

Effet de la biocalcification par MICP sur les propriétés mécaniques des argiles

Olivier Maston¹

¹ Université Le Havre Normandie, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294 CNRS, Le Havre, France.

RESUME : L'intérêt croissant pour l'utilisation de la terre crue en tant que matériau de construction durable a incité les chercheurs à explorer des moyens d'améliorer sa viabilité dans l'industrie de la construction. Une approche innovante qui a captivé l'attention au cours de la dernière décennie est l'utilisation de la précipitation de calcite induite par les microbes (MICP) pour renforcer et stabiliser principalement les sols inertes. Cette étude vise à appliquer préventivement le MICP par la méthode du "Soil-Mixing" dans une argile chargée, nommée "Kaolin P300". Tous les échantillons ont été soumis à une batterie de tests destructifs pour évaluer l'amélioration des propriétés mécaniques de l'argile, passant d'une préparation de l'état liquide à l'état solide. Les résultats ont démontré une amélioration de la résistance du Kaolin P300 grâce au traitement MICP. La corrélation des résultats a souligné une cohésion renforcée par le MICP, particulièrement à la limite plastique des échantillons. La précipitation de CaCO_3 a été confirmée et quantifiée à l'aide d'un calcimètre. De plus, l'analyse microscopique par spectroscopie infrarouge à réflectance totale atténuée et la diffraction des rayons X ont confirmé la présence de CaCO_3 sous forme de calcite, tout en mettant en évidence la présence résiduelle d'urée et d'acétate de calcium.

Mots-clefs : Sols argileux, MICP, Propriétés mécaniques, Microscopie.

I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire génère une quantité significative de CO_2 . Afin de répondre aux défis environnementaux de notre époque, il est impératif de s'orienter vers l'utilisation de matériaux écologiques renouvelables, moins énergivores et moins polluants. Les éco-matériaux à base de terre crue présentent des perspectives encourageantes. Cependant, pour être mondialement reconnus en tant que matériaux de construction écologiques, ils doivent satisfaire à des critères rigoureux.

L'une des principales raisons pour lesquelles la terre crue ne peut être largement adoptée dans les régions à climats tempérés réside dans le phénomène de fissuration par dessiccation de sa fraction argileuse. Les fluctuations de la teneur en eau de l'argile entraînent un cycle de retrait/gonflement, générant des contraintes internes pendant le séchage et provoquant l'apparition de fissures. Plusieurs projets de recherche sont menés pour comprendre et surmonter ces mécanismes de fissuration. L'amendement de l'argile avec des renforts en fibres végétales apparaît comme une solution potentielle (El Hajjar et al., 2021). Cependant, la réduction de la fissuration reste insuffisante.

La précipitation de carbonate de calcium par l'activité microbienne (MICP) a émergé, ces dernières années, comme une solution potentielle et écologique pour l'amélioration des sols. Elle repose sur l'activité enzymatique bactérienne capable d'hydrolyser l'urée pour produire des ions carbonate, qui, en présence d'ions calcium, précipitent du CaCO_3 . La recherche s'intéresse de plus en plus à l'utilisation du MICP pour améliorer les propriétés mécaniques des sols en cimentant la matrice solide tout en préservant la perméabilité (Whiffin et al., 2007).

Actuellement, les travaux sur le MICP se concentrent principalement sur les sables inertes. Cette étude cherche à élargir ces connaissances en appliquant le MICP dans des sols argileux chargés et non inertes. Elle adopte une approche novatrice en utilisant de l'acétate de calcium, moins fréquemment utilisé dans les argiles et émettant moins d'ammoniac que le chlorure de calcium, plus couramment utilisé (Xiang et al., 2022). Pour ce faire, des échantillons d'argile sont confectionnés avec un traitement MICP pour les renforcer mécaniquement. Le processus débute expérimentalement par la préparation des échantillons par soil-mixing, qui consiste à mélanger une poudre d'argile avec une solution bactérienne et cimentaire contenant respectivement des bactéries *Sporosarcina Pasteurii*, et une solution équimolaire d'acétate de calcium et d'urée. Les échantillons sont soumis à des essais mécaniques trois jours après leur préparation pour évaluer l'augmentation de la résistance de l'argile grâce au traitement MICP. Les analyses par diffraction des rayons X (DRX) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) confirment la présence de cristaux de CaCO_3 , quantifiée par le calcimètre de Dietrich-Frühling. L'utilisation de l'acétate de calcium pour le MICP dans les argiles semble prometteuse.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Préparation des échantillons

Tous les échantillons étudiés se composent d'une matrice solide à base d'une argile peu plastique nommée « Kaolin P300 », utilisée dans les travaux de (El Hajjar et al., 2022). Dans la suite de cette étude, les échantillons composés par cette argile seront appelés « K100 ». Selon l'ASTM D4318-17e1, les limites d'Atterberg ainsi que quelques autres caractéristiques de K100 sont résumées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques du Kaolin P300

Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	Indice de plasticité I_P (%)	Granulométrie (% < 2 μ m)	Densité solide G_s (g/cm ³)
40	20	20	60	2,65

La préparation des échantillons avec le traitement MICP passe par quatre étapes successives et s'articule autour du procédé de soil-mixing. En premier lieu, de l'urée et de l'acétate de calcium sont dissous à équimolarité dans de l'eau pour obtenir une solution de "cimentation". Simultanément, des bactéries uréolytiques, les *Sporosarcina Pasteurii*, sont mélangées avec de l'eau pour créer une solution "bactérienne". Dans un second temps, le mélange de ces deux solutions conduit à une solution "MICP". Après ces deux étapes, la solution MICP est versée sur une poudre de Kaolin P300 préalablement séchée dans un four à 105°C. Cette préparation est activement malaxée jusqu'à obtenir une pâte homogène. Les mélanges issus d'une faible teneur en

eau sont tamisés après le malaxage jusqu'à une ouverture de maille de 1 mm. Enfin, les préparations à l'état liquide et plastique sont placées dans des pots cylindriques hermétiques de 50 mm de diamètre et 70 mm de hauteur, pour être soumises à un cisaillement à l'aide d'un scissomètre de laboratoire. Les préparations à l'état solide sont mises dans un moule cylindrique à double piston et compactées avec une presse statique. Les échantillons résultants, de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, sont soumis à un essai de compression uniaxiale. La figure 1 illustre la préparation de ces spécimens.

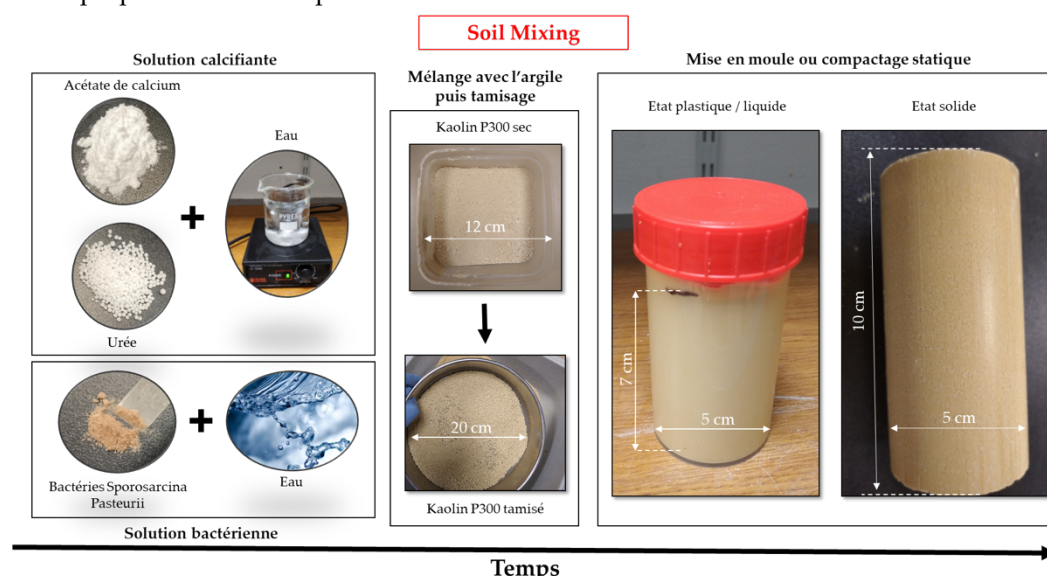


FIGURE 1. Préparation des échantillons de K100 par méthode de soil-mixing

Tous les échantillons sont préparés dans une salle thermostatique maintenue à une température constante de 20°C, avec une variation ne dépassant pas $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Ils sont confectionnés à une densité sèche de 15 kN/m³ ou à la saturation ($S_r = 100\%$) pour les plus liquides, puis scellés pour empêcher leur séchage pendant 72 heures, garantissant ainsi la précipitation du carbonate de calcium et l'homogénéité de la teneur en eau. Dans le but d'évaluer l'accroissement de résistance conféré par la biocalcification, les échantillons traités par MICP sont comparés à des échantillons de référence non traités, dans les mêmes conditions initiales. Les éprouvettes sont systématiquement préparées par lots de trois pour vérifier leur reproductibilité.

B. Essais

Les essais au scissomètre de laboratoire permettent, conformément à la norme ASTM D4648/D4648M-16, de mesurer la cohésion non drainée des argiles molles, suivant l'équation 1 :

$$C_u = \frac{6 M}{\pi D^2 (3H + D)} \quad (1)$$

C_u est la cohésion non drainée (kPa), M le couple de forces (kN.m). D et H correspondent respectivement au diamètre et à la hauteur de la pale (m).

Les essais de compression uniaxiale sont, conformément à la norme ASTM D2166/D2166M-16, réalisés sur des éprouvettes solides à faible teneur en eau. La compression est réalisée à une vitesse de déformation constante de 0,1 mm/min, suffisamment rapide pour maintenir des conditions non drainées.

La combinaison de ces deux essais mécaniques permet d'explorer une large gamme de teneurs en eau. L'essai UCS a été utilisé pour un état solide avec des indices de liquidité (I_L) inférieurs à 0, tandis que l'essai au scissomètre de laboratoire a été utilisé pour des états liquide et plastique ($0,4 < I_L < 2,0$). L'indice de liquidité I_L est défini par l'équation 2 :

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} \quad (2)$$

I_L représente l'indice de liquidité, I_P l'indice de plasticité, W_P la limite de plasticité, et W la teneur en eau de l'échantillon.

La mesure de la teneur en carbonate de calcium est effectuée sur les sols après les essais mécaniques destructifs. Trois échantillons ont été prélevés en haut, au milieu et en bas de chaque échantillon pour définir la teneur globale. La teneur en CaCO_3 précipitée (CCC_P) des échantillons est mesurée à l'aide du test du calcimètre de Dietrich-Frühling selon la norme NF P94-048. Trois mesures répétées sont effectuées pour chaque échantillon.

Pour l'analyse microscopique, la sélection des échantillons a été réalisée de la même manière que ceux destinés au calcimètre. Les techniques analytiques par DRX et FTIR ont été utilisées pour caractériser la minéralogie des échantillons traités et non traités. La structure cristalline a été déterminée par DRX sur des échantillons de poudre sèche à l'aide du diffractomètre Xpert-Pro Powder, avec des données enregistrées par pas de $0,013^\circ$ entre 5° et 80° d'un angle de 2θ . L'analyse FTIR a été réalisée sur des pâtes humides à l'aide d'un spectrophotomètre FTIR Spirit de Shimadzu équipé d'un accessoire de mesure à réflexion totale atténuée (ATR). Cette configuration a permis d'identifier clairement les composants chimiques de chaque échantillon dans une gamme de longueurs d'onde allant de $4\,000$ à 400 cm^{-1} .

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Comme détaillé dans la section précédente, la résistance mécanique de K100 est étudiée par essai de cisaillement au scissomètre de laboratoire et essai de compression uniaxiale, puis corrélée. Après le cisaillement, le calcimètre est utilisé pour mesurer la teneur en carbonate de calcium du matériau. Enfin, les propriétés cristallines et chimiques du matériau sont analysées à l'aide des méthodes ATR-FTIR et DRX.

A. Scissomètre de laboratoire

La figure 2 présente la cohésion non drainée en fonction de l'indice de liquidité des échantillons K100 non traités et traités par MICP.

La diminution de l'indice de liquidité dans un état saturé implique une augmentation de la densité sèche. Par conséquent, l'espacement entre les particules de sol est réduit, ce qui explique l'accroissement de la cohésion non drainée. De plus, les échantillons de K100 avec MICP présentent un gain de C_u conséquent vis-à-vis de leurs homologues sans MICP. La différence de C_u entre les échantillons d'argile traités et non traités augmente à mesure que l'indice de liquidité diminue.

Le C_u s'est accru de manière significative dans la plage plastique du matériau traité (entre 0,4 et 1 I_L). La valeur la plus élevée de C_u est de 66 kPa et a été obtenue pour les échantillons K100 avec MICP pour un indice de liquidité de 0,4. Cette valeur C_u représente 650% de la cohésion non drainée de K100 sans MICP.

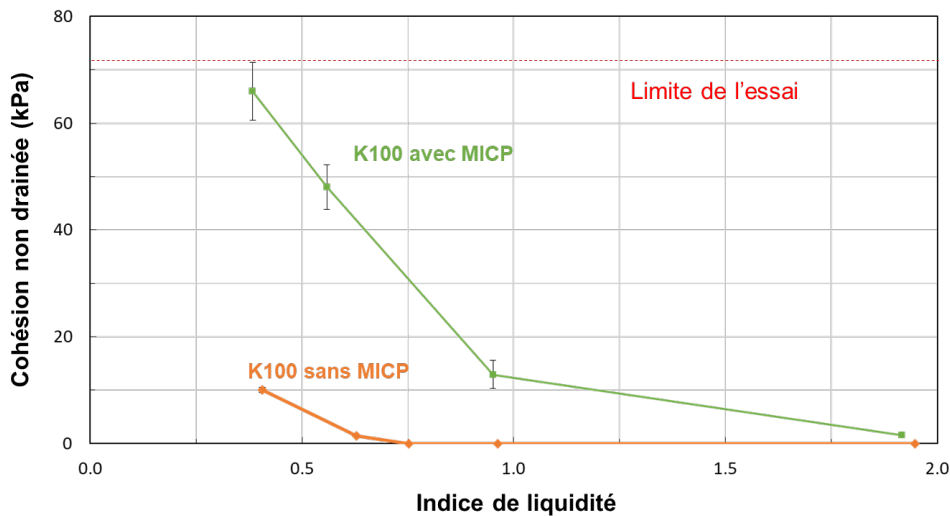


FIGURE 2. Evolution de la cohésion non drainée de K100 en fonction de son indice de liquidité

Suite à la mise en évidence du gain de résistance prodigué par le traitement MICP dans des pâtes de K100, la prochaine section s'intéresse au traitement MICP d'échantillon K100 à l'état solide et plus sec.

B. Compression uniaxiale

Pour des indices de liquidité plus faible, l'essai de compression uniaxiale est envisagé. Il permet de déterminer la valeur de la résistance ultime à la compression (valeur UCS) et le module de déformation E_{50} . La valeur UCS représente le sommet de la courbe contrainte - déformation, qui est deux fois supérieure à la valeur de C_u en conditions UU (non Consolidées et non Drainées). Le module E_{50} présente la rigidité des sols argileux dans la plage de déformation plastique et est défini comme le rapport de la moitié de la valeur UCS sur la déformation correspondante. Sur la base de la contrainte maximale et du module de déformation de chaque spécimen, la figure 3 présente les résultats obtenus.

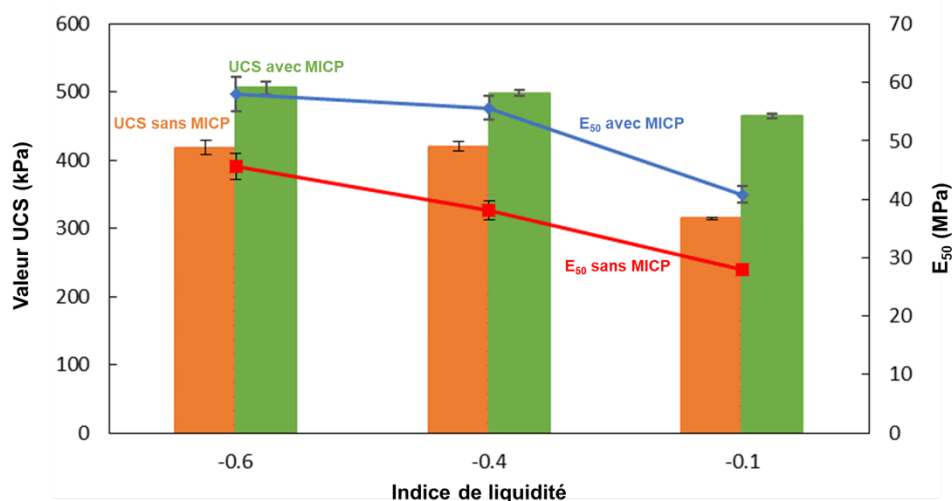


FIGURE 3. Valeurs UCS et E_{50} des échantillons traités et non traités par MICP

Elle révèle une augmentation de la résistance des échantillons K100 lorsque l'indice de liquidité diminue et/ou lorsqu'ils sont traités par MICP. Durant la diminution de l'indice de liquidité dans un milieu à densité sèche fixe, le volume des vides reste constant, mais la succion augmente. Par conséquent, la résistance mécanique s'accroît. De même, le traitement par MICP augmente la valeur UCS. Les échantillons avec et sans traitement MICP présentent notamment la plus grande différence de valeur UCS de l'ordre de 150 kPa. Contrairement aux résultats des essais au scissomètre de laboratoire, la résistance la plus élevée fournie par le MICP lors des essais de compression uniaxiale correspond à l'échantillon avec l'indice de liquidité le plus élevé. Comme pour le comportement de la valeur UCS, le module E_{50} augmente à mesure que l'indice de liquidité diminue et/ou lorsqu'il est traité par MICP. Cela indique d'une part que la désaturation du matériau le rigidifie. D'autre part, l'amélioration de la valeur E_{50} par le traitement MICP laisse à supposer que le carbonate de calcium joue le rôle de liant entre les particules de sol. Plus précisément, la valeur E_{50} pour K100 avec MICP à -0,1 IL atteint 40,8 MPa, soit près de 46% de plus que la valeur E_{50} de K100 sans MICP à -0,1 IL.

C. Corrélation des résultats mécaniques

Afin d'établir une corrélation entre les résultats de cisaillement au scissomètre de laboratoire et la compression uniaxiale, et de mettre en évidence la cohésion apportée par le traitement MICP, un nouveau paramètre appelé " C_{MICP} " a été déterminé. Le C_{MICP} est défini par l'équation 3 et se présente comme la différence entre la cohésion totale d'un échantillon traité ($C_{avec\ MICP}$) et la cohésion totale d'un échantillon non traité ($C_{sans\ MICP}$). Il quantifie spécifiquement l'amélioration de la cohésion due au MICP.

$$C_{MICP} = C_{avec\ MICP} - C_{sans\ MICP} \quad (3)$$

En se basant sur les cercles de Mohr et le critère de rupture de Mohr-Coulomb dans des conditions non confinées et non drainées (UU), la cohésion totale (C_{totale}) de chaque échantillon soumis à des essais en compression uniaxiale a été définie. Elle correspond à la contrainte de cisaillement maximale (τ) car l'angle de frottement est considéré comme nul en raison des conditions non drainées. Or, τ correspond à la moitié de la valeur UCS, d'où :

$$C_{totale} = \frac{UCS}{2} \quad (4)$$

La figure 4 expose les valeurs C_{MICP} de tous les échantillons K100 traités et issus des deux essais mécaniques.

Ce graphique met en évidence trois comportements distincts en fonction de l'état de l'échantillon. Lorsque l'indice de liquidité diminue, l'état liquide présente d'abord une légère augmentation du C_{MICP} , suivie d'une augmentation significative dans son état plastique et enfin, d'une diminution dans son état solide. Ce comportement peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Dans l'état liquide, la distance interparticulaire est plus grande que dans les autres états. Par conséquent, l'effet de la cimentation du carbonate de calcium dans le sol est moins efficace. Il en résulte une légère augmentation du C_{MICP} .
- Dans l'état plastique, la diminution du degré de saturation a lieu dans une plage d'indice de liquidité de 0,6 à -0,1. Cette réduction favorise la formation de ménisques d'eau entre les particules d'argile, facilitant la cimentation du sol par précipitation de la calcite et améliorant considérablement le C_{MICP} .
- Comme la teneur en eau de préparation est moins élevée à l'état solide, le taux de $CaCO_3$ devient moins important, ce qui entraîne une diminution du C_{MICP} .

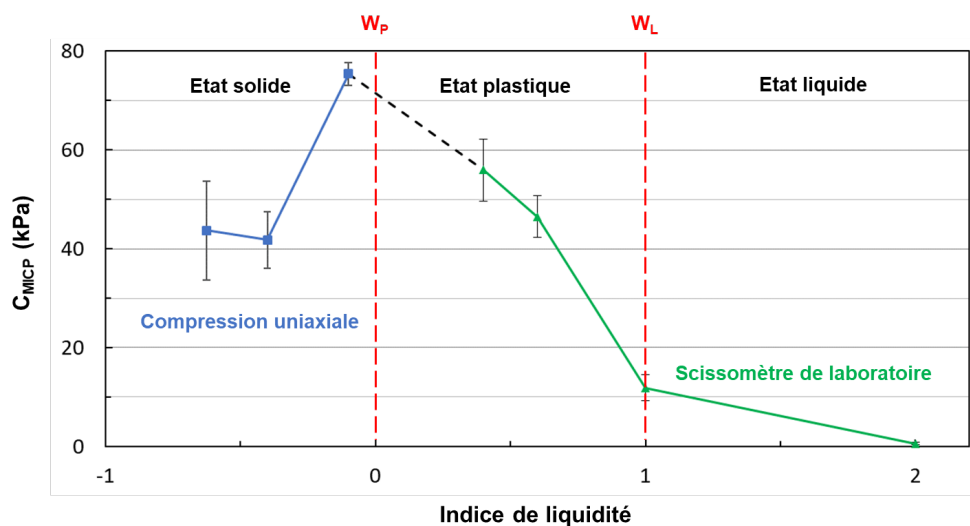


FIGURE 4. Evolution de C_{MICP} de K100 avec MICP en fonction de son indice de liquidité

La section suivante expose les taux de carbonate de calcium précipité (CCC_P) de chaque échantillon.

D. Taux de carbonate de calcium précipité

La figure 5 présente l'évolution du taux de carbonate de calcium précipité dans K100 avec MICP en fonction de son indice de liquidité.

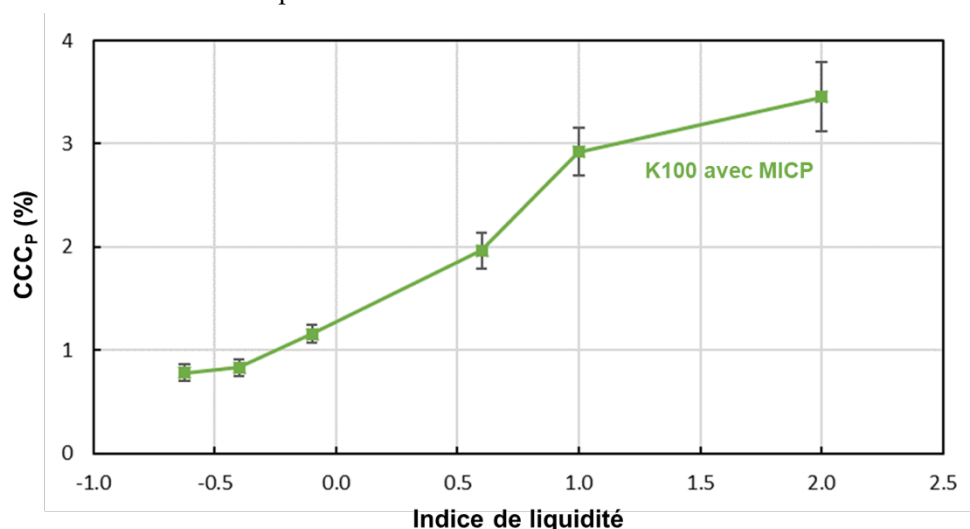


FIGURE 5. Evolution du CCC_P de K100 traité par MICP en fonction de son indice de liquidité

Elle montre la diminution du CCC_P durant la réduction de l'indice de liquidité. En effet, pour une même concentration nutritive et un même taux de réaction, la quantité de $CaCO_3$ précipitée sera plus importante pour un échantillon préparé avec plus d'eau. De plus, cette réduction du CCC_P pourrait expliquer la baisse de C_{MICP} observée dans l'état solide de K100. Fondamentalement, C_{MICP} dépend du CCC_P et à la disposition des cristaux de calcite dans la matrice solide, ce qui affecte finalement la cimentation et/ou la densification du sol.

E. Analyse microscopique

L'analyse des composants microscopiques par DRX et FTIR est essentielle pour mettre en évidence la précipitation du carbonate de calcium et les réactions chimiques au sein des échantillons d'argile traités par MICP. La figure 6. a) superpose les spectres ATR-FTIR de K100 avec et sans MICP à 1 lL. Les deux pâtes humides de K100 présentent de nombreux pics propres aux liaisons chimiques retrouvées dans la kaolinite, notamment dans la zone de l'empreinte digitale entre 1500 et 400 cm^{-1} (Saikia et al., 2003). L'état humide de K100 implique l'existence de liaisons caractéristiques de l'eau avec des vibrations d'étirement O-H (bande d'absorption large et intense entre 3200 et 3400 cm^{-1}) et un cisaillement de flexion H-O-H caractérisé par un pic intense à une fréquence proche de 1639 cm^{-1} (Mojet et al., 2010). La présence de CO_2 est représentée par des pics autour de 2348 cm^{-1} (Boffa et al., 2008). Elle pourrait être dû aux conditions de l'analyse ATR-FTIR qui s'effectue à l'air libre. Cette analyse de la pâte humide de K100 avec MICP confirme la présence de CaCO_3 (pics de longueur d'onde à 874 cm^{-1} et large bande à environ 1416 cm^{-1} correspondant aux vibrations en flexion hors du plan et en étirement asymétrique, respectivement), malgré la présence résiduelle d'acétate de calcium (vibrations symétriques de flexion CH_3 à 1347 cm^{-1} et vibrations asymétriques d'étirement C-O à 1553 cm^{-1}). Ces résultats sont en accord avec les observations de (Tiwari et al., 2021) réalisés sur des sols traités au MICP. Le processus de précipitation n'est pas totalement efficace, ce qui peut expliquer la présence des résidus de la solution nutritive (Šovljanski et al., 2021).

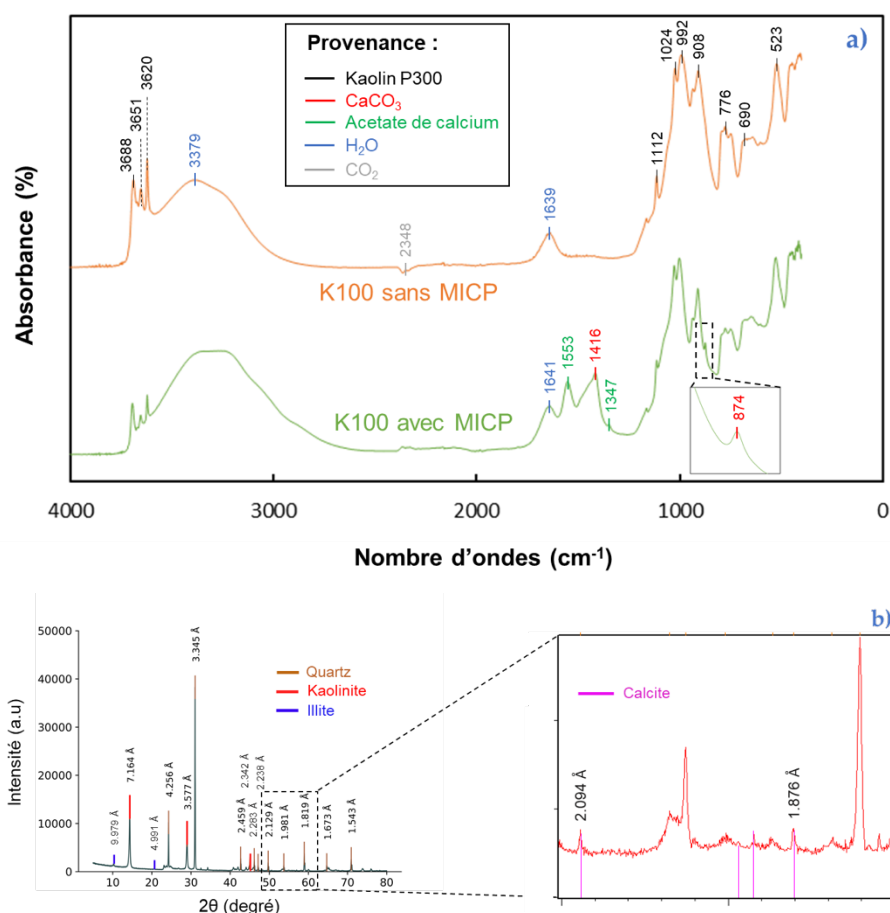


FIGURE 6. a) Spectre ATR-FTIR de pâtes humides de K100 ; **b)** Diffractogramme d'une poudre sèche de K100 avec MICP

Grâce à l'analyse par DRX, la figure 6. b) dresse le diffractogramme de K100 avec MICP, préalablement séché au four à 105°C. Elle met en évidence la composition de K100, constituée de kaolinite, de quartz et d'illite. La vue rapprochée sur la droite de cette figure permet d'attester de l'existence de carbonate de calcium et expose des distances interréticulaires propres à l'arrangement structural de la calcite. Tout comme la spectroscopie ATR-FTIR, l'analyse microscopique par DRX a confirmé la précipitation de CaCO_3 dans les échantillons traités. Elle a également spécifié sa forme cristalline observée, correspondant à la calcite.

L'incorporation d'acétate de calcium dans le procédé MICP a permis d'améliorer les propriétés mécaniques d'argiles telles que K100, contrairement aux résultats rapportés par (Gorospe et al., 2013) dans le contexte des milieux sableux. Enfin, l'analyse des composants microscopiques par ATR-FTIR s'avère être un moyen simple et rapide de vérifier la présence de CaCO_3 dans les échantillons d'argile secs ou humides. Elle constitue également une méthode d'identification efficace des liaisons chimiques dans les argiles sans les sécher au four, préservant ainsi toute modification de leur composante microscopique liée au séchage. Ces échantillons peuvent ensuite être analysés par des méthodes complémentaires plus longues et plus coûteuses, telles que la DRX ou le MEB. De plus, sa capacité à distinguer les liaisons atomiques lui permet de détecter les phases en présence, qu'elles soient cristallines ou amorphes. En complément, la DRX peut être utilisée pour identifier spécifiquement la structure cristalline. Une analyse plus poussée des diffractogrammes permettrait de déterminer la taille des cristaux de CaCO_3 .

IV. CONCLUSION

Ces travaux ont permis de souligner l'effectivité du MICP dans des argiles traitées par soil-mixing, en ayant recours à l'utilisation d'une source de calcium moins émettrice en ammoniac et beaucoup moins utilisée que le chlorure de calcium. Le couplage d'essais mécaniques destructifs, le scissomètre de laboratoire et la compression uniaxiale, ont permis d'étudier l'effet du traitement MICP sur le Kaolin P300 dans une large gamme de teneur en eau. Un nouveau paramètre mécanique appelé " C_{MICP} " a été défini pour quantifier explicitement la cohésion découlant uniquement de la biocalcification. Le C_{MICP} démontre le fonctionnement efficace de la biocalcification et son impact positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques de l'argile, avec une résistance optimale observée à la limite de plasticité du kaolin P300.

Au-delà de l'amélioration de la résistance observée dans ces échantillons d'argile par le traitement MICP, la biocalcification a été confirmée grâce au calcimètre de Dietrich-Fruhling. Elle a montré l'augmentation du taux de carbonate de calcium précipité pour une teneur en eau plus importante. L'analyse microscopique par DRX révèle la précipitation de cristaux de calcite dans K100 traité avec MICP. La spectroscopie ATR-FTIR a été utilisée pour caractériser les groupes fonctionnels moléculaires dans les échantillons de K100 humides, tels que le CaCO_3 et l'acétate de calcium. Elle ne spécifie pas la présence d'autres réactions chimiques observables.

REMERCIEMENTS : La Région Normandie a financé ce travail dans le cadre du projet BIOFIS. Le financement de ces recherches est assuré par l'université du Havre Normandie. L'industrie Soletanche Bachy fournit les bactéries nécessaires à ces études.

REFERENCES

- Boffa, V., Ten Elshof, A., Petukhov, A., Blank, D., 2008. Microporous Niobia–Silica Membrane with Very Low CO₂ Permeability. *ChemSusChem* 1, 437–43.
<https://doi.org/10.1002/cssc.200700165>
- El Hajjar, A., Ouahbi, T., Hamrouni, I., Taibi, S., Eid, J., Hattab, M., 2022. Experimental characterization of desiccation cracking mechanisms in clayey soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2136249>
- El Hajjar, A., Ouahbi, T., Taibi, S., Eid, J., Hattab, M., Fleureau, Jean-Marie, 2021. Assessing crack initiation and propagation in flax fiber reinforced clay subjected to desiccation. *Construction and Building Materials* 278.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122392>
- Gorospe, C.M., Han, S.-H., Kim, S.-G., Park, J.-Y., Kang, C.-H., Jeong, J.-H., So, J.-S., 2013. Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 18, 903–908.
<https://doi.org/10.1007/s12257-013-0030-0>
- Mojet, B., Ebbesen, S., Lefferts, L., 2010. ChemInform Abstract: Light at the Interface: The Potential of Attenuated Total Reflection Infrared Spectroscopy for Understanding Heterogeneous Catalysis in Water. *Chemical Society reviews* 39, 4643–55.
<https://doi.org/10.1039/c0cs00014k>
- Saikia, Dr.N., Bharali, D., Sengupta, P., Bordoloi, D., Goswamee, R., Saikia, P., Borthakur, P., 2003. Characterization, beneficiation and utilization of a kaolinite clay from Assam, India. *Applied Clay Science - APPL CLAY SCI* 24, 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(03\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00151-0)
- Šovljanski, O., Pezo, L., Stanojev, J., Bajac, B., Kovač, S., Tóth, E., Ristić, I., Tomić, A., Ranitović, A., Cvetković, D., Markov, S., 2021. Comprehensive Profiling of Microbiologically Induced CaCO₃ Precipitation by Ureolytic *Bacillus* Isolates from Alkaline Soils. *Microorganisms* 9, 1691. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081691>
- Tiwari, N., Satyam, N., Sharma, M., 2021. Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method. *Sci Rep* 11, 10324.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-89687-2>
- Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., Harkes, M.P., 2007. Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique. *Geomicrobiology Journal* 24, 417–423.
<https://doi.org/10.1080/01490450701436505>
- Xiang, J., Qiu, J., Wang, Y., Gu, X., 2022. Calcium acetate as calcium source used to biocement for improving performance and reducing ammonia emission. *Journal of Cleaner Production* 348, 131286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131286>