

# Mesure du coefficient de migration à l'état stationnaire de géopolymères contenant des matériaux à changement de phase microcapsulés

Bouha EL MOUSTAPHA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>BUILDERS Ecole d'ingénieurs, 1 Rue Pierre et Marie Curie, Epron, France

<sup>2</sup>Arts & Métiers sciences and technologies – Innovation and Product Design Laboratory, 151 Boulevard de l'Hôpital, F-75013 Paris, France.

**RESUME :** L'objectif de cette recherche est d'évaluer les propriétés de migration du chlorure à l'état stationnaire des mortiers géopolymères à base de laitier de haut fourneau (MGPs) et des mortiers de ciment (MCs). Trois taux de matériaux à changement de phase microencapsulés (MCPM) : 0 %, 5 % et 10 % ont été incorporés dans les deux types de mortiers. En outre, trois taux de métakaolin (MK) : 0 %, 10 % et 20 %, ont été ajoutés pour étudier leur effet sur la performance des MGPs après l'ajout de MCPM. Les résultats ont montré que l'ajout de MK a augmenté la résistance en compression des MGPs-MCPM d'environ 10 MPa. Ces effets sont dus à la grande réactivité du MK, qui a favorisé une bonne dissolution de la silice et de l'aluminium dans le MK, qui a bien participé avec le calcium dans le laitier de haut fourneau pour créer les gels NASH et CASH. Ces gels ont amélioré les performances mécaniques des MGPs. D'autre part, l'ajout de MK a montré une réduction du coefficient de migration des ions chlorure (Dss). Cette diminution est due à une liaison physique et chimique sur les gels CASH et NASH du géopolymère après l'ajout de MK. Enfin, tous les MGPs-MCPM ont montré des performances mécaniques et une durabilité améliorée par rapport aux MCs.

**Mots-clefs :** Géopolymère, matériaux à changement de phase microencapsulés, résistance mécanique, durabilité, diffusion des chlorures.

## I. INTRODUCTION

Le développement de bâtiments offrant une bonne efficacité énergétique fait l'objet d'une grande attention de la part des chercheurs en raison de leur impact considérable sur la consommation mondiale d'énergie (36 %) et les émissions de gaz à effet de serre (40 %) ("Energy efficiency – Topics," n.d.). Ces émissions de gaz à effet de serre sont principalement dues aux émissions de CO<sub>2</sub>. En particulier, les émissions globales de CO<sub>2</sub> du secteur du bâtiment sont principalement dues à la production de matériaux de construction et à l'énergie nécessaire pour maintenir le confort thermique dans les bâtiments (Llantoy et al., 2020).

Dans ce contexte, l'incorporation de matériaux à changement de phase microencapsulés (MCPM) dans une matrice géopolymère pour concevoir un béton géopolymère-MCPM avec des performances environnementales améliorées pourrait être une solution prometteuse au problème de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> associées à l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments et à la

production de matériaux de construction tels que le ciment Portland (El Moustapha et al., 2022; Shadnia et al., 2015). Selon Shadnia et al. (Shadnia et al., 2015), le MCPM a la capacité de réduire la température interne des cellules géopolymères d'environ 4,5 à 5,5°C. Dans une étude antérieure, El Moustapha et al. (El Moustapha et al., 2022) ont étudié les effets de la coexistence des gels CASH et NASH sur les performances thermiques d'un géopolymère-MCPM à base de laitier de haut fourneau et de métakaolin. Selon leurs résultats, la capacité thermique de géopolymère-MCPM était égale à 1280 J/Kg.K. Cette capacité est supérieure à la capacité thermique d'un mortier normalisé à base de ciment Portland.

Cependant, les études ci-dessus se limitent à l'étude des propriétés thermiques et mécaniques de ce nouveau matériau. Bien que la technologie se développe rapidement et attire l'attention des universitaires, la littérature révèle que peu de recherches ont été effectuées sur l'effet de l'ajout de MCPM sur la durabilité des géopolymères et aucune étude antérieure n'a été menée pour étudier la pénétration des ions chlorure. Il est donc essentiel d'évaluer la durabilité de ce nouveau matériau contre la pénétration des ions chlorure. En effet Il est également important de noter que, selon l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature), plus de 60 % de la population mondiale vit actuellement dans des zones côtières étendues. Les projections démographiques pour 2035 prévoient que ce chiffre dépassera 75 % ("Climat: vers un dérèglement géopolitique ?," n.d.). Cette perspective suggère que de nombreux futurs bâtiments dans ces zones risqueront d'être détruits au fil du temps en raison de la pénétration de chlorures.

La corrosion du béton armé causée par la pénétration des ions chlorure est un indicateur de la durabilité du béton qui a fait l'objet de recherches approfondies. Les chlorures peuvent pénétrer par diffusion ionique, absorption capillaire et convection en réponse aux gradients de pression des liquides. En dépassant l'armature incorporée, ils déclenchent la corrosion des barres d'armature, ce qui réduit la capacité du béton à supporter le poids et peut affaiblir le béton de la structure (Neville, 1995).

Cependant, de nombreuses études publiées sur les géopolymères sans l'ajout de MCPM montrent que les géopolymères ont une résistance à la pénétration des chlorures supérieure ou équivalente à celle des matériaux cimentaires (Ravikumar and Neithalath, 2013). Cependant, ces études se concentrent sur la mesure de la pénétration des chlorures à l'aide du RCPT (Rapid Chloride Permeation Test) ou de l'ASTM C1202/AASHTO T277. Cette technique est fréquemment utilisée pour évaluer la résistance des matériaux cimentaires à la pénétration des chlorures (Huang and Yang, 2018). Cette approche est basée sur la mesure de la conductivité électrique du béton, qui est influencée par la composition de la solution interstitielle, qui à son tour a un impact significatif sur les résultats des mesures des matériaux activés par les alcalins. Cependant, le géopolymère présente des valeurs de conductivité électrique élevées qui sont dues à une forte concentration d'alcalins dans sa solution interstitielle. Cela est dû à la forte concentration de Na<sup>+</sup> et d'autres cations. Ces charges de cations alcalins enregistrées sont également prises en compte pendant le processus d'essai et peuvent interférer avec les résultats finaux (Lloyd et al., 2010). Bernal et al. (Bernal and Provis, 2014) indiquent que cette méthode ne doit pas être considérée comme un indicateur fiable pour évaluer la résistance des géopolymères à la pénétration des chlorures.

Il est donc plus fiable de mesurer directement le flux de chlorure à travers le matériau, plutôt que d'utiliser la charge transmise comme indicateur de diffusion. Les méthodes de migration accélérée ("état stationnaire ") développées par Andrade et al. (Andrade, 1993) et Tang et al. (Luping and Nilsson, 1992) se sont avérées fiables pour calculer le coefficient de migration des chlorures. Contrairement à la méthode RCPT qui prend en compte les mesures de conductivité électrique du

béton, ces essais mesurent la concentration des ions chlorure qui ont migré dans le béton en accélérant le transport des chlorures à l'aide d'un champ électrique appliqué à l'échantillon testé, ce qui permet de calculer directement le coefficient de migration des ions chlorure à l'état d'équilibre (Dss).

Le but de cette recherche est d'évaluer les propriétés de pénétration des ions chlorure en utilisant la méthode de l'état stationnaire des mortiers géopolymères à base de laitier de haut fourneau (MGPs) et des mortiers à base de ciment Portland (MCs) avec l'ajout de 3 taux de MCPM tels que 0, 5 et 10% dans les deux types de mortiers étudiés. D'autre part, cette étude vise à étudier l'effet de l'inclusion de 0, 10 et 20% de métakaolin dans les MGPs afin d'évaluer l'effet de la coexistence des gels CASH et NASH sur la résistance en compression et la pénétration des ions chlorure sur ces mortiers.

## II. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

### A. Matériaux

Le MCPM considéré dans cette étude se présente sous la forme d'une micro-encapsule sphérique blanche. Ils ont une température de fusion de 28°C et une densité de 0,84 g/cm<sup>3</sup>.

Le tableau 1 présente la composition chimique et les caractéristiques physiques du ciment (CEM II 32.5), du laitier de haut fourneau et du métakaolin.

**TABLEAU 1.** Composition chimique et caractéristiques physiques du ciment, du laitier de haut fourneau et du métakaolin.

Composition chimique (%)	CEM II	Laitier	MK
SiO <sub>2</sub>	7.47	37.3	55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.18	10.7	41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.84	0.2	1.2
CaO	69.02	43.0	0.1
MgO	-	6.5	0.2
TiO <sub>2</sub>	-	0.7	0.4
(Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O) <sub>eq</sub>	-	0.8	1.8
Specific gravity	3.03	2.9	2.4
Blaine specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	0.37	0.44	17
verage grain size (µm)	8.47	13.25	7.13

La solution d'activation est une combinaison d'hydroxyde de sodium et de silicate de sodium. La composition du silicate de sodium est la suivante : 27,53 % de SiO<sub>2</sub>, 11,47 % de Na<sub>2</sub>O et 61 % de H<sub>2</sub>O. L'hydroxyde de sodium est constitué à 98 % de soude caustique pure. Le sable utilisé est un sable normalisé (CEN NF 196-1) qui a une densité de 2,6 g/cm<sup>3</sup>.

### B. Procédure de malaxage et conditions de durcissement

Cette étude a examiné douze formulations, trois à base de mortier normalisé et neuf à base de mortier géopolymère. Le rapport eau/liant de 0,5 et le rapport sable/liant de 3 étaient constants pour les deux types de mortier. Le liant géopolymère, équivalent au ciment, est défini comme la somme du laitier de haut fourneau, du MK et des constituants solides de la solution alcaline. Nous avons maintenu un rapport massique de 3 pour (laitier+MK)/SA, où SA représente les constituants solides de la solution alcaline. Ces choix sont en accord avec les recommandations présentées dans l'étude de Hasnaoui et al. (Hasnaoui et al., 2019). Les taux de MK ajoutés aux formulations MGP sont de 0 %, 10 % et 20 %. Dans toutes les formulations des MGPs, le rapport entre le silicate de sodium (SS) et l'hydroxyde de sodium (SS/NaOH) est systématiquement fixé à 2,5. Cette teneur élevée en silicate de sodium est destinée à garantir des niveaux de silice optimaux après l'incorporation de notre pourcentage accru de métakaolin (20 % MK) (Bernal et al., 2012a).

Trois concentrations ont été choisies pour le MCPM dans les deux types de mortier (à base de ciment et géopolymère), 0, 5 et 10% respectivement. La méthode choisie pour l'incorporation de MCPM est la méthode de remplacement du sable par le MCPM (remplacement volumique en pourcentage du sable).

Le tableau 2 présente les proportions de mélange en kg/m<sup>3</sup>.

**TABLEAU 2. Formulations de MCs et MGPs (kg/m<sup>3</sup>) (El Moustapha et al., 2022).**

Sample	Proportions des mélanges (kg/m <sup>3</sup> )								
	Ciment	Laitier	MK	Sable	MCPM	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH	Eau MGPs	Eau MCs
MC <sub>0/0/0</sub>	585.9	-	-	1757.8	-	-	-	-	293.0
MC <sub>0/0/5</sub>	585.9	-	-	1673.8	28.4	-	-	-	293.0
MC <sub>0/0/10</sub>	585.9	-	-	1582.0	56.8	-	-	-	293.0
MGP <sub>100/0/0</sub>	-	439.5	-	1757.8	-	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>100/0/5</sub>	-	439.5	-	1673.8	28.4	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>100/0/10</sub>	-	439.5	-	1582.0	56.8	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>90/10/0</sub>	-	395.5	43.9	1757.8	-	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>90/10/5</sub>	-	395.5	43.9	1673.8	28.4	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>90/10/10</sub>	-	395.5	43.9	1582.0	56.8	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>80/20/0</sub>	-	351.6	87.9	1757.8	-	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>80/20/5</sub>	-	351.6	87.9	1673.8	28.4	267.9	127.7	42.6	-
MGP <sub>80/20/10</sub>	-	351.6	87.9	1582.0	56.8	267.9	127.7	42.6	-

Les MCs ont été fabriqués conformément à la norme NF 196-1 (EN 196-1, 2016.). Ces mortiers ont été choisis comme références pour la comparaison avec les mortiers à base de géopolymère.

Néanmoins, dans le cas du géopolymère, le laitier et le MK ont été mélangés avec la solution alcaline et l'eau pendant une durée de 90 secondes pour obtenir une pâte homogène (Pilehvar et al., 2017). Le sable a ensuite été introduit et mélangé pendant 5 minutes, puis le MCPM a été introduit et mélangé pendant 2 minutes. Après cette étape, le moulage a été effectué dans des

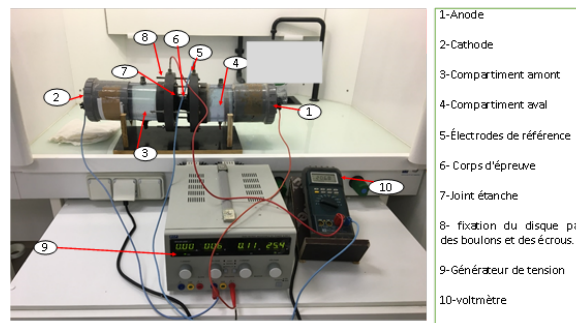
éprouvettes de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  pour l'essai de résistance en compression, et dans des moules cylindriques de dimensions ( $D = 63 \text{ mm}$  ;  $H = 130 \text{ mm}$ ) pour l'essai de migration des ions chlorure à l'état stable. Les échantillons ont été stockés dans une pièce climatisée (température  $20^\circ\text{C}$  et humidité relative 50%) pendant 48 heures avant d'être démoulés.

### C. Méthodes de caractérisation

La résistance en compression des mortiers a été mesurée à l'aide d'une presse hydraulique (figure 1) conformément à la norme NF EN 196-1 ("EN 196-1, 2016). Pour chaque formulation, six échantillons ont été testés après 28 et 90 jours de cure. Les essais de migration des chlorures sont réalisés conformément à la norme XP-P18-461 ("NF XP P18-461, 2012). Le coefficient de migration des chlorures dans un état stationnaire " $D_{ss}$ " ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) peut être calculé à partir de l'équation (1) sous la forme suivante :

$$D_{ss} = \frac{RTL}{ZFEC_0} J \quad (1)$$

Où  $J$  est le flux des ions chlorure ( $\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$ ),  $z$  est la valence de l'ion égale à 1,  $F$  est la constante de Faraday ( $96480 \text{ J}/(\text{V}.\text{mol})$ ),  $E$  est le champ électrique mesuré ( $\text{V}/\text{m}$ ),  $L$  est l'épaisseur de l'échantillon ( $0,04 \text{ m}$ ),  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J}/(\text{mol}.\text{K})$ ),  $T$  est la température absolue ( $293,15 \pm 2 \text{ K}$ ),  $C_0$  est la concentration en chlorure dans le compartiment amont ( $0,5 \text{ mol}/\text{m}^3$ ).



**FIGURE 1.** Dispositif illustrant l'essai de migration des ions chlorure de sodium sous champ électrique en régime stationnaire et non stationnaire.

## III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. Résistance en compression

Les résultats de la résistance en compression après 28 et 90 jours de durcissement sont présentés dans la figure 2. Aucune différence significative n'apparaît entre les résistances en compression entre 28 et 90 jours pour les MGPs, contrairement au MCs qui montrent une augmentation de sa résistance à la compression entre 28 et 90 jours. En effet, le géopolymère peut atteindre la majeure partie de sa résistance mécanique dans les premiers jours de son durcissement en raison de sa forte liaison chimique (Bernal et al., 2012a). Cependant, les résistances en compression des MCs et des MGPs diminuent avec l'augmentation de la teneur en MCPM. Après 28 jours de durcissement, l'ajout de 10 % de MCPM a entraîné une réduction de la résistance en compression allant jusqu'à 7 MPa pour les MCs et 30 MPa pour les MGPs sans MK respectivement. En fait, l'augmentation de la teneur en MCPM entraîne une augmentation des vides dans les deux types

de matrice. Ces vides peuvent s'expliquer par l'agglomération du MPCM au cours du processus de mélange. Les images MEB et les mesures de la porosité à l'eau et du module d'Young dans notre étude précédente (EL Moustapha et al., 2022, EL Moustapha et al., 2023) montrent que le MPCM affecte davantage la matrice géopolymère que la matrice cimentaire. Cela indique que la connexion entre le MPCM et la matrice géopolymère est faible et que le MPCM peut induire plus de vides d'air dans la matrice géopolymère que dans la matrice cimentaire, ce qui affaiblit la résistance à la compression.

D'autre part, la diminution de la résistance à la compression de deux types de mortier est due à la faible rigidité et résistance mécanique de MPCM par rapport au sable, ce qui leur permet de se briser facilement sous l'effet de la force de compression (Shadnia et al., 2015).

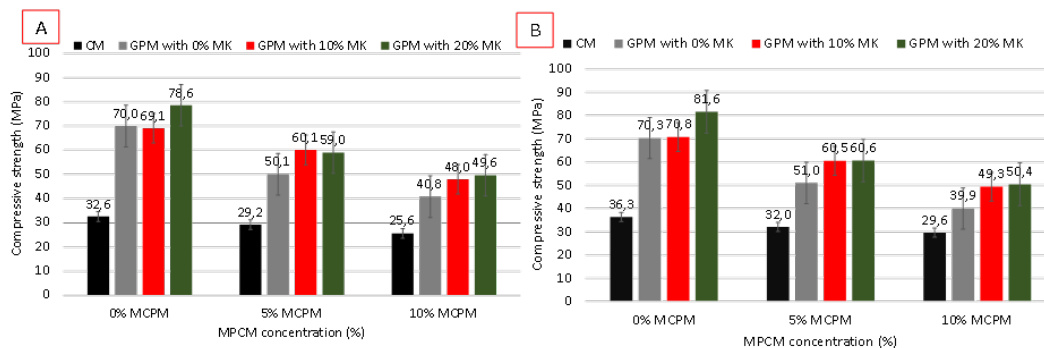


FIGURE 2. Résistance en compression A : 28 jours ; B : 90 jours.

La résistance mécanique du mortier géopolymère avec 0% MK était assez élevée. Selon NAZARI et al. (Nazari and Sanjayan, 2015), l'augmentation de la teneur en activateur est à l'origine de cette augmentation. En effet, le pH élevé de la solution favorise une bonne dissolution des ions de silice et d'alumine du laitier, créant ainsi un gel mécaniquement résistant. Selon Bernal et al. (Bernal et al., 2012a), contrairement au gel CSH observé dans un béton classique, le calcium créé lors de l'interaction entre les ions Na, les ions Si et les ions Al a conduit à la création du gel CASH, qui est riche en Al.

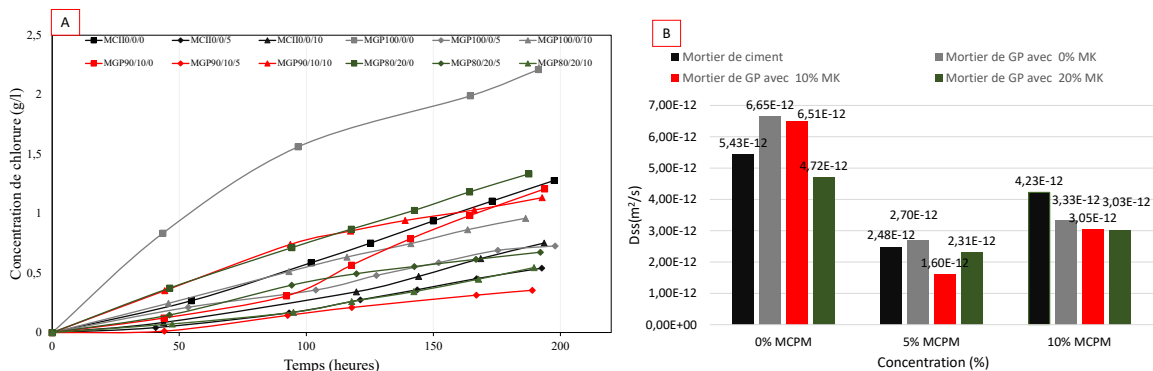
En outre, la résistance en compression à 28 jours de tous les échantillons a augmenté avec l'ajout de 10 % et 20 % de MK aux mortiers géopolymères avec les deux concentrations de MPCM (5 et 10 %). La résistance en compression est passée de 40,8 à 49,6 MPa pour une concentration de 10 % de MPCM. À 90 jours, l'ajout de MK a eu le même effet sur l'augmentation de la résistance en compression. Cependant, contrairement à l'ajout de 20% de MK, l'ajout de 10% de MK n'a pas augmenté la résistance en compression du MGP sans MPCM (0% MPCM), contrairement aux MGPs avec 5% et 10% de MPCM. Ce résultat peut être dû à l'effet de remplissage provoqué par l'activation du MK, qui a comblé les vides causés par le MPCM, améliorant ainsi les performances mécaniques du géopolymère (Ibrahim et al., 2018). La plus petite taille des particules de MK et sa surface spécifique plus élevée par rapport au laitier, qui lui permettent de réagir plus rapidement, expliquent cette amélioration de la résistance mécanique. La seconde explication est due à la forte concentration d'activateur et aux quantités élevées d' $Al_2O_3$  et de  $SiO_2$  dans le MK (Huseien et al., 2018). La forte teneur en activateur facilite la géopolymérisation en favorisant la dissolution de la silice et de l'aluminium dans la MK et en produisant du gel NASH et du gel CASH en plus du CASH généré par l'activation du laitier (Bernal et al., 2012a; Ibrahim et al., 2018; Sabir et al., 2001).

### B. Migration des ions de chlorure à l'état stationnaire

La figure 3 présente les mesures de migration des chlorures à l'état stationnaire des échantillons après 28 jours de durcissement. La figure 3 (A) présente les résultats de la concentration cumulée de chlorure mesurée dans le compartiment aval en fonction du temps. La figure 3 (B) montre le coefficient de migration du chlorure à l'état stationnaire Dss. Le MC avec 0 % de MCPM présente une concentration cumulée de chlorure significativement plus faible que le MGP avec 100 % de laitier et 0 % de MCPM. Dans ce type d'essai, les matériaux à base de ciment sont généralement affectés par l'adsorption des chlorures sur les parois des pores capillaires. Cette adsorption est le résultat de réactions entre les chlorures et les aluminates présents dans la matrice du ciment. Ces réactions conduisent à l'hydratation du C<sub>3</sub>A et du C<sub>4</sub>AF et à la formation du sel de Friedel, ce qui réduit le taux de concentration des chlorures (Luping and Nilsson, 1993).

D'autre part, la fixation physique, dans laquelle l'adsorption des chlorures se produit sur les produits du gel d'hydratation des CSH, retarde la pénétration des chlorures (Zibara, 2001). Notre étude précédente (El Moustapha et al., 2023) montre que les MGPs présentent une fixation physique et chimique assez élevée. La figure 3 (A) montre que les MGPs avec 10 et 20% de MK ont une concentration cumulée de chlorure plus faible que les MGPs avec 100% du laitier, et donc un coefficient de migration plus faible.

Une explication est que le gel NASH formé après l'ajout de MK est plus résistant à la température de séchage que le gel CASH formé par l'activation du laitier (Neville, 1995). Cela peut également réduire davantage l'interconnexion des pores par rapport aux mortiers contenant 100 % du laitier. En outre, il a été prouvé que l'ajout de MK réduit le diamètre critique "dcr" des MGPs et la porosité totale mesurée par la porosimétrie par intrusion au mercure, réduisant ainsi l'interconnexion des pores (El Moustapha et al., 2023). L'ajout de MK augmente en outre la résistivité électrique (El Moustapha et al., 2023). En effet, un matériau contenant un plus petit nombre de pores interconnectés avec un chemin plus tortueux bloquera le passage des ions à travers la structure poreuse. Polder et al. (Polder et al., 2000) signalent qu'une faible résistivité du béton est corrélée à une pénétration rapide des chlorures et à un taux de corrosion élevé. En outre, Bernal et al. (Bernal et al., 2012b) et Mehta et al. (Mehta et al., 2020) ont souligné que la coexistence des gels CASH et NASH pour former le gel CNASH est efficace pour empêcher la pénétration des chlorures dans les matériaux à base de géopolymères. Toutes ces raisons peuvent expliquer la réduction de la pénétration des ions chlorure dans les MGPs après l'ajout de MK.



**FIGURE 3.** Mesure de la migration des chlorures à l'état stationnaire : (A) Concentration cumulée de chlorures en fonction du temps, (B) Coefficient de migration à l'état stationnaire "Dss".

L'ajout de MCPM conduit également à une diminution de la pénétration des ions chlorure dans tous les mortiers étudiés. Ceci peut être dû à l'augmentation de la tortuosité causée par l'agglomération de MCPM (El Moustapha et al., 2023). En effet, l'augmentation de la tortuosité joue un rôle très important dans les propriétés de transport des matériaux de construction, en particulier le coefficient de diffusion des chlorures.

## CONCLUSION

Cette recherche visait à évaluer les propriétés de pénétration des ions chlorure à l'état stationnaire des MGPs et des MCs contenant 3 taux de MCPM tels que 0, 5 et 10%. D'autre part, le but de cette étude était d'examiner l'effet de l'inclusion de 0, 10 et 20% de métakaolin dans les MGPs afin d'évaluer l'effet de la coexistence des gels CASH et NASH sur la résistance en compression et la pénétration des ions chlorure dans ces derniers. Les résultats montrent que l'inclusion du métakaolin a provoqué:

- Une augmentation de la résistance en compression du mortier géopolymère-MCPM, attribuée à la taille plus petite des particules de MK et à sa surface spécifique plus élevée par rapport au laitier, qui lui permettent de réagir plus rapidement, et à la concentration élevée d'activateur, qui a favorisé la dissolution de grandes quantités de silice et d'aluminium dans le MK, produisant plus de gel NASH et de gel CASH.
- Une diminution du coefficient de migration des ions chlorure à l'état stationnaire, qui est généralement attribuée à une fixation physique et chimique sur les parois des gels CASH et NASH causée par l'ajout de MK.

Enfin, l'ajout de MCPM a conduit à une réduction de la résistance en compression, mais a également diminué le coefficient de migration à l'état stationnaire en raison de son influence sur la tortuosité des mortiers étudiés (effet de l'agglomération lors du mélange) d'une part et/ou en raison de la nature non poreuse de MCPM (non perméable) comparée à la nature poreuse du sable, qui peut bloquer la pénétration des ions chlorure d'autre part.

## REMERCIEMENTS

L'étude expérimentale a été réalisée à l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (laboratoire Gem) - CNRS UMR 6183, Saint Nazaire. Nous tenons à remercier l'équipe de l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique.

## REFERENCES

- Andrade, C., 1993. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cem. Concr. Res.* 23, 724–742. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)
- Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R., Provis, J.L., 2012a. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Constr. Build. Mater.* 33, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.017>
- Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R., Provis, J.L., 2012b. Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Constr. Build. Mater.* 33, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.017>



- Bernal, S.A., Provis, J.L., 2014. Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives. *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 997–1008. <https://doi.org/10.1111/jace.12831>
- Bi, L., Long, G., Ma, C., Xie, Y., 2020. Mechanical properties and water absorption of steam-cured mortar containing phase change composites. *Constr. Build. Mater.* 248, 118707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118707>
- Cao, V.D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok, A.M., Bui, T.Q., Carmona, M., Rodriguez, J.F., Kjøniksen, A.-L., 2019. Thermal analysis of geopolymer concrete walls containing microencapsulated phase change materials for building applications. *Sol. Energy* 178, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.039>
- Cao, V.D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok, A.M., Rodriguez, J.F., Carmona, M., Al-Manasir, N., Kjøniksen, A.-L., 2017. Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications. *Energy Convers. Manag.* 133, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.061>
- Caré, S., 2003. Influence of aggregates on chloride diffusion coefficient into mortar. *Cem. Concr. Res.* 33, 1021–1028. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00009-7)
- Climat: vers un dérèglement géopolitique? [WWW Document], n.d. URL <https://www.senat.fr/rap/r15-014/r15-0143.html> (accessed 3.22.22).
- El Moustapha, B., Bonnet, S., Khelidj, A., Leklou, N., Froelich, D., Babah, I.A., Charbuillet, C., Khalifa, A., 2022. Compensation of the negative effects of micro-encapsulated phase change materials by incorporating metakaolin in geopolymers based on blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 314, 125556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125556>
- El Moustapha, B., Bonnet, S., Khelidj, A., Maranzana, N., Froelich, D., Khalifa, A., Ahmedou Babah, I., 2023. Effects of microencapsulated phase change materials on chloride ion transport properties of geopolymers incorporating slag and, metakaolin, and cement-based mortars. *J. Build. Eng.* 74, 106887. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106887>
- EN 196-1. Methods of testing cement- Part 1: Determination of strength. European committee for standardization, 2016, n.d.
- Energy efficiency – Topics [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org/topics/energy-efficiency> (accessed 3.22.22).
- 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>
- Huang, K.-S., Yang, C.-C., 2018. Using RCPT determine the migration coefficient to assess the durability of concrete. *Constr. Build. Mater.* 167, 822–830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.109>
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., Ariffin, M.A.M., 2018. Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Eng. J.* 9, 1557–1566. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.011>
- Ibrahim, M., Johari, M.A.M., Maslehuddin, M., Rahman, M.K., 2018. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the strength and microstructure of natural pozzolan based alkali activated concrete. *Constr. Build. Mater.* 173, 573–585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.051>
- Llantoy, N., Chàfer, M., Cabeza, L.F., 2020. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. *Energy Build.* 225, 110323. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110323>

- Luping, T., Nilsson, L.-O., 1993. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.* 23, 247–253. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90089-R](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90089-R)
- Luping, T., Nilsson, L.-O., 1992. CHLORIDE DIFFUSIVITY IN HIGH STRENGTH CONCRETE AT DIFFERENT AGES. *Nord. Concr. Res. Publ.* NO 11.
- Mehta, A., Siddique, R., Ozbakkaloglu, T., Uddin Ahmed Shaikh, F., Belarbi, R., 2020. Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties. *Constr. Build. Mater.* 257, 119548. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119548>
- Nazari, A., Sanjayan, J.G., 2015. Synthesis of geopolymer from industrial wastes. *J. Clean. Prod.* 99, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.003>
- Neville, A., 1995. Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Mater. Struct.* 28, 63–70. <https://doi.org/10.1007/BF02473172>
- NF XP P18-461, “Test on hardened concrete: Accelerated test of chloride ions in steady state, determination of the effective diffusion coefficient of chloride ions,” French Standard, France, 2012.(in French)., n.d.
- Pilehvar, S., Cao, V.D., Szczotok, A.M., Valentini, L., Salvioni, D., Magistri, M., Pamies, R., Kjøniksen, A.-L., 2017. Mechanical properties and microscale changes of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Cem. Concr. Res.* 100, 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.012>
- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M., 2000. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Mater. Struct.* 33, 603–611. <https://doi.org/10.1007/BF02480599>
- Ravikumar, D., Neithalath, N., 2013. An electrical impedance investigation into the chloride ion transport resistance of alkali silicate powder activated slag concretes. *Cem. Concr. Compos.* 44, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.002>
- Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cem. Concr. Compos., Metakaolin and Calcined Clays* 23, 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Shadnia, R., Zhang, L., Li, P., 2015. Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. *Constr. Build. Mater.* 84, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.066>
- Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z., Ou, Z., 2017. Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies. *Constr. Build. Mater.* 152, 598–613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.027>
- Zibara, H., 2001. Binding of external chlorides by cement pastes (Thesis).