

Effet d'un nouveau protocole de cure au jeune âge combinant traitement thermique et carbonatation sur les propriétés des matériaux cimentaires bas carbone

Imane BEKRINE, Benoît HILLOULIN, Ahmed LOUKILI

Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME L'industrie de la préfabrication du béton représente environ 20 % de la production mondiale, et l'intégration de bétons bas carbone y est un enjeu majeur. Cette étude explore une approche innovante combinant cure thermique et carbonatation pour améliorer les performances mécaniques de ciments à fort taux de substitution tout en stockant du CO₂. Trois pâtes ont été testées à l'âge de 2 jours, respectivement composées d'un ciment de référence (OPC), d'un deuxième ciment avec 60 % de laitier de haut fourneau (PS₆₀) et un troisième ternaire combinant laitier et argile calcinée (PCC_{130S30}). Comparée à une cure humide classique, la cure combinée améliore la résistance à la compression de 16 % (OPC), 55 % (PS₆₀) et 92 % (PCC_{130S30}). Le module de fluage mesuré par microindentation, reflétant la résistance du matériau au chargement de fluage, augmente notamment de 78 % pour le liant ternaire. Le procédé permet aussi une fixation de CO₂ atteignant 1 à 6 % de la masse cimentaire. Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à une préfabrication plus durable et performante, avec un potentiel d'application à d'autres formulations bas carbone.

Mots-clés jeune âge, additions minérales, carbonatation, cure thermique, performance mécanique, microindentation

I. INTRODUCTION

L'industrie de la préfabrication du béton occupe aujourd'hui près de 20 % de la production mondiale. L'adaptation des bétons bas carbone à faible dosage en clinker à la préfabrication présente donc une préoccupation majeure des industriels, notamment dans la gestion de l'amélioration de leurs propriétés mécaniques au jeune âge. En effet, l'emploi de certaines additions minérales affaiblit les propriétés (micro)mécaniques de liants bas carbone au jeune âge, surtout avec des taux de substitution de ciment élevés.

La cure thermique est une pratique communément utilisée dans l'industrie de préfabrication pour l'activation de ces liants afin d'améliorer leurs résistances au jeune âge. Ce processus accélère l'hydratation et améliore les performances mécaniques au jeune âge en augmentant la formation

des CSH (Escalante-García and Sharp, 1998; Lothenbach et al., 2007). Cependant, elle est très consommatrice d'énergie, ce qui peut paraître « contradictoire » avec la philosophie bas carbone.

Face aux enjeux environnementaux, la cure par carbonatation s'impose comme une alternative prometteuse, combinant développement mécanique et séquestration du carbone (Andrade and Sanjuán, 2018). Ce procédé consiste à exposer les matériaux cimentaires jeunes à une atmosphère enrichie en CO₂, induisant la carbonatation des phases non hydratées du ciment ainsi que des produits d'hydratation, notamment la portlandite et le C-S-H, avec formation ultérieure de carbonate de calcium (Rostami et al., 2011). Par ailleurs, la carbonatation permet de réduire la consommation énergétique globale du processus de cure, participant ainsi à un cycle carbone plus vertueux (Koytsoumpa et al., 2018; Pan et al., 2018). Cependant, un taux élevé de substitution du ciment pourrait limiter l'efficacité de la cure par carbonatation, en raison d'une hydratation plus lente au jeune âge (Zhang et al., 2021).

Bien que les effets de la cure thermique et de la carbonatation aient été largement étudiés séparément, leur combinaison reste peu explorée. Cette étude propose un protocole innovant associant ces deux régimes de cure, pouvant offrir une approche synergique, exploitant les avantages complémentaires de chacun pour optimiser les performances du matériau. Pour cela, trois liants cimentaires sont étudiés, le premier composé uniquement de CEM I, le deuxième remplaçant le CEM I avec 60 % de laitier de haut fourneau et le troisième avec une utilisation jointe du laitier de haut fourneau et de l'argile calcinée en 60 %. Nous comparons l'effet de ce régime de cure au jeune âge avec une cure à l'eau conventionnelle en évaluant : i) la fixation de CO₂, ii) le développement de la résistance à la compression en lien avec l'hydratation, et iii) les propriétés micromécaniques évaluées par microindentation.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux et formulations

Trois formulations de pâtes cimentaires font l'objet de la présente étude, fabriquées à base de ciment Portland de type CEM I 52,5 N, de laitier de haut fourneau (GGBFS) et d'argile calcinée CC1 dont les compositions chimiques sont données dans le [Tableau 1](#). Leurs masses volumiques respectives sont 3,15 g/cm³, 2,90 g/cm³ et 2,20 g/cm³ et leurs surfaces spécifiques respectives sont 3979 cm²/g, 4450 cm²/g (BET) et 190000 cm²/g (Blaine). Le rapport eau/liant des pâtes (E/L) est fixé à 0,40. La première est composée uniquement de CEM I et est appelée OPC, les deux autres par remplacement de 60% du volume de CEM I par du GGBFS dans le PS₆₀ et par du GGBFS et du CC1 dans le PCC1₃₀S₃₀. Un superplastifiant a été ajouté à cette dernière pâte pour garantir une consistance similaire de tous les mélanges, étant donné la forte demande en eau de l'argile calcinée. Ces formulations ont été choisies car le PS₆₀ contient des liants CEM III/A, tout en aidant à comprendre les effets combinés observés pour le PCC1₃₀S₃₀, qui, à son tour, ressemble étroitement au CEM VI nouvellement normalisé en Europe. Des échantillons prismatiques de dimensions 4 × 4 × 16 cm³, et d'autres cylindriques de dimensions Ø2,8 × 5,8 cm² sont fabriqués. Leurs conditions de cure seront détaillées par la suite.

carbonaté (coloré, d_{NC}) et en la soustrayant de la section transversale totale des cylindres de diamètre d , conformément à l'équation :

$$\text{Ratio de la section carbonatée (\%)} = \left(1 - \left(\frac{d_{NC}}{d}\right)^2\right) \times 100 \quad (1)$$

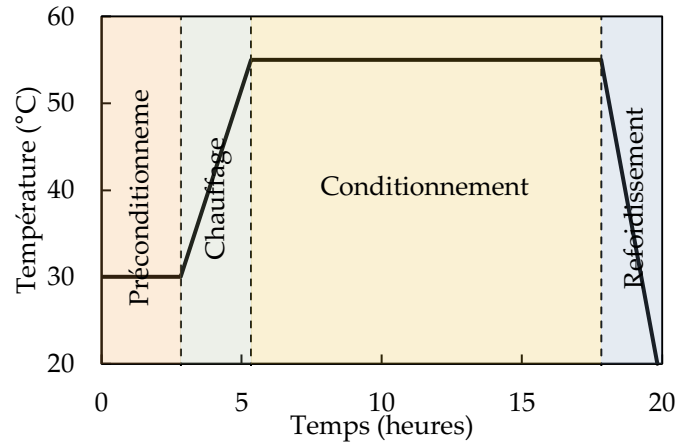


Figure 2. Cycle utilisé pour la cure thermique.

Une analyse thermogravimétrique a été réalisée sur les trois échantillons sous différents régimes de cure afin de quantifier leur teneur en portlandite et en eau liée, conformément à la norme ASTM C1872-18. Ces deux quantités permettront de suivre l'évolution de la réaction pouzzolanique et de la réaction d'hydratation. D'autre part, l'ATG permettra d'évaluer l'absorption de CO_2 par les liants hydratés. À cette fin, 100 g de pâtes broyées à 80 μm de diamètre maximal, en provenance d'une fine lamelle coupée transversalement du cylindre, ont été soumises à un profil de température allant de 20 °C à 1000 °C à un taux de 10 °C/min.

L'eau liée représente la quantité d'eau libérée par les produits d'hydratation pendant le chauffage et est calculée en ajoutant la perte de masse entre 40 °C et 400 °C (en utilisant la méthode par étapes sur la courbe DTG) correspondant à la déshydratation du C-S-H, de l'ettringite et d'autres produits d'hydratation et la perte de masse entre 400 °C et 550 °C (en utilisant la méthode de Marsh sur la courbe TGA) correspondant à la déshydroxylation de la portlandite. La perte de masse de la portlandite est ensuite utilisée pour calculer la proportion massique réelle de portlandite dans la pâte. Quant à la fixation de CO_2 , il est quantifié comme la perte de masse entre 550 °C et 850 °C divisée par la masse initiale de liant non hydraté m_{liant} :

$$CO_2 \text{ stocké (\%)} = \frac{m_{550^\circ C} - m_{850^\circ C}}{m_{liant}} \times 100 \quad (2)$$

Les éprouvettes prismatiques préparées selon le protocole décrit précédemment sont soumises à un essai de flexion. Ensuite, chacune des deux parties est testée en compression sur la section $4 \times 4 \text{ cm}^2$. La résistance à la compression est calculée en moyennant au moins trois valeurs sur trois échantillons différents selon la norme NF EN 196-1.

Ensuite, des essais de microindentation ont été effectués sur toutes les pâtes sous les différentes conditions de cure, afin d'élucider les effets de la cure sur la microstructure, ainsi que le rôle de celle-ci dans le développement des propriétés macro-mécaniques. Avant de réaliser ces essais, la surface des échantillons est bien polie afin de minimiser les défauts. La rugosité finale des échantillons mesurée sur une surface de $50 \times 50 \mu m^2$ est inférieure à 50 nm.

Pour ce faire, un microindenteur Fischerscope HM2000 est employé, équipé d'une pointe Vickers. Une charge maximale P_{max} de 2 N est employée, maintenue constante afin de mesurer le fluage. Des indents sont réalisés le long du rayon des échantillons cylindriques à mi-hauteur de l'échantillon, étant donné que la diffusion de CO_2 est radiale à hauteur fixe.

Le centre et un point du bord de l'échantillon sont donc visés sous le microscope du microindenteur. La distance entre les deux points est évaluée, et un nombre d'indents est choisi de telle sorte à avoir un espacement de 100 μm ($\pm 1,2 \mu m$ car le nombre d'indents calculé n'est pas toujours entier). Ensuite, une moyenne de 10 valeurs est calculée chaque 1 mm et tracée pour avoir un profil de propriété (E ou C) selon le rayon.

Le module d'indentation M et le module d'Young E peuvent être calculés comme suit, selon l'approche d'Oliver et Pharr (Oliver and Pharr, 1992) :

$$M = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{A_c}} S \quad (3)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_{ind}^2}{E_{ind}} \quad (4)$$

S est la pente de la courbe de déchargement à la charge maximale, ν est le coefficient de Poisson du matériau qui est égal à 0,24 pour la pâte de ciment (Constantinides and Ulm, 2004) et $\nu_{ind}=0,07$ et $E_{ind}=1141$ GPa sont respectivement le coefficient de Poisson et le module d'élasticité de la pointe diamantée.

En ce qui concerne le module de fluage C, il est proportionnel à la variation de la dérivée de la complaisance de fluage $L(t)$ exprimée dans l'équation (5), avec $h(t)$ la profondeur de pénétration pendant la phase de maintien de charge.

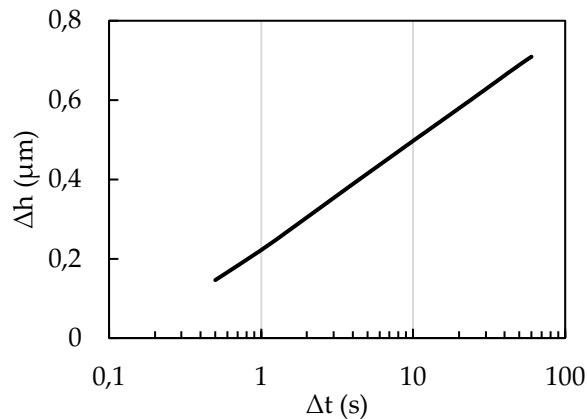


Figure 3. Fluage logarithmique d'une pâte de ciment obtenu par microindentaion.

Etant donné que le fluage des matériaux cimentaires est bien représenté par une évolution temporelle logarithmique à cette échelle, C est obtenu par ajustement de la profondeur de pénétration pendant la phase de maintien de charge qui peut s'écrire sous la forme $h(t) = x_1 \ln(x_2 t + 1)$, avec x_1 et x_2 les deux paramètres d'ajustement. La Figure 3 montre un exemple de cette fonction sur une pâte de ciment. Enfin, C est obtenu par la formule (6).

$$\dot{L}(t) = 2 \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \frac{\dot{h}(t)}{P_{max}} = \frac{1}{Ct} \quad (5)$$

$$C = \frac{P_{max}}{2x_1} \sqrt{\frac{\pi}{A_c}} \quad (6)$$

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Sections carbonatées et capture de CO₂

Les sections carbonatées des pâtes cimentaires, après 2 jours d'hydratation, ont été identifiées par utilisation de phénolphtaléine, et les résultats sont résumés dans la Figure 4. Nous pouvons remarquer que l'OPC présente le taux de carbonatation le plus faible des trois formulations. Le remplacement de 60 % du ciment Portland par du laitier entraîne une augmentation de la carbonatation, qui est encore plus importante avec l'utilisation jointe de laitier et d'argile calcinée.

Le taux de CO₂ fixé par les liants sous cure combinée a été quantifié et les résultats sont résumés dans le Tableau 1. Comme l'objectif est de quantifier le CO₂ fixé uniquement à la suite du processus de carbonatation, les quantités de CO₂ dérivées de l'équation (2) pour la cure humide (correspondant aux carbonates de calcium naturellement présents dans ces mélanges) sont déduites des quantités calculées sous cure combinée. La substitution de ciment favorise la fixation de CO₂ dans les liants pour aller de 0,9 % dans l'OPC à 4,6 % dans PS₆₀ et finalement atteindre 5,2 % dans PCC_{130S30}, ce qui est corrélé à la quantification des sections carbonatées précédemment présentées.



Figure 4. Ratio des sections carbonatées (zones incolores) sous cure combinée après 2 jours d'hydratation de la pâte (a) OPC, (b) PS₆₀ et (c) PCC_{130S30}.

Tableau 1. Fixation de CO₂ des trois liants sous cure combinée (% par rapport à la masse des liants).

	OPC	PS ₆₀	PCC _{130S30}
CO ₂ fixé (%)	0,9	4,6	5,2

B. Effet de la cure combinée sur le comportement mécanique au jeune âge

Le comportement mécanique des pâtes au jeune âge, sous conditions de cure humide et combinée, a été identifié en mesurant la résistance à la compression immédiatement après la fin des cycles de cure (48 h) sur les échantillons prismatiques, comme le montre la Figure 5. Tout d'abord, on peut remarquer que l'OPC a une résistance à la compression plus importante que les mélanges binaire et ternaire, signalant sa meilleure performance au jeune âge grâce à la forte hydraulité. Ceci justifie aussi le recours à l'activation au jeune âge des liants bas carbone pour améliorer leur performance mécanique. En ce qui concerne le régime de cure combinée, on peut remarquer une augmentation de la fc₂₈ des mélanges ayant subi une cure combinée par rapport à la cure humide, surtout pour les binaire et ternaire d'environ 55 % et 92 % respectivement.

Afin de lier ce comportement à la réactivité du liant, nous avons quantifié la teneur en portlandite et l'eau liée des trois pâtes sous les deux régimes de cure, et les résultats sont montrés dans la Figure 6. Tout d'abord, nous pouvons remarquer que l'OPC présente une teneur en portlandite et en eau

liée plus élevées dans les deux régimes de cure par rapport aux mélanges binaire et ternaire, appuyant ainsi les résultats de la résistance mécanique. La teneur en portlandite de l'OPC reste pratiquement invariable vers les 10 % dans les deux régimes de cure, tandis que cette quantité diminue de 66 % et 59 % sous cure combinée par rapport à la cure humide, respectivement dans les liants binaire et ternaire. Cette diminution est due au processus de carbonatation, en accord avec les observations des sections carbonatées dans la [Figure 4](#).

En ce qui concerne la quantité d'eau liée, celle-ci diminue de 13 % pour l'OPC, ce qui peut être du soit à la précipitation de carbonates qui entourent les particules de ciment et qui les empêchent de s'hydrater, ou à la compétition entre l'hydratation et la carbonatation. Ceci est le cas aussi pour PCC1₃₀S₃₀, en plus de la diminution de la quantité de portlandite par carbonatation, dont l'eau liée diminue de 28 % par rapport à la cure humide. Pour PS₆₀, cette quantité reste pratiquement invariable, malgré la diminution de la quantité de portlandite. Ceci peut être expliqué par le fait que la cure thermique des systèmes cimentaires à base de laitier favorise l'hydratation de l'alite et accélère celle de la bélite au jeune âge (Escalante-García and Sharp, 1998). A partir de ces données, on peut expliquer l'augmentation de résistance des liants bas carbone par la précipitation des carbonates de calcium renforçant la composition chimique et microstructurale des pâtes (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2017) et réduisant la porosité.

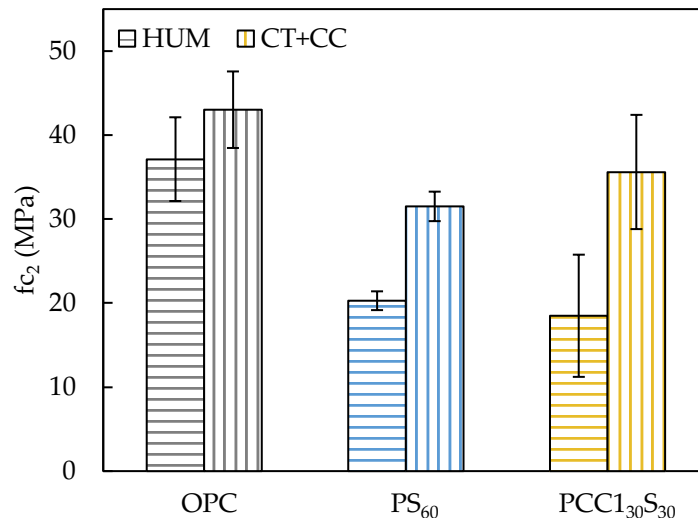


Figure 5. Résistance à la compression des trois mélanges sous les quatre régimes de cure à l'âge de 2 jours.

C. Effet de la cure combinée sur le comportement micromécanique au jeune âge

Les propriétés micromécaniques des liants étudiés ont été mesurées suivant le rayon des échantillons cylindriques d'hydratation afin d'explorer l'effet radial de la cure combinée, comparée à la cure humide pour laquelle les propriétés (lignes continues) sont constantes suivant le rayon, et sont montrées dans la [Figure 7](#). Il est important de noter que compte-tenu du grand écart-type sur les module de fluage, une analyse ANOVA a été réalisée et a montré que les différences entre les moyennes des différents échantillons sont statistiquement significatives. Nous pouvons remarquer que sur l'OPC, les propriétés micromécaniques sont en général invariantes suivant tout le rayon et sont un peu en-dessous de la moyenne calculée sous cure humide, jusqu'à la dernière valeur ayant des propriétés plus élevées atteignant les 24,4 GPa pour le module élastique et 216,8 GPa pour le

module de fluage. En revenant sur la Figure 4 montrant les sections carbonatées, nous pouvons remarquer que c'est la partie coïncidant avec le rayon carbonaté, ce qui est conforme avec les résultats de la littérature (Kaddah et al., 2022), et peut être expliqué par la formation des carbonates de calcium, ayant des propriétés mécaniques plus importantes que les C-S-H carbonatés (Han et al., 2012). Ensuite, il s'avère que les propriétés de PS₆₀ sont aussi invariantes selon le rayon, et sont plus importantes que la moyenne calculée sur les échantillons qui ont subi une cure humide.

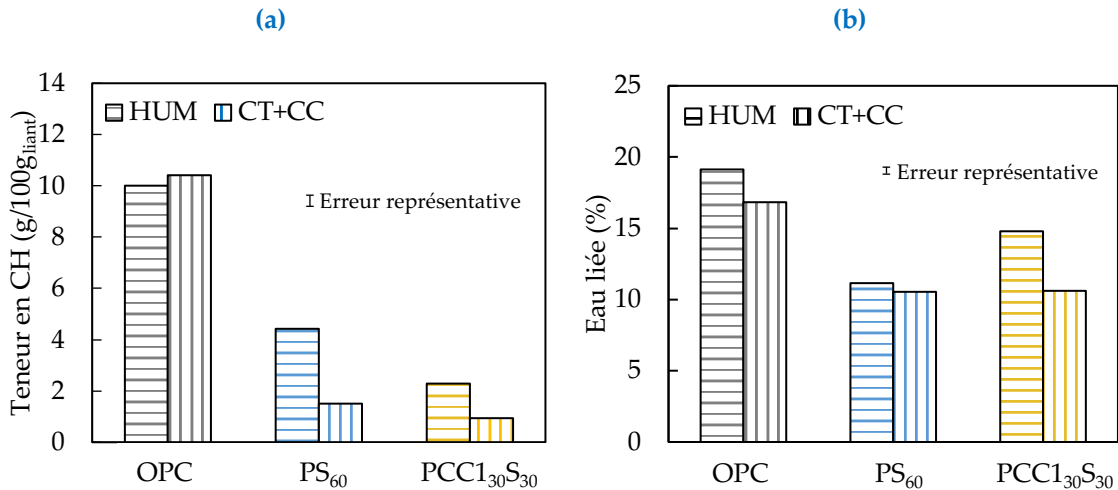


Figure 6. (a) Teneur en portlandite et (b) eau liée des trois mélanges sous les quatre régimes de cure à l'âge de 2 jours.

Cependant, les propriétés du liant ternaire semblent diminuer après une distance du centre de 10 mm, qui coïncide avec le rayon carbonaté. En effet, le module élastique diminue de 15,9 GPa à 12,6 GPa et le module de fluage de 141,0 GPa à 107,4 GPa, avec des propriétés généralement plus élevées par rapport à celles mesurées sur l'échantillon sous cure humide.

Une différence de comportement est remarquée entre les différents liants dans la zone carbonatée des échantillons sous traitement combiné. En général, on remarque que la cure combinée permet le renforcement de la microstructure des liants bas carbone, pour s'approcher de celle de l'OPC.

Nous regardons plus en détails les propriétés dans les zones non-carbonatées des trois liants, sur 10 mm de rayon depuis le centre de l'échantillon OPC, et sur 6 mm pour PS₆₀ et PCC₁₃₀S₃₀ compte-tenu des profils de sections carbonatées (Figure 4). Les propriétés calculées sont résumées dans le Tableau 2. Pour l'OPC, ces propriétés s'approchent de celles mesurées sur la même formule sous cure thermique seule, comme nous le démontrons dans (Bekrine, 2024). En revanche, les propriétés calculées sur les parties non-carbonatées des liants binaire et ternaire sont plus importantes que celles mesurées sur ces mêmes liants que ce soit ceux sous cure thermique ou sous cure humide (Bekrine, 2024). Ceci appuie le fait que l'augmentation de la résistance mécanique est due au renforcement de la microstructure.

Il est intéressant de noter qu'en particulier, la résistance au fluage du mélange ternaire est nettement plus importante que celle mesurée sous cure thermique de 49 %, ce qui montre l'intérêt de la cure combinée pour l'amélioration de la microstructure des liants ternaires.

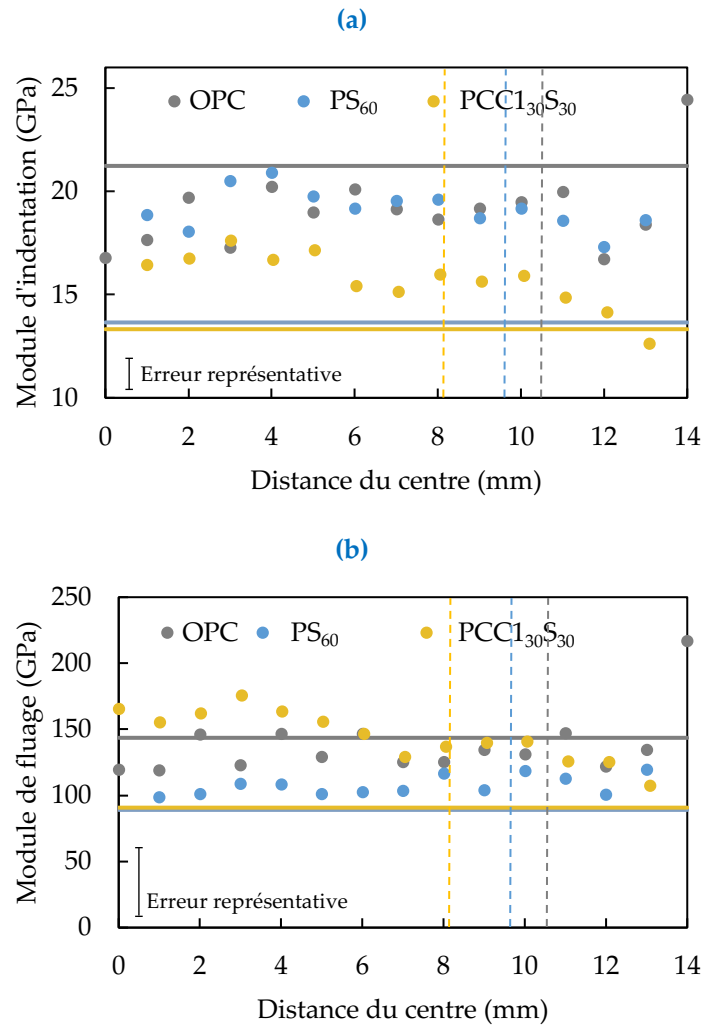


Figure 7. Evolution du (a) module élastique et (b) module de fluage des mélanges étudiés avec la profondeur de pénétration de CO₂ sous cure par carbonatation à 2 jours d'hydratation. Les lignes horizontales présentent la moyenne des propriétés sous cure humide, les marqueurs présentent les propriétés sous cure combinée. Les lignes en pointillés verticales présentent les fronts de carbonatation.

Tableau 2. Propriétés micromécaniques (moyenne ± écart-type) des sections non-carbonatées dans les trois pâtes cimentaires sous cure combinée après 2 jours d'hydratation.

	E_{IT} (GPa)	C_{IT} (GPa)
OPC	$18,9 \pm 1,9$	$131,9 \pm 19,7$
PS ₆₀	$19,6 \pm 2,1$	$105,4 \pm 16,3$
PCC1 ₃₀ S ₃₀	$16,8 \pm 1,3$	$161,7 \pm 23,2$

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons exploré l'effet au jeune âge d'un régime de cure innovant, combinant cure thermique et carbonatation, sur les propriétés de trois formulations : un ciment Portland classique (OPC), un liant binaire avec 60 % de laitier de haut fourneau (PS₆₀), et un liant ternaire

contenant 30 % de laitier et 30 % d'argile calcinée (PCC1₃₀S₃₀). Les résultats montrent que la substitution du clinker par des matériaux alternatifs favorise la fixation de CO₂, atteignant jusqu'à 5,2 % pour le liant ternaire contre seulement 0,9 % pour l'OPC, en corrélation avec les profondeurs de carbonatation mises en évidence par l'indicateur pH.

Sur le plan mécanique, la cure combinée améliore significativement la résistance à la compression au jeune âge (48 h) pour les formulations PS₆₀ et PCC1₃₀S₃₀, avec des gains respectifs de 55 % et 92 % par rapport à une cure classique humide. Cette amélioration est liée à la précipitation de carbonates de calcium, qui renforce la microstructure. L'analyse chimique confirme une diminution marquée de la portlandite, signe d'une carbonatation active.

Les mesures micromécaniques révèlent également un renforcement localisé des propriétés dans les zones carbonatées, en particulier pour le liant ternaire, dont le module de fluage augmente significativement.

Cette étude ouvre de nouvelles voies de recherche pour améliorer les propriétés des matériaux cimentaires modernes à jeune âge, ce qui pourrait être particulièrement utile pour l'industrie de la préfabrication. Afin d'explorer plus avant l'impact du régime de cure proposé, son effet sur d'autres formulations à faible teneur en carbone utilisant d'autres additions minérales pourrait être testé.

REFERENCES

- Andrade, C., Sanjuán, M.Á., 2018. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. *Sustainability* 10, 4806. <https://doi.org/10.3390/su10124806>
- Bekrine, I., 2024. Etude des propriétés mécaniques des liants bas carbone par des approches expérimentales multi-échelles (phdthesis). École centrale de Nantes, Nantes, France.
- Constantinides, G., Ulm, F.-J., 2004. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. *Cement and Concrete Research* 34, 67–80. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00230-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00230-8)
- Escalante-García, J.I., Sharp, J.H., 1998. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part i, neat cements. *Cement and Concrete Research* 28, 1245–1257. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00115-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00115-X)
- Escalante-García, J.I., Sharp, J.H., 1998. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part ii, blended cements. *Cement and Concrete Research* 28, 1259–1274. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00107-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00107-0)
- Han, J., Pan, G., Sun, W., Wang, C., Cui, D., 2012. Application of nanoindentation to investigate chemomechanical properties change of cement paste in the carbonation reaction. *Sci. China Technol. Sci.* 55, 616–622. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4571-1>
- Kaddah, F., Ranaivomanana, H., Amiri, O., Rozière, E., 2022. Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales. *Journal of CO₂ Utilization* 57, 101885. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101885>
- Koytsoumpa, E.I., Bergins, C., Kakaras, E., 2018. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids* 132, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>

- Liu, B., Qin, J., Shi, J., Jiang, J., Wu, X., He, Z., 2021. New perspectives on utilization of CO₂ sequestration technologies in cement-based materials. *Construction and Building Materials* 272, 121660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121660>
- Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E., Lunk, P., 2007. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research* 37, 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.016>
- Oliver, W.C., Pharr, G.M., 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* 7, 1564–1583. <https://doi.org/10/bdv47f>
- Pan, S.-Y., Chiang, P.-C., Pan, W., Kim, H., 2018. Advances in state-of-art valorization technologies for captured CO₂ toward sustainable carbon cycle. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 48, 471–534. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1469943>
- Rostami, V., Shao, Y., Boyd, A.J., 2011. Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing. *Construction and Building Materials* 25, 3345–3355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.025>
- Zhang, D., Ghouleh, Z., Shao, Y., 2017. Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO₂ Utilization* 21, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
- Zhang, T., Ma, B., Jiang, D., Jiang, Q., Jin, Z., 2021. Comparative research on the effect of various mineral admixtures on the early hydration process of cement. *Construction and Building Materials* 301, 124372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124372>