

Amélioration des propriétés mécaniques des sols argileux par biocalcification MICP

O. Maston¹, T. Ouahbi¹, A. Dadda¹, A. El Hajjar¹, S. Taibi¹, L. Sapin², A. Esnault Filet², H. Souli³, J-M. Fleureau⁴

¹Normandie University, UNIHAVRE, Laboratory of Waves and Complex Media, UMR 6294 CNRS, Le Havre, France (tariq.ouahbi@univ-lehavre.fr)

²Soletanche Bachy, Rueil-Malmaison, France

³Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes - CNRS UMR 5513, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne, Saint Étienne, France

⁴Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux, UMR 8579 CNRS, Gif-sur-Yvette, France

RESUME : Les enjeux climatique et environnementaux occupent une place de plus en plus importante dans notre société. C'est pour cela qu'on s'intéresse de plus en plus à la terre crue dans le domaine de construction afin de limiter les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie fossile, mais également afin de revaloriser ce matériau présent en grande quantité et posant un problème de stockage. Le frein majeur à l'utilisation de la terre crue réside en sa fissuration lors de sa dessiccation du au retrait de sa fraction argileuse. Afin de viabiliser ce type de construction, les chercheurs se sont intéressés à différents type d'amendement permettant de réduire suffisamment la fissuration. L'ajout de renfort avec des fibres végétales à permis de réduire la fissuration mais reste insuffisant. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la biocalcification faisant l'objet de nombreuses études sur d'autre matériaux de construction depuis ces dernières années. Notre travail aura pour objectif de maîtriser la biocalcification dans les argiles pour ensuite l'élargir à la terre crue afin d'intervenir préventivement et curativement.

Mots-clefs : Argile, Biocalcification, MICP, Cohésion non-drainée.

I. INTRODUCTION

Le changement climatique est l'un des défis majeur et complexes du 21ème siècle. Une des principales causes responsables du réchauffement climatique est l'émission de gaz à effet de serre, notamment le CO₂. L'aspect écologique d'un bâtiment ou d'un ouvrage prend une place de plus en plus importante dans l'industrie de la construction. Le secteur du BTP (Bâtiment et Travaux Publics) affecte fortement l'environnement à travers la consommation de ressources naturelles et d'énergie, l'émission des polluants et l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Le recours à des matériaux de construction bio-sourcés à faibles impacts environnementaux devient de plus en plus nécessaire pour inverser les tendances actuelles.

Les éco-géo-matériaux à base de terre, renforcés éventuellement à l'aide de fibres végétales, constituent l'une des pistes prometteuses concernant l'avenir des matériaux de construction.

La biocalcification par MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) a émergé ces dernières années comme une solution potentielle et écologique pour l'amélioration des sols. Récemment, Xiao et al. 2020 ont utilisé la MICP pour renforcer des échantillons d'argile, en mélangeant le sol avec la bactérie et la solution calcifiante. Le but de cette étude consistait à voir l'efficacité mécanique de ce processus sur les argiles par la réalisation des essais de compression simple. Par contre, Liu et al. 2020 ont utilisé la MICP par pulvérisation en surface pour renforcer des échantillons d'argile contre la fissuration par dessiccation. Cette étude a montré l'efficacité de cette technique pour atténuer ce phénomène par la diminution du nombre, de l'épaisseur et de la longueur des fissures.

Dans la présente étude on envisage d'utiliser le MICP pour renforcer des échantillons d'argiles contre la fissuration. Ce travail débute expérimentalement en utilisant la méthode de soil-mixing pour la préparation d'échantillons d'argile traités avec et sans MICP, afin d'évaluer l'accroissement de la résistance de notre argile grâce au traitement MICP.

II. MATERIAUX ET METHODES

Le matériau étudié est une kaolinite naturelle de couleur jaune nommée P300. Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques de la kaolinite P300 (El Hajjar et al. 2020, 2021)

Matériaux	Limite de liquidité W _L (%)	Indice de plasticité I _p (%)	Densité solide G _s (g/cm ³)
Kaolinite P300	40	20	2,65

Les échantillons d'argiles avec et sans traitement MICP sont préparés par malaxage à l'aide de la technique de soil-mixing, afin d'obtenir des échantillons homogènes.



Le mécanisme fondamental de la MICP peut être caractérisé par les équations (1 et 2), correspondant respectivement à deux étapes : (1) l'urée est hydrolysée par voie uréase microbienne pour former des ions ammonium et carbonate ; (2) les ions de calcium libres vont réagir avec le précédent produit des ions carbonates pour générer des précipitations de calcite (Figure 1).

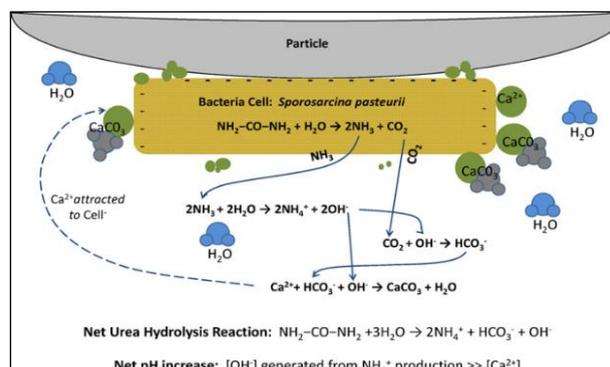


FIGURE 1. Processus de précipitation du CaCO₃ dans les particules de sable (Dejong et al. 2010)

Pour obtenir nos échantillons, nous préparons en amont une solution aqueuse dans laquelle on mélange nos bactéries (*Les Sporosarcina Pasteurii*) et une solution nutritive composée d'une base carbone (l'urée) et d'une base calcium (le CaCl_2 ou l'acétate). Après dissolution dans l'eau, nous mélangeons nos solutions bactérienne et nutritive pour obtenir une solution calcifiante. Cette solution calcifiante sera versée sur un volume de poudre d'argile P300 qui sera malaxé afin d'obtenir une pâte d'argile avec une teneur en eau homogène (Figure 2).

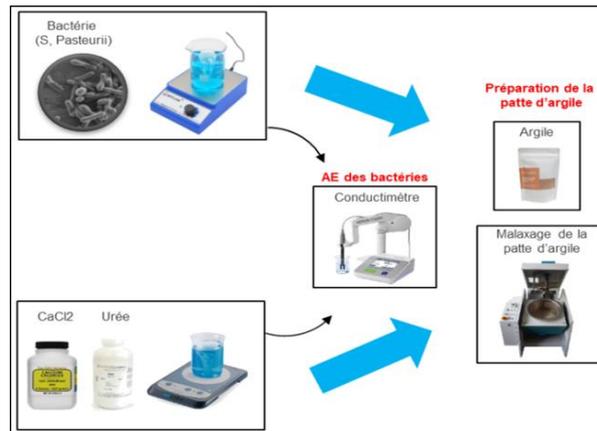


FIGURE 2. Préparation de la pâte d'argile traité par la MICP

Après la préparation de la pâte d'argile, on la coule par couche dans des pots de 5 cm de diamètre et de 7 cm d'hauteur afin de réaliser des essais au scissomètre, dans le but d'évaluer la cohésion non-drainée de notre matériau.

Le calcul de la cohésion non-drainée d'une argile est basé sur la mesure d'un angle de rotation qui permet de remonter à un couple de force M . La mesure de la cohésion non drainée C_U est donnée par l'équation 3 suivante :

$$C_U = \frac{6M}{\pi D^2 (3H+D)} \quad (3)$$

Où D et H sont respectivement le diamètre et la hauteur de la pale.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Les premiers résultats obtenus sur l'effet du traitement en amont à l'aide de la MICP d'une kaolinite sont très encourageants, notamment en termes d'augmentation de la cohésion non drainée (C_U) obtenue à partir des mesures de résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle à l'aide d'un Scissomètre de laboratoire (Figure 3). Lorsque que l'on observe le profil des deux courbes, on constate que C_U augmente lorsque la teneur en eau diminue. En effet, plus la teneur en eau en milieu saturé sera élevée plus la distance entre les particules d'argile sera importante. La cohésion résultante sera donc plus faible étant donné qu'elle caractérise l'attraction entre les particules d'argile autrement dit la « colle » entre ces particules. De plus, on remarque le bon fonctionnement du traitement MICP (à 72h) qui grâce à la création de ponts de calcite entre les particules et les agrégats d'argile, rigidifie la structure. Cet accroissement de résistance est présenté par la différence de C_u entre les deux courbes pour une même teneur en eau.

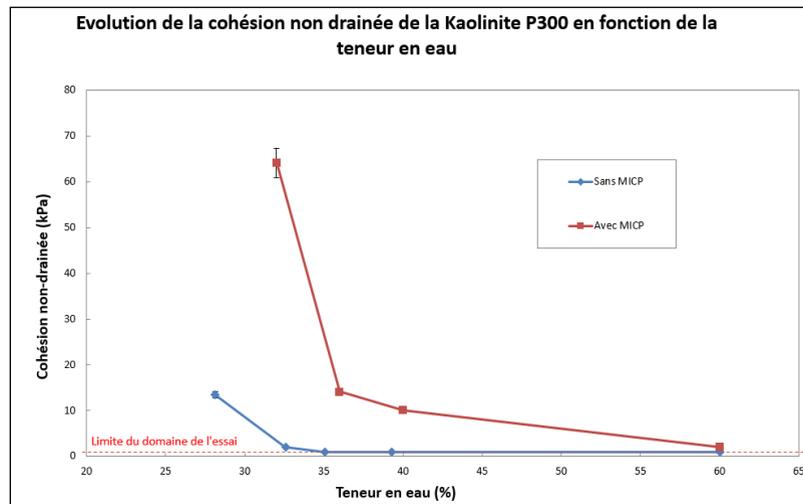


FIGURE 3. Comparaison de la cohésion non drainée de la Kaolinite P300 avec et sans MICP

IV. CONCLUSION

L'utilisation de la biocalcification dans les argiles et plus généralement la terre crue semble prometteuse. L'accroissement de la résistance obtenue dans nos essais en sont témoin. De nombreuses expérimentations seront à mener pour constater la potentielle limitation de la fissuration des argiles lors de leur dessiccation grâce à la biocalcification. Grâce à la maîtrise de ce phénomène, nous pourrons avec les bons protocoles de préparation limiter la fissuration notamment avec le potentiel couplage de la MICP avec l'ajout de renforts en fibres végétales. Cet assemblage d'amendement plus « vert » dans le domaine de la construction permettra de faire un pas vers la réponse aux enjeux climatique et environnementaux d'aujourd'hui.

REFERENCES

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2) :197–210.

El Hajjar, A., Ouahbi, T., Taibi, S., Eid, J., Hattab, M., Fleureau, J.M. Assessing crack initiation and propagation in flax fiber reinforced clay subjected to desiccation. *Constr. Build. Mater.* 2021, 278, 122392.

El Hajjar, A, Ouahbi, T, Eid, J, Hattab, M, Taibi, S. Shrinkage cracking of unsaturated fine soils: New experimental device and measurement techniques. *Strain*. 2020; 56:e12352.

Liu, B., Zhu, C., Tang, C. S., Xie, Y. H., Yin, L. Y., Cheng, Q., & Shi, B. (2020). Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). *Engineering geology*, 264, 105389.

Xiao, J. Z., Wei, Y. Q., Cai, H., Wang, Z. W., Yang, T., Wang, Q. H., & Wu, S. F. (2020). Microbial-Induced Carbonate Precipitation for Strengthening Soft Clay. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.