

Effet de la substitution du clinker sur le comportement à haute température des mortiers cimentaires LC³

Thierry Lobé¹, Anne-Lise Beaucour¹, Javad Eslami¹

¹L2MGC CY Cergy Paris Université, 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise F-95031 Cergy-Pontoise, France.

RESUME : Le ciment LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) représente une nouvelle génération de ciment à plus faible empreinte carbone produit à partir de calcaire, et d'argile calcinée en remplacement partiel du clinker. Le feu constitue l'un des risques les plus graves pour les matériaux cimentaires. Cependant l'influence de la substitution du clinker sur la dégradation de la microstructure et des propriétés mécaniques du matériau cimentaire pour des températures élevées est encore méconnue. Quatre formulations distinctes ont été étudiées, chacune présentant un pourcentage de substitution massique du ciment portland (0%, 40%, 50%, 60%) avec un rapport massique fixe métakaolin : calcaire (2 : 1). Les résistances en compression et traction, la vitesse des ondes ont été évaluées à température ambiante et après divers cycles de chauffage et de refroidissement à 150°C, 300°C, 450°C, 600°C et 800°C. Contrairement au mortier de clinker, les mortiers LC³ présentent une légère perte de résistance en compression dès 150°C plus précoces que les mortiers à base de ciment Portland. Mais entre 400°C et 600°C, les performances mécaniques des mortiers LC³ se maintiennent contrairement à celles du mortier Portland. L'évolution de la microstructure, de la minéralogie et de la décomposition des hydrates en fonction de la température complète l'analyse de l'évolution des propriétés macroscopiques.

Mots-clés : LC³, Mortier, Haute température, Propriétés résiduelles.

I. INTRODUCTION

Le béton est responsable d'environ 8% des émissions mondiales de CO₂, dont le ciment, son principal constituant, est responsable à 98%. Pour pallier ce problème climatique, l'émergence de bétons à faible teneur en carbone, notamment ceux utilisant des liants bas carbone, a mis en lumière de nouvelles gammes de ciments, dont le LC³ ("LC³ – Limestone Calcined Clay Cement," 2024; Scrivener et al., 2018). Ce dernier propose un avantage écologique en réduisant de 40% les émissions de CO₂ de l'industrie cimentaire et un plus économique avec une réduction de 25% des coûts de production (Sharma et al., 2021). En termes de performances mécaniques et de durabilité, plusieurs chercheurs s'accordent à dire que, à température ambiante, le LC³ offre des capacités mécaniques comparables, voire supérieures, à celles du ciment Portland conventionnel (Zunino and Scrivener, 2017; Canbek et al., 2022; Sheikh et al., 2023). Cependant, à ce jour, peu de données traitent de son comportement lorsqu'il est soumis à des températures élevées, comme en cas d'incendie, ce qui freine son intégration dans les normes et son développement industriel. Les études les plus récentes se sont concentrées sur la formulation LC3-50 pour observer ses propriétés mécaniques résiduelles et les comparer à celles du ciment portland pur. Une diminution de la

résistance après des cycles de chauffage-refroidissement en fonction de la température est généralement observée, due à la déshydratation, déshydroxylation et la décarbonatation des différents composés hydratés formés lors de la maturation (Cao et al., 2023; Li et al., 2024; Lin et al., 2021).

L'objectif de cette étude est d'analyser, l'influence du taux de substitution du clinker sur les performances des mortiers cimentaires LC³ soumis à haute température. Pour comprendre, l'incidence de la composition du liant, plusieurs formulations à des taux de substitution en clinker différents ont été élaborées en maintenant constants le rapport $\text{Eau}_{\text{efficace}}/\text{Liant}_{\text{totale}}$ et l'étalement, afin de minimiser les variables susceptibles d'affecter les analyses. Dans un second temps, les éprouvettes de mortier ainsi préparées ont été soumises à divers cycles de chauffage et de refroidissement, allant de la température ambiante à 800°C, pour une caractérisation physique et mécanique résiduelle.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux utilisés

Un sable silico-calcaire 0/4 avec un coefficient d'absorption de 1.2% « S » (St Louis, France), un ciment Portland CEM I 52,5 N « C » (Rochefort, France), un métakaolin Argicem « MK » (Argeco, France), une addition calcaire Betocarb HP-OG « L » (Omya, France) et une addition de sulfate de calcium Alpha-hémihydraté FG 100 « H » (Knauf, Allemagne) ont été utilisés dans les formulations. La maniabilité des mortiers frais a été ajustée par l'ajout d'un superplastifiant « Sp » (Chryso, France). Les caractéristiques des différents constituants sont présentées dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Propriétés des matières premières

| | S | C | MK | L | H | Sp |
|--|-----|-------|-------|------|------|------|
| d50 (µm) | 0-4 | 12,58 | 23,07 | 7,93 | 47,5 | - |
| Masse volumique (g/cm ³) | 2,6 | 3,18 | 2,54 | 2,7 | - | 1,09 |
| Surface spécifique (m ² /g) | - | 4,1 | 17,26 | 0,46 | - | - |

B. Formulation

Quatre mortiers (M-X) ont été élaborés en combinant les matières premières selon des proportions spécifiques. Dans cette nomenclature, X représente la proportion massique de clinker présent dans chaque mélange, soit 100%, 60%, 50%, et 40%. Pour toutes les formulations intégrant des substituants, le rapport massique entre le métakaolin (MK) et le calcaire (L) a été maintenu à 2 :1 (Avet and Scrivener, 2018) . De plus, l'ajout d'hémi-hydrate a permis d'apporter des sulfates aux mélanges LC³ afin de réguler leur prise (Zunino and Scrivener, 2023).

Le sable, relativement humide, a été stocké dans des fûts hermétiques. Avant la préparation des mortiers, son humidité a été évaluée par des mesures de teneur en eau, et son absorption a été prise en compte afin d'ajuster la quantité d'eau ajoutée dans chaque formulation. Par ailleurs, un superplastifiant a été incorporé dans les mélanges, en tenant compte de son impact sur l'apport en

eau, et les propriétés rhéologiques. Les proportions précises de ces formulations sont résumées dans le Tableau 2.

TABLEAU 2. Composition des différentes formulations pour 1 m³ de mortier

| Nomenclature | M-100 | M-60 | M-50 | M-40 |
|--|-------|------|------|------|
| S - Sable 0/4 (Kg) | 1140 | 1132 | 1126 | 1119 |
| C - CEM I 52,5 N (Kg) | 809 | 482 | 399 | 318 |
| MK - Métakaolin (Kg) | - | 195 | 242 | 289 |
| L - Addition calcaire (Kg) | - | 97 | 121 | 145 |
| H - Hémi-hydrate (Kg) | - | 8 | 16 | 23 |
| Sp - Superplastifiant (Kg) | 3,2 | 5,5 | 6,2 | 8,1 |
| E - Eau efficace (Kg) | 307 | 297 | 296 | 294 |
| Eeff/Ltot | 0,38 | | | |
| Etalement (cm) | 20 | | | |
| Masse volumique apparente (Kg/m ³) | 2223 | 2186 | 2177 | 2163 |

C. Malaxage, confection et conservation des éprouvettes

Pour 6 litres de pâte par formulation, le malaxage a été réalisé en plusieurs étapes de sorte de s'approcher de la norme NF P15-437. Tout d'abord, le sable, le ciment et/ou ses matières substituantes, ont été ajoutés dans le bol du malaxeur planétaire pour un premier malaxage de 60 secondes. Ensuite, l'eau adjuvantée a été incorporée au mélange, suivie d'un malaxage supplémentaire de 60 secondes. En fonction de la consistance obtenue, un ajustement éventuel en superplastifiant a été effectué.

Les éprouvettes destinées aux essais ont été moulées en une seule couche dans des moules en polystyrène de dimensions 4 x 4 x 16 cm³. Le mortier frais a été compacté à l'aide d'une table vibrante (fréquence = 50Hz ; durée : environ 15 secondes). Le lendemain, les éprouvettes ont été démoulées, puis immergées dans l'eau pendant un mois afin d'optimiser au mieux les réactions pouzzolaniques latentes. Elles ont ensuite été retirées, enveloppées dans des chiffons humides, placées dans des sacs plastiques étanches, puis transférées dans une enceinte climatique maintenue à une température de 20±4°C et une humidité relative de 70±5%), où elles ont été conservées pendant une période de maturation de deux mois.

D. Essais réalisés à l'état frais

Essai d'étalement : La consistance des mortiers frais a été évaluée par un essai d'étalement, conformément à la norme NF EN 12350-5. Ces essais ont été réalisés dans les 5 minutes suivant le malaxage. Les valeurs d'étalement obtenues étaient de 20 ± 1 cm pour tous les mortiers, attestant d'une bonne ouvrabilité. La masse volumique à l'état frais a également été mesurée, conformément à la norme NF EN 12350-6.

E. Essais réalisés à l'état durci

Evolution de la perte de masse : pour évaluer la perte de masse des mortiers après chauffage, la masse des échantillons a été mesurée avant et après leur exposition à un cycle de chauffage-refroidissement. La perte de masse (%) a été calculée selon l'équation suivante :

$$\text{perte de masse (\%)} = \frac{m1 - m2}{m1} * 100 \quad (1)$$

Où, m1 représente la masse moyenne de trois éprouvettes prismatiques avant chauffage ; m2 la masse moyenne des mêmes 3 éprouvettes prismatiques après le chauffage.

Vitesse des ultrasons : La vitesse de propagation des ultrasons a été mesurée à l'aide d'un équipement Pundit Lab-Proceq, en déterminant le temps de transit de l'onde (t en μ s) entre les deux extrémités des échantillons de 16 cm de longueur (L). La vitesse des ultrasons (V en m/s) a été calculée en divisant L par t. La valeur retenue est la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque éprouvette.

Résistance à la traction par flexion 3 points et résistance à la compression : les essais mécaniques ont été réalisés à l'aide d'une presse de cimentier Quantech de chez 3R dont la capacité est de 8 kN pour la flexion et 250 KN pour la compression, conformément à la norme NF EN 196-1.

Essai de chauffage/refroidissement : les échantillons de mortier ont été soumis à différents cycles de chauffage et de refroidissement, de la température ambiante à 150°C, 300°C, 450°C, 600°C et 800°C. Chaque cycle comprenait une phase de montée en température à une vitesse de 1°C/min, un palier isotherme de 2 heures puis une phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante, selon une rampe théorique de -1°C/min. Le four utilisé permettait l'insertion de consignes automatiques via son module de pilotage, ajustant sa puissance de chauffage grâce à son thermocouple de détection thermique pour respecter au mieux la courbe de température. Il était également équipé d'un système de brassage de l'air afin d'assurer une bonne répartition de la chaleur au sein de l'enceinte. Des thermocouples de type K ont été placés dans le four afin de suivre l'évolution de la température en temps réel.

Analyse thermogravimétrique (ATG) : une analyse thermogravimétrique a été réalisée à l'aide d'un appareil Jupr STA 449 F1 développé par Netzsch. Chaque matière première (environ 100 mg) a été soumise à une vitesse de chauffage de 10°C/min de 20°C à 1100°C sous une atmosphère inerte (azote).

III. RESULTATS

A. Perte de masse

A l'état frais, les teneurs en eau totales des quatre formulations M-100, M-60, M-50, M-40 sont respectivement de 14,4%, 14%, 14,2% et 14,4%. Après les cycles de chauffage-refroidissement, la perte de masse observée peut s'expliquer par le départ progressif de l'eau, même à des températures supérieures à 150°C.

La figure 1. illustre la perte de masse résiduelle des différents mortiers soumis à des températures élevées. Les courbes révèlent trois principales phases de diminution de masse :

De la température à 150°C : Les pertes de masse sont respectivement de 9%, 10%, 11% et 12% pour M-100, M-60, M-50 et M-40. Ces pertes s'expliquent par l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores capillaires, à l'eau adsorbée à la surface des particules solides ainsi qu'à l'eau chimiquement liée de certains hydrates. Les pertes de masse sont plus importantes pour les mortiers à base de LC³ et augmentent avec le taux de substitution du clinker. Etant donné que la teneur en eau totale à l'état frais est similaire pour les quatre mortiers, ces différences pourraient être attribuées à une moindre consommation d'eau pour l'hydratation dans le LC³ par rapport au clinker. En effet, le filler calcaire et le métakaolin n'ayant pas d'activité hydraulique, une plus grande quantité d'eau libre demeure dans les mortiers LC³, entraînant ainsi des pertes massiques plus élevées à cette première phase de chauffage.

Entre 150°C et 600°C : La perte de masse est relativement moins prononcée dans cette plage de température. Cette perte de masse est liée à la déshydratation des hydrates jusqu'à 300°C et à la déshydroxylation de la portlandite autour de 500°C. A ce stade, les pertes de masse atteignent respectivement 12%, 13%, 12%, 13% pour M-100, M-60, M-50 et M-40 à 450°C.

De 600°C à 800°C : L'augmentation significative de la perte de masse observée, est attribuée à la décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO₃), avec des valeurs de perte de masse atteignant 18% pour M-100, 18% pour M-60, 18% pour M-50 et 20% pour M-40 à 800°C.

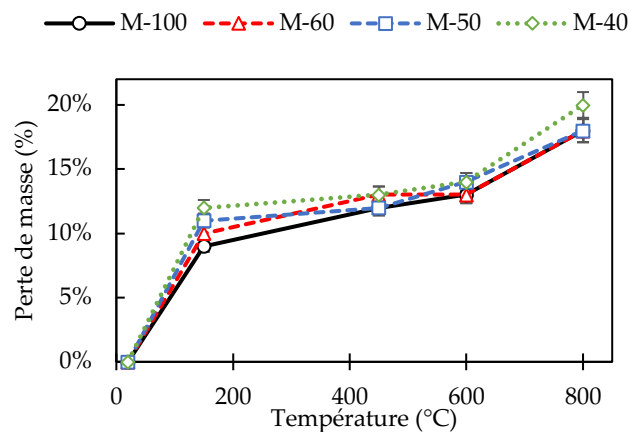


FIGURE 1. Evolution de la perte de masse des mortiers en fonction de la température

B. Vitesse des ultrasons

La figure 2. présente l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores dans les mortiers M-100, M-60, M-50, M-40 soumis à des températures élevées. A température ambiante, les vitesses mesurées sont respectivement de 4504 m/s, 4394 m/s, 4326 m/s et 4271 m/s. Entre la température ambiante et 450°C, une diminution linéaire notable de la vitesse est observée, attribuée à l'augmentation de la porosité due aux transformations physiques et chimiques (31% pour M-100, 33% pour M-60, 38% pour M-50 et 33% pour M-40). Dans l'intervalle de 450°C à 600°C, la baisse s'accroît, avec des réductions de vitesse atteignant 58% pour M-100, 59% pour M-60, 58% pour M-50, et 55% pour M-40 à 600°C par rapport aux valeurs initiales. Le mortier avec 100% de CEM I

montre une chute de vitesse plus importante. Au-delà de 600°C, M-100 continue de montrer une diminution linéaire, tandis que les formulations LC³ (M-60, M-50, M-40) montre un ralentissement de la perte de vitesse, avec des valeurs à 800°C de 86% pour M-100, 66% pour M-60, 67% pour M-50, 72% pour M-40. Ces variations suggèrent que les mortiers LC³ conservent une meilleure intégrité structurelle à 800°C comparativement au mortier au CEM I.

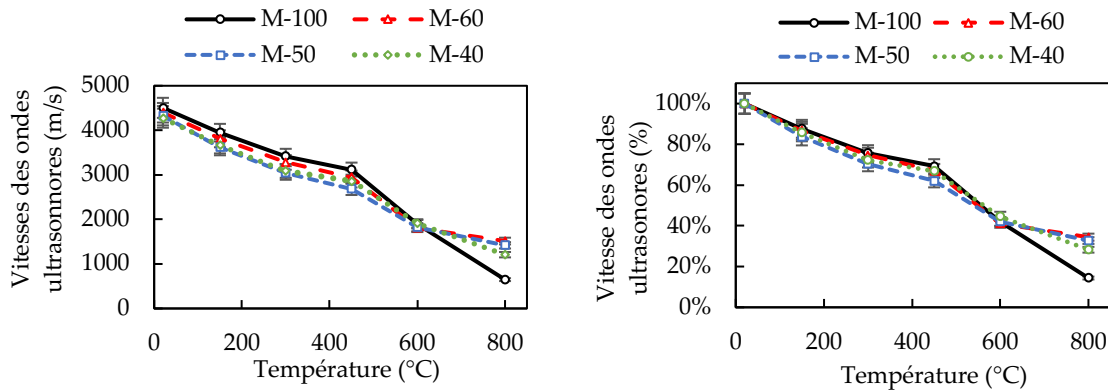


FIGURE 2. Evolution de la vitesse ultrasonique des mortiers en fonction du cycle de chauffage-refroidissement : (à gauche) en absolu et (à droite) en relatif

C. Résistances mécaniques résiduelles

Résistances résiduelles à la compression : La figure 3. montre qu'à température ambiante, les résistances en compression des mortiers M-100, M-60, M-50 et M-40 sont respectivement de 72,7 MPa, 74,7 MPa, 63,6 MPa et 58,7 MPa. Dès 150°C, les mortiers LC³ (M-60, M-50, M-40) subissent une diminution de résistance, avec des valeurs de 73,8 MPa, 59,6 MPa, 48,6 MPa et 49,4 MPa, tandis que le mortier CEM I (M-100) reste relativement stable. Entre 450°C et 600°C, la résistance en compression du mortier CEM I diminue plus fortement que celle des LC³, en accord avec l'évolution de la vitesse des ondes. Ainsi, à 600°C, les résistances résiduelles en compression des mortiers convergent et se situent entre 39% et 46% de leur résistance initiale.

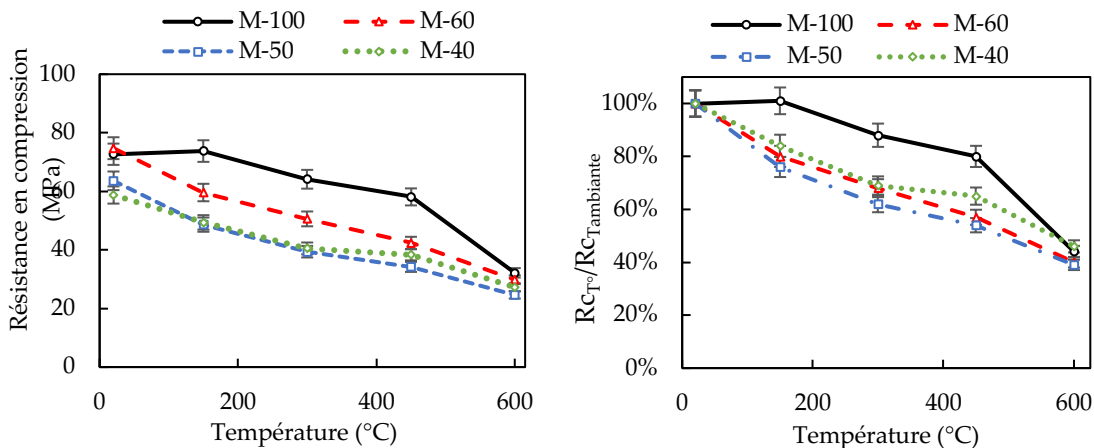


Figure 3. Evolution des résistances en compression résiduelles en fonction de la température : (à gauche) en absolu et (à droite) en relatif

Résistances résiduelles à la traction par flexion : La figure 4. montre qu'à température ambiante, les résistances des mortiers M-100, M-60, M-50 et M-40 sont respectivement de 8,6 MPa, 9,4 MPa, 8,3 MPa et 7,9 MPa. A 150°C, tous les mortiers conservent une résistance relativement stable. Au-delà de 300°C, une diminution notable de cette résistance est observée, principalement due aux transformations physico-chimiques internes des mortiers cimentaires exposés à de hautes températures. Comme pour les précédentes propriétés mécaniques, la perte de résistance est plus accentuée entre 450°C et 600°C pour les M-100.

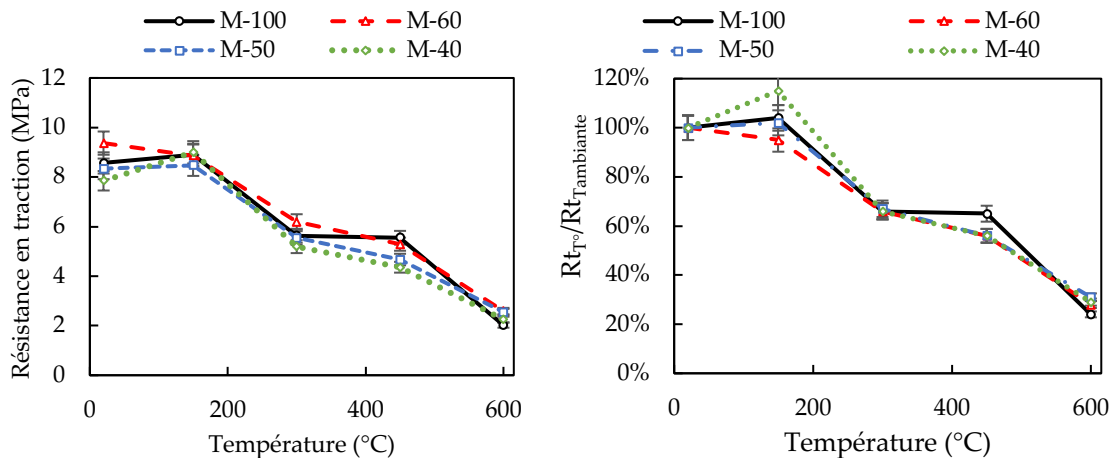


Figure 4. Evolution des résistances en traction par flexion résiduelles en fonction de la température : (à gauche) en absolu et (à droite) en relatif

D. Observations post-exposition thermique

A température, ambiante, les formulations présentent des variations d'aspect, notamment une intensification de la teinte rouge avec l'augmentation du taux de substitution. Cette coloration est attribuée à la présence d'oxydes de fer dans le métakaolin, conférant aux échantillons LC³ une teinte rouge pâle.

Après exposition à des températures élevées, tous les échantillons tendent à s'éclaircir progressivement. La décoloration blanche grisâtre des mortiers est attribuée à la décomposition des composants calcaïques des agrégats et de la pâte de cimentaire (Gunjal and Kondraivendhan, 2021; Li et al., 2024; Khan and Abbas, 2015).

Aucune fissure n'a été observée sur les mortiers soumis à des cycles de chauffages inférieurs à 450°C. à partir de 450°C, de fines fissures visibles à l'œil nu apparaissent sur l'ensemble des échantillons. Entre 600°C et 800°C, les fissures deviennent plus prononcées, indiquant des dommages significatifs limitant les mesures mécaniques pos-chauffage au-delà de 800°C en raison de la perte de cohésion des échantillons. Après exposition à 800°C, les échantillons se sont progressivement désagrégés en quelques jours à température ambiante (figure 4.c).

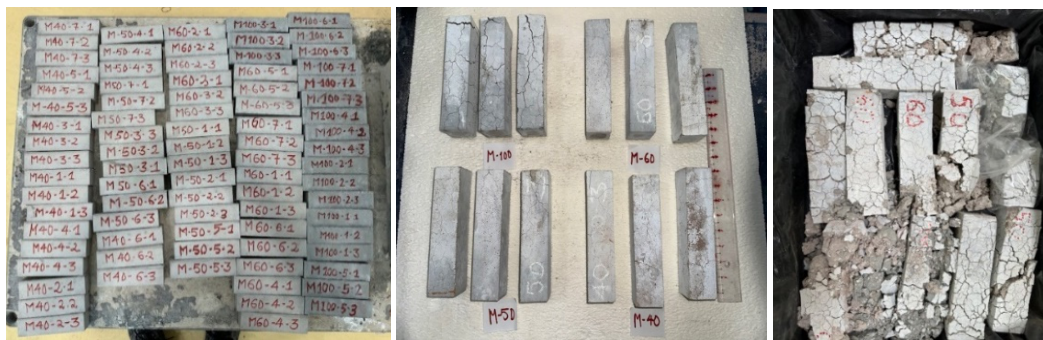


Figure 5. Images d'échantillons avant et après un cycle de chauffage : (à gauche) avant l'essai de chauffage, (au milieu) immédiatement après 800°C, (à droite) quelques jours après 800°C

E. Analyse thermogravimétrique et dérivée (ATG/DTG)

Les résultats de cette analyse sont présentés dans la figure ci-dessous sous forme de courbes de perte de masse (TG) et de sa dérivée (DTG) en fonction de la température (voir figure ci-dessous). Cinq zones distinctes ont été identifiées en fonction des variations thermiques :

$T^{\circ} < 150^{\circ}\text{C}$: Les pertes de masse observées dans cette plage de température sont attribuées à l'évaporation de l'eau libre et à la déshydratation des produits d'hydratation tels que les phases C-(A)-S-H et l'ettringite (Cao et al., 2023).

$150^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 300^{\circ}\text{C}$: Dans cette plage, la déshydratation des phases C-(A)-S-H se poursuit. Par ailleurs, des pics d'épaulement autour de 170°C, sont liés à la décomposition du monosulfate et des carboaluminates (Hay and Celik, 2023).

$300^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 400^{\circ}\text{C}$: De légers pics détectés vers 350°C sont attribués à la décomposition de l'hydrogrossulaire en faible quantité et de la brucite (Lin et al., 2021).

$400^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 460^{\circ}\text{C}$: Les pics endothermiques aux environs de 450°C correspondent à la déshydroxylation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Les résultats montrent que la quantité de portlandite diminue avec la substitution en clinker. Pour les mélanges M-50 et M-40 toute la portlandite a disparu à l'âge des essais. En effet, cette substitution consomme de la portlandite existante pour produire davantage de phases C-(A)-S-H et de carboaluminates (Cao et al., 2023).

$700^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 850^{\circ}\text{C}$: Dans cette plage, les pics autour de 800°C sont associés à la décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO_3) présent initialement et de la portlandite carbonatée. L'ajout de poudre de calcaire a conduit à des intensités de décarbonatation plus importantes dans les mélanges LC³ que dans le ciment Portland pur (CEM I). La présence de calcite dans le mélange CEM I s'explique par la présence de calcaire dans le sable et la carbonatation d'une partie de la portlandite.

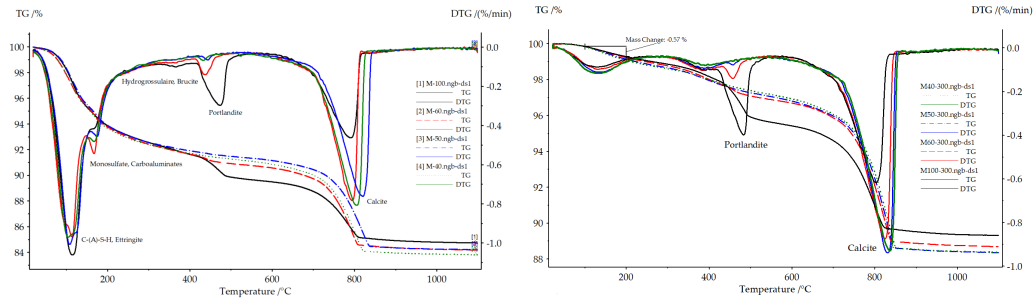


Figure 6. Courbes d'analyse thermogravimétrique à température ambiante (à gauche) et après un cycle de chauffage-refroidissement à 300°C (à droite)

La figure 6b. présente une analyse ATG sur les échantillons ayant subi un cycle de chauffage-refroidissement de 300°C. Une légère perte de masse 0,6% est observée entre 100°C et 200°C, ce qui peut sembler surprenant. Cette diminution pourrait être attribuée à une réhydratation partielle survenue lors du refroidissement ou à la présence d'eau piégée dans les pores du mortier, soumise à des tensions capillaires plus élevées.

IV. CONCLUSION

Cette étude s'est intéressée à l'effet de la substitution du clinker par du métakaolin et du calcaire sur le comportement de mortier soumis à hautes températures. Trois mortiers LC³ ont été étudiés avec une substitution respective en clinker de 40%, 50% et 60%. Ces mortiers ont été comparés à un mortier de ciment Portland. Les principales conclusions sont les suivantes :

A température ambiante, la substitution du clinker jusqu'à 40% permet d'obtenir un mortier aux propriétés mécaniques comparables à celles d'un ciment portland pur, contribuant ainsi à la réduction de émissions de gaz à effet de serre.

Dès 150°C, une diminution des résistances mécaniques en compression est observée dans tous les mélanges LC³, contrairement aux échantillons à base CEM I. Cette diminution de résistance en compression s'accompagne d'une diminution de vitesse des ondes et d'une perte de masse. Les analyses ATG ne montrent toutefois très peu de différences de comportement entre les mortiers jusqu'à 400°C hormis la décomposition de carboaluminat et d'AFm.

Aux environs de 450°C, les mortiers LC³ maintiennent mieux leur résistance mécanique. Leur teneur modérée en portlandite, observée sur les courbes ATG, semble contribuer à éviter des dommages supplémentaires sévères. Ainsi, vers 600°C, leurs résistances mécaniques sont très proches de celles des mortiers à base de ciment classique. A 800°C, l'ensemble des mortiers présente d'importantes fissurations rendant impossible les tests mécaniques. Plusieurs jours après refroidissement, on observe une désagrégation du matériau suite à la réhydratation par l'air de la chaux formée suite à la décarbonatation de la calcite.

En résumé, cette étude a mis en évidence l'évolution des mortiers à base de ciment LC³, apportant des compléments sur leurs aptitudes pour une utilisation normative dans les nouvelles constructions. Des mesures plus approfondies, notamment sur l'évolution des propriétés thermiques et thermomécaniques telles que la porosité, le coefficient de dilatation thermique, la

chaleur massique et la conductivité thermique, sont nécessaires pour compléter et lever les interrogations sur l'évolution de leurs performances face à la haute température.

REFERENCES

- Avet, F., Scrivener, K., 2018. R-041 CIMENTS CALCAIRE ARGILES CALCINÉES – LIMESTONE CALCINED CLAY CEMENTS (LC3). nomad 2018.
- Canbek, O., Washburn, N.R., Kurtis, K.E., 2022. Relating LC3 microstructure, surface resistivity and compressive strength development. *Cement and Concrete Research* 160, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106920>
- Cao, Y., Wang, Y., Zhang, Z., Ma, Y., Wang, H., 2023. Thermal stability of limestone calcined clay cement (LC3) at moderate temperatures 100–400 °C. *Cement and Concrete Composites* 135, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104832>
- Gunjal, S., Kondraivendhan, B., 2021. High temperature impact on calcined clay-limestone cement concrete (LC3). *Materials Today: Proceedings* 61. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.300>
- Hay, R., Celik, K., 2023. Performance enhancement and characterization of limestone calcined clay cement (LC3) produced with low-reactivity kaolinitic clay. *Construction and Building Materials* 392, 131831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131831>
- Khan, M.S., Abbas, H., 2015. Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering* 19, 1825–1831. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-1092-z>
- LC3 – Limestone Calcined Clay Cement, 2024. URL <https://lc3.ch/> (accessed 5.29.24).
- Li, Y., Liu, Z., Jiang, J., 2024. Microstructure and macroscopic properties of low-carbon concrete subjected to elevated temperature: State-of-the-Art Review. *Journal of Building Engineering* 108731.
- Lin, R.-S., Han, Y., Wang, X.-Y., 2021. Macro–meso–micro experimental studies of calcined clay limestone cement (LC3) paste subjected to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites* 116, 103871. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103871>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO2 ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS 114, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., Scrivener, K., 2021. Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research* 149, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Sheikh, M.D., Jamil, T., Ayub, T., Khan, A.-R., Bilal, S.M., Hu, C., 2023. Comparative Study on LC³-50 with OPC Concrete Using Raw Materials from Pakistan. *Advances in Materials Science and Engineering* 2023, e5503670. <https://doi.org/10.1155/2023/5503670>
- Zunino, F., Scrivener, K., 2017. Reactivity and performance of limestone calcined-clay cement (LC3) cured at low temperature.
- Zunino, F., Scrivener, K.L., 2023. Recent advances in understanding the hydration of limestone calcined clay cements (LC3), in: *Further Reduction of CO₂-Emissions and Circularity in the Cement and Concrete Industry*, 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023 - ICC2023. Presented at the 16th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2023), Thailand Concrete Association, pp. 98–104. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000636037>