

Retrait chimique et endogène de mortiers alcali-activés

Moussa Ka^{1,4}, Laurent Molez², Benoit Bissonnette³, Josée Duchesne³, Christophe Lanos¹, Luc Courard⁴

¹ LGCGM, Université de Rennes, Rennes, France

² LGCGM, INSA de Rennes, Rennes

³ CRIB, Université Laval, Québec (QC), Canada

⁴ ArGEnCo (GeMMe), Université de Liège, Liège, Belgique

RESUME Dans cet article, les travaux visent à étudier l'influence de la nature du précurseur (métakaolin, cendres volantes de charbon et laitier de haut fourneau granulé broyé) sur les retraits chimique et endogène de pâtes et mortier alcali-activés à un âge précoce. Deux activateurs (sodium, silicate de sodium) ont été utilisés. Les résultats montrent que le retrait dépend principalement du type de liant utilisé. Les différents mélanges de pâte testés présentent des cinétiques de retrait chimique assez différentes. Les mélanges à base de laitier activé par une solution alcaline ne montrent pas la même tendance que la pâte OPC de référence, présentant un gonflement précoce. Le retrait chimique de la pâte OPC est globalement le plus élevé. Les mortiers activés par les alcalis préparés avec du métakaolin subissent un retrait chimique plus élevé que ceux utilisant des cendres volantes. Le mortier à base de métakaolin a un retrait endogène inférieur à celui du mortier OPC de référence, mais il a également été observé qu'il augmentait avec le E/L. Avec des rapports E/L comparables, le retrait endogène des mortiers de laitier activé par une solution alcaline s'est révélé plus important. La composition minéralogique du précurseur, le rapport E/L, la surface spécifique et le rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de la solution alcaline sont autant de paramètres importants pour obtenir des matériaux cimentaires alcali-activés avec des caractéristiques de constructibilité appropriées.

Mots-clefs laitier de haut fourneau, métakaolin, cendre volante, mortier alcali-activé, retrait chimique, retrait endogène

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le secteur de la construction en béton est confronté à l'épuisement progressif des ressources naturelles et à la difficulté croissante d'y accéder, mais également aux grandes quantités de CO_2 émises pour la fabrication du ciment. Environ 8% des émissions totales de CO_2 seraient attribuables à la production du ciment Portland (Zhang et al., 2014 ; Andrew, 2018). Le monde scientifique se penche depuis une vingtaine d'années sur des alternatives au ciment portland traditionnel. Les matériaux cimentaires alcali-activés, généralement fabriqués avec des sous-produits industriels, semblent constituer à cet égard une alternative intéressante (Pacheco-Torgal et al., 2012). Malgré le nombre important d'études consacrées aux AAM ces dernières

années, certains aspects nécessitent encore des recherches plus approfondies. Ce travail a pour objectif principal l'étude du retrait chimique et endogène au jeune âge de pâtes et mortiers alcali-activés.

II. ETUDE EXPERIMENTALE

A. Matériaux

Dans le cadre de cette étude, différents précurseurs ont été étudiés : un laitier granulé et moulu (Écocem), un laitier de grade 80 (HF-80) issu de Stoney Creek au Canada, une cendre volante de charbon, un métakaolin (Argical M1000) et un métakaolin à haute réactivité produit au moyen d'un procédé breveté (Burgess Optipozz). Un ciment Portland (CEMI 52.5 N CE CP2 NF) a été utilisé comme référence. Les Tableaux 1 et 2 présentent les compositions chimiques et les propriétés physiques du liant de référence et des précurseurs.

TABLEAU 1. Composition chimique du liant de référence et des précurseurs

Exemple	Ciment CEMI	Laitier Ecocem	Laitier HF-80	Cendre volante	Métakaolin Argical M1000	Métakaolin Burgess Optipozz
SiO ₂	21.4	37.31	37.74	50.76	55	50
Al ₂ O ₃	5.5	10.24	10.75	26.10	40	48
CaO	64.2	43.21	36.20	2.70	0.30	0.18
MgO	1.70	6.10	12.62	2.63	0.21	-
Fe ₂ O ₃	2.1	0.60	0.5	6.21	1.41	-
TiO ₂	0.2	0.50	0.91	1.14	1.50	0.50
K ₂ O	0.4	0.60	0.49	3.51	0.82	0.42

TABLEAU 2. Caractéristiques physiques du liant de référence et des précurseurs

Exemple	Ciment CEMI	Laitier Ecocem	Laitier HF-80	Cendre volante	Métakaolin Argical M1000	Métakaolin Burgess Optipozz
Densité (kg/m ³)	2.94	2.90	2.67	2.25	2.42	2.21
Finesse (m ² /g)	0.35	0.44	0.47	0.30	17.12 (BET)	18.35 (BET)

Les matériaux étudiés sont des pâtes et des mortiers de ciment. Le dosage en eau est ajusté de façon à garantir une iso-rhéologie aux différents mélanges. Le mortier de référence (C001) est un mortier de ciment ordinaire à base de ciment portland (S/L = 3, E/L = 0,50). Les mortiers L001 et L002, à base des laitiers Écocem et HF-80 respectivement, ont été activés avec du silicate de sodium liquide (pour les deux mélanges : E/L = 0,48 ; liant/activateur = 6,24). Le mortier référencé CV01, formulé avec la cendre volante, a été activé avec une solution de NaOH (5M) (E/L = 0.35). Les mortiers référencés GP1 et GP2 à base des métakaolins Argical M1000 et Burgess Optipozz, ont été activés avec un mélange de silicate de sodium solide et de soude à 32% (E/L = 0,61 et 0,65 ; S/L voisins de 3 (+/- bien contrôlé), et un rapport molaire SiO₂/Na₂O est de 1.14.

B. Campagne d'essais

Les essais de retrait chimique ont été réalisés conformément à la norme ASTM C1608-17 en mesurant le changement de volume interne de la pâte de liant hydraulique résultant de l'hydratation. Une quantité de pâte de liant hydraulique est introduite dans un récipient étanche immergé dans un bain d'eau maintenue à 23°C. La variation de volume est mesurée à l'aide d'un tube capillaire. Le retrait chimique par unité de masse de liant au temps t est calculé à partir de la masse de liant dans le flacon et la variation du niveau d'eau dans le tube capillaire au cours du temps. Les mesures sont répétées pour deux échantillons.

Le retrait endogène au jeune âge des mélanges de mortiers étudiés a été mesuré conformément à la procédure d'essai ASTM C1698-19. Immédiatement après le mélange, le mortier frais a été coulé dans un tube ondulé, scellé à l'aide de deux bouchons d'extrémité et placé dans une chambre climatique maintenue à 23°C. L'éprouvette ainsi constituée est positionnée horizontalement et est supportée longitudinalement par deux tiges. À l'aide d'un dilatomètre, on mesure les changements de longueur à une extrémité de l'échantillon. Les mesures sont comparées à la longueur d'une barre de référence. On enregistre toutes les heures la longueur de l'échantillon. Les mesures sont répétées pour deux échantillons.

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La Figure 1 présente les résultats de retrait chimique obtenus sur les pâtes. La pâte de ciment C001 possède le retrait chimique le plus élevé. L'évolution du retrait chimique des pâtes à base de métakaolin ou de cendre volante est essentiellement différente de celle de C001 (Li et al. 2019). En générale, les écarts entre les contractions chimiques de différentes pâtes peuvent être attribuées aux différences entre leurs produits d'hydratation/géopolymérisation. Le retrait chimique de la pâte GP2 à base de métakaolin est plus élevé que celle de GP1. Cette différence s'explique par le rapport E/L élevé de GP2. Le retrait chimique augmente avec l'augmentation du rapport E/L (Zhang et al. 2013). En effet, plus la quantité d'eau présente est grande, plus la distance entre les grains du liant augmente. Le retrait chimique plus élevé de la pâte GP2 peut être également attribué à la dissolution plus rapide du MK Optipozz par rapport au MK Argical M1000. Un rapport E/L élevé facilite grandement la dissolution du MK et, dans l'intervalle, dilue la concentration en espèces dissoutes (Li et al. (2019)). Les pâtes L001 et L002 à base de laitiers activés ont le retrait chimique le plus faible. Leur gonflement initial pourrait être dû à un effet thermique (dilatation thermique) ou à la formation retardée de produits de réaction. Les pâtes contenant de plus grandes quantités de laitier ont un dégagement total de chaleur cumulé élevé (Lee et Lee, 2015). Les différents mélanges ont des cinétiques de retrait chimique assez différentes. Les retraits chimiques dépendent essentiellement du type de liant utilisé.

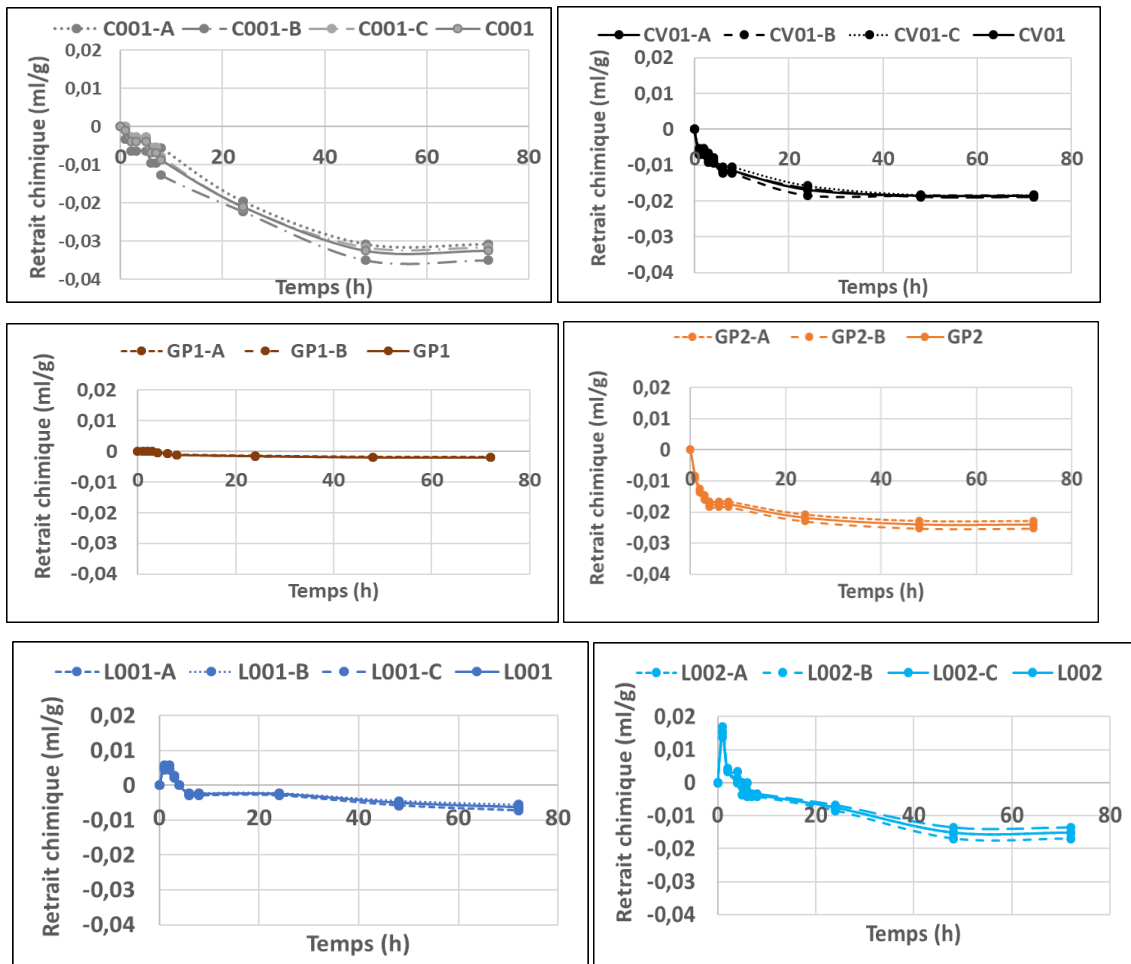


FIGURE 1. Retrait chimique des pâtes de ciment Portland et alcali-activés

La Figure 2 présente les résultats de retrait endogène obtenus sur les mortiers. Les résultats montrent que les retraits endogènes des mortiers GP1 et GP2 à base de métakaolin sont plus faibles que ceux à base du ciment Portland, de cendre volante et de laitiers activés. Le retrait du mortier CV1 à base de cendre volante est plus élevé de celui du mortier de ciment portland. Cette différence s'explique par le rapport E/L plus faible du mortier CV1. Malgré que GP2 ait un rapport E/L plus élevé, la réactivité plus élevée du métakaolin Burgess Optipozz a engendré un retrait au jeune âge légèrement plus élevé que le mortier GP1. De tous les mélanges, les mortiers L001 et L002 à base de laitier activé ont les retraits endogènes les plus élevés. L001 et L002 ont les mêmes dosages mais des retraits endogènes très différents liés à la nature du liant utilisé. Le retrait endogène augmente rapidement avec la diminution du rapport E/L et plus le liant est fin, plus il développe un retrait endogène important et précoce (Tazawa et al. 1995).

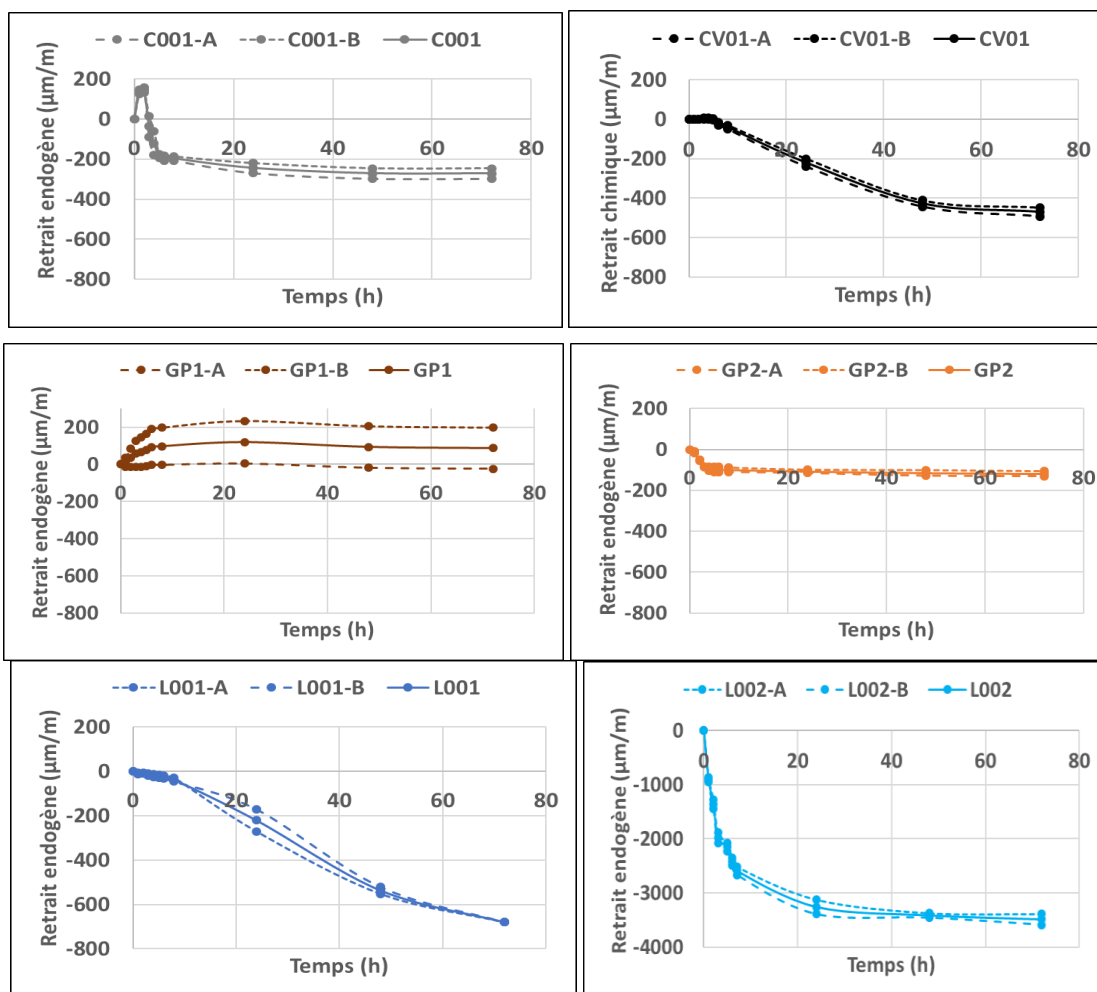


FIGURE 2. Retrait endogène des mortiers de ciment Portland et alcali-activés

IV. CONCLUSION

L'étude présentée dans ce document a montré que la pâte de ciment Portland possède le retrait chimique le plus élevé. Hormis les mortiers de laitier activé, les mortiers de cendre volante ont le retrait endogène le plus élevé. Les laitiers activés se distinguent par un gonflement chimique initial et un retrait chimique faible mais un retrait endogène plus important. Les mortiers à base de métakaolin se caractérisent par des retraits chimiques et endogènes faibles. Le retrait dépend principalement du type de liant utilisé. Ainsi, la composition minéralogique, le rapport E/L, la surface spécifique et le rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de la solution alcaline sont les paramètres essentiels à l'obtention de laitiers activés et de géopolymères aux caractéristiques attractives.

REFERENCES

Z. Zhang, J.L. Provis, A. Reid, H. Wang (2014). Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials* 56, 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081>

R.M. Andrew (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 195-217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>

F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A.F. Camões, M. Jamshidi, Y. Ding (2012). Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue. *Construction and Building Materials* 400-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>

Z. Li, S. Zhang, Y. Zuo, W. Chen, G. Ye. (2019). Chemical deformation of metakaolin based geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 120, 108-118

N.K. Lee, H.K. Lee (2015). Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/ slag paste. *Construction and Building Materials*. 81, 303-312

T. Zhang, P. Gao, R. Luo, Y. Guo, J. Wei, Q. Yu (2013). Measurement of chemical shrinkage of cement paste: Comparison study of ASTM C 1608 and an improved method. *Construction and Buildings Materials*, 48, 662-669

E. Tazawa, S. Miyazawa, T. Kasai (1995). Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol 25, No 2, pages 288-292

ASTM C1608-17, Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste

ASTM C1698-19, Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar.