

## VERS L'ACTIVATION CHIMIQUE DE LA POZZOLANE NATURELLE DE BÉNI-SAF POUR LA PRODUCTION D'UN NOUVEAU CIMENT GÉOPOLYMÈRE

### TOWARDS THE CHEMICAL ACTIVATION OF THE NATURAL POZZOLAN OF BENI-SAF FOR THE PRODUCTION OF A NEW GEOPOLYMER CEMENT

Réception : 11/01/2022

Acceptation : 22/03/2022

Publication : 08/06/2022

GOUFI Nourredine<sup>1</sup>, KAID Nouria<sup>2</sup>, KERDAL Djamel Eddine<sup>3</sup>, IDIR Rachida<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Mécanique des Structures et Stabilité des Constructions (LM2SC), USTOMB, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie, [n\\_goufi@yahoo.fr](mailto:n_goufi@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Laboratoire de Matériaux, Sols et Thermique (LMST) USTOMB, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie, [n.kaidustomb@gmail.com](mailto:n.kaidustomb@gmail.com), [nouria.kaid@univ-usto.dz](mailto:nouria.kaid@univ-usto.dz)

<sup>3</sup>Laboratoire de Mécanique des Structures et Stabilité des Constructions (LM2SC), USTOMB, BP 1505 El M'Naouer, Oran, Algérie, [djkerdal@yahoo.fr](mailto:djkerdal@yahoo.fr)

<sup>4</sup>Cerema, DIMA Research Team, 120. Rue de Paris, BP 216, Sourdon, 77487, Provins CEDEX, France, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Ile-de-France (CEREMA). [rachida.idir@cerema.fr](mailto:rachida.idir@cerema.fr)

**Résumé** - L'industrie du ciment est considérée actuellement parmi les industries les plus polluantes. Pour faire face à cette situation, de nouveaux liants connus sous l'appellation de ciments alcalins et géopolymères ont vus le jour. Dans cet article, les caractéristiques mécaniques d'un liant composé d'une pouzzolane naturelle provenant du gisement de Bouhamidi de Béni Saf et d'un ciment de type CEM II/A sont présentées. Le mélange est essentiellement constitué de la pouzzolane à laquelle est ajouté le ciment. Pour optimiser les caractéristiques recherchées, le nouveau mélange ou ciment composé est activé par des solutions chimiques d'hydroxydes de sodium et de potassium NaOH et KOH. Les résultats montrent que contrairement à d'autres études, l'utilisation de KOH s'avère meilleure que celle du NaOH et que l'activation chimique du nouveau ciment composé conduit à une amélioration importante des résistances à la compression en particulier aux jeunes âges. Ces résistances peuvent même lui assurer de multiples utilisations pratiques.

**Mots - clés** : Ciment hybride, Pouzzolane Naturelle, Activants, Résistance à la compression.

**Abstract** - The cement industry is currently considered among the most polluting industries. To deal with this situation, new binders known as alkaline cements and géopolymères have been developed. In this article, the mechanical characteristics of a binder composed of a natural pozzolan from the Bouhamidi deposit of Beni-Saf, which is used with a high rate in substitution of the CEM II/A cement are presented. The new mixture or compound cement is activated by chemical solutions of sodium and potassium hydroxides NaOH and KOH. The results show that, unlike other studies, the use of KOH is better than that of NaOH and that the chemical activation of the new compound cement leads to a significant improvement in compressive strengths, especially at young ages. These resistances can even assure multiple practical uses.

**Keywords:** Hybrid cement, Natural Pozzolan, Activators, Compressive strength.

### 1-Introduction

Grand consommateur d'énergie, le secteur des matériaux de construction a cherché à optimiser ses dépenses énergétiques et diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> en adoptant de nouvelles stratégies. L'industrie du ciment est considérée

actuellement comme l'une des plus polluantes industries. Elle représente environ 5-8 % d'émission mondiale de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et de rejet de gaz tels que l'hémioxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et d'autres oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) responsables de l'effet de serre et de pluies acides, Réf. [1].

La recherche sur les compléments ou les alternatives au ciment Portland ordinaire (CPO) peut être divisée en deux voire trois grandes catégories, à savoir : (i) le remplacement partiel du CPO par les pouzzolanes, qui donne lieu aux ciments composés; (ii) l'activation chimique de matériaux aluminosilicates qui donne lieu aux ciments géopolymères ou matériau à activation alcaline (MAA); (iii) les ciments intermédiaires impliquant à la fois un remplacement du CPO à des taux élevés associé à une activation alcaline et qui donnent lieu aux ciments alcalins hybrides ou souvent appelés ciments hybrides. De part leur mode d'hydratation et de leurs diverses propriétés, les pâtes de ciment hybrides et géopolymères diffèrent de celles des CPO.

Certaines études, Réfs. [2 & 3] ont même montré que l'ajout d'activant alcalins tels que le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  et le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  était beaucoup plus efficace que le broyage prolongé des pouzzolanes ou le traitement thermique à températures élevées de mélanges contenant ces pouzzolanes. Ceci est dû au fait que l'utilisation d'un activant alcalin augmente le pH du milieu d'hydratation. Ce pH élevé conduit alors à une plus grande possibilité de rupture des liaisons Si-O-Si et Al-O-Al et de dissolution de la phase vitreuse du matériau pouzzolanique. Des études ont également rapporté le fait que, généralement, le dosage de l'activant a un effet significatif sur la résistance des matériaux [4 & 5]. Certaines recherches ont mis en évidence l'existence d'une concentration optimale de l'activant au-delà de laquelle un effet négatif sur l'évolution des propriétés, en particulier de résistance à la compression, peut être enregistré. Cependant, le dosage optimal varie en fonction de la nature de l'activant et de l'alumino-silicate utilisés ainsi que des conditions de cure, Réfs. [6 & 7]. A titre d'exemple, Xu et al. ont indiqué que pour le KOH, des molarités allant de 5 M à 10 M sont souvent utilisées pour activer des minéraux naturels, Réf. [8]. En théorie, tout minéral pouzzolanique riche en silice et alumine facilement solubles dans les milieux alcalins peut servir de précurseur pour les ciments hybrides [9 & 10]. Paradoxalement, cette large gamme de matériaux pouvant être utilisée en activation alcaline est une difficulté majeure dans le développement de ces matériaux [11]. En effet, la diversité des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques des précurseurs alumino-silicates rend non seulement leurs

études importantes mais et surtout la prévision et la compréhension de leurs comportement et caractéristiques complexes à définir.

Le présent travail décrit le potentiel d'utilisation de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (également notée « PN ») en tant que précurseur alumino-silicate pour la production d'un ciment hybride constitué de 80% de cette pouzzolane et 20% d'un ciment CEM-II/42,5 activé par deux solutions alcalines. Les résultats de la résistance à la compression en fonction du type d'activant et de sa concentration sont présentés et analysés.

## 2-Matériaux utilisés

### 2.1- Le ciment

C'est un CEM-II/42,5 provenant de la cimenterie de Sour el Ghozlane (Wilaya de Bouira) conforme aux exigences spécifiées dans la norme algérienne, Réf. [12]. Il est caractérisé par une finesse de  $367 \text{ m}^2/\text{kg}$  et une densité de 3,1. Sa composition chimique est donnée au Tableau 1 :

**Tableau 1 :** Composition chimique du ciment utilisé

**Table 1:** Chemical composition of the cement used

Composition Chimique %	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PAF
CEM-II/42,5	63,9	21,3	4,6	5,5	1,4	0,1	0,4	2,5	2,4

### 2.2- L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des différents échantillons de pâtes ainsi que des solutions activantes est une eau déminéralisée.

### 2.3- Les activants

Deux (2) activants alcalins ont été utilisés à savoir : le NaOH et le KOH qui sont fournis sous forme de pastilles blanches avec une pureté de 98 à 99%.

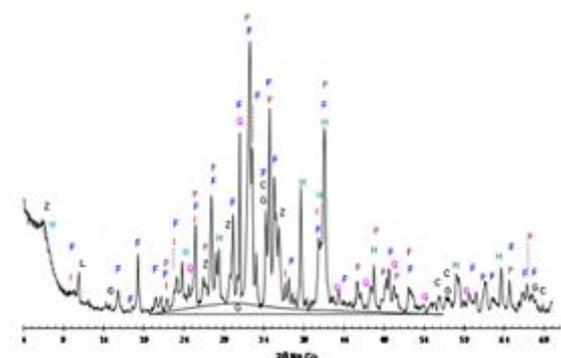
## 2.4- La pouzzolane naturelle

La PN est extraite du gisement de Bouhamidi à Béni-Saf situé dans la région ouest de l'Algérie. Elle est lavée puis séchée à 105°C, concassée puis broyée pendant 4 h dans un broyeur à boulet de type Libsat. La poudre obtenue est ensuite tamisée jusqu'à passage entier à travers un tamis de 80µm. Les compositions chimique et minéralogique de la pouzzolane sont données dans le tableau 2 et figure 1 suivants. La surface spécifique de la pouzzolane est de l'ordre de 460 m<sup>2</sup>/kg.

**Tableau 2 :** Composition chimique de la Pouzzolane naturelle (PN)

**Tableau 2:** Chemical composition of the natural pozzolan (NP)

Composition chimique de la PZN		Recommandations ASTM C618 pour PN
SiO <sub>2</sub>	45.4	43-72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.6	9-20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.3	1-12
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74.3	Min 70%
CaO	10.8	1-15
MgO	3.7	0.5-7
SO <sub>3</sub>	0.2	0-1.4
K <sub>2</sub> O	0.6	0.2-8
Na <sub>2</sub> O	0.8	0.5-11
PAF	4.3	Max 10%



**Figure 1 :** Diffractogramme des rayons X-DRX de la PN

**Figure 1:**X-ray diffraction pattern of the NP

## 3- Préparation des échantillons

### 3.1. Solutions activantes

La dissolution des activants dans l'eau étant parfois très exothermique, il est indiqué de verser lentement une masse de la phase solide de l'activant préalablement déterminée en fonction de la molarité recherchée dans l'eau distillée en agitant avec précaution pour homogénéiser la température du récipient qui peut être élevée et dégager des vapeurs.

### 3.2. Echantillons de pâte

Pour préparer les différents échantillons de pâte, les constituants du liant à savoir la pouzzolane naturelle et le ciment sont préalablement mélangés dans un malaxeur pendant 4 min. Par la suite, la solution activante est ajoutée et l'ensemble est de nouveau mélangé pendant 4 min. Les pâtes sont ensuite coulées dans des moules cylindriques de 3,2x5 cm<sup>2</sup>, puis scellées et laissées à température ambiante pendant 24 h (figure 2). Les extrémités des éprouvettes sont rectifiées pour rendre les deux surfaces d'appuis planes et parallèles. Par la suite, les échantillons sont conservés dans des boîtes hermétiques et maintenus dans une salle à une température contrôlée de 20±2°C jusqu'à l'âge de l'essai.



**Figure 2 :** Préparation des échantillons de pâtes

**Figure 2 :** Sample pastes preparation.

## 4-Etude paramétrique de l'évolution de la résistance à la compression des pâtes de ciment hybride

### 4.1- Effet du type d'activant chimique

#### 4.1.1- Cas de mélanges avec la pouzzolane naturelle seule

La pouzzolane naturelle contient plus de 40% de  $\text{SiO}_2$ , plus de 15% d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  et environ 10% de  $\text{CaO}$ . En présence d'activants alcalins, elle peut réagir pour produire aussi bien des C-S-H que des N-A-S-H ou (N, C)-A-S-H qui pourront lui conférer des propriétés liantes. Pour vérifier et illustrer cela, les résultats de résistance à la compression d'échantillons à base de pouzzolane naturelle de Béni-Saf avec et sans activation chimique sont consignés au tableau 3. A noter que seul le NaOH 6M a été testé.

**Tableau 3 :** Evolution des résistances à la compression (en MPa) d'échantillons de PN activés par NaOH 6M au cours du temps

**Tableau 3 :** Evolution over time of compressive strengths (in MPa) of NP samples activated by NaOH 6M

Age (jours)	7	28	90	420
Solution				
avec l'eau distillée	-	0,50±0,16	0,79±0,21	0,91±0,09
avec solution de NaOH	1,89±0,42	2,78±0,58	2,64±0,34	2,89±0,44

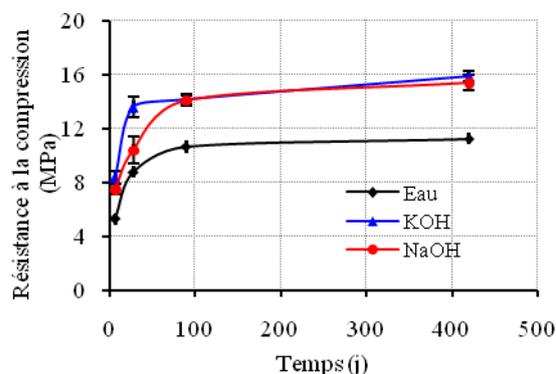
L'analyse des résultats indique que les échantillons préparés avec de l'eau distillée ne développent pratiquement pas de résistances à la compression. Une valeur maximale de 0,91 MPa est enregistrée à 420 jours alors qu'à 7 jours, les échantillons de pâte ne présentent aucune résistance. Ce résultat montre l'absence de réaction d'hydratation et signifie que dans ces conditions, la pouzzolane naturelle ne développe pas de propriétés liantes. Des résultats similaires ont été trouvés par Qian et al. pour des cendres volantes de classe F, Réf.[13]. L'utilisation de NaOH entraîne de plus grandes résistances qui restent néanmoins trop faibles pour envisager une application concrète. En outre, l'effet de l'activation

chimique se produit principalement avant 28 jours. A cette échéance, le rapport de résistances à la compression d'échantillons de pouzzolane avec et sans activation alcaline est maximal. Ainsi, à 28 jours lorsque le NaOH est utilisé comme activant, un gain de résistance de plus de 550 % est noté alors qu'à 90 et 420 jours, seuls des pourcentages d'augmentation de résistances de l'ordre de 215 % sont relevés.

Nourredine et al., Réf. [14] ont indiqué que l'activation alcaline d'un matériau aluminosilicate entraîne la libération plus rapide d'alumine qui conduit à la formation plus rapide de gel riche en Al de type N-A-S-H suivi d'un gel riche en Si. La présence initiale assez importante d'alumine dissoute empêche la dissolution de la silice. Ceci conduit à des résistances initiales élevées et une plus faible cinétique de développement de ces résistances avec le temps.

#### 4.1.2 -Cas de mélanges avec la pouzzolane naturelle et le ciment

Les résultats des résistances à la compression sur pâtes à consistances normales activées avec NaOH et KOH sont illustrés sur la figure 3. Pour l'ensemble des valeurs de résistances déterminées, le coefficient de variation se situe généralement entre 4 et 9% et est largement inférieur à 15%. Avant chaque essai de compression, les échantillons sont soigneusement examinés à l'œil nu et aucune fissure n'est détectée.



**Figure 3 :** Effet du type de l'activant sur le développement des résistances à la compression de pâtes de ciment hybride.

**Figure 3 :** Effect of activator type on the development of compressive strengths of hybrid cement pastes.

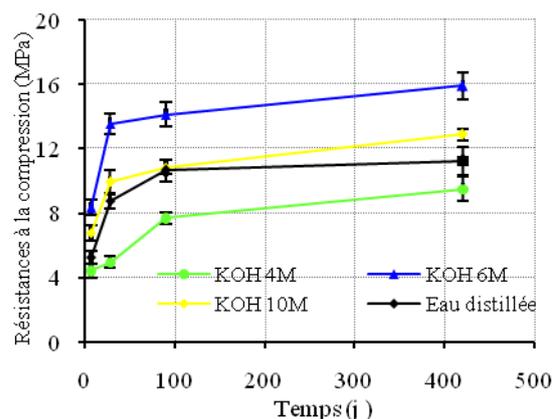
Une première analyse des résultats montre que la présence du ciment entraîne un gain en résistance à la compression pour les échantillons avec ou sans activation alcaline. Cet accroissement de résistance est attribué aussi bien à la contribution de la source de calcium du ciment qui produit C-S-H qu'à la chaleur libérée lors du processus de son d'hydratation qui favorise l'activation de l'alumino-silicate. Les plus grandes valeurs de résistances enregistrées avec l'activation alcaline aux différentes échéances, indiquent une accélération de la réaction des pouzzolanes. Ceci favorise la précipitation de plus grandes quantités de produits de réaction impliqués dans le développement de ces résistances mécaniques. Cet accroissement de la réaction de la pouzzolane suggère également que les produits traditionnels formés lors de l'hydratation de ce type de mélange diffèrent des produits obtenus lors de l'activation alcaline. D'ailleurs, García-Lodeiro et al. ont indiqué que l'une des caractéristiques la plus importante des ciments hybrides est l'absence de portlandite attribuée à la baisse de la solubilité du calcium dans les milieux alcalins, Réf. [15] ou à l'effet de dilution: la quantité faible de ciment utilisée conditionne la quantité de produit formé, Réf.[16]. La figure 3 montre également que les deux activants testés conduisent à des résistances à la compression meilleures que celles des échantillons sans activation alcaline. Cependant, l'effet de l'utilisation de KOH est plus important que celui lié à l'emploi de NaOH en particulier aux jeunes âges. Duxson et al. ont associé l'influence plus importante de KOH à son plus haut niveau d'alcalinité par rapport au NaOH. Cette alcalinité plus élevée lui confère une plus grande capacité de dissolution des espèces réactives du précurseur alumino-silicate et c'est cette capacité de dissolution qui contrôle la première étape de la réaction, Réf. [17]. En outre, les travaux de Bondar et al., Réf. [18] sur l'activation par NaOH et KOH de plusieurs alumino-silicates naturels ont illustré que KOH présente généralement de meilleurs produits de réaction que NaOH. Sur la base des résultats de Xu et Deventer, Bondar et al., ont également indiqué qu'étant donné que les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  présentent la même charge électronique, leurs effets devaient résulter plutôt de leurs différences de tailles ioniques. L'ion  $\text{K}^+$  étant plus grand, il favorise la formation de grands oligomères de silicate, ce qui est favorable au

développement de la résistance en raison de la plus grande condensation ou empilement des gels résultants. A l'inverse, le cation  $\text{Na}^+$ , de taille inférieure, favorise une réaction ionique avec des oligomères de silicate plus petits et entraîne alors de plus faibles résistances, Réf.[18].

Toutefois, les auteurs ont relevé que du point de vue des coûts, l'utilisation de NaOH est plus favorable que celle du KOH.

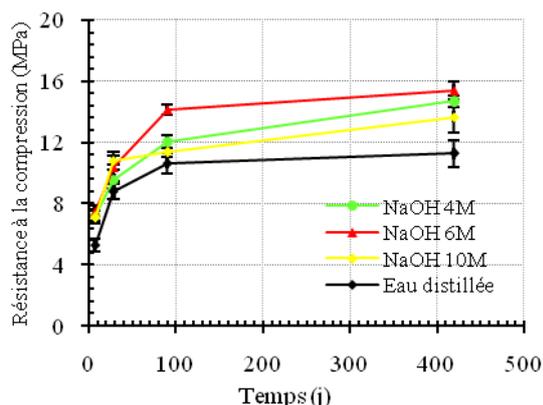
#### 4.2-Effet de la concentration de l'activant

Pour illustrer l'effet de concentrations et rechercher la valeur optimale permettant d'obtenir les résistances les plus élevées des ciments hybrides considérés dans cette étude, les résultats de résistances à la compression obtenus avec divers dosages de NaOH et KOH sont présentés sur les figures 4 et 5.



**Figure 4 :** Effet de la concentration en KOH sur le développement des résistances à la compression de pâtes de ciments hybrides.

**Figure 4 :** Effect of KOH concentration on the development of compressive strengths of hybrid cement pastes.



**Figure 5 :** Effet de la concentration en NaOH sur le développement des résistances à la compression de pâtes de ciments hybrides.

**Figure 5 :** Effect of NaOH concentration on the development of compressive strengths of hybrid cement pastes.

L'analyse des figures 4 et 5 permet de relever que pour les deux activateurs utilisés, un accroissement de la résistance à la compression au cours du temps est enregistré indépendamment de la concentration de l'activateur. Cet effet est associé à la formation en continu des gels de C-S-H et N-(C) A-S-H selon la disponibilité des ions calcium, alumine et silice. Lorsque les activateurs sont utilisés à de faibles concentrations (4M), de plus faibles résistances sont enregistrées pratiquement à toutes les échéances considérées. Les valeurs les plus importantes des résistances et pour l'ensemble des échéances sont obtenues pour des concentrations de 6M aussi bien pour le NaOH, que pour le KOH. Bondar et al. ont d'une part indiqué que les résistances maximales de pâtes de diverses pouzzolanes naturelles iraniennes activées par une solution de KOH ont été obtenues pour des concentrations de KOH comprises entre 5 et 7,5 M, Réf. [18] qui corroborent nos résultats. D'autre part, comme l'ont suggéré Bondar et al., l'obtention de ces résistances maximales peut être liée aux plus grands taux de dissolution de silice Si et d'alumine Al contenus dans le précurseur alumino-silicate utilisé, Réf. [18].

En outre, l'analyse des résultats des figures précédentes montre que contrairement aux résistances des pâtes de ciment hybride obtenues avec les solutions de KOH 10M qui sont supérieures à celles relevées pour des

concentrations de 4M, les échantillons de pâtes préparés avec NaOH 10M présentent les plus faibles résistances qui sont d'ailleurs plus faibles que celles enregistrées pour les plus basses molarités de NaOH considérées dans cette étude.

Les faibles résistances obtenues pour les faibles concentrations sont justifiées par le fait que la faible alcalinité génère une faible dissolution de la silice et de l'alumine contenues dans la pouzzolane ce qui entraîne une formation moins importante de gel alumino-silicate N-A-S-H/(N,C)-A-S-H. Dans ce cas-ci, les résistances sont particulièrement dictées par l'hydratation du ciment présent dans le mélange. Il est toutefois utile de noter que pour le cas des ciments hybrides étudiés ici, la teneur en Al réactif des mélanges étant probablement faible, il est possible que lorsqu'une solution de NaOH ou KOH est utilisée comme activateur, des gels de silicate de sodium et de calcium soient formés plutôt que des gels de silicate de sodium. Le même constat a été fait par Cyr et al. dans leur études sur les propriétés de pâtes et mortiers de géopolymères à base de verre, Réf. [19]. Dans leur étude sur l'activation de déchet de brique rouge activés par une solution de NaOH, Robayo-Salazar et al. ont noté qu'une faible concentration de NaOH (<6%) ne fournit pas une alcalinité suffisante entraînant la solubilité du précurseur, Réf. [7]. Pour leur part, Najimi et al. à travers leur étude sur des ciments hybrides constitués de pouzzolane naturelle et de laitier, ont indiqué que, bien que la chaux disponible dans les scories puisse réagir avec l'eau, l'hydroxyde de sodium et le silicate de sodium, les réactions des pouzzolanes naturelles ne se produisent qu'avec des solutions alcalines fortes, Réf. [20].

En présence de grandes concentrations, les plus faibles résistances à la compression relevées sont liées à la présence d'alcalins libres dans le produit. Cet excès d'alcalins affecte de manière négative l'évolution des résistances. De même, l'augmentation de la concentration des activateurs 10M n'a pas d'effet sur les taux de dissolution de la silice et alumine contenus dans la pouzzolane naturelle. En effet, l'utilisation de solutions à pH élevé accélère la formation des produits alumino-silicates qui créent par la suite des barrières autour des grains et bloquent

ainsi la continuité des réactions conduisant alors à des résistances faibles, Réfs. [18 & 20].

## 6-Conclusion

Les résultats énumérés dans cet article ont clairement montré que la résistance mécanique augmente dans les ciments hybrides aux différentes échéances de cure ainsi qu'une accélération de la réaction des pouzzolanes qui favorise la précipitation de plus grandes quantités de produits de réaction impliqués dans le développement de la résistance. Les résultats trouvés ont également permis de relever que la résistance des différents ciments hybrides étudiés peut être attribuée à deux facteurs : d'une part à la réaction entre la silice et l'alumine actives dans la pouzzolane naturelle et les alcalins utilisés, d'autre part, à la formation de C-S-H provenant de la réaction d'hydratation du ciment contenu dans le mélange. Toutefois, il est important de trouver un équilibre entre la teneur en liant et les matériaux alcalins pour garantir que tous les matériaux alumino-silicate soient consommés dans le processus d'activation alcaline. Les résultats ont aussi révélé l'effet plus important de l'emploi de KOH à celui de NaOH en particulier aux jeunes âges en raison du plus haut niveau d'alcalinité de KOH par rapport au NaOH et qu'il est aussi déconseillé d'essayer d'accroître la résistance en augmentant le dosage des alcalins, tant du point de vue économique que du point de vue des propriétés.

## Références bibliographiques

- [1] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*., Ed. Institut Géopolymère, Saint-Quentin. Tthird ed, 2008.
- [2] Shi,C., and Day, R.L., *Comparison of different activation methods for enhancing reactivity of pozzolans*., Cement and Concrete Research, Ed. Elsevier, Vol.31, pp 813–818, 2001.
- [3] Radwan, M.M., Farag, L.M., Abo-El-Enein, S.A. and Abdel-Hamid, H.K., *Alkali activation of blended cements containing oil shale ash*., Construction and Building Materials, Ed. Elsevier, Vol.40, pp 367–377, 2013.
- [4] Ariel R. Villca, Lourdes Soriano, Alba Font, Mauro M. Tashima, José Monzó, Maria Victoria Borrachero, Jordi Payá., *Lime / pozzolan / geopolymer systems: Performance in pastes and mortars*. Construction and Building Materials 276 (2021) 122208. Ed. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122208>.
- [5] Yurdakul Aygormez., *Assessment of performance of metabentonite and metazeolite-based geopolymers with fly ash sand replacement*. Construction and Building Materials. 302 (2021) 124423. Ed. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124423>
- [6] A. Palomo, P. Monteiro, P. Martauz, V. Bilek, A. Fernandez-Jimenez, *Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum)*. Cement and Concrete Research. 124 (2019) 105829. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105829>
- [7] Komljenovic, M., *Mechanical strength and Young's modulus of alkali activated cement-based binders*., Handbook of Alkali-activated Cements Mortars and Concretes University of Belgrade, Serbia, 2015.
- [8] Robayo-Salazar, R.A., Mejía de Gutiérrez, R. and Gordillo, M., *Natural pozzolan-and granulated blast furnace slag-based binary geopolymers*., Materiales de Construcción, Ed. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Vol.66, n° 321, pp 1-8, 2016.
- [9] Sedira, N. and Castro-Gomes, J., *Effect of activators on hybrid alkaline binder based on tungsten mining waste and ground granulated blast furnace slag*., Construction and Building Materials. 232 (2020). 117176 Ed. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117176>.
- [10] Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I., Maltseva, O., Palomo, A., *Hydration mechanisms of hybrid cements as a function of the way of addition of chemicals*, Journal of the American Ceramic Society. 102 (2018) 427-436 Ed. Wiley-Blackwell.
- [11] Xu, H., Van Deventer, J.S.J. and Jannie, S.J., *Geopolymerisation of multiple minerals*,



Minerals Engineering, Ed. Elsevier, Vol.15, n° 12 pp 1131–1139, 2012.

[12] Normes Algérienne, NA 442., *Ciment: Composition, spécifications et critères de conformité*, (2005).

[13] Qian, J., Shi, C. and Wang, Z., *Activation of blended cements containing fly ash.*, Cement and Concrete Research, Ed. Elsevier, Vol.31, n° 8, pp 1121–1127, 2001.

[14] Nourredine, G., Kerdal, D., Kaid. N. and Idir, R., *Potential use of activated Algerian natural pozzolan powder as a cement replacement material.*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Ed. Taylor and Francis, Vol. 25, n° 6 pp 967-987, 2021.

[15] Garcia-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., *Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction Stages.*, Cement and Concrete Composites, Ed. Elsevier, Vol.39, pp 82–92, 2013.

[16] Daniela, E. and Angulo-Ramírez, R., *Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars : Performance to alkali-aggregate reaction.*, Construction and Building Materials, Ed. Elsevier, Vol.179, pp 49–56, 2018.

[17] Duxson, P., Fernandez-Jimenez , A., Provis , J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and Van Deventer, J.S.J., *Geopolymer technology: the current state of the art.*, Journal of Materials Science, Ed. Springer, Vol.9, n° 42, pp 2917–33, 2007.

[18] Bondar, D., Lynsdale, C, Milestone, N, Hassani, N. and Ramezaniapour, A., *Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans.*, Cement and Concrete Composites, Ed. Elsevier, Vol.33, n° 2, pp 251–260, 2011.

[19] Cyr, M., Idir, R. and Poinot, T., *Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet.*, Journal of Materials Science, Ed. Springer, Vol.47, pp 2782–2797, 2012.

[20] Najimi, M., Ghafoori, N. and Sharbaf, M., *Alkali-activated natural pozzolan /slag mortars: A parametric study.*, Construction and Building Materials, Ed. Elsevier, Vol.164, pp 625–643, 2018.