

# Etude de la carbonatation des matériaux cimentaires à base d'un ciment à forte teneur en laitier de haut fourneau

Elodie Piolet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LGCGM, INSA Rennes - 20 Avenue des Buttes de Coësmes CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7, France

**RESUME** Dans le contexte actuel de volonté de réduction des émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel de réduire celles émises par la production du ciment Portland et surtout du clinker. Pour cela, il est possible de diminuer la proportion de clinker du liant en le remplaçant ou en substituant une partie par des déchets ou des co-produits de l'industrie tel que des laitiers de haut fourneau. Cependant, l'utilisation de ces liants modifie le processus d'hydratation et les propriétés physiques et chimiques des matériaux les contenant tel que la porosité, les propriétés de transport... Ces liants à base de laitier doivent donc présenter de bonnes propriétés mécaniques et une bonne durabilité pour répondre aux exigences qui leur seront imposées. En effet, les structures contenant ces ciments peuvent être exposées à l'air ambiant donc à l'humidité, à la carbonatation et simultanément soumises à des contraintes mécaniques. Ces recherches visent à étudier principalement les propriétés de durabilité d'un ciment à très forte teneur en laitier de haut-fourneau (CEM III/C). De plus, l'étude étant inscrite dans le cadre du WG4 du groupe de travail RILEM TC 281-CCC, les effets de la carbonatation sur le comportement mécanique et inversement les effets de la sollicitation mécanique lors du processus de carbonatation accélérée ou naturelle sont étudiés. Différentes concentrations en CO<sub>2</sub> (0,03%, 2% et 20%) et différents taux de chargement sont testés. Les résultats ont montré que le chargement mécanique imposé lors des essais de carbonatation a un impact sur la flèche en flexion et sur l'épaisseur carbonatée ainsi que sur la résistance à la flexion.

**Mots-clefs** Laitier de haut-fourneau, Carbonatation, Flexion 4-points, Retrait, Fluage

## I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre. Le béton et plus particulièrement la production du ciment Portland (CEM I) y contribue grandement. En effet, sa production génère 7% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), selon la GCCA, donc un facteur d'émissions de 866 kgCO<sub>2</sub>éq. /tonne de ciment (AQC, 2021). Or au vu des problématiques environnementales actuelles, il est primordial de réduire cet impact. Pour remédier à cela, il est possible de diminuer la proportion de clinker du liant en le remplaçant ou en substituant une partie par des déchets ou des co-produits de l'industrie tel que des laitiers de haut fourneau granulés (LHF). Les LHF sont des coproduits de la production de l'acier formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Ce sont des laitiers vitrifiés qui sont utilisés pour les liants cimentaires. Ils sont obtenus en faisant subir au laitier en fusion une trempe par de l'eau pour empêcher sa cristallisation. Ces matériaux sont sous forme de poudre fine et sèche qui

possèdent des propriétés hydrauliques latentes et pouzzolaniques. Les LHF nécessitent une activation par ajout de chaux, soude ou gypse (CTPL, 2012). Les effets moyens de la production, du broyage et du transport du laitier de haut fourneau auront un impact de l'ordre de 100 kg CO<sub>2</sub> éq. /t. de laitier de haut fourneau, soit environ 9 fois moins important que la production du ciment Portland (CERIB, 2022). Donc pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liés à la production de ciment portland, il est possible d'utiliser un ciment à très forte teneur en laitier de haut-fourneau tel que le CEM III/C. Ce ciment contient plus de 80% de LHF et est activé avec du ciment portland en faible quantité. Il est déjà connu et utilisé depuis quelques années car il a une bonne résistance aux ions chlorure et aux attaques sulfatiques internes mais de nombreux aspects de ses réactions et propriétés sont encore méconnus. Ces recherches visent à approfondir les connaissances mécaniques et de durabilité sur ce matériau. En effet, les structures contenant ces ciments peuvent être exposées à l'air ambiant donc à l'humidité relative, la carbonatation... et simultanément soumises à des contraintes mécaniques qui peuvent affecter la durabilité.

La carbonatation est un processus naturel influencé par de nombreux facteurs dans lequel le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère diffuse sous forme gazeuse dans les pores du béton et se dissout (von Greve-Dierfeld, S. & al., 2020). Cette dissolution forme un acide au contact de la solution interstitielle du ciment réduisant la valeur du pH du système de 13 à moins de 9 (Valsaraj, K.T., 1995). Lorsque le CO<sub>2</sub> diffuse, il modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Il crée des déséquilibres chimiques, qui entraînent des réactions avec les hydrates de la pâte de ciment (Guiraud, P., 2019). La portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>.CH) réagit avec les ions carbonates formés, créant ainsi des carbonates de calcium :  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$  (équation 1) (Hoyle, 1951, Younsi, A., 2011). Le silicate de calcium hydraté (C-S-H) réagit en créant du carbonate de calcium et un gel de silice :  $(CaO)_n(SiO_2)_2(H_2O)_m + nCO_2 \rightarrow nCaCO_3 + 2(SiO_2).(H_2O)_{\frac{m}{2}}$  (Gendron, F., 2020) (équation 2). Les silicates présents dans le ciment réagissent également :  $3CaO.SiO_2 + 3CO_2 + vH_2O \rightarrow SiO_2.vH_2O + 3CaCO_3$  (équation 3) et  $2CaO.SiO_2 + 2CO_2 + vH_2O \rightarrow SiO_2.vH_2O + 2CaCO_3$  (équation 4) (Papadakis & al., 1989). Ensuite le monosulfoaluminate de calcium (AFm) réagit en produisant du gypse, (Thiery, M., 2005) et enfin le trisulfoaluminate de calcium (AFt) forme de la calcite, du gypse et du gel d'alumine :  $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O + 3CO_2 \rightarrow Al_2O_3.vH_2O + 3(CaSO_4.2H_2O) + 3CaCO_3 + (26 - v)H_2O$  (équation 5) (Nishikawa, T., & al., 1992). De plus les deux principaux composés hydratés du laitier autres que les C-S-H, et qui se carbonatent sont la strätlingite (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>)  $2CaO.Al_2O_3.SiO_2.8H_2O + 2CO_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2Al(OH)_3 + SiO_2$  et l'aluminat de calcium hydraté  $4CaO.Al_2O_3.vH_2O + 4CO_2 \rightarrow 4CaCO_3 + 2Al(OH)_3 + (v - 7)H_2O$  ( $13 \leq v \leq 19$ ) (Houst, Y.F., 1992). Le phénomène de carbonatation peut engendrer des problèmes structurels sur le matériau tel que des fissures et du retrait. En effet, les phases de carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) qui se forment lors de la carbonatation ont un volume plus élevé par rapport à la portlandite contenu dans le matériau. Cela conduit à une diminution de la porosité du béton. L'augmentation de volume des solides est comprise entre 12 % et 19 % selon que le produit de la réaction est de la calcite, de l'aragonite ou de la vaterite (Pihlajavaara, S.E., 1968). Cependant, malgré l'augmentation du volume des phases, ce n'est pas un gonflement mais un retrait qui est observé. Différentes hypothèses ont été émises, notamment que le retrait serait dû à la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium alors que ceux-ci sont soumis à une contrainte de compression (Powers, T.C., 1962). En effet, la carbonatation, en progressant provoque un retrait

non uniforme. L'extérieur du béton a tendance à se retirer, tandis que l'intérieur est stable. Le retrait est compensé par des déformations dues à des contraintes internes, de traction proche de la surface et de compression dans le cœur.

Outre les phénomènes naturels qui peuvent affecter la durabilité des structures, celles-ci peuvent être soumises à des contraintes mécaniques statiques ou cycliques au fil du temps, telles que la compression, la torsion et la flexion, qui peuvent provoquer le fluage des structures. A ce jour, très peu de recherches ont été menées sur le couplage de la carbonatation et d'une contrainte de flexion. Lorsqu'un échantillon est soumis à une charge de flexion, on peut distinguer trois zones différentes. Un plan neutre situé au centre de l'éprouvette sépare la zone de traction sur la partie inférieure de l'éprouvette et la zone de compression sur la partie supérieure de l'éprouvette. Dans ces différentes zones des variations de la microstructure sont observées, le réseau de pores est modifié et les fissures ne sont pas identiques. Il en résulterait des différences dans la vitesse de carbonatation des zones de l'échantillon et dans sa résistance (Liu, Z.Y. & al., 2021).

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail dont l'objectif principal est d'étudier la carbonatation du CEM III/C sous ses différents états (anhydre à hydraté) et à différentes échelles (de la poudre au mortier) ainsi que ses caractéristiques mécaniques et de durabilité (retrait, fluage, carbonatation...). Les effets de la carbonatation sur le comportement en flexion 4-points et inversement les effets de la sollicitation mécanique lors du processus de carbonatation accélérée ou naturelle sont étudiés.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### A. Matériaux

Le ciment étudié est un CEM III/C 42.5 L-LH/SR dont la composition et les propriétés physiques sont données au tableau 1. Les mortiers ont été fabriqués avec un sable siliceux normalisé, de l'eau du robinet et du ciment. Le protocole de préparation est inspiré de la norme EN 196-1. L'impact du couplage mécanique/carbonatation en flexion 4-points est étudié sur des éprouvettes de mortier de  $7 \times 2 \times 28 \text{ cm}^3$ . Le processus de carbonatation naturelle étant long, il a été choisi de réaliser des échantillons fins pour avoir des résultats plus rapidement et un effet significatif du chargement mécanique. Le retrait a été étudié sur des éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Les mortiers ont un E/C=0.5, ils sont vibrés 11 secondes pour assurer une bonne mise en place dans les moules et une relative bonne homogénéité.

**TABLEAU 1. Composition et propriétés physiques des ciments utilisés**

	Rc à 28 jours (MPa)	Perte au feu %	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Ciment Portland	Laitier de haut fourneau
CEM III/C	49	0.9	2.97	15%	85%

Après fabrication, les moules contenant les éprouvettes ont été conservés sous film plastique dans une chambre climatique à  $(98 \pm 2) \%$  de HR et  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 72h. Après démoulage, les échantillons ont subi une période de durcissement telle que prescrite par le comité RILEM TC281 WG4, c'est-à-dire 6 jours dans une solution saturée de chaux à  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  suivi d'une cure de 19 jours dans une salle régulée à  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  et  $(65 \pm 5) \%$  d'HR. Soit une durée de cure totale de 28 jours,

leur âge de maturation. Le durcissement sous l'eau favorise l'hydratation et conduit à des bétons moins poreux donc plus résistants à la carbonatation (Atis, 2003, Ammar & al., 2017).

### B. Méthodes

- Etude du ciment anhydre

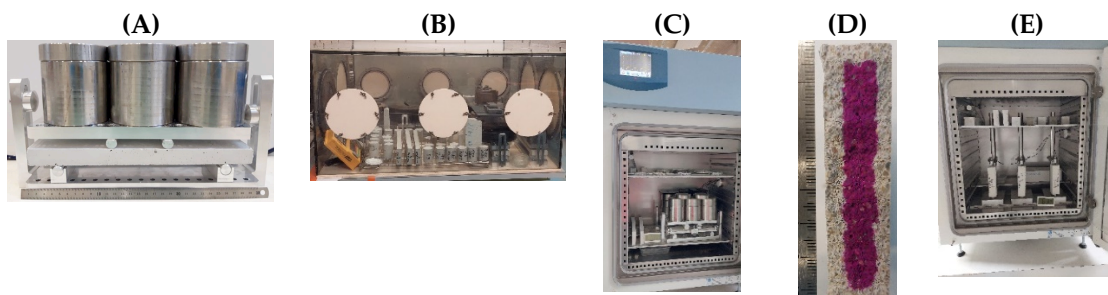
Du ciment anhydre a été mis en carbonatation naturelle et accélérée à 2% et 20% CO<sub>2</sub>, (22±2) °C et (65±5) %HR. Les ciments ont été caractérisés par analyse thermogravimétrique (ATG) et diffraction des rayons X (DRX) à différentes échéances (7, 28, 90 et 224 jours).

- Etude du retrait de carbonatation

Le retrait des échantillons de mortier a été étudié dès le démoulage, pendant la période de maturation des échantillons puis lors d'une maturation en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub> (naturelle et accélérée à 2% et 20%CO<sub>2</sub>) pendant 28 jours à (20 ± 2) °C et (65 ± 5) % d'HR. Des mesures ponctuelles ont été faites avec un dilatomètre et pour les échantillons en carbonatation à 20%CO<sub>2</sub>, des mesures continues ont aussi été faites avec des capteurs LVDT (Figure 1.E). A la fin de l'essai, les éprouvettes sont soumises à la flexion 3-points puis à la compression.

- Etude de l'impact du chargement en flexion

Après maturation, les échantillons utilisés ont été placés à (22±2°C) et à (65±5%)HR dans des cellules de carbonatation contrôlées (Figure 1.B, 1.C). Il a été démontré que le taux de carbonatation est maximal lorsque l'humidité relative est autour de 65% (Houst, Y.F.,1992). Certains échantillons ont été placés dans les cellules sans chargement pour étudier l'impact de la carbonatation sur la résistance mécanique et d'autres ont été placés sur des cadres de flexion 4-points (Figure 1.A) inspiré de la norme NF EN 12390-5 dans la cellule pour étudier le couplage carbonatation/chargement mécanique. Le chargement est maintenu constant pendant la durée de carbonatation. Cette dernière a été fixée à 7 jours pour les essais à 20 %CO<sub>2</sub>, 14 jours pour 2 % de CO<sub>2</sub> et à 196 jours pour la carbonatation naturelle pour éviter la carbonatation totale de la section transversale et pouvoir comparer la profondeur de carbonatation entre les échantillons chargés et non chargés. La variation de la flèche des échantillons chargés est suivie à l'aide de capteur LVDT (Figure 1.C). Différents taux de chargement ont été considérés et un minimum de 4 éprouvettes par condition est testé.



**FIGURE 1.** (A) Dispositif de chargement de flexion 4-points pour l'essai de carbonatation sous charge, (B) Chambre de conservation et de carbonatation naturelle, (C) Cellule de carbonatation à 2% et 20% CO<sub>2</sub>, (D) Echantillon carbonaté naturellement à 196j, (E) Système de mesure du retrait sous carbonatation accélérée

### III. RESULTATS

#### A. Caractérisation physico-chimique du ciment

Le CEM III/C est composé de ciment portland et de laitier de haut-fourneau. Ces différents matériaux anhydres ont été mis en carbonatation naturelle et accélérée pour connaître leur comportement à la carbonatation lorsqu'ils sont bruts. Les résultats montrent que les ciments s'hydratent avec l'humidité ambiante et se carbonatent également tout comme le laitier (figure 2). En effet, les résultats de DTG, pour le laitier brut montrent une très légère variation de la quantité d'eau libre et une faible carbonatation due probablement à la présence de CaO dans le matériau (figure 2 et tableau 2). Pour le CEM I, la disparition de la portlandite (325-425°C) est constatée, ce qui confirme sa carbonatation. De plus pour les deux ciments, le calcul de la teneur massique de CaCO<sub>3</sub> (Tableau 2), montre que la quantité de carbonate de calcium, aragonite (550°C-720°C) et calcite (720°C-950°C) augmente également de façon importante (Lothenbach & al., 2015). La formation d'agglomérat est observée dans les échantillons ce qui confirme la coagulation des grains entre eux. Il en découle que le CEM III est sensible à l'humidité et au CO<sub>2</sub> présents dans l'air. En effet, le taux de CO<sub>2</sub> (figure 2.E, 2.F) influence plus la carbonatation du CEM III que celle du CEM I. De plus à 90j (tableau 2) les variations de masses entre le CEM I et le CEM III sont quasiment identique. En fonction du taux de CO<sub>2</sub> et de la durée de carbonatation, les mêmes phases ne sont pas présentes et leur quantité varie ce qui est également confirmé par les résultats de DRX.

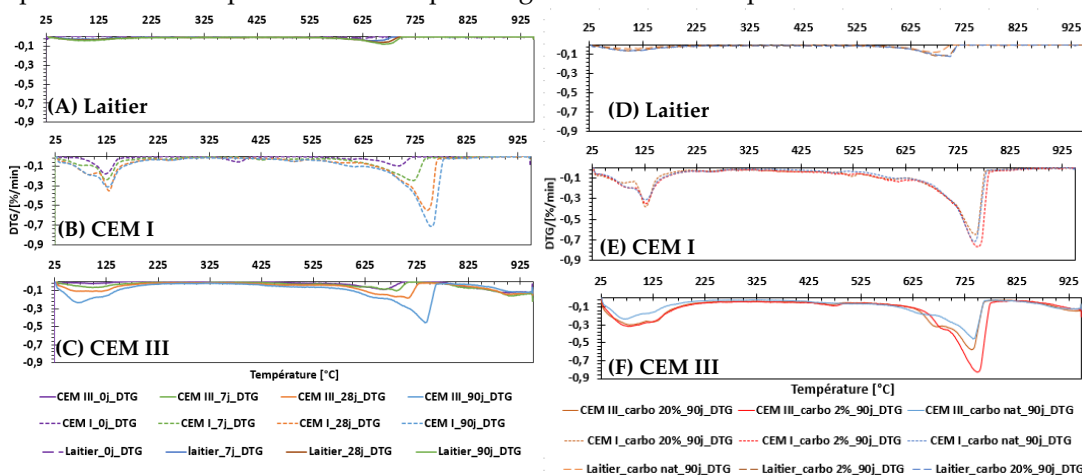


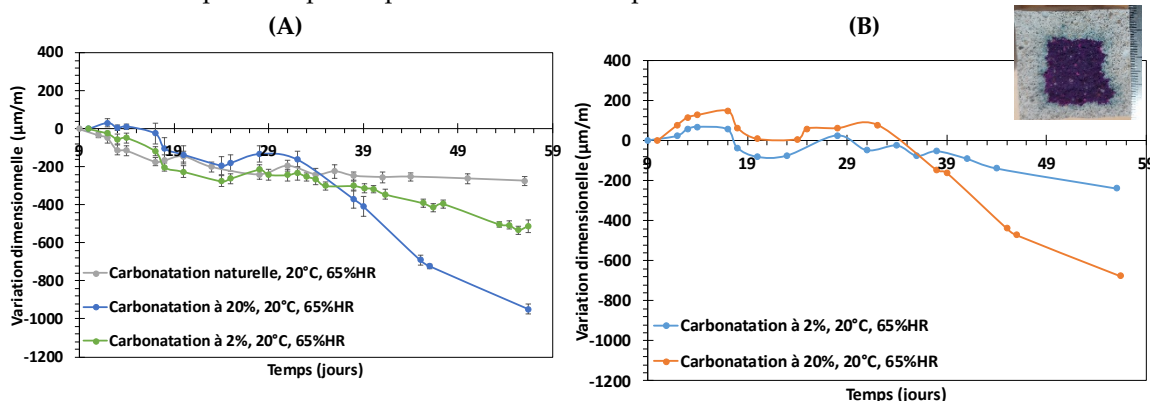
FIGURE 2. Résultats des essais d’ATG à différentes échéances (A, B et C) pour du Laitier, du CEM I et du CEM III/C anhydre carbonatés naturellement et avec différents taux de CO<sub>2</sub> (D, E et F)

TABLEAU 2. Teneur massique en carbonates de calcium dans le laitier, le CEM I et CEM III/C lors de sa carbonatation à l’air à (22±2°C) et à (65±5%)HR

âge de l'échantillon	Δm(total)			m(CaCO <sub>3</sub> ), Aragonite			m(CaCO <sub>3</sub> ), Calcite		
	Laitier	CEM I	CEM III	Laitier	CEM I	CEM III	Laitier	CEM I	CEM III
brut	0,14	-1,8	-2,78	X	0,49	0,41	X	1,08	0,81
7j	-0,7	-4,14	-3,74	0,77	1,01	1,11	0,05	3,62	1,00
28j	-0,93	-6,95	-5,33	1,07	4,75	3,13	0,05	4,97	2,15
90j	-1,14	-8,67	-8,73	1,3	5,51	6,36	0,05	7,23	3,81

*B. Variation dimensionnelle en l'absence de charge extérieure*

La variation dimensionnelle des échantillons a été suivie pendant 56 jours dans différentes conditions. Pour les éprouvettes mises en carbonatation accélérée à 2% et 20%CO<sub>2</sub>, les résultats montrent bien la présence d'un retrait de carbonatation important. En effet les éprouvettes sont dans les mêmes conditions d'humidité et de température et seul le taux de CO<sub>2</sub> varie. Il est observé que le retrait de carbonatation à 2% est 2 fois plus important qu'en carbonatation naturelle et le retrait en carbonatation accélérée à 20%, lui, est environ 4 fois plus important. En carbonatation à 20% de CO<sub>2</sub>, les éprouvettes sont totalement carbonatées à la fin de l'essai alors qu'elles sont carbonatées sur une épaisseur de 1cm environ à 2% de CO<sub>2</sub> (Figure 3.A). De plus, le retrait couplé à la carbonatation accélérée génère une diminution de la résistance à la compression (tableau 3). Des pertes de masse plus importantes sont également constatées dues à la carbonatation des phases telles que les C-S-H qui libèrent de l'eau en se carbonatant (Houst, Y.F., & al., 1989). Pour les essais à 20%CO<sub>2</sub>, une variation dans la pente de la courbe est observée vers 39 jours, moment correspondant à la carbonatation totale de l'éprouvette. Il n'y a ainsi plus de force de compression au centre de l'éprouvette. Le retrait excédentaire dû au retrait de carbonatation a pu être calculé (Figure 3.B). Le retrait augmente lorsque la carbonatation est accélérée. Ces variations dimensionnelles peuvent provoquer des fissures compromettant la durabilité des structures.



**FIGURE 3.** (A) Graphique des résultats de retrait dans différentes conditions, (B) Photo de l'éprouvette carbonatée à 2% après essai et graphique du retrait excédentaire dû au retrait de carbonatation par rapport à la carbonatation naturelle

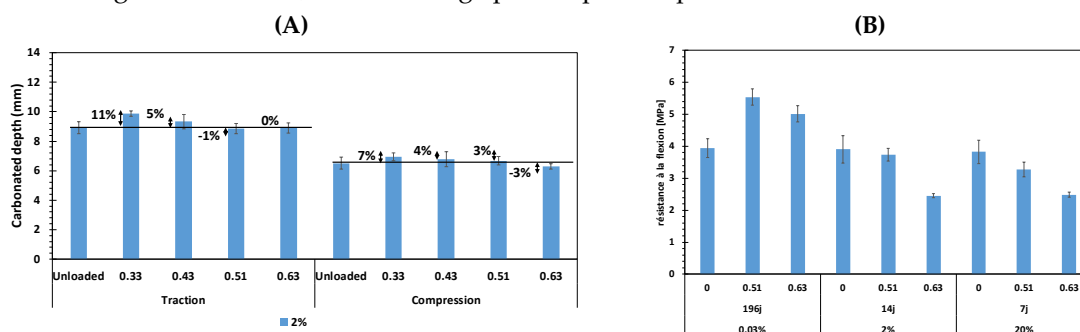
**TABLEAU 3.** Résistance à la compression des éprouvettes 4x4x16cm<sup>3</sup> après maturation et carbonatation

	28 jours	56 jours, 0.03%	56 jours, 2%	56 jours, 20%
Résistance à la compression (MPa)	43.27±0.55	47.71±1.8	41.16±1.03	33.04±1.34

*C. Déformation sous chargement mécanique de flexion 4-point : fluage*

Les échantillons ont été soumis à des contraintes statiques sous différentes masses en flexion 4-points tout en étant également soumis à différents taux de carbonatation. Les éprouvettes ont été retournées pour l'essai, c'est-à-dire que la zone la plus poreuse de l'éprouvette (zone arasé) est mise en traction et la face coffrée de l'éprouvette moins poreuse est mise en compression car une légère différence de porosité est observée sur les échantillons entre le haut (22,11±0,06%) et le bas (20,71±0,05%) à maturation. Un minimum de 4 échantillons a été testés par essai. La figure 4.A montre que le chargement mécanique n'a pas un effet notable sur la profondeur de carbonatation

pour des mortiers de ciment au laitier, contrairement à un effet plus important observé sur des mortiers de ciment portland, d'après Lui & al.. En effet, les mortiers de CEM I se carbonatent moins vite mais s'ils sont chargés, la profondeur carbonatée est plus grande. Alors que la variation de profondeur de carbonatation pour les mortiers CEM III est négligeable. Inversement la carbonatation a un impact important sur la résistance à la flexion car en carbonatation accélérée, les éprouvettes avec une charge de 63% (soit 31kg) par rapport à la résistance à 28 jours ont toutes cassé en quelques jours durant l'essai sous charge, alors qu'en carbonatation naturelle, les éprouvettes ont bien résisté. Cependant l'épaisseur carbonatée est moindre donc à plus long terme les éprouvettes pourraient potentiellement casser ou avec une charge plus importante. En effet, en carbonatation naturelle, les éprouvettes cassent dans les 24h avec une charge de 51kg (soit 104%). De plus, plus la charge appliquée pendant l'essai est élevée, plus la résistance à la flexion est faible (Figure 4.B). Lors de l'essai sous charge, il a été observé une variation de la flèche de l'échantillon due au fluage de ce dernier, avec un fluage plus important pour la carbonatation accélérée.



**FIGURE 4.** (A) Résultats de carbonatation des mortiers au CEM III en fonction du taux de charge (par rapport à la résistance à la rupture) et de la zone de l'éprouvette pour une carbonatation à 2%CO<sub>2</sub> pendant 14 jours, (B) Résultats de résistance à la flexion en fonction de la charge appliquée pour différents taux de CO<sub>2</sub>

## CONCLUSION

Pour conclure, le ciment à fort taux de laitier de haut fourneau est un ciment utilisé pour réduire l'impact environnemental du béton. Tous les constituants qui le composent se carbonatent à l'air en captant du CO<sub>2</sub>, libérant de l'eau et formant une quantité importante de CaCO<sub>3</sub>. L'eau libérée et les carbonates de calcium formés entraînent des variations dimensionnelles pouvant générer des fissures et une perte de résistance. En effet, plus le taux de carbonatation augmente plus le retrait est important. Le retrait est environ 4 fois plus important en carbonatation à 20% de CO<sub>2</sub> qu'en carbonatation naturelle. De plus, en condition d'utilisation les structures peuvent avoir une charge statique imposée. Les résultats ont montré que le chargement de flexion imposé lors des essais de carbonatation a un impact sur la flèche et sur la résistance en flexion mais l'impact est négligeable pour la carbonatation. En effet, plus la charge augmente, plus la résistance à la flexion diminue. Inversement, le taux et la cinétique de carbonatation ont également un impact sur la résistance mécanique (Leducq, 2012, Pons et al., 2008). En effet, pour un même taux de chargement mais une concentration en CO<sub>2</sub> différente, des éprouvettes sont amenées à être endommagées voir ruinées avec une augmentation de la carbonatation. Or la carbonatation, le fluage et le retrait des structures dépendent principalement de l'humidité ambiante et de la composition notamment du ciment. Le fluage dépend également de la maturité du béton lors du premier chargement ainsi que de la durée

et de l'intensité de la charge. Donc lors des formulations de bétons avec ce ciment ayant un plus faible impact pour l'environnement, il faut donc bien prendre en compte tous ces paramètres.

## REFERENCES

- AQC (2021). Béton bas carbone : perspectives et recommandations, 24(9).
- Ammar, B.K.B., Mellas, M., Mezghiche, B. (2017). Caractérisation des bétons d'enrobage pour les bétons de préfabrication soumis à la carbonatation. *Courrier du Savoir*, no. 24, p. 9
- Atis, C.D. (2003). Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, *Construction and Building Materials*, 17 (3), 147-152.
- CERIB, (2022). Impact carbone des laitiers de haut fourneau utilisés dans les ciments.
- CTPL (2012). Les laitiers sidérurgiques, des produits industriels valorisés de longue date. Relations Presse : BC Consultants.
- Gendron, F., (2019). Carbonatation des matériaux cimentaires : étude de la diffusion du CO<sub>2</sub>. Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle. LaSIE.
- Guiraud, P., (2019). Les ciments courants font l'objet de la norme NF EN 197-1 « Ciment – partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ». Infociment.
- Houst, Y.F. (1992). Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie. Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Houst, Y.F., Wittmann, F.H. (1989). Le retrait de carbonatation. Rapport AIPC
- Liu, Z.Y., Van Den Heede, P., De Belie N. (2021). Effect of the Mechanical Load on the Carbonation of Concrete: A Review of the Underlying Mechanisms, Test Methods, and Results, *Materials*. 14(16) (2021) 4407. <https://doi.org/10.3390/ma14164407>
- Leducq, J.-A. (2012). Le fluage, ce compagnon silencieux. Compagnie des experts architectes près la cours d'appel de paris.
- Lothenbach, B., Durdzi, P., Weerdt, K.D., 2015. Thermogravimetric analysis, in: *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. p. 35.
- Nishikawa, T. & al. (1992). Decomposition of synthesized Ettringite by carbonation. *Cement and Concrete Research*. 22 (1). 6-14.
- V.G. Papadakis, V.G. & al. (1989). A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. *Journal of the American Institute of Chemical Engineers*. vol. 1(11). p.110-122.
- Pihlajavaara, S.E. (1968). Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste. *Mat. Constr.*, I. 521 -526.
- Pons, G. Torrenti, J.-M. (2008). Retrait et fluage. Chapitre
- Powers, T.C. (1962). A Hypothesis on Carbonation Shrinkage, *J. PCA R. & D. Lab*. p. 40-50.
- Thiery, M. (2005). Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires – Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées de Paris.
- Valsaraj, K.T., 1995. Elements of environmental engineering. Thermodynamic sand kinetics, CRC Press, 1995, p.649.
- von Greve-Dierfeld, S. & al. (2020). Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Mater Struct.* vol. 53. n° 6. p. 136. doi: [10.1617/s11527-020-01558-w](https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w).
- Younsi, A. (2011). Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales. Thèse de Doctorat. Université de La Rochelle. p. 177.