

Formulation d'un liant alcali-activé pour des blocs de construction biosourcés

Laila Benbahloul^{1,2}, Jonathan Page¹, Chafika Djelal¹, Mohamed Waqif², Latifa Saâdi²

¹ Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

² Univ. Cadi Ayyad, Laboratoire des Matériaux innovants, Energie et Développement Durable (IMED-Lab), Marrakech, Maroc

RESUME Ce travail vise à étudier l'effet de l'ajout de laitier de haut fourneau (LHF) avec des grandes proportions sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un liant alcali-activé à base de métakaolin (MK) et le silicate de sodium. Afin d'améliorer les performances du matériau, l'étude consiste à optimiser le dosage de LHF et les conditions de cure. Les résultats de l'étude à l'état frais ont révélé que l'ajout de LHF a amélioré la réaction d'activation en élevant la quantité de chaleur cumulée et en réduisant le temps de prise. A l'état durci, l'incorporation de LHF a montré un effet favorable sur la résistance à la compression grâce à la réactivité élevée du LHF prouvée par la calorimétrie. De plus, l'élévation de la température de cure du liant favorise la réaction d'activation. Ceci génère des contraintes thermiques au cours du durcissement, entraînant des fissurations et des porosités, et par conséquent une réduction de la résistance à la compression.

Mots-clés Liant alcali-activé, métakaolin, laitier de haut fourneau.

I. INTRODUCTION

Les blocs de construction biosourcés suscitent un intérêt croissant en raison de leurs multiples avantages énergétiques et environnementaux. Grâce à leurs performances hygrothermiques, ces blocs contribuent à l'isolation thermique et la diminution de la consommation d'énergie dans le bâtiment en réduisant la dépendance aux systèmes du chauffage et de la climatisation. De plus, l'utilisation de ressources naturelles, renouvelables et biodégradables permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la fabrication de ces blocs, tout en diminuant la quantité de déchets, ce qui atténue l'impact environnemental du secteur de la construction (Ntimugura et al., 2020). Les blocs biosourcés ont fait l'objet de plusieurs études approfondies et détaillées dans la littérature, que ce soit pour leur fabrication, leurs propriétés et leurs applications potentielles (Amziane and Collet, 2017; Page et al., 2017; Talibi et al., 2024). Malgré les performances et les avantages de ces blocs, l'utilisation des liants conventionnels, tels que la chaux et le ciment dans leur fabrication présentent certains inconvénients. En particulier, des problèmes d'hydratation, des durées longues pour le durcissement et du risque d'épuisement des matières premières (Bumanis et al., 2020; Chabannes et al., 2015; Delannoy et al., 2020). Pour remédier à ces défauts, il est impératif de développer un liant alternatif durable.

Dans ce contexte, le liant alcali-activé peut constituer une solution prometteuse pour la confection des blocs biosourcés. Les liants alcali-activés sont des matériaux relativement nouveaux, ils sont obtenus suite à une réaction chimique entre un précurseur d'aluminosilicate et un activateur alcalin. Par définition, le précurseur désigne une poudre pouzzolanique riche en silice et alumine. Ce précurseur peut être un produit naturel sous forme d'argile ou d'un déchet industriel tels que les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau. L'activateur est un composé chimique soluble dans l'eau, donnant des cations alcalins (Na^+ et K^+) avec un pH élevé (Provis, 2018).

Les liants alcali-activés ont été largement étudiés dans la littérature. Leurs propriétés à l'état frais et à l'état durci peuvent être modifiées en fonction du précurseur, de l'activateur et des conditions de cure. Plusieurs précurseurs ont été étudiés tels que les cendres volantes, le métakaolin (MK), les laitiers de haut fourneau (LHF) et d'autres déchets industriels (Nawaz et al., 2020). En effet, les liants à base de cendres volantes nécessitent des températures élevées pour le durcissement et le développement de la résistance mécanique, alors que les liants à base LHF provoquent un temps de prise très rapide. De plus, il induit un phénomène de l'efflorescence ce qui affecte la durabilité du matériau. Les matériaux alcali-activés à base de MK seule sont très collants ce qui affecte la maniabilité (Hasnaoui et al., 2019). L'utilisation d'un mélange des précurseurs dans la formulation des liants alcali-activé est une solution pratique pour optimiser les propriétés finales de ces matériaux en exploitant les avantages complémentaires de différents précurseurs. A cette fin, des mélanges entre les cendres volantes/MK, les cendres volantes/ LHF et le LHF/MK ont été étudiés.

Le laitier de haut fourneau est défini en tant qu'un sous-produit issu du processus de la fabrication de la fonte. Il est incorporé dans le ciment pour remplacer partiellement le clinker et aussi pour améliorer les performances mécaniques à long terme des composites cimentaires (Cheah et al., 2021; Page et al., 2021). Dans les matériaux alcali-activé, le laitier a été mélangé avec d'autres précurseurs afin d'améliorer les propriétés de ces matériaux. Récemment, (Zhu et al., 2021) ont étudié l'effet de l'ajout de LHF sur des liants alcali-activés à base de MK avec des pourcentages entre 0% et 40%. Les résultats ont révélé que la substitution du MK par le LHF a amélioré la réaction, en favorisant la formation de gel C-S-H et en augmentant la résistance à la compression. Cet effet positif de LHF a été rapporté par d'autres auteurs (Akturk et al., 2022; Zakira et al., 2023).

Pour obtenir des propriétés optimales du liant, le contrôle de la température de cure est essentiel. (Hardjito et al., 2008) ont étudié l'effet de la température de cure sur les propriétés mécaniques des matériaux alcali-activés. Des températures entre 65 °C et 80 °C ont été examinées. Les meilleures résistances mécaniques ont été obtenues à une température de 65 °C. En outre, les températures élevées peuvent avoir des effets négatifs, tels que la formation de fissures ou la réduction des propriétés mécaniques. Alors que les températures basses provoquent une cinétique lente de la réaction et des résistances mécaniques faibles. Il est préférable de choisir des températures supérieures à la température ambiante et inférieures à 65 °C pour améliorer la réaction et avoir des bonnes performances mécaniques.

L'objectif globale de ces travaux est la fabrication d'un matériau biosourcé à base d'un liant alcali-activé et d'anas de lin sous forme des Blocs Biosourcés Compactés (BBC). A cette fin, il est nécessaire de faire une étude préliminaire sur la formulation des liants alcali-activés. Cet article aborde principalement les travaux menés sur la formulation d'un liant alcali-activé caractérisé par un temps de prise court et une résistance mécanique élevée. Ce liant est formulé à base de MK, de LHF

et de silicate de sodium. Cette étude porte sur l'optimisation du rapport MK/LHF et de la température de cure. Les aspects évalués à l'état frais incluent le suivi de la cinétique de la réaction et le temps de prise. A l'état durci, l'étude a été menée sur la porosité accessible à l'eau, la masse volumique apparente et la résistance à la compression.

II. PREPARATION DES MATERIAUX ALCALI-ACTIVES

A. Précurseurs

Dans cette étude, le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (LHF) sont les deux précurseurs choisis pour la formulation des matériaux alcali-activés en raison de leur composition chimique riche en silicates et en aluminates et de leur réactivité élevée.



FIGURE 1. Illustration de LHF et MK utilisés : a) LHF ; b) MK

Le Tableau 1 présente la composition chimique en pourcentage massique de LHF et MK. Le laitier est caractérisé par une masse volumique de $2900 \pm 30 \text{ kg/m}^3$ et une surface spécifique supérieure à $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$. La masse volumique du MK varie entre $2500 \pm 100 \text{ kg/m}^3$. Ces caractéristiques ont été données par les fournisseurs.

TABLEAU 1. Composition chimique en pourcentage massique de LHF et MK

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
LHF	35,3	10,5	0,4	41,6	7,3	0,7	0,1	0,21	0,47
MK	69,8	21,6	2,2	0,3	0,2	1	0,2	0,1	0,3

B. Activateur

L'activateur alcalin utilisé dans cette étude est une solution de silicate de sodium. Le choix de cet activateur est basé sur sa capacité à avoir une prise rapide et des résistances mécaniques élevées (Cheah et al., 2021). La solution d'activation finale est caractérisée par un rapport SiO₂/Na₂O de 1,5 et une concentration massique de 35% (Zhu et al., 2021). Cette solution est obtenue par le mélange entre les silicates de sodium avec un rapport SiO₂/Na₂O de 3,4, l'hydroxyde de sodium (pureté > 99 % en poids) et de l'eau. L'activateur a été équilibré à la température ambiante avant la réaction. L'ajout de l'activateur par rapport au précurseur est ajusté d'après la littérature pour bien optimiser les performances finales du matériau. Le rapport activateur/précurseur est maintenu à 0,55 pour toutes les formulations (Mohamed et al., 2022).

C. Malaxage

Le LHF est incorporé dans un matériau alcali-activé à base de MK à des pourcentages massiques de 0%, 30%, 50%, 70% et 100%. Ces taux d'ajout sont choisis pour mieux comprendre l'effet de LHF à faible et à grande teneur sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des mélanges. Le Tableau 2 présente les pourcentages du MK et du LHF des échantillons élaborés.

TABLEAU 2. Pourcentages massiques du MK et LHF dans les liants

CODE	0LHF	30LHF	50LHF	70LHF	100LHF
Teneur de LHF (%)	0	30	50	70	100
Teneur de MK (%)	100	70	50	30	0

Le mélange est effectué dans un malaxeur d'une capacité de 5 litres pour toutes les formulations, il est réalisé en deux étapes (Fig. 2). Tout d'abord, le mélange à sec de MK et LHF avec une vitesse lente. Puis, l'ajout de l'activateur suivi par le malaxage avec une vitesse rapide pendant deux minutes. Le liant final obtenu a une texture identique au ciment.

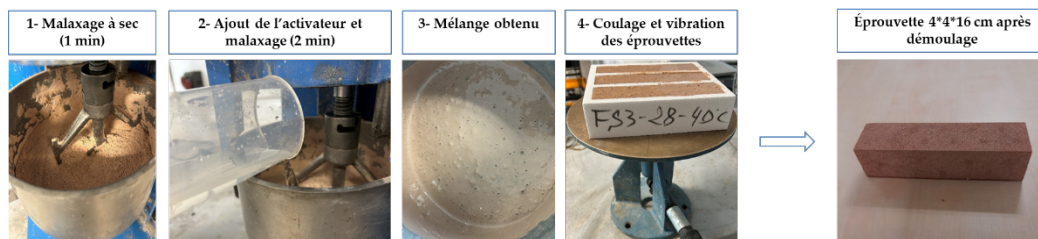


FIGURE 2. Procédure du malaxage et mise en forme du liant alcali activé

Après le malaxage, les mélanges ont été coulés dans des moules de dimensions 4×4×16 cm, et ont été vibrés ensuite pendant 10 secondes afin d'éliminer les bulles d'air emprisonnées dans le matériau. Les moules ont été recouverts par un film plastique pour éviter une éventuelle dessiccation. Afin d'étudier l'effet de la température de cure sur les propriétés du liant, les échantillons ont été séparés en deux groupes. Le premier groupe est placé dans l'étuve à une température de 40 °C, et le deuxième à une température de 60 °C pendant 24h. Après le durcissement, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans une chambre humide (HR > 80% et température ambiante) jusqu'à 7 jours et 28 jours. Etant donné l'absence de normes pour la caractérisation des matériaux alcali-activés, les caractérisations ont été effectuées selon les normes de ciment. Ainsi, la caractérisation à l'état frais est menée sur la calorimétrie isotherme à conduction et le temps de prise selon la norme NF EN 196-3. A l'état durci les propriétés mesurées sont la porosité accessible à l'eau suivant la norme NF P18-459 et la résistance à la compression selon la norme NF EN 196-1.

III. PROPRIETES A L'ETAT FRAIS

Les propriétés à l'état frais ont été évaluées par la calorimétrie isotherme à conduction et le temps de prise. Etant donné que la réaction d'activation est exothermique, au cours de cette réaction, des flux de chaleur se libèrent. L'essai de la calorimétrie permet de mesurer cette chaleur libérée au cours du temps, de suivre la cinétique et le processus de la formation des hydrates. De plus, cet essai peut constituer une méthode quantitative pour mesurer la réactivité des produits de la réaction en enregistrant leur chaleur libérée. Parallèlement, le temps de prise permet de déterminer la marge du temps pendant laquelle le mélange peut être manipulé et moulé avant que le durcissement ne devienne significatif. Ainsi, cet essai fournit des indications sur le temps approprié pour la fabrication des BBC, lors du mélange du liant avec les particules végétales avant son temps de la fin de prise.

A. Cinétique de la réaction d'activation

Pour évaluer l'effet d'ajout de LHF sur l'activation, le suivi de la réaction a été réalisé sur toutes les formulations à une température de 20 °C. Le principe de l'essai repose sur la mesure de la chaleur dégagée lors de la réaction en se basant sur deux capteurs reliés à un échantillon inerte et à l'échantillon à analyser. Le flux de chaleur est calculé en comparant les flux libérés par les deux échantillons. Le flux de chaleur libéré pendant les premières 48 heures de la réaction est mesuré à l'aide d'un calorimètre isotherme (I-Cal 2000 HPC). Afin de garantir un test représentatif, immédiatement après le mélange, les échantillons ont été introduits dans le calorimètre. Les flux de chaleur instantanés et cumulés, libérés au cours du temps sont donnés dans la Fig.3. Deux pics exothermiques sont observés pendant la période d'enregistrement. Un premier pic net apparaît immédiatement après le mélange, précisément après une minute pour toutes les formulations, suivi d'un second pic large qui se superpose parfois au premier. Le premier pic est attribué à la dissolution du précurseur après l'ajout de la solution d'activation. Cette dissolution est expliquée par l'adsorption de l'activateur sur la surface des particules du précurseur, puis les anions OH⁻ commencent à attaquer les liaisons Si-O-Si et Al-O-Al, en libérant les monomères d'Al et de Si. Lorsque les concentrations de ces monomères et d'autres petites espèces dissoutes atteignent un niveau critique dépassant les conditions de saturation dans l'environnement alcalin, la polycondensation entre l'Al et le Si commence, et par conséquent le deuxième pic exothermique apparaît (Akturk et al., 2022; Zhu et al., 2021). Pour les formulations 100LHF et 70LHF, les deux pics sont superposés ainsi que le flux de chaleur instantané reste constant pendant les 15 premières minutes de la réaction. Ces constatations peuvent être expliquées par le chevauchement entre la dissolution et la polycondensation, en indiquant que la polycondensation commence au cours de la dissolution. L'intensité du dégagement de chaleur maximal du premier pic augmente d'une manière significative à mesure que la teneur de LHF augmente dans le mélange, ce qui correspond à une dissolution élevée des précurseurs, et par conséquent une amélioration de la réaction. En effet, cette amélioration de la réaction d'hydratation avec l'ajout de LHF résulte de la teneur élevée du calcium dans le mélange. Le calcium en phase vitreuse donne une tendance accrue au désordre de la structure ce qui augmente la réactivité (Li et al., 2010).

Le dégagement de chaleur cumulé au cours de la réaction a été déterminé par l'intégration de la courbe du flux de chaleur (Fig. 3 (b)). Le mélange 100LHF présente le dégagement de chaleur cumulé le plus élevé, tandis que l'incorporation du MK dans les mélanges réduit les valeurs du dégagement de la chaleur. Ces constatations indiquent une formation de produits d'hydratation tels que le C-S-H et C-(A)-S-H plus importante lorsque la proportion de LHF est élevée.

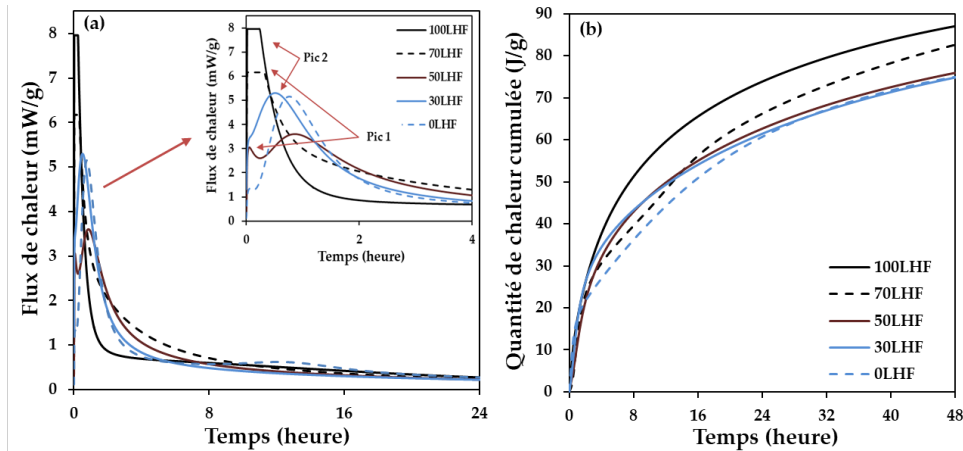


FIGURE 3. Résultats de la calorimétrie : a) flux de chaleur instantané ; b) quantité de chaleur cumulée

B. Temps de prise des liants alcali-activés

L'essai du temps de prise a été réalisé conformément à la norme NF EN 196-3 sur toutes les formulations à température ambiante en utilisant le dispositif Vicat. Il consiste à déterminer le début et la fin de la prise. La Fig. 4 montre les temps de prise initiaux et finaux des pâtes alcali-activées en fonction des teneurs en laitier. Les résultats montrent que les temps sont diminués d'une manière significative avec l'augmentation du pourcentage de LHF. Les études antérieures ont rapporté des résultats similaires (Kabay et al., 2021; Zhu et al., 2021). Ces temps de prise courts observés peuvent être liés à la forte réactivité du laitier par rapport au MK prouvée par la calorimétrie. Ce qui accélère la réaction d'hydratation et initie le processus du durcissement. En se basant sur ces résultats, le temps disponible pour formuler des blocs biosourcés doit être inférieur au début de prise. Pour la formulation 70LHF, ce temps est autour de 20 minutes.

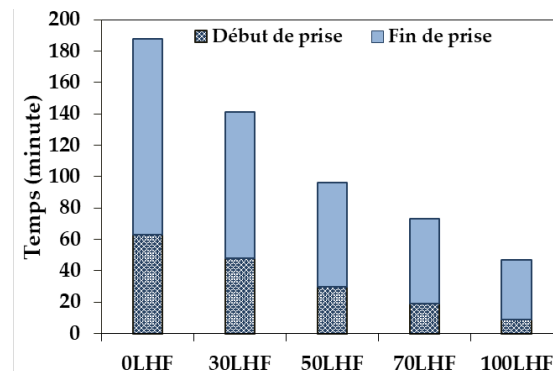


FIGURE 4. Temps de prise initiaux et finaux en fonction de la teneur du LHF

IV. PROPRIETES A L'ETAT DURCI

A. Propriétés physiques : Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente

L'incorporation de LHF dans les liant alcali-activés à base de MK, peut influencer sur la porosité et la masse volumique apparente. Ces caractéristiques peuvent à leur tour impacter les performances mécaniques.

La porosité accessible à l'eau et la masse volumique sont déterminées par pesée hydrostatique selon la norme NF P18-459 après 28 jours de cure. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105 °C pendant 24h. Ils sont ensuite introduits dans une enceinte sous vide pendant 4h et immergés par l'eau pendant 44h. La porosité accessible à l'eau (ε) et la masse volumique apparente (ρ_d) sont obtenues à l'aide de l'Eq.1 et de l'Eq.2, respectivement :

$$\varepsilon = \left(\frac{m_{air} - m_{sèche}}{m_{air} - m_{eau}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\rho_d = \left(\frac{m_{sèche}}{m_{air} - m_{eau}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Avec m_{air} est la masse de l'échantillon à l'état saturé, m_{eau} est la masse dans une balance hydrostatique et $m_{sèche}$ est la masse après le séchage.

La Fig. 5 illustre la masse volumique et la porosité en fonction de la teneur de LHF. Les résultats montrent une augmentation de la masse volumique apparente avec l'incorporation de LHF. Il semble que cette augmentation soit liée à la masse volumique initiale de LHF élevée à 2900 ± 30 kg/m³ par rapport à celle de MK située entre 2400 et 2600 kg/m³. Les études antérieures ont rapporté des masses volumiques comprises entre 1200 et 1800 kg/m³ pour des liants alcali-activés à base de MK et entre 1700 et 1950 kg/m³ pour des liants alcali-activés hybrides (Zulkifly et al., 2021). Contrairement à la masse volumique, la porosité a subi une diminution avec l'ajout de LHF. Les valeurs les plus basses de la porosité correspondent à la formulation 100LHF. En effet, la diminution de la porosité dans les mélanges riches en LHF est probablement attribuée à la précipitation de calcium sous forme de Ca(OH)₂ dans les pores (Chindapasirt et al., 2014). Pour toutes les formulations élaborées, l'élévation de la température de cure de 40 °C à 60 °C, induit à une réduction de la masse volumique apparente et une augmentation de la porosité. Des résultats analogues ont été rapportés par (Kubba et al., 2018). Ils ont interprété ce résultat par la formation du gel C-S-H avec une microstructure moins dense, entraînant une augmentation des vides et des pores. Cette augmentation de la porosité à 60 °C peut être expliquée par les fissurations observées dans les éprouvettes séchées à cette température.

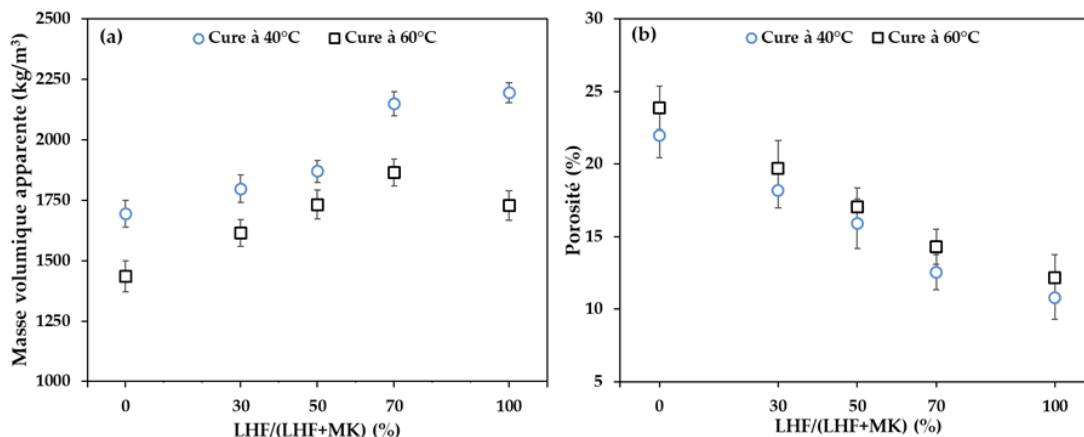


FIGURE 5. Propriétés physiques en fonction de la teneur en LHF et la température de cure : a) masse volumique ; b) porosité

B. Résistances à la compression

La résistance mécanique a été déterminée par l'essai de la compression conformément à la norme EN 196-1. L'essai a été effectué sur des échantillons de dimensions 4 x 4 x 8 cm dans une presse hydraulique avec une capacité de charge de 250 kN.

Trois éprouvettes de chaque échantillon ont été soumises à une charge croissante avec une vitesse de chargement de 2,4 kN/s jusqu'à la rupture. Les résistances à la compression après 7 et 28 jours des différentes formulations séchées à 40 °C et 60 °C sont données dans la Fig. 6. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression quelque soit le pourcentage d'ajout LHF par rapport au MK pour les deux températures de cure. A la température de 40 °C, la résistance à la compression de 28 jours a augmenté de 26,38 MPa à 74,67 MPa pour les formulations 0LHF et 70LHF, respectivement. Cette amélioration notable peut être interprétée par la réactivité élevée du LHF par rapport à celle de MK prouvée par la calorimétrie, ce qui induit à une dissolution plus rapide permettant la formation des hydrates C-S-H et C-(A)-S-H, par conséquent une résistance initiale élevée indépendamment de l'alcalinité (Mohamed et al., 2022; Zakira et al., 2023).

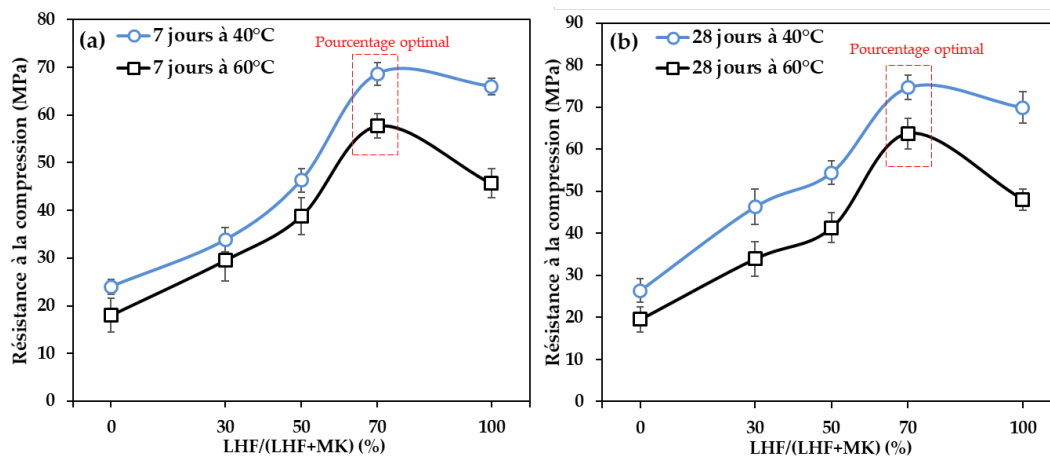


FIGURE 6. Résistances à la compression en fonction de la teneur en LHF et la température de durcissement : a) 7 jours ; b) 28 jours

C. Effet de température de cure

L'élévation de la température de durcissement favorise la réaction d'activation et contribue à des résistances mécaniques élevées (Mo et al., 2014). Les résultats de la résistance à la compression en fonction de la température sont présentés dans la Fig. 6. Ces résultats montrent que les liants durcis à 60 °C ont des résistances à la compression faibles par rapport aux liants durcis à 40 °C. Les variations observées peuvent être attribuées à l'augmentation de la porosité avec la température, ce qui affecte les performances mécaniques. (Mo et al., 2014; Kubba et al., 2018), ont associé ce comportement à la formation de microfissures dérivées au cours du processus de rétrécissement et de retrait par le cure à des températures élevées. De plus, l'augmentation de la température de durcissement favorise la réaction de l'activation en élevant le flux de chaleur dégagé à des temps de prise courts, ce qui génère des contraintes thermiques au cours du durcissement qui peuvent entraîner des fissurations et des défauts au niveau de la microstructure du liant, et par conséquent une réduction de la résistance à la compression.

La Fig. 6 montre également qu'il n'y a pas d'augmentation notable de résistance après 28 jours de durcissement pour tous les liants élaborés. Ce gain de résistance à jeune âge est observé aussi par (Zakira et al., 2023; Zhu et al., 2021). En outre, (Nawaz et al., 2020) ont noté que les liants alcali-activés développent une grande partie de leur résistance (plus de 70 %) au cours des 7 premiers jours de cure, quelle que soit les conditions de durcissement adoptées.

V. CONCLUSION

L'objectif de ces travaux est de formuler un liant alcali-activé pour des blocs biosourcé, en optimisant le rapport MK/LHF et la température de cure. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les résultats de la calorimétrie isotherme à conduction ont montré que l'incorporation de LHF a amélioré la réaction d'activation en raison de sa réactivité élevée.
- La substitution de MK par le LHF a réduit le temps de prise initial et final. Cette réduction est liée à la forte réactivité du laitier prouvée par la calorimétrie. Ce qui accélère l'hydratation et le durcissement.
- L'ajout de LHF dans les matériaux alcali-activés a un effet favorable sur la résistance à la compression. La substitution de MK par 70% de LHF a donné la résistance à la compression la plus élevée (74 MPa à 28 jours).
- La température de cure joue un rôle déterminant dans les propriétés à l'état durci. En revanche, l'augmentation de la température de cure à 60°C a provoqué une diminution de la résistance à la compression à 7 et à 28 jours. De plus les matériaux alcali-activés élaborés développent leur résistance dans les 7 premiers jours du durcissement.

L'incorporation du LHF dans les matériaux alcali-activés par les silicates de sodium améliore les propriétés à l'état frais et à l'état durci. Grâce à leur temps de prise court et leur capacité de développer la résistance à des jeunes âges, ces liants alcali-activés élaborés peuvent constituer une alternative prometteuse pour remplacer les liants utilisés habituellement dans les blocs de construction biosourcés. En se basant sur les résultats obtenus, les formulations choisies pour la fabrication des BBC sont 100LHF et 70LHF, avec une température de cure de 40°C. L'ajout des anas

de lin dans ce liant peut influencer leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques. Ces changements de comportement présenteront l'objectif de l'étude suivante.

REFERENCES

- Akturk, B., Abolfathi, M., Ulukaya, S., Kizilkanat, A.B., Hooper, T.J.N., Gu, L., Yang, E.-H., Unluer, C., 2022. Hydration kinetics and performance of sodium carbonate-activated slag-based systems containing reactive MgO and metakaolin under carbonation. *Cem. Concr. Compos.* 132, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104617>
- Amziane, S., Collet, F. (Eds.), 2017. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, RILEM State-of-the-Art Reports. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>
- Bumanis, G., Vitola, L., Pundiene, I., Sinka, M., Bajare, D., 2020. Gypsum, Geopolymers, and Starch—Alternative Binders for Bio-Based Building Materials: A Review and Life-Cycle Assessment. *Sustainability* 12, 5666. <https://doi.org/10.3390/su12145666>
- Chabannes, M., Garcia-Diaz, E., Clerc, L., Bénézet, J.-C., 2015. Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. *Constr. Build. Mater.* 94, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032>
- Cheah, C.B., Tan, L.E., Ramli, M., 2021. Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review. *Constr. Build. Mater.* 272, 121657. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121657>
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., Rattanasak, U., 2014. Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite. *Adv. Powder Technol.* 25, 1087–1093. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.02.007>
- Delannoy, G., Marceau, S., Glé, P., Gourlay, E., Guéguen-Minerbe, M., Diafi, D., Amziane, S., Farcas, F., 2020. Impact of hemp shiv extractives on hydration of Portland cement. *Constr. Build. Mater.* 244, 118300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118300>
- Hasnaoui, A., Ghorbel, E., Wardeh, G., 2019. Optimization approach of granulated blast furnace slag and metakaolin based geopolymer mortars. *Constr. Build. Mater.* 198, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.251>
- Kabay, N., Miyay, N., Özkan, H., 2021. Basic oxygen furnace and ground granulated blast furnace slag based alkali-activated pastes: Characterization and optimization. *J. Clean. Prod.* 327, 129483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129483>
- Kubba, Z., Fahim Huseien, G., Sam, A.R.M., Shah, K.W., Asaad, M.A., Ismail, M., Tahir, M.Md., Mirza, J., 2018. Impact of curing temperatures and alkaline activators on compressive strength and porosity of ternary blended geopolymer mortars. *Case Stud. Constr. Mater.* 9, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00205>
- Li, C., Sun, H., Li, L., 2010. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cem. Concr. Res.* 40, 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
- Mo, B., Zhu, H., Cui, X., He, Y., Gong, S., 2014. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* 99, 144–148. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.024>
- Mohamed, O.A., Al Khattab, R., Al Hawat, W., 2022. Effect of relative GGBS/fly contents and alkaline solution concentration on compressive strength development of geopolymer

- mortars subjected to sulfuric acid. *Sci. Rep.* 12, 5634. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09682-z>
- Nawaz, M., Heitor, A., Sivakumar, M., 2020. Geopolymers in construction - recent developments. *Constr. Build. Mater.* 260, 120472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>
- Ntimugura, F., Vinai, R., Harper, A., Walker, P., 2020. Mechanical, thermal, hygroscopic and acoustic properties of bio-aggregates – lime and alkali - activated insulating composite materials: A review of current status and prospects for miscanthus as an innovative resource in the South West of England. *Sustain. Mater. Technol.* 26, e00211. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00211>
- Page, J., Khadraoui, F., Gomina, M., Boutouil, M., 2021. Enhancement of the long-term mechanical performance of flax fiber-reinforced cementitious composites by using alternative binders. *J. Build. Eng.* 40, 102323. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102323>
- Page, J., Sonebi, M., Amziane, S., 2017. Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material. *Constr. Build. Mater.* 139, 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.037>
- Provis, J.L., 2018. Alkali-activated materials. *Cem. Concr. Res.* 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Talibi, S., Page, J., Djelal, C., Saâdi, L., 2024. Impact of treated red-algae fibers on physico-mechanical behavior of compressed earth bricks for construction. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 0, 1–34. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2329722>
- Zakira, U., Zheng, K., Xie, N., Birgisson, B., 2023. Development of high-strength geopolymers from red mud and blast furnace slag. *J. Clean. Prod.* 383, 135439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135439>
- Zhu, H., Liang, G., Li, H., Wu, Q., Zhang, C., Yin, Z., Hua, S., 2021. Insights to the sulfate resistance and microstructures of alkali-activated metakaolin/slag pastes. *Appl. Clay Sci.* 202, 105968. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105968>
- Zulkifly, K., Cheng-Yong, H., Yun-Ming, L., Abdullah, M.M.A.B., Shee-Ween, O., Khalid, M.S.B., 2021. Effect of phosphate addition on room-temperature-cured fly ash-metakaolin blend geopolymers. *Constr. Build. Mater.* 270, 121486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121486>