

---

# Comparaison entre des mortiers géopolymères et un mortier normalisé de même classe de résistance

Abdelaziz HASNAOUI<sup>1</sup>, Elhem GHORBEL<sup>2</sup>, George WARDEH<sup>3</sup>

Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, 5 Mail Gay Lussac-Neuville sur Oise-95031 Cergy Pontoise Cedex.

<sup>1</sup> [abdelaziz.hasnaoui@u-cergy.fr](mailto:abdelaziz.hasnaoui@u-cergy.fr)

<sup>2</sup> [elhem.ghorbel@u-cergy.fr](mailto:elhem.ghorbel@u-cergy.fr)

<sup>3</sup> [george.wardeh@u-cergy.fr](mailto:george.wardeh@u-cergy.fr)

---

*RÉSUMÉ.* Ce travail a pour but de comparer, pour une même classe de résistance mécanique (entre 47 et 52 MPa), des mortiers géopolymères à base de laitier de haut fourneau et de métakaolin avec un mortier Portland. A l'issue d'une étude préliminaire, un mortier normalisé de référence, formulé avec un ciment Portland (CEM II 42,5), ainsi que trois mortiers géopolymères ont été développés et caractérisés aux états frais et durci. La rhéologie, le temps de prise, les résistances mécaniques et le module d'élasticité dynamique ont été évalués pour chaque matériau conformément aux normes des mortiers cimentaires. Les résultats obtenus montrent qu'en termes de résistances mécaniques, les mortiers géopolymères à base d'un rapport laitier/métakaolin de 50/50 sont comparables au mortier de référence. Par ailleurs, leur temps de prise est deux fois plus rapide par rapport au mortier Portland alors que leur rigidité est 40% moins importante.

*ABSTRACT.* This work aims to compare, for the same strength class (between 47 and 52 MPa) geopolymer mortars based on blast furnace slag and metakaolin with a Portland one. Following a preliminary study, a standardized mortar, formulated with Portland cement (CEM II 42.5), and three geopolymer mortars were developed and characterized in fresh and hardened states. Rheology, setting time, mechanical strengths and dynamic modulus of elasticity were evaluated using cementitious mortar standards. The obtained results show that, in terms of mechanical strengths, geopolymer mortars based on 50/50 slag/metakaolin are comparable to the reference one. However, their setting time is twice faster compared to the Portland mortar while their stiffness is 40% lower.

*MOTS-CLÉS :* mortier géopolymère, impact environnemental, résistance mécanique, module d'élasticité dynamique.

*KEY WORDS :* geopolymer mortar, environmental impact, mechanical strength, dynamic modulus of elasticity.

---

## 1. Introduction

Face au nombre croissant de défis environnementaux, et afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre de l'industrie de ciment Portland, les géopolymères ont été proposés pour remplacer les ciments Portland conventionnels pour des applications particulières [DAV 13]. Un mortier géopolymère est un mélange de sable et de liant géopolymère, ce dernier est synthétisé par l'activation alcaline de matières premières aluminosilicates tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau (L) et le métakaolin (M). Généralement, les matériaux à base de ciment géopolymères sont caractérisés par leur haute résistance aux températures élevées [KON 10] et aux attaques chimiques [BAK 05]. De plus, ils montrent des résistances mécaniques comparables, voire meilleures, que celles des mortiers Portland [MOB 17]. Malgré les nombreux travaux qui ont été effectués dans le cadre d'optimisation des formulations de mortiers géopolymères, la comparaison avec les mortiers Portland se concentre souvent sur la différence en résistances mécaniques en ignorant les autres propriétés telles que la rhéologie, la prise et la rigidité. Par ailleurs, l'utilisation d'un mélange de géopolymères à base de laitier-métakaolin semble prometteuse puisqu'on peut s'affranchir d'une prise rapide et d'une demande en eau élevée [BER 15].

L'objectif de cette étude est de comparer, pour une même classe de résistance à la compression, les performances rhéologiques et mécaniques de trois mortiers géopolymères à base de laitier et métakaolin et d'un mortier Portland normalisé.

## 2. Matériaux et méthodes

Un ciment Portland CEM II 42,5 a été utilisé pour la formulation d'un mortier normalisé selon la norme NF EN 196-1. Deux matériaux aluminosilicates ont été employés dans la formulation de mortiers géopolymères : laitier de haut fourneau (L) et métakaolin (M). La composition chimique de chaque matériau ainsi que ses propriétés physiques sont illustrés dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Composition chimique et propriétés physiques du ciment Portland, du laitier de haut fourneau (L) et du métakaolin (M).

Composition chimique (%)	CEM II	L	M
SiO <sub>2</sub>	18,7	35,9	55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	11,2	39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,7	0,3	1,8
TiO <sub>2</sub>	-	0,7	1,5
CaO	62,0	42,3	0,6
MgO	-	8,0	-
(Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O)eq	0,6	0,7	1,0
<b>Densité (g /cm<sup>3</sup>)</b>	3,09	2,91	2,2
<b>Surface spécifique (m<sup>2</sup>/g)</b>	0,37	0,45	19

Dans le cadre de ce travail, trois mortiers géopolymères ont été formulés à base d'un mélange L/M de 50/50, un rapport Liquide/Solide de 0,5 et 3 rapports molaires SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O de la solution alcaline d'activation de 1,2 ; 1,4 et 1,6. La solution alcaline d'activation (SAA) est composée d'une solution de silicate de sodium et de NaOH solide. La composition des différentes formulations de géopolymères (tableau 2) est obtenue en remplaçant le ciment Portland du mortier normalisé par les matières solides (L+ M+ extraits solides contenus dans le SAA). Pour chaque mortier, la rhéologie (seuil de cisaillement et viscosité plastique), la prise, les résistances mécaniques et le module d'élasticité dynamique ont été évalués.

**Tableau 2.** Formulations du mortier normalisé et des mortiers géopolymères de même classe de résistance (entre 47 et 52 MPa).

Mortiers	RM	Formulation (g)							Liquide/Solide
		Ciment	L	M	Sable	SS	NaOH	Eau	
MP	-	450	-	-	1350	-	-	225	0,5
MG1	1,2	-	168,8	168,8	1350	224,2	26,6	86,7	0,5
MG2	1,4	-	168,8	168,8	1350	241,1	19,0	74,4	0,5
MG3	1,6	-	168,8	168,8	1350	261,6	12,3	63,6	0,5

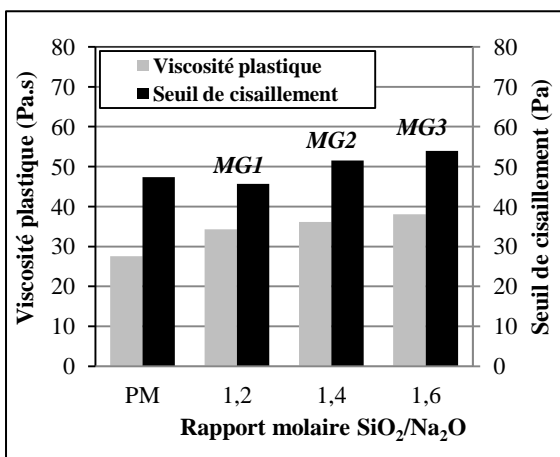
## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Propriétés à l'état frais

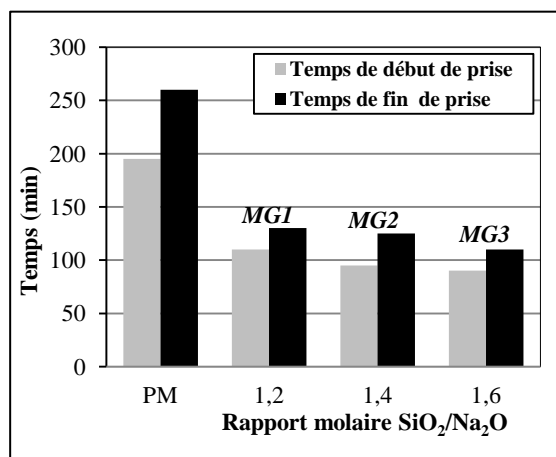
Tous les mortiers ont montré un comportement rhéologique de type Binghamien. Les valeurs calculées de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement des différentes formulations sont reportées dans la figure 1. Les différences observées entre les paramètres rhéologiques des 3 mortiers géopolymères ne sont pas significatives. Toutefois il semble que les ciments géopolymères seraient responsables d'une ouvrabilité légèrement moins aisée que les ciments Portland.

Le temps du début et de la fin de prise des différents mortiers est représenté sur la figure 2. De toute évidence, nous pouvons constater que les mortiers géopolymères possèdent un temps de prise, à peu près, deux fois plus rapide que celui du mortier Portland. De plus, l'intervalle entre le début et la fin de prise est plus large pour MP par rapport à celui du MG1, MG2 et MG3. Autrement dit, le temps de durcissement du ciment Portland est plus long que celui du ciment géopolymère. Cette différence de temps entre les deux types de mortiers trouve son

origine dans la différence des mécanismes de prise dans les deux systèmes. Les ciments Portland font prise par le phénomène d'hydratation tandis que le processus chimique à l'origine de la prise et le durcissement dans les géopolymères est la polycondensation des espèces aluminosilicates. Par ailleurs, l'augmentation du rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de la solution alcaline accélère légèrement la prise. Le temps de début de prise enregistré pour MG1 (RM=1,2), MG2 (RM=1,4) et MG3 (RM=1,6) était 110, 95 et 90 minutes respectivement.



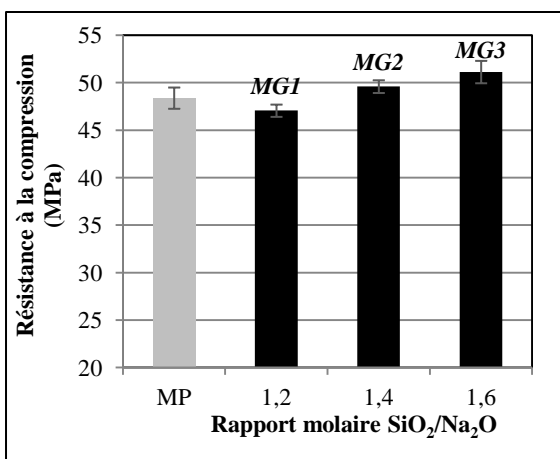
**Figure 1.** Propriétés rhéologiques du mortier normalisé et des mortiers géopolymères.



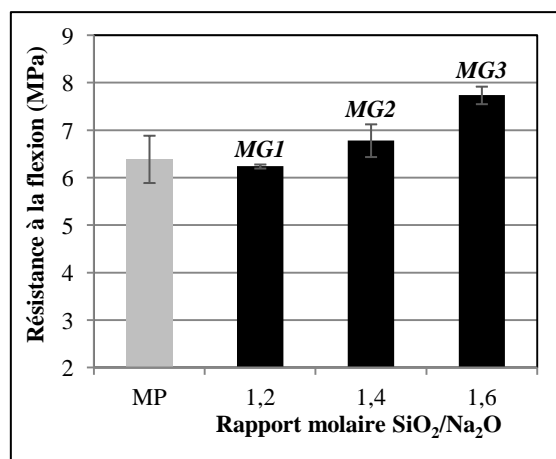
**Figure 2.** Temps du début et de fin de la prise du mortier normalisé et des mortiers géopolymères.

### 3.2. Propriétés à l'état durci

Les résistances à la compression et à la flexion des mortiers à 28 jours sont respectivement illustrées dans les figures 3 et 4.



**Figure 3.** Résistance à la compression du mortier normalisé et des mortiers géopolymères à 28 jours.

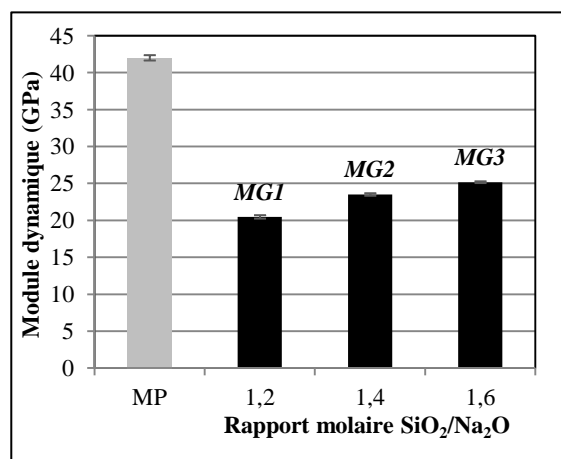


**Figure 4.** Résistance à la flexion du mortier normalisé et des mortiers géopolymère à 28 jours.

Nous remarquons que les mortiers géopolymères et le mortier normalisé possèdent des résistances à la compression qui varient entre 47 et 51 MPa, ce qui permet de considérer qu'ils appartiennent à la même classe de résistance. L'augmentation de résistance à la compression des mortiers géopolymères, bien que faible mais décelable, est due à l'augmentation du rapport molaire  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ . La même tendance est observée pour les résistances à la flexion (Figure 4).

La figure 5 représente le module d'élasticité des différents mortiers à 28 jours. Contrairement aux résistances mécaniques, la différence observée entre les rigidités des mortiers géopolymères et les mortiers normalisés est significative. En effet, un module d'Young de 42 GPa a été enregistré pour le mortier normalisé tandis que les valeurs pour MG1, MG2 et MG3 étaient 20, 23 et 25 GPa respectivement. Le même résultat a

été remarqué pour des mortiers géopolymères à base de cendres volantes [MOB 17], ce qui confirme la faible rigidité des géopolymères qu'elles que soit les matières premières utilisées.



**Figure 5.** Module d'élasticité dynamique du mortier normalisé et des mortiers géopolymères à 28 jours.

#### 4. Conclusions

Sur la base des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, on peut conclure que:

- La formulation d'un mortier géopolymère à base d'un mélange L/M de 50/50, un rapport Liquide/Solide de 0,5 et un rapport molaire SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O entre 1,2 et 1,8, conduit à une classe de résistance comparable à celle d'un mortier normalisé (entre 47 et 52 MPa).
- Les mortiers géopolymères à base de laitier et métakaolin possèdent une prise deux fois plus rapide que celle du mortier normalisé de même volume de pâte.
- En termes de rhéologie et de résistances mécaniques, les mortiers géopolymères peuvent être un bon alternatif écologique au mortier Portland.
- Pour une même classe de résistance à la compression, les mortiers géopolymères possèdent une rigidité inférieure de 40% à celle du mortier de référence.

#### 5. Bibliographie

- [BAK 05] BAKHEREV T., « Resistance of geopolymer materials to acid attack », *Cement and concrete research*, vol. 35, n° 4, 2005, p. 658-670.
- [BER 15] BERNAL S.A., « Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials », *Construction and building materials*, vol. 98, n° 3, 2015, p. 217-226.
- [DAV 13] Davidovits J., « Geopolymer cement », *Geopolymer institue*, vol. 21, 2013, p. 1-11.
- [KON 10] KONG D.L.Y., « Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete », *Cement and concrete research*, vol. 40, n° 2, 2010, p. 334-339.
- [MOB 17] MOBILI A., « Calcium sulfoaluminate, geopolymeric, and cementitious mortars for structural applications », *Enviroments*, vol. 4, n° 3, 2017, p. 64.