

Etude de l'effet de la pression de cure sur la microstructure d'un limon stabilisé à la chaux et au liant hydraulique par tomographie *in situ* à rayons X.

Lucile Pigeot^{1,2}

¹Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000, Nantes, France

²GeoCoD, Cerema Méditerranée, 13290, Aix-en-Provence, France

RESUME Le présent article propose un développement expérimental qui vise à estimer l'effet d'une pression de confinement sur un sol limoneux stabilisé avec un traitement mixte à la chaux et au liant hydraulique RocAS pendant sa cure. En effet, dans les projets d'infrastructures linéaires actuels, les sols stabilisés peuvent être soumis à des contraintes importantes au sein d'ouvrages géotechniques. Afin de montrer que ces conditions de cure favorisent l'hydratation des phases cimentaires, une étude comparative est menée sur des éprouvettes ayant eu une cure de 28 jours avec ou sans pression de confinement. Des analyses de diffractions des rayons X, couramment employées pour suivre l'apparition des phases hydratées au sein des matériaux cimentaires, ne permettent pas de conclure quant à l'évolution de l'hydratation dans le sol stabilisé. En outre, des essais de porosimétrie par intrusion de mercure montrent qu'une cure sous contrainte entraîne une apparition plus précoce de la nano-porosité associée aux hydrates. Une utilisation originale d'imageries par tomographie *in situ* à rayons X offre la possibilité d'appréhender l'évolution de la composition et de la microstructure au sein du matériau en cure confinée. Elle est illustrée par une diminution du volume des particules anhydres et par un affinement de la porosité.

Mots-clefs sol stabilisé, tomographie (*in situ*) à rayons X, porosimétrie par intrusion de mercure, cure sous contrainte, micromorphologie

I. INTRODUCTION

L'optimisation du volume des déblais et remblais est un défi majeur de tous les projets linéaires actuels (lignes ferroviaires, routes et canaux). C'est dans cette optique que des solutions innovantes se développent afin de pouvoir réutiliser le sol en place même s'il ne possède pas les performances mécaniques requises. Il est souvent nécessaire d'associer une amélioration chimique (par traitement) et mécanique (par compactage). Généralement les sols sont préalablement stabilisés à la chaux pour améliorer leur maniabilité sur le chantier, ensuite l'ajout de liant hydraulique et le compactage leur confère davantage de rigidité, de cohésion et de résistance. Dans un objectif de réduction de l'impact carbone des projets linéaires, les liants utilisés sont désormais composés de ciment Portland associé à des additions minérales (laitier de haut fourneau, cendres volantes, etc...). Afin d'optimiser les dosages en traitement et les densités à atteindre, des campagnes expérimentales sont menées sur des éprouvettes reconstituées en laboratoire ou prélevées sur des remblais expérimentaux. Elles permettent de s'assurer que les performances mécaniques requises

sont atteintes après les temps de cure définis (Bell, 1996). Les conditions de cure en laboratoire décrites dans les normes actuelles permettent de simuler correctement une cure dans un remblai de faible hauteur (LCPC/SETRA, 2000). Par ailleurs, dans le cas des remblais de grande hauteur (> 10 m), il est nécessaire d'appliquer en laboratoire, sur l'éprouvette subissant une cure, une pression de confinement correspondant aux contraintes *in situ* à cette profondeur.

Le projet de recherche se concentre sur l'évolution d'éprouvettes de limon stabilisées par 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique RocAS lorsqu'elles sont soumises ou non à une pression de confinement de 300 kPa durant leur cure. Un gain mécanique d'environ 15 %, apporté par le confinement isotrope lors de la cure, a été quantifié au moyen d'essais de résonance en torsion, non présentés ici.

Avec l'objectif de vérifier cette hypothèse, une étude comparative a été menée sur des éprouvettes ayant eu une cure de 28 jours avec ou sans pression de confinement. Elle se concentre dans un premier temps sur l'avancée des réactions d'hydratation par une quantification des réactifs et des produits présents dans le sol limoneux en fonction du temps. Dans un deuxième temps, l'étude cherche à montrer l'impact de l'hydratation sur la microstructure du sol. Pour ce faire, des imageries de tomographie *in situ* à rayons X sont exploitées pour appréhender aussi bien l'évolution de la composition que de la microstructure. En effet, le principe de tomodensimétrie qui régit l'analyse tomographique résulte en une distinction d'une part des phases de haute densité (les anhydres) et d'autre part de densité nulle (la porosité) (Nguyen et al., 2019). Les résultats de ces essais sont complétés et comparés à ceux donnés par des essais de diffractions des rayons X (DRX) et des essais de porosimétrie par intrusion de mercure.

II. MATERIAUX

A. Sol et traitement

Le matériau utilisé est un sol limoneux prélevé dans le Nord de la France. Une fois au laboratoire, il est tamisé à 0,2 mm puis quarté. Une analyse granulométrique réalisée par diffraction laser sur le tamisat a montré que 80 % des grains étaient inférieurs à 0,08 mm et que le diamètre maximal des grains était de 0,135 mm (ISO 13320:2020, 2020). Les essais d'identification du sol réalisés en laboratoire ont donné les résultats de la valeur au bleu de Méthylène (VBS = 2,2 g/100 g) (NF P94-068, 1998) et les limites d'Atterberg (Limite de liquidité LL = 28 % ; Limite de plasticité LP = 21 % ; Indice de plasticité $I_p = 7$) (NF EN ISO 17892-12, 2018). De ces paramètres résultent une classification du sol en un limon (M) de faible plasticité (L) (ASTM D2488, 2020).

Sur site, la première étape du traitement du sol consiste à en augmenter le pH en incorporant 1 % de chaux. La chaux vive de l'étude est composée à 90 % de chaux vive (CaO). Son ajout favorise la floculation, améliore la maniabilité du sol et diminue sa teneur en eau, modifiant ainsi sa texture et le rendant plus propice à un compactage efficace. Cette étape alcalinisante est essentielle pour optimiser l'efficacité du traitement ultérieur au liant hydraulique. Ce liant, ajouté à hauteur de 5 %, a une composition semblable à un CEM III/A, c'est-à-dire 35 % de ciment Portland et 65 % de laitier de haut fourneau. Plus exactement, une analyse minéralogique a indiqué qu'il contenait du quartz, de l'alite (C₃S), de la bélite (C₂S), des aluminates (C₃A), de la brownmillerite (C₄AF), de la calcite, de la Portlandite, du gypse et de l'anhydrite. Le liant renforce les propriétés mécaniques du sol en

formant des coques cimentaires autour des agrégats de sol préalablement agglomérés par la chaux. Ces coques sont composées d'hydrates provenant de la réaction de l'eau avec les anhydres cités ci-dessus. Ils ont été identifiés comme étant majoritairement de la Portlandite (C-H), des silicates de calcium hydratés (C-S-H), des aluminates de calcium hydratés (C-A-H), des aluminosilicates de calcium hydratés (C-A-S-H).

B. Confection des éprouvettes

La densité attribuée aux éprouvettes reconstituées en laboratoire a été déterminée au moyen d'essais Proctor normal effectués aupaéalable sur le mélange de limon humide, chaux et liant hydraulique (NF P94-093, 2014). Le résultat des essais est présenté dans la Figure 1, sous la forme d'un graphique de la densité sèche [Mg/m³] en fonction de la teneur en eau [%]. Les cinq points de la courbe Proctor correspondent à cinq échantillons compactés à des teneurs en eau différentes. Les courbes tracées en gris correspondent à des degrés de saturation S_r [%] de 100 %, 90 % et 80 %. Pour le sol stabilisé, la densité sèche optimale mesurée ($\rho_{dOPN} = 1,75 \text{ Mg/m}^3$) à la teneur en eau optimale $w_{OPN} = 17,5 \%$ est représentée par un carré bleu.

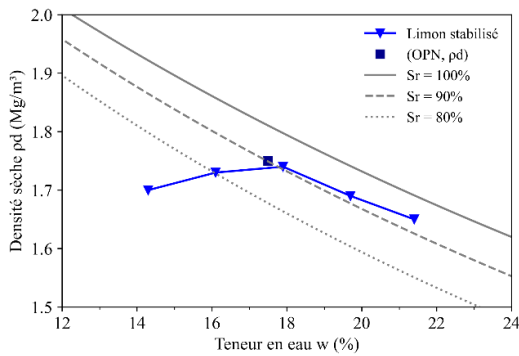


FIGURE 1. Courbe Proctor et lignes de saturation.

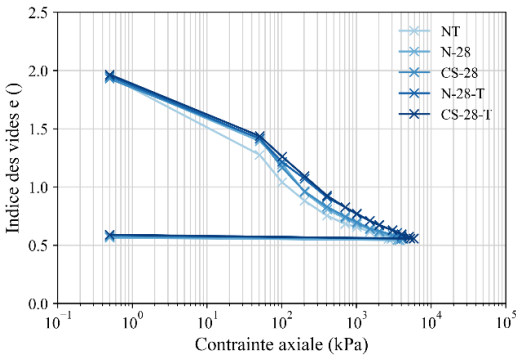


FIGURE 2. Courbes de compactage.

Le mélange est compacté statiquement en une seule couche (Serratrice, 2018) à une teneur en eau $W_{OPN} + 1 \%$ qui correspond à la teneur en eau optimale déterminée par essai Proctor, à laquelle est ajouté 1% pour compenser l'eau qui sera consommée par la chaux. Les éprouvettes de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur sont confectionnées pour atteindre 96 % de la densité sèche maximale (19,9 KN/m³). Ce type de compactage est rapide et permet une bonne productibilité des éprouvettes, ce qui est illustré par le graphique de l'indice de vide e [] en fonction de la contrainte axiale [kPa] de la Figure 2. L'indice des vides moyen des 5 éprouvettes est $e = 0,58$ et il varie entre 0,55 et 0,59 avec un écart-type de 0,014. Le Tableau 1 indique les conditions de cure des éprouvettes et les essais effectués.

TABLEAU 1. Description des éprouvettes reconstituées.

Éprouvette	NT	N-28	C-28	N-28-T	C-28-T
Temps / Pression de cure	-	28 j / P_{atm}	28 j / 300 kPa	28 j / P_{atm}	28 / 300 kPa
Essai	PIM-DRX			Tomographie aux rayons X	

*NT : Non traité ; N : cure normalisée ; CS : Curing stress ; P_{atm} : Pression atmosphérique ; T : tomographie à rayons X.

III. METHODES EXPERIMENTALES

A. Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X (DRX) permet d'identifier les phases cristallisées de matériaux sous forme de poudre en utilisant un faisceau de rayons X réfléchi dans des directions spécifiques lorsqu'il rencontre un cristal. Chaque phase cristalline correspond à un ensemble spécifique de pics en termes d'angle et d'intensité qui sont empiriquement liés aux distances atomiques par la loi de Bragg. Les essais ont été effectués sur des poudres provenant d'éprouvettes de sol traité reconstituées en laboratoire, séchées, broyées puis tamisées à 80 µm sur une gamme d'analyse de 7 à 70 [°2θ].

B. Porosimétrie par intrusion de mercure

Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure (PIM) rendent possible l'investigation de la porosité comprise entre 3 nm et 100 µm. Ils consistent à injecter du mercure à pression croissante afin de remplir la porosité accessible d'un cube de 15*15*15 mm³ prélevé dans une éprouvette puis séché (ISO 15901-1:2016, 2016). Chaque pression peut être associée à un diamètre de taille de pores (D) [m] avec l'équation de Washburn (Washburn, 1921) où P est la pression d'injection du mercure [MPa], γ est la tension superficielle du mercure dans le vide (0,485 N/m) et θ est l'angle de contact entre le mercure et le solide (fixé à 130°) :

$$D = \frac{4\gamma \cos \theta}{P} \quad (1)$$

C. Tomographie à rayons X

L'imagerie par tomographie à rayons X est une méthode non destructive et non invasive qui fournit des informations sur la structure interne d'un objet. Elle est régie par le principe de l'atténuation différentielle des rayons X. Ils interagissent avec les composants en fonction de leur densité : ils sont diffusés, absorbés ou transmis. Chaque point de mesure correspond à un coefficient d'atténuation linéique qui est associé à un pixel. Ces pixels sont assemblés en matrices qui représentent des coupes 2D de l'objet. Un niveau de gris (NDG) est attribué à chaque pixel en fonction de la densité de la matière qu'il représente. Les matériaux de forte densité ont un NDG élevé, tandis que les matériaux de faible densité ont un NDG faible selon le principe de la tomodensimétrie. Les scans ont été réalisés avec le tomographe du laboratoire 3SR de l'Université de Grenoble qui a la particularité de pouvoir être utilisé avec un chargement, par exemple en appliquant une pression de confinement autour de l'échantillon à observer. Les essais présentés ont été réalisés dans le cadre d'essais de faisabilité, ce qui explique qu'il n'y ait qu'une éprouvette par condition de cure.

Les scans, d'une durée de 6 heures, consistent en une rotation de l'éprouvette dans le tomographe selon un pas d'angle de 0,25°. L'énergie d'acquisition est déterminée en fonction de la taille de l'échantillon (100 keV). La taille des pixels, 30 µm, est imposée par la taille des échantillons et la durée de l'analyse. Dans cette étude, il est intéressant de pouvoir disposer d'une éprouvette de même taille que celles testées lors d'essais de mécanique des sols standards, c'est-à-dire 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur. Pour tenir compte de la taille inhabituelle des objets à observer, il a fallu fabriquer une cellule sur mesure en plexiglas.

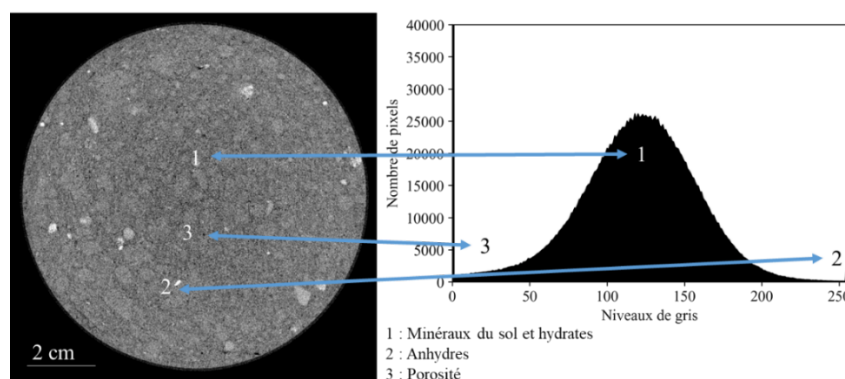


FIGURE 3. Coupe horizontale de l'éprouvette N-28-T et histogramme en niveau de gris correspondant.

Une coupe horizontale de l'éprouvette N-28-T en 8 bit est présentée dans la Figure 3. En l'associant à son histogramme en niveaux de gris (255 NDG) il est possible de distinguer la matrice de sol et les hydrates en gris, la porosité en noir et les grains anhydres en blanc. Les scans représentent un ensemble de 3500 coupes horizontales qu'il est nécessaire d'assembler pour créer des « images » qui seront ensuite traitées. Ces images reconstruites, d'un volume initial de 22,8 Go, sont converties en 8 bit afin de faciliter leur traitement. Cela signifie que le nombre de niveaux de gris passe de 65535 à 255. L'objectif final est d'isoler les pixels correspondants aux grains anhydres et à la porosité, respectivement les NDG les plus élevés et les plus faibles, d'après leur densité. En effet, les minéraux du sol limoneux et les hydrates ont des densités semblables, ce qui ne permet pas leur distinction.

Pour ce faire, le logiciel Fiji (Schindelin et al., 2012) et la bibliothèque Python SPAM (Software for the Practical Analysis of Material) (Stamati et al., 2020) sont utilisés conjointement. Les étapes du traitement sont les suivantes :

- Des parallélépipèdes de $3 \times 3 \times 9 \text{ cm}^3$ sont extraits au centre des éprouvettes cylindriques. Ces volumes sont communément appelés des ROI (Region Of Interest) en analyse d'images. Ils ont un volume bien défini qui permet de calculer précisément les fractions volumiques des composants le constituant (en l'occurrence pores et particules anhydres dans l'étude).
- Pour faciliter la distinction des différentes phases, la luminosité et le contraste des images sont ajustés puis elles sont filtrées à l'aide d'un filtre gaussien avec un rayon d'application $\sigma = 1$. Il participe à l'amélioration du contraste entre un pixel et son voisinage, ce qui rend les contours des objets à observer plus nets.
- Les images sont ensuite binarisées, c'est-à-dire que les pixels se voient attribuer une valeur de 0 ou 255 NDG. Il existe plusieurs modes de binarisation proposés par Fiji qui affectent différemment les valeurs 0 et 255 aux pixels. Par conséquent, le choix du mode a un impact direct sur le volume de particules obtenu à la fin du traitement.
- Le plugging BoneJ développé pour Fiji permet d'analyser les particules en 3D (Domander et al., 2021). Le choix de la taille des particules à détecter est un paramètre important dans la variabilité des résultats de porosité et de volume de grains anhydres. Cette étape permet de produire des images .tif dans lesquelles les particules sont identifiées et associées à des volumes. Des histogrammes de distributions peuvent être produits à partir de ces données.

IV. RESULTATS

A. Evolution de la composition du sol

L'augmentation des propriétés mécaniques des sols stabilisés est associée à l'évolution des réactions d'hydratation (Bell, 1996). Dans les matériaux cimentaires, l'évolution de la quantité d'anhydres et d'hydrates est usuellement mesurée par des essais de diffraction des rayons X. Sur du « soil mixing », il a été montré que la cure sous pression favorisait les cinétiques d'hydratation, notamment en favorisant l'accès des anhydres à l'eau (Rabbani et al., 2019).

La Figure 4 présente les résultats des analyses par DRX réalisés sur le limon naturel et sur les éprouvettes N-28 et C-28. Les diffractogrammes sont présentés dans un graphique de l'intensité [] en fonction de l'angle [2θ]. L'analyse effectuée sur le limon non traité a permis d'identifier les minéraux qui le composent : du quartz, des phases carbonatées (calcite et dolomite), des feldspaths sous forme d'albite, de la muscovite, de la kaolinite, du clinocllore et du microcline. La présence d'hématite a également été détectée.

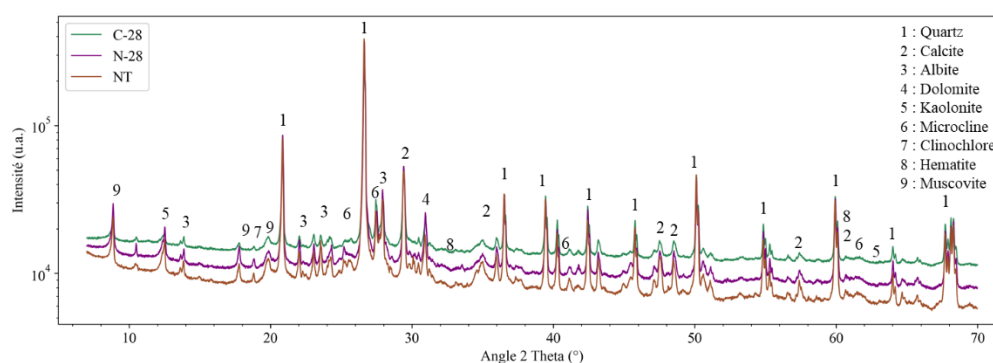


FIGURE 4. Diffractogrammes des échantillons de sol naturel (NT) et de sol stabilisé après 28 jours de cure (cure normalisée : N-28 et cure confinée : C-28).

Les diffractogrammes obtenus pour les deux échantillons de sol stabilisé après 28 jours de cure (N-28, C-28) sont identiques à ceux du sol naturel (NT). Après cette période de cure, des phases anhydres et hydratées sont censées coexister au sein du sol. Ces minéraux correspondent d'une part, à ceux identifiés dans le liant et d'autre part, aux hydrates formés par leur réaction avec l'eau contenue dans le sol. La détection des phases hydratées au sein des sols stabilisés est souvent ardue, d'autant plus quand le dosage de traitement est inférieur à 10 % (Bouras, 2020), néanmoins les auteurs espéraient que la cure confinée permette d'en identifier certaines. La difficulté à détecter les hydrates dans les sols stabilisés repose principalement sur leur faible cristallisation, car ils sont généralement présents sous forme de gels. Une quantité de traitement plus importante, à hauteur de celle qui est ajouté en « soil mixing » (jusqu'à 30 % de liants) permettrait sûrement d'observer l'impact de la pression de cure sur l'hydratation.

L'utilisation de la tomographie à rayons X a permis de pallier ce manque expérimental en rendant possible le suivi des phases anhydres qui se distinguent par leur haute densité. Comme il n'est pas possible d'observer la formation des hydrates (leur densité étant similaire à celle des composés du sol limoneux), les réactions d'hydratation sont appréhendées de manière indirecte par la diminution du pourcentage volumique des particules anhydres visibles. Les étapes du processus développées en III.C. conduisent à la comparaison de la distribution granulaire des particules

anhydres au sein des deux éprouvettes (Figure 5). Les histogrammes sont présentés dans des graphiques du pourcentage volumique des grains [%] en fonction de leur rayon équivalent [μm]. La résolution en voxels imposée par l'imagerie ne permet d'observer qu'une partie des grains anhydres présents dans l'éprouvette. Ont été sélectionnées uniquement les particules supérieures à $0,00027 \text{ mm}^3$ (10 voxels), afin de limiter celles qui correspondraient vraisemblablement à du bruit.

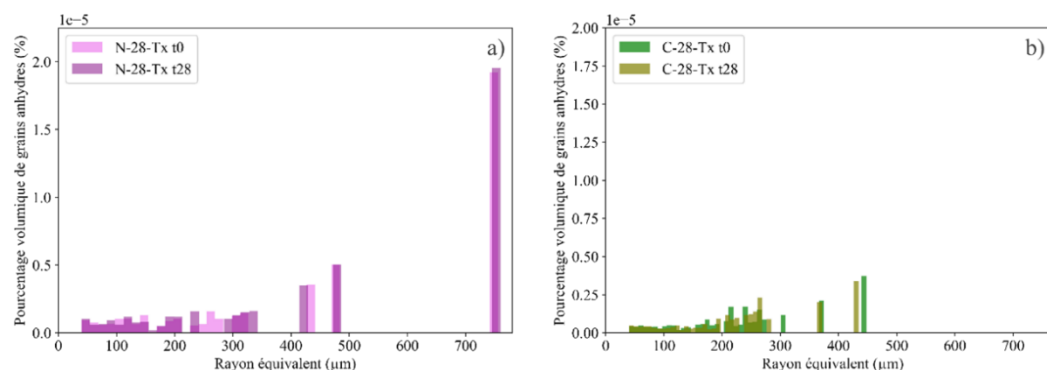


FIGURE 5. Distribution granulaire des particules anhydres en fonction de leur rayon équivalent au sein des éprouvettes N-28-T (a) et C-28-T (b), à 0 et 28 jours.

La comparaison des distributions révèle que le pourcentage volumique des anhydres a davantage diminué au sein de l'éprouvette confinée. De surcroît, même avant le premier scan, le pourcentage d'anhydres est deux fois plus faible dans C-28-T que N-28-T. Ceci met en évidence une hydratation rapide des grains anhydres avec une cinétique moindre pendant les 28 jours (t_{28}) de cure de N-28-T que dans la première heure de cure (t_0) de C-28-T. Dans les deux éprouvettes, le nombre de particules détectées à t_{28} est plus important qu'à t_0 , ce qui pourrait signifier que certaines particules se sont fragmentées pendant l'hydratation.

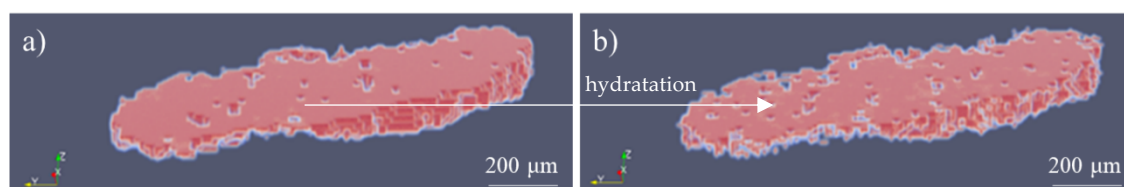


FIGURE 6. Évolution de la morphologie d'une particule anhydre entre le scan t_0 et t_{28} (éprouvette C-28-T).

La Figure 6 illustre l'hydratation d'une particule anhydre qui se situe au sein de l'éprouvette CS-28-T. L'image a) montre une représentation 3D de cette particule après le premier scan et l'image b) après 28 jours de cure confinée. Visuellement, la particule à t_{28} semble être "érodée" et des creux se sont développés sur sa surface. Sachant que la tomographie permet de faire des distinctions par la densité des phases, ces observations semblent indiquer que des phases non hydratées de haute densité se sont transformées en des phases hydratées de plus faible densité. Ces hypothèses coïncident avec le fait que les particules anhydres s'hydratent toujours de l'extérieur vers le centre, au contact de l'eau (Le Chatelier, 1887).

B. Evolution de la porosité

A l'instar de l'évolution de la composition du sol liée à l'avancement des réactions d'hydratation, le réarrangement micro-morphologique entraîné par le traitement joue un rôle majeur dans l'amélioration de ses propriétés mécaniques. Les essais de PIM et les imageries tomographiques fournissent une estimation qualitative de la distribution porale au sein des éprouvettes. Néanmoins les essais de PIM ont tendance à surestimer le volume de la nano-porosité. Ceci est dû d'une part à l'utilisation de l'Eq. 1 qui donne des résultats plus ou moins cohérents en fonction de la géométrie du pore investigué (Diamond, 2000). Et d'autre part, la pression de mercure nécessaire (jusqu'à 430 MPa) pour atteindre les plus petits pores peut déformer et endommager la matrice du matériau (Feldman, 1984). La tomographie aux rayons X telle qu'utilisée dans l'étude correspond à une taille de pixel de 0,03 mm et le volume des pores mesuré dépend de la méthode de traitement de l'image. C'est-à-dire que les plages de mesure des deux essais ne se recoupent pas. La mesure de porosité totale d'une éprouvette est d'environ 37 %, les essais de porosimétrie par intrusion de mercure estiment une porosité d'environ 30 % [0,001 – 10 μm] et la tomographie d'environ 1,2 % [$> 30 \mu\text{m}$].

Les résultats des essais de PIM sont présentés dans la Figure 7. L'essai réalisé sur l'échantillon de limon non traité est représenté en marron, sa porosité a une distribution bi-modale et est majoritairement située entre 0,1 et 3 μm . Les courbes de distribution porale des éprouvettes N-28 (en violet) et C-28 (en vert) illustrent que la cinétique d'évolution de la porosité associée à l'hydratation est favorisée par l'application de la pression de cure de 300 kPa durant les 28 premiers jours. En effet, au sein de l'échantillon C-28 dès 28 jours de cure, la nano-porosité se développe au détriment de la micro-porosité.

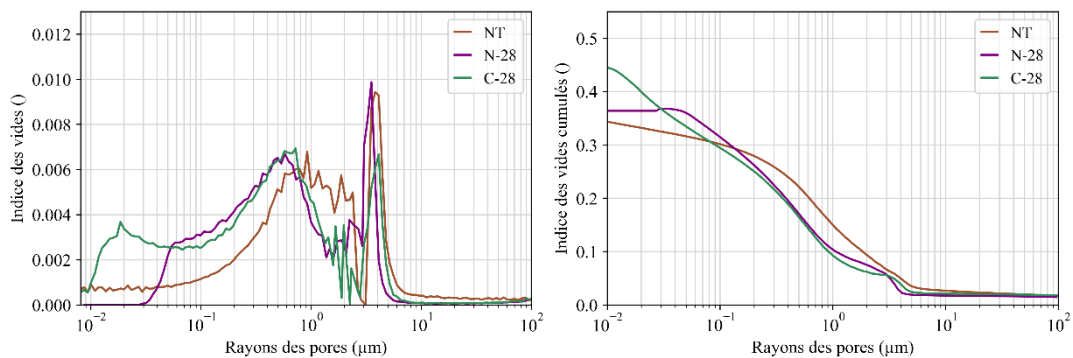


FIGURE 7. Distribution porale et indice des vides cumulés obtenus par les essais PIM.

L'analyse particulaire 3D réalisée sur les pores identifiés sur les images de tomographie permet l'obtention de distributions porales présentées sous forme d'histogrammes d'indices de vides en fonction du rayon équivalent des particules (Figure 8). Les barres vertes correspondent à l'éprouvette ayant eu une cure à pression atmosphérique (N-28-T) et les violettes à l'éprouvette ayant eu une cure confinée (C-28-T). Globalement, pour la même éprouvette, la porosité diminue et la courbe se décale vers des rayons de pores équivalents plus petits. La différence entre les courbes, correspondant au scan à t_0 , des deux éprouvettes illustre le fait que la pression de cure a un impact sur l'hydratation dès le début de la cure.

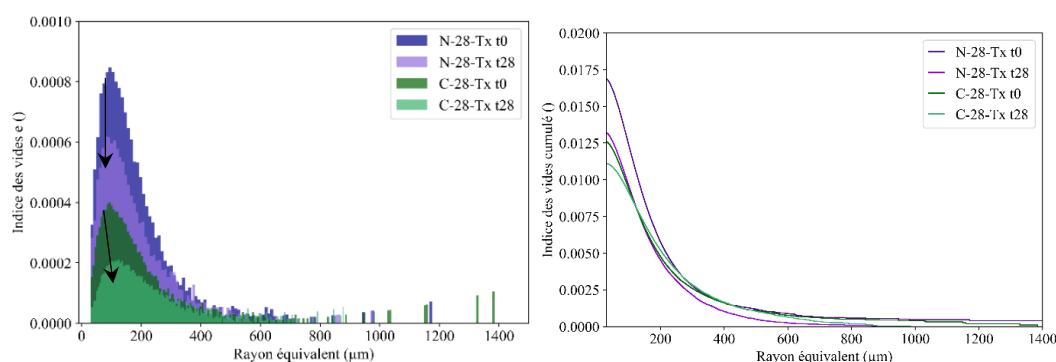


FIGURE 8. Distributions porales d'après les imageries de tomographie à rayons X.

V. CONCLUSION

Deux méthodes d'analyse classiques (diffraction des rayons X et porosimétrie par intrusion de mercure) ont été utilisées en parallèle d'une méthode d'analyse plus originale (tomographie à rayons X) dans l'objectif de comprendre le gain mécanique, dans un sol traité, apporté par une cure sous contrainte de 28 jours. Les principaux résultats sont les suivants :

- Les essais de DRX ne permettent de distinguer ni les phases anhydres de la chaux et du liant, ni les phases hydratées présentes dans les éprouvettes de limon traité même après une cure confinée.
- La tomographie à rayons X rend possible la visualisation de phases anhydres probablement associées à l'ajout de chaux. Le nombre et la fraction volumiques de ces particules anhydres sont inférieurs dans l'éprouvette ayant une cure confinée.
- Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure et les imageries tomographiques montrent que les distributions porales sont impactées par l'application d'une pression de confinement lors de la cure.
- Une famille de nano-pores n'est identifiée par PIM que dans l'éprouvette sous pression. Elle peut être associée à la formation des coques cimentaires autour des agrégats, qui est plus précoce en cure confinée.
- La tomographie montre un affinement des pores mesurés entre 0 et 28 jours de cure, avec davantage de pores détectés en cure normalisée.
- Les essais de faisabilité présentés montrent que la tomographie *in situ* aux rayons X est une méthode adaptée pour suivre la cure sous pression d'un limon stabilisé à la chaux et au liant hydraulique d'un point de vue de sa composition et de sa morphologie.

VI. REMERCIEMENTS

Le travail de doctorat est financé par l'Ecole Centrale de Nantes et EGIS Géotechnique SE. Les essais de tomographie ont été réalisés au laboratoire 3SR de Grenoble grâce à l'implication de Nicolas Lenoir. L'exploitation des données de tomographie a été facilitée par l'équipe du logiciel SPAM et par l'aide de Michel Vanwolleghem. Les institutions ainsi que les personnes ayant contribué à ce travail sont chaleureusement remerciées.

VII. REFERENCES

- ASTM D2488, 2020. Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
<https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- 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)
- Bouras, F., 2020. Le traitement de sols argileux : Approches physico-chimique et géotechnique (Doctoral dissertation). Université d'Orléans.
- Diamond, S., 2000. Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 30, 1517–1525.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00370-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00370-7)
- Domander, R., Felder, A.A., Doube, M., 2021. BoneJ2 - refactoring established research software.
- Feldman, R.F., 1984. Pore structure damage in blended cements caused by mercury intrusion. *Journal of the American Ceramic Society* 67, 30–33.
- ISO 13320:2020, 2020. Particle size analysis—Laser diffraction methods.
- ISO 15901-1:2016, 2016. Evaluation de la distribution de taille des pores et la porosité des matériaux solides par porosimétrie à mercure et l'adsorption des gaz — Partie 1: Porosimétrie à mercure.
- LCPC/SETRA, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide de Traitement des sols (GTS) (No. Réf. D9924). LCPC.
- Le Chatelier, H., 1887. Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Vve Ch. Dunod, édit. Paris.
- NF EN ISO 17892-12, 2018. Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- NF P94-068, 1998. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- NF P94-093, 2014. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- Nguyen, T.T.H., Cui, Y.-J., Ferber, V., Herrier, G., Ozturk, T., Plier, F., Puiatti, D., Salager, S., Tang, A.M., 2019. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical strength of lime-treated fine-grained soils. *Transportation Geotechnics* 21, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100281>
- Rabbani, P., Lajevardi, S.H., Tolooiyan, A., Daghighi, Y., Falah, M., 2019. Effect of Cutter Soil Mixing (CSM) method and curing pressures on the tensile strength of a treated soft clay. *Heliyon* 5, e02186. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02186>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D.J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A., 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* 9, 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Serratrice, J.-F., 2018. Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. *Rev. Fr. Geotech.* 1. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019001>
- Stamati, O., Andò, E., Roubin, E., Cailletaud, R., Wiebicke, M., Pinzon, G., Couture, C., Hurley, R., Caulk, R., Caillerie, D., Matsushima, T., Bésuelle, P., Bertoni, F., Arnaud, T., Laborin, A., Rorato, R., Sun, Y., Tengattini, A., Okubadejo, O., Colliat, J.-B., Saadatfar, M., Garcia, F., Papazoglou, C., Vego, I., Brisard, S., Dijkstra, J., Birmpilis, G., 2020. spam: Software for Practical Analysis of Materials. *JOSS* 5, 2286. <https://doi.org/10.21105/joss.02286>
- Washburn, E.W., 1921. The dynamics of capillary flow. *Physical review* 17, 273.