

Carbonatation naturelle et accélérée d'un géopolymère à base de métakaolin

Sara KOUBEISSY

*Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de mécanique Multiphysique
Multiéchelle, Lille, 59000, France*

RESUME Cette étude explore le comportement à la carbonatation d'échantillons de géopolymères formulés dans le cadre du projet PREDIS. Les échantillons ont été exposés à une carbonatation naturelle ainsi qu'à une carbonatation accélérée sous quatre conditions distinctes : (1) 1% de CO₂, 60% HR, 20°C ; (2) 1% de CO₂, 60% HR, 40°C ; (3) 1% de CO₂, 60% HR, 50°C et (4) 5% de CO₂, 60% HR, 20°C, afin de déterminer si la carbonatation accélérée est représentative des mécanismes observés en conditions naturelles ainsi que d'évaluer l'influence de la température et de la concentration en CO₂ sur le processus de carbonatation. Les résultats montrent qu'en carbonatation accélérée, une augmentation du diamètre moyen des pores a été observée, suggérant une réorganisation du réseau poreux plutôt qu'un simple comblement. De plus, les carbonates de potassium n'ont été détectés qu'après séchage et exposition à l'air, révélant une précipitation différée et un comportement spécifique aux conditions accélérées. L'analyse des propriétés de transfert et de la résistance en compression met en évidence des différences significatives entre la carbonatation naturelle et accélérée, confirmant que la carbonatation accélérée ne reflète pas fidèlement le comportement des géopolymères en conditions naturelles.

Mots-clefs Géopolymères, carbonatation naturelle, carbonatation accélérée, température, bicarbonates de potassium.

I. INTRODUCTION

Le béton conventionnel, largement utilisé dans la construction (Joshua et al., 2018), repose principalement sur le ciment Portland, dont la production est responsable d'importantes émissions de CO₂ : 4,3 Gt en 2020 comparé à 4,2 Gt en 2019 (Gijbels et al., 2020). Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique à l'échelle mondiale, et les émissions liées à la production de ciment continuent d'augmenter avec la demande croissante en matériaux de construction. Face à ces enjeux environnementaux, les matériaux alcali-activés (MAA), y inclus les géopolymères (GP), émergent comme une alternative prometteuse, offrant une empreinte carbone réduite tout en présentant des propriétés mécaniques et de durabilité intéressantes (Singh and Middendorf, 2020).

Toutefois, la question de leur durabilité face aux mécanismes de dégradation reste un défi majeur. Parmi ceux-ci, la carbonatation est une pathologie bien connue du béton cimentaire. Lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique réagit avec la matrice cimentaire, il déclenche une série de réactions chimiques qui modifient les propriétés du matériau, causant ainsi la décomposition des hydrates du béton, principalement la portlandite et le C-S-H, ce qui altère la microstructure et la résistance du matériau (Johannesson and Utgenannt, 2001). Ce phénomène entraîne des effets contrastés tels que la corrosion des armatures en acier (Belda Revert et al., 2018; Stefanoni et al., 2018) mais aussi une réduction de la porosité et de la perméabilité (Dewaele et al., 1991).

Avec l'émergence des MAA, la recherche sur la carbonatation s'est principalement concentrée sur les systèmes riches en calcium, tels que les laitiers et leurs mélanges avec des cendres volantes ou du métakaolin (Nedeljković et al., 2018; Nguyen et al., 2022; Zhang et al., 2020). En revanche, l'impact de la carbonatation sur les géopolymères pauvres en calcium activés au potassium, notamment ceux à base de métakaolin, demeure un sujet peu exploré. Quelques études existantes se sont surtout intéressées aux MAA et GP activés au sodium, en analysant la composition chimique de la solution interstitielle, l'évolution du pH et la nature des carbonates formés au cours du processus de carbonatation (Bernal et al., 2012; Pouhet and Cyr, 2016).

Vu le développement croissant du béton géopolymère dans des applications variées, allant des infrastructures routières aux revêtements de protection (Almutairi et al., 2021) et à l'immobilisation des déchets (Cantarel et al., 2015), sa durabilité face à la carbonatation doit être étudiée plus en profondeur pour mieux comprendre ses implications sur les propriétés mécaniques et microstructurales du matériau et anticiper son comportement à long terme. Cette étude vise à analyser l'impact de la carbonatation, aussi bien naturelle qu'accélérée, sur une formulation à base de métakaolin activée par du potassium, un sujet encore peu exploré dans la littérature. Elle cherche également à évaluer dans quelle mesure la carbonatation accélérée des géopolymères est représentative du comportement observé dans des conditions naturelles, sachant que certaines études rapportent une carbonatation rapide des GP.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet européen PREDIS, qui vise à développer des formulations de géopolymères pour l'immobilisation de déchets radioactifs liquides, en s'intéressant notamment à leur durabilité à long terme.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Matériaux

Les géopolymères fabriqués sont formulés à partir de métakaolin et activés par des solutions basiques à base de potassium. Le métakaolin utilisé est le Metamax, une poudre blanche calcinée par voie rotative et fournie par BASF®. Sa composition chimique est présentée dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Composition chimique de la poudre de métakaolin obtenue par fluorescence X (% massique) et sa surface spécifique.

Teneur (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	CaO	MgO	PAF	Surface spécifique (m ² /g)
Metamax	51,48	43,99	0,34	1,47	0,06	0,00	0,00	2,66	13,5

L'activation alcaline est assurée par une solution commerciale à base de silicate de potassium, le BETOL® 5020T, fournie par Woellner® (Allemagne). Cette solution se compose de 30 % de SiO₂, 18,5 % de K₂O et 51,5 % d'eau. Afin d'ajuster la stœchiométrie du mélange, des pastilles de KOH (pureté > 99 %), obtenues auprès de VWR International (USA), ainsi que de l'eau déionisée, sont ajoutées à la formulation.

B. Stœchiométrie et cure

La formulation utilisée a été développée par les partenaires du laboratoire « National Nuclear Laboratory » dans le cadre du projet PREDIS. Elle est caractérisée par les ratios molaires suivants :



Après un mélange à 2000 tours/minute pendant 5 minutes, les échantillons sont soumis à une phase de cure de 28 jours dans une enceinte climatique à 20°C et 90 % d'humidité relative (HR).

C. Conditions de carbonatation

La carbonatation naturelle est évaluée dans des conditions de 0,1 % de CO₂, 60 % d'humidité relative (HR) et 20°C. Pour la carbonatation accélérée (CA), quatre conditions différentes sont appliquées :

- 1 % de CO₂, 60 % HR et 20°C (Condition 1 suivant la norme EN 13295, (Standards, 2004)),
- 1 % de CO₂, 60 % HR et 40°C (Condition 2),
- 1 % de CO₂, 60 % HR et 50°C (Condition 3),
- 5 % de CO₂, 60 % HR et 20°C (Condition 4).

D. Méthodes expérimentales

Le résumé des différents essais réalisés dans cette étude sont résumés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2. Résumé des différents essais utilisés dans l'étude.

Essais réalisés	Description de l'essai
Indicateur colorés	Après carbonatation, les échantillons (de diamètre $D = 2,7$ cm) ont été coupés et colorés à la phénolphthaléine et au jaune d'alizarine pour évaluer la profondeur de carbonatation. Les mesures ont été effectuées à partir de la teinte foncée fournie par le jaune d'alizarine ($\text{pH} \geq 12$). Certaines variations visuelles sont liées à des coupes irrégulières sur des échantillons desséchés, où les fissures peuvent canaliser la propagation du front et perturber la lecture.
Essai à la compression	La résistance à la compression a été évaluée sur des échantillons cubiques de 4 cm de côté à l'aide d'une machine INSTRON 5500R d'une capacité de 45 kN.
DRX	La diffraction des rayons X a été réalisée avec un diffractomètre Bruker Advance D8 en configuration Bragg-Brentano ($2\theta : 5^\circ - 60^\circ$, pas de $0,05^\circ$, temps d'acquisition de 20 s par pas). Les résultats ont été traités avec le logiciel DIFFRAC.EVA.
Isotherme de sorption	L'adsorption d'azote a été réalisée sur des échantillons initialement cylindriques (de diamètre $D = 2,7$) préalablement concassés et tamisés ($63 - 400 \mu\text{m}$) spécifiquement pour cet essai. Les analyses ont été effectuées à l'aide d'une machine Micromeritics ASAP2020 à 77 K, dans un intervalle de pression relative de 0,001 à 0,995 P/P_0 . Après concassage et tamisage ($63 - 400 \mu\text{m}$), les échantillons ont été dégazés sous vide à 130 °C pendant 12 h.
FTIR	Les échantillons ont été analysés à l'aide d'une cellule ATR. Les mesures ont été effectuées dans la plage de longueurs d'onde de 500 à 4000 cm^{-1} , avec 20 acquisitions par mesure.

Perméabilité accessible au Gas	Les tests de perméabilité au gaz ont été réalisés sur des échantillons cylindriques (de diamètre $D = 3,6$) séchés à 40°C jusqu'à stabilisation de masse à 0.05%. Une pression de gaz constante (argon) de 0,5 MPa a également été appliquée sous des pressions de confinement de 1, 2 et 5 MPa pour analyser la perméabilité et détecter la présence de fractures.
--------------------------------	--

III. RÉSULTATS

A. Profondeur, vitesse et évolution minéralogique de la carbonatation

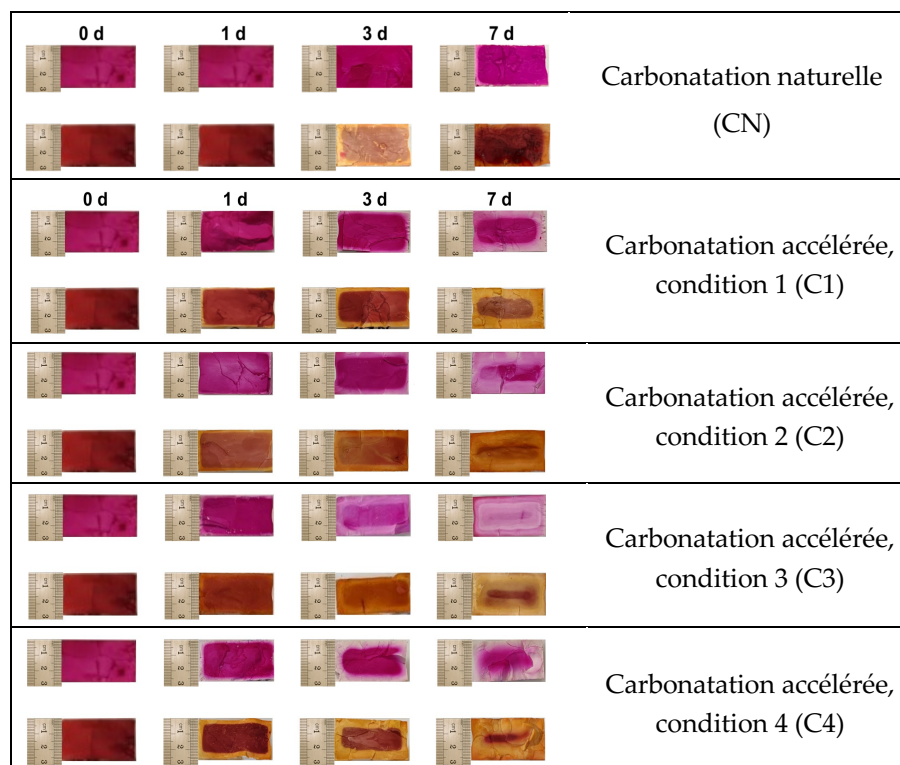


FIGURE 1. Front de carbonatation mesuré à l'aide des deux indicateurs sous différentes conditions de carbonatation.

La Figure 1 illustre la profondeur de carbonatation des GP. La zone non-carbonatée est identifiée par une coloration rose lorsque la phénolphtaléine est utilisée ($\text{pH} > 9$) et par une coloration orange lorsque l'alizarine jaune est employée ($\text{pH} > 12$). Cette zone est principalement observée au centre de l'échantillon ou dans l'échantillon de référence testé avant carbonatation (0 jour).

La carbonatation naturelle progresse lentement au cours des premiers jours. Après 7 jours, la profondeur de carbonatation reste limitée, avec un cœur encore alcalin selon la phénolphtaléine. L'alizarine jaune, plus sensible aux variations de pH, indique une diminution plus rapide du pH en surface (< 12), révélant une différence due aux seuils de virage des deux indicateurs.

Les échantillons exposés à des concentrations plus élevées de CO_2 et à des températures accrues présentent des profondeurs de carbonatation nettement plus importantes. En particulier, et

d'après les Figure 1 et 2, la comparaison entre C1 et C4 ainsi qu'entre C1, C2 et C3 met en évidence l'effet du taux de CO₂ (3,64 comparé à 1,86 mm/jour^{1/2}) et de la température (2,27 et 3,24 mm/jour^{1/2} comparé à 1.86 mm/jour^{1/2}) sur la vitesse de carbonatation.

En comparaison avec les MAA en carbonatation accélérée, la condition C1 (E/C = 0.65) présente une vitesse de carbonatation de 1.86 mm/jour^{1/2}, tandis qu'une formulation de MAA riche en calcium (E/C = 0.55) atteint 3.02 mm/jour^{1/2} (Nguyen et al., 2024). Cette différence montre que, malgré un rapport E/C plus élevé, les géopolymères carbonatent moins rapidement que les MAA riches en calcium, soulignant ainsi leur meilleure résistance à la carbonatation sous des conditions accélérées. Ainsi, l'effet de la concentration en CO₂ et de la température suit une tendance similaire à celle rapportée pour le ciment Portland (Xu et al., 2022), indiquant que les mécanismes de carbonatation restent comparables malgré des différences de composition chimique et de structure des liants. Toutefois, les coefficients ont été déterminés à l'aide d'une courbe de tendance passant par zéro. Cependant, des facteurs de correction devront être appliqués en fonction de la géométrie cylindriques des échantillons testés afin d'assurer une comparaison rigoureuse des vitesses de carbonatation.

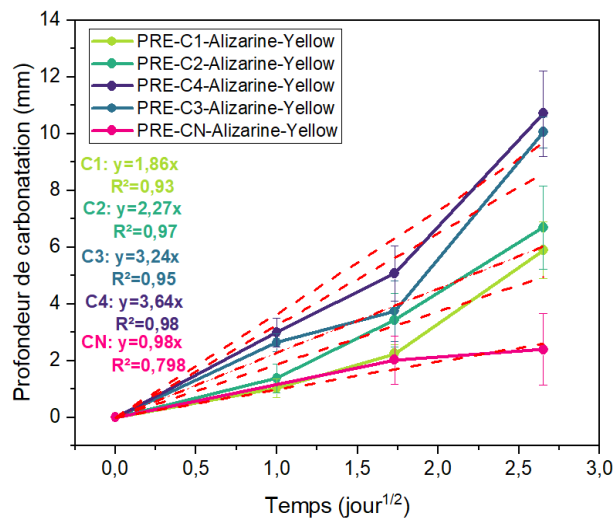


FIGURE 2. Profondeur de carbonatation déterminée à l'aide de l'alizarine comme indicateur coloré.

Après carbonatation, l'analyse par DRX ne révèle aucune formation de carbonates de potassium, que ce soit dans les échantillons soumis à une carbonatation naturelle ou accélérée (Fig 3a). Seule la présence de l'anatase a été détectée, provenant de la poudre de Metamax. Ce résultat est en accord avec la littérature, qui indique que les carbonates de potassium sont très solubles dans l'eau en comparaison avec les carbonates de sodium (1,12 g/L comparé à 0,21 g/L) et donc plus difficiles à détecter. De plus, certains carbonates de potassium peuvent précipiter sous une forme amorphe ou faiblement cristallisée, contribuant ainsi à l'augmentation du signal amorphe (Fig 3).

Cependant, après un certain temps, une fine poudre blanche, semblable à des efflorescences, apparaît sur la surface des échantillons ayant subi la carbonatation accélérée suivi d'un séchage et d'une exposition à l'air ambiant, ce qui suggère une cristallisation progressive des carbonates. Le séchage à 40°C s'est avéré crucial pour stabiliser ces phases secondaires et a été réalisé préalablement aux essais de transfert. Lors de la réanalyse par DRX, des bicarbonates de potassium KHCO₃ ont été détectés (Figure 3b), confirmant des observations similaires rapportées

par Gao et al. (Gao et al., 2013). À l'appui de ces résultats, les analyses FTIR réalisées sur ces échantillons confirment également la formation des bicarbonates (voir Annexe A). Ces observations suggèrent que la formation des carbonates de potassium semble favorisée par des cycles d'humidité et de séchage, suggérant que ces carbonates, qui paraissent stables, pourraient influencer la microstructure du matériau, s'ils persistent à long terme. De plus, la détection de ces phases uniquement dans les échantillons soumis à la carbonatation accélérée, même à long terme, montre que les carbonates peuvent se former différemment selon les conditions de carbonatation naturelle ou accélérée, traduisant ainsi un comportement distinct entre les deux types de carbonatation.

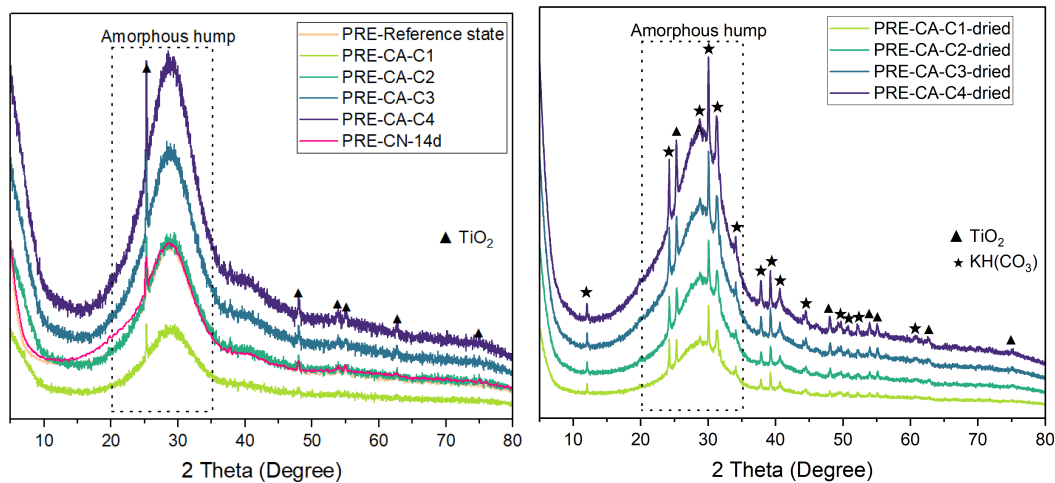


FIGURE 3. Diffraction des rayons X (DRX) des échantillons analysés immédiatement après carbonatation (a) et après séchage et exposition à l'air ambiant (b).

B. Effet de la carbonatation sur les propriétés de transfert : porosité et perméabilité

Les courbes d'adsorption d'azote et les distributions de taille des pores montrent l'évolution de la porosité des géopolymères après carbonatation naturelle et accélérée (Figure 4). Dans le cas de la carbonatation naturelle, l'adsorption d'azote diminue progressivement avec le temps, indiquant une réduction de la porosité après 7 et 14 jours. L'échantillon CN-14d présente une adsorption plus faible que l'état de référence et que CN-7d, suggérant un remplissage partiel des pores par les produits de carbonatation. L'analyse BJH confirme cette tendance avec une diminution de la proportion de mésopores, traduisant un réarrangement progressif de la structure poreuse.

En carbonatation accélérée (Figure 4b), l'adsorption d'azote est certes moins importante, mais le diamètre médian des pores augmente. Cette évolution pourrait résulter d'une modification de la microstructure de la matrice due au séchage, entraînant des fissurations. La précipitation des carbonates, combinée aux conditions agressives de carbonatation (température), pourrait favoriser l'apparition de microfissurations dans les géopolymères (Trincal et al., 2022). Ces observations indiquent que la carbonatation accélérée ne se limite pas à un simple remplissage des pores comme dans le cas de la carbonatation naturelle, mais entraîne également une modification plus profonde de la structure et de la connectivité poreuse.

L'analyse des courbes de perméabilité (Annexe B) montre que la carbonatation naturelle entraîne une réduction légère de la perméabilité à 50 bars, suggérant un comblement progressif des pores

et une stabilisation de la microstructure. En revanche, la carbonatation accélérée conduit à une augmentation de la perméabilité, soulignant le même effet observé au niveau de l'augmentation du diamètre médian des pores (Figure 4b).

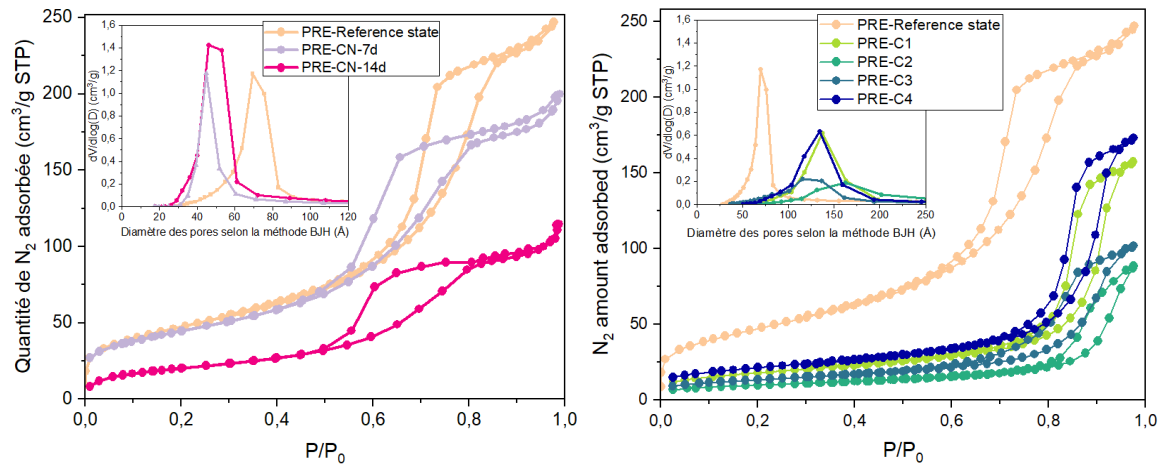


FIGURE 4. Isothermes de sorption d'azote et distribution des pores selon la méthode BJH des géopolymères après carbonatation naturelle (a) et accélérée (b).

La normalisation des valeurs de perméabilité (Figure 5) met en évidence l'impact du séchage et de la désaturation sur l'évolution de la microstructure. Des fissurations apparaissent dans les deux types de carbonatation en raison de ces facteurs, mais la carbonatation accélérée se distingue par une augmentation de la perméabilité, suggérant un effet plus agressif. Ce phénomène indique que la carbonatation accélérée modifie plus profondément la microstructure, influençant la perméabilité et la durabilité du matériau. Ces résultats soulignent l'effet combiné des carbonates formés et de la température de séchage, jouant un rôle clé dans l'évolution de la carbonatation.

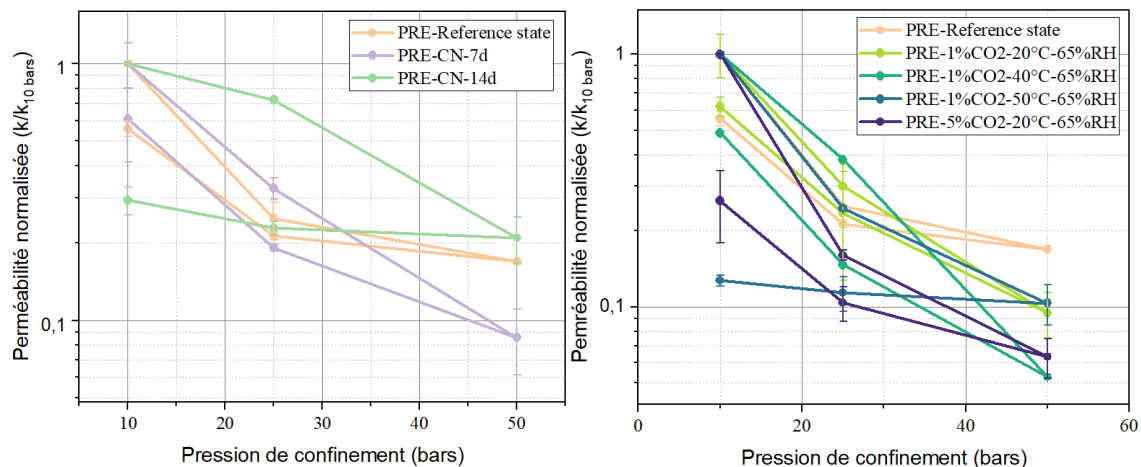


FIGURE 5. Perméabilité normalisée en fonction de la pression de confinement (bars) après carbonatation naturelle (a) et accélérée (b). Une pression de gaz constante (argon) de 0,5 MPa est appliquée sous des pressions de confinement de 1, 2 et 5 MPa.

C. Évolution de la résistance à la compression après carbonatation et lien avec la densification microstructurale

La Figure 6a illustre l'évolution de la résistance en compression des échantillons soumis à une carbonatation naturelle. Une légère augmentation de la résistance est observée entre l'état de référence et les échantillons CN-7d et CN-14d. Cependant, cette variation indique que la carbonatation naturelle n'a pas eu d'impact significatif sur la résistance en compression.

En revanche, la Figure 6b met en évidence une amélioration notable de la résistance en compression pour tous les échantillons après carbonatation accélérée. Dès 3 jours, une augmentation significative est observée dans toutes les conditions. Après 7 jours, cette amélioration semble atteindre un plateau pour les conditions 1 % CO₂ à 40°C, 1 % CO₂ à 50°C et 5 % CO₂ à 20°C, suggérant que la carbonatation a stabilisé la résistance mécanique dans ces environnements. Toutefois, pour 1 % CO₂ à 20°C, la résistance continue d'augmenter, indiquant que le processus de carbonatation et son influence sur la résistance mécanique se poursuivent au-delà de cette période. La carbonatation accélérée semble augmenter la résistance à la compression en densifiant la microstructure par la précipitation des carbonates.

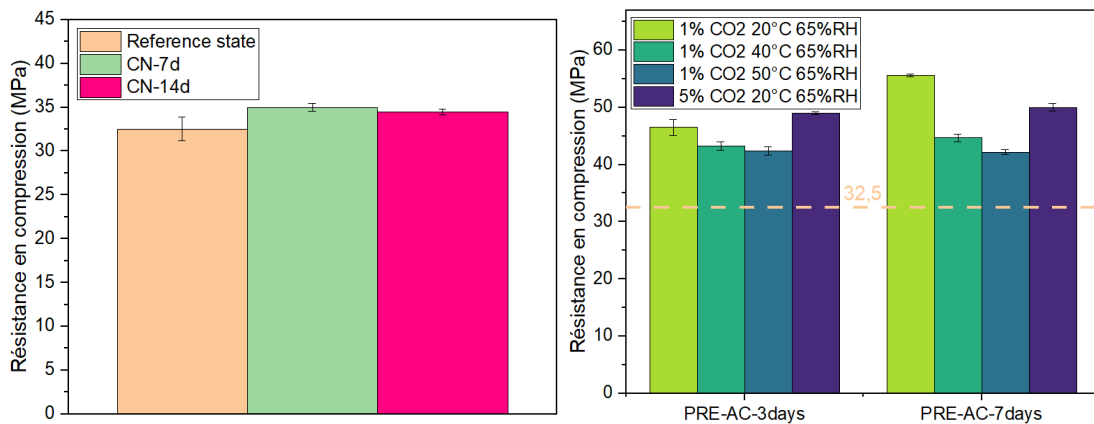


FIGURE 6. Résistance en compression des échantillons soumis à une carbonatation naturelle (a) et accélérée (b).

IV. CONCLUSIONS

Cette étude qui porte sur la carbonatation des géopolymères a permis de mettre en évidence des effets notables sur l'évolution microstructurale, les propriétés de transfert et les transformations chimiques, notamment la formation de bicarbonates.

- La carbonatation naturelle est un processus lent qui réduit progressivement la taille des pores, entraînant une légère diminution de la perméabilité
- La formation de bicarbonates sous conditions accélérées souligne des différences dans les produits de réaction entre carbonatation naturelle et accélérée.
- Une température plus élevée accélère la cinétique de la carbonatation accélérée.
- En carbonatation accélérée, la formation des carbonates et les fissurations entraînent une réorganisation du réseau poreux, augmentant la perméabilité et altérant ainsi les propriétés de transfert du matériau.
- Ces résultats montrent que la carbonatation accélérée est plus agressive et ne reflète pas fidèlement l'évolution du matériau en conditions naturelles.

RESUME TRAVAUX DE THESES

En plus de ce travail sur la carbonatation des géopolymères, ma thèse s'est également intéressée à l'influence des **précurseurs** (taille des particules, surface spécifique, etc.) sur les **performances des géopolymères**, ainsi qu'à l'effet de la **carbonatation accélérée et naturelle** sur différentes formulations, y compris celles présentées dans cette étude. J'ai également étudié la **carbonatation naturelle et accélérée de géopolymères contenant 30 % d'huile modèle de déchets radioactifs**, afin d'évaluer l'impact de cette encapsulation sur leur comportement. Par ailleurs, une autre partie de mes recherches a porté sur la **lixiviation des géopolymères avec et sans huile** dans des milieux acides, basiques et neutres. Enfin, mon travail de thèse a également abouti à **l'optimisation d'une formulation**, intégrant les contraintes liées aux performances mécaniques, à la durabilité et à la rétention des liquides organiques dans la matrice géopolymère.

REFERENCES

- Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F., Zeyad, A.M., 2021. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Stud. Constr. Mater.* 15, e00733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>
- Belda Revert, A., De Weerd, K., Hornbostel, K., Geiker, M.R., 2018. Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset. *Constr. Build. Mater.* 162, 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.066>
- Bernal, S.A., Provis, J.L., Brice, D.G., Kilcullen, A., Duxson, P., van Deventer, J.S.J., 2012. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. *Cem. Concr. Res.* 42, 1317–1326. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.07.002>
- Cantarel, V., Nouaille, F., Rooses, A., Lambertin, D., Poulesquen, A., Frizon, F., 2015. Solidification/stabilisation of liquid oil waste in metakaolin-based geopolymer. *J. Nucl. Mater.* 464, 16–19. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.04.036>
- Dewaele, P.J., Reardon, E.J., Dayal, R., 1991. Permeability and porosity changes associated with cement grout carbonation. *Cem. Concr. Res.* 21, 441–454. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90092-V](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90092-V)
- Gao, X.X., Michaud, P., Joussein, E., Rossignol, S., 2013. Behavior of metakaolin-based potassium geopolymers in acidic solutions. *J. Non-Cryst. Solids* 380, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.09.002>
- Gijbels, K., Krivenko, P., Kovalchuk, O., Pasko, A., Schreurs, S., Pontikes, Y., Schroeyers, W., 2020. The influence of porosity on radon emanation in alkali-activated mortars containing high volume bauxite residue. *Constr. Build. Mater.* 230, 116982. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116982>
- Johannesson, B., Utgenannt, P., 2001. Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cem. Concr. Res.* 31, 925–931. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00498-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00498-7)
- Joshua, O., Matawal, P.D., Akinwumi, T., 2018. DEVELOPMENT OF A FULLY POZZOLANIC BINDER FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION: WHOLE CEMENT REPLACEMENT IN CONCRETE APPLICATIONS. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 9.

- Nedeljković, M., Šavija, B., Zuo, Y., Luković, M., Ye, G., 2018. Effect of natural carbonation on the pore structure and elastic modulus of the alkali-activated fly ash and slag pastes. *Constr. Build. Mater.* 161, 687–704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.005>
- Nguyen, T.N., Phung, Q.T., Frederickx, L., Jacques, D., Dauzeres, A., Elsen, J., Pontikes, Y., 2024. Microstructural evolution and its impact on the mechanical strength of typical alkali-activated slag subjected to accelerated carbonation. *Dev. Built Environ.* 19, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100519>
- Nguyen, T.N., Phung, Q.T., Yu, Z., Frederickx, L., Jacques, D., Sakellariou, D., Dauzeres, A., Elsen, J., Pontikes, Y., 2022. Alteration in molecular structure of alkali activated slag with various water to binder ratios under accelerated carbonation. *Sci. Rep.* 12, 5524. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09491-4>
- Pouhet, R., Cyr, M., 2016. Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer. *Cem. Concr. Res.* 88, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.008>
- Singh, N.B., Middendorf, B., 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Constr. Build. Mater.* 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Standards, E., 2004. BS EN 13295:2004 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of resistance to carbonation [WWW Document]. <https://www.en-standard.eu/bs-en-13295-2004-products-and-systems-for-the-protection-and-repair-of-concrete-structures-test-methods-determination-of-resistance-to-carbonation/> (accessed 2.10.25).
- Stefanoni, M., Angst, U., Elsener, B., 2018. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. *Cem. Concr. Res.* 103, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>
- Trincal, V., Benavent, V., Lahalle, H., Balsamo, B., Samson, G., Patapy, C., Jainin, Y., Cyr, M., 2022. Effect of drying temperature on the properties of alkali-activated binders - Recommendations for sample preconditioning. *Cem. Concr. Res.* 151, 106617. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106617>
- Xu, Z., Zhang, Z., Huang, J., Yu, K., Zhong, G., Chen, F., Chen, X., Wengen, Y., Wang, Y., 2022. Effects of temperature, humidity and CO₂ concentration on carbonation of cement-based materials: A review. *Constr. Build. Mater.* 346, 128399. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128399>
- Zhang, X., Long, K., Liu, W., Li, L., Long, W.-J., 2020. Carbonation and Chloride Ions' Penetration of Alkali-Activated Materials: A Review. *Molecules* 25, 5074. <https://doi.org/10.3390/molecules25215074>

ANNEXE A : Courbes FTIR des échantillons après carbonatation accélérée

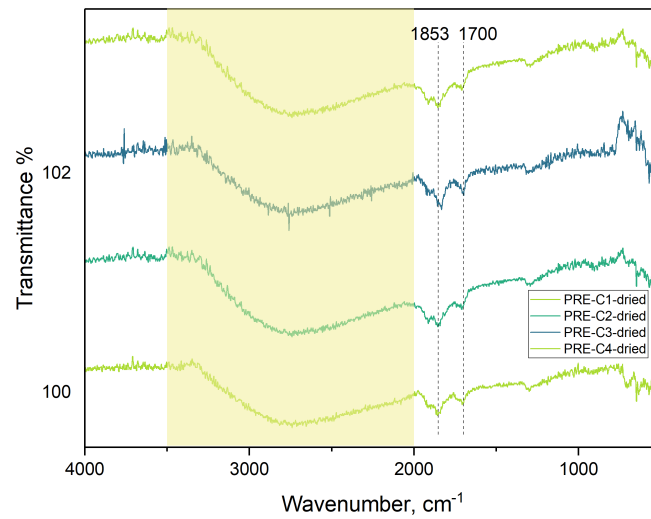


FIGURE A. Spectres FTIR des géopolymères carbonatés de manière accélérée après exposition à différentes conditions suivie d'un séchage et d'une mise à l'air ambiant.

ANNEXE B : Courbes de perméabilité en variant la pression de confinement non-normalisés

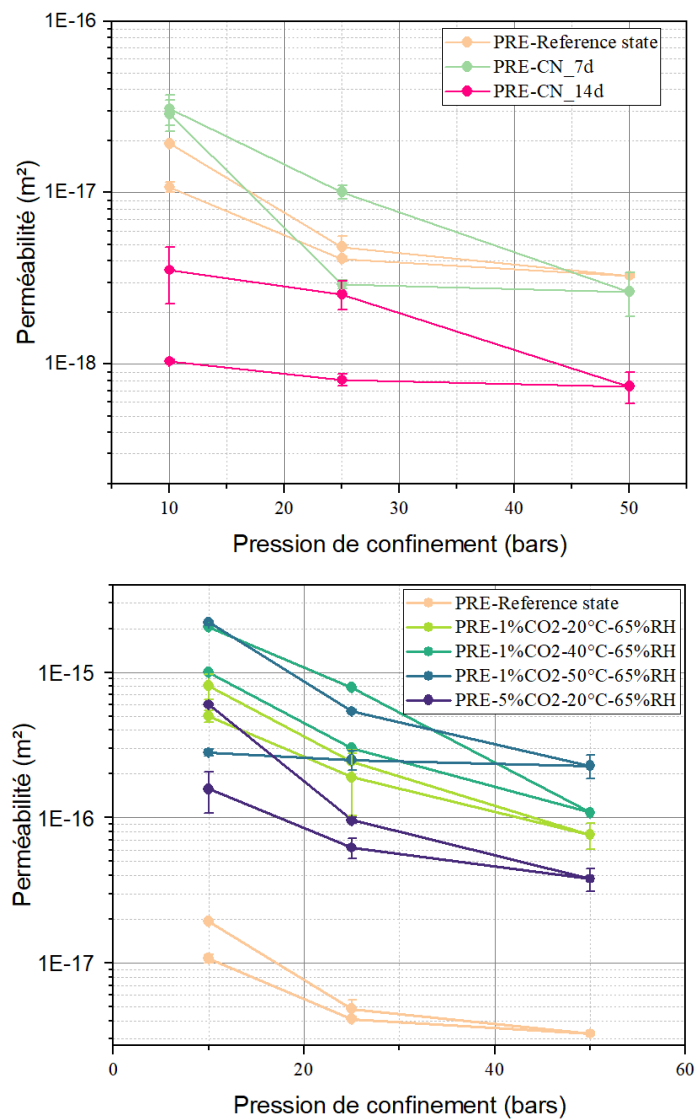


FIGURE B. Mesure de la perméabilité en fonction de la pression de confinement après carbonatation naturelle (a) et accélérée (b). Une pression de gaz constante (argon) de 0,5 MPa est appliquée sous des pressions de confinement de 1, 2 et 5 MPa.