



Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique (*Assessment of pozzolanic mortars sustainability exposed to chemical attack*)

**L. Laoufi^{1*}, Y. Senhadji¹, A. Benazzouk², T. Langlet², M. Mouli³,
I. Laoufi¹, A. S. Benosman⁴**

¹Département de Génie Civil, Université de Mascara, Bp 736 Route de Mamounia, Mascara 29000, Algérie.

²Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Vernes 80025 Amiens cedex, 1 France.

³Laboratoire LABMAT, Département de Génie Civil, ENP-Oran El Mnaouer 31000, Algérie.

⁴Faculté des Sciences Exactes et Appliqués, Laboratoire de la Chimie des Polymères, Université d'Oran, Algérie.

Received 14 Dec 2015, Revised 02 Apr 2016, Accepted 12 Apr 2016

*For Correspondence: E-mail: laoufifr@yahoo.fr (L. Laoufi); Phone: +21345804169; Fax: +21345804169

Résumé

Le ciment est un produit stratégique dans le génie civil pour la construction de structures en béton armé. Mais sa production génère environ 5 % de gaz toxiques tels que le CO₂ responsable de la dégradation écologique de l'environnement de la planète, de plus l'industrie cimentaire est un secteur consommateur d'énergie non renouvelable. L'utilisation dans le ciment d'ajouts naturels est une solution pour réduire le gaz CO₂ et le coût de production. Le but de ce travail est l'étude d'un matériau de construction durable : la pouzzolane naturelle (PN) de Béni-saf (Algérie) incorporée aux mortiers exposés à une attaque de 5% d'acide sulfurique. La perte de masse, le suivi de la lecture du pH de chaque solution d'attaque ainsi que celui des dimensions des éprouvettes sont les différents essais réalisés pour étudier la durabilité des mortiers confectionnés à 0, 10, 20 et 30% de pouzzolane. Les résultats trouvés montrent que la pouzzolane naturelle améliore la résistance des mortiers dans un environnement acide.

Mots clés : Pouzzolane naturelle, attaque chimique, durabilité, acide sulfurique, perte de masse

Abstract

Cement is a strategic product in the civil engineering for the construction of reinforced concrete structures. But its production generates around 5% of toxic gases such as CO₂ responsible for the ecological environmental degradation of the planet; moreover the cement industry is a consumer of non-renewable energy sector. Using natural additions in cement is a solution to reduce the CO₂ gas and the cost of production. The purpose of this work is the study of a sustainable building material: natural pozzolan (PN) of Beni Saf (Algeria) which is incorporated into mortars exposed to an attack of 5% sulfuric acid. The loss of mass, monitoring the pH of each solution over time as well as the dimensions of the specimens are the different tests to study durability of mortars made up 0, 10, 20 and 30% pozzolan. The results show that the natural pozzolan improves mortars resistance in acidic environment.

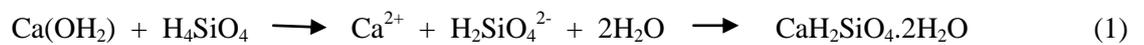
Keywords: natural pozzolan, chemical attack, durability, sulfuric acid, mass loss

1. Introduction

L'eau libre peut pénétrer dans le réseau de pores et de capillaires du béton et apporter avec elle des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure. Un béton durable est un béton qui résiste à la pénétration des agents agressifs et qui permet une durée de vie significative aux structures en béton. Les agressions externes telles que les chlorures, le CO₂ et les attaques chimiques peuvent dégrader les propriétés physiques et mécaniques du béton ainsi que sa durabilité au cours du temps. Parmi les attaques chimiques, les acides qui peuvent provenir aussi bien des zones industrielles que de l'activité urbaine dégradent le plus sévèrement le béton [1].

L'acide sulfurique (H₂SO₄) avec l'acide chlorhydrique (HCl) sont classés comme les menaces naturelles les plus agressives. Lorsque le béton est exposé à un environnement contenant de l'acide sulfurique, il subit une sévère dégradation due à des réactions de neutralisation. L'acide sulfurique réagit avec la chaux libre [Ca(OH)₂] dans le béton, formant le gypse [CaSO₄·2H₂O]. Une autre action destructrice est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux de gypse [2]. Ces deux produits constituent l'ettringite, le produit de réaction le moins soluble, [3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O]. Le gypse et l'ettringite causent l'expansion qui entraîne la fissuration du béton [3].

Les échantillons de béton contenant les ajouts pouzzolaniques sont considérablement plus résistants à l'agression d'une solution d'acide sulfurique que le béton ordinaire sans pouzzolane. Il est généralement admis que les pouzzolanes ont besoin de moins d'énergie pour leur broyage que le clinker et que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans le ciment ou dans le béton entraîne de nombreuses propriétés bénéfiques, comme la faible chaleur d'hydratation, la résistance à la compression élevée, la faible perméabilité, la haute résistance aux sulfates et la faible activité de l'alcali-silice [4, 5]. L'utilisation du ciment Portland avec de la pouzzolane naturelle (PN) génère une réaction entre l'hydroxyde de calcium, produit par l'hydratation du ciment Portland et le SiO₂ amorphe de la phase vitreuse de la pouzzolane. Ceci conduit à une augmentation de la formation du gel de l'hydrate de silicate de calcium [CSH] dit de 2^{ème} génération et ainsi à l'augmentation de la résistance et de la densité [6].



Dans cette étude, l'effet de 5% H₂SO₄ en concentration massique sur la perte de masse, le suivi du pH et des dimensions d'éprouvettes en mortiers pouzzolaniques et en mortiers de ciment Portland a été examiné.

2. Etude expérimentale

2.1. Les matériaux

2.1.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland type CEM I - 42.5 N fabriqué selon la norme algérienne NA 442-2008 [7], provenant de la cimenterie de Zahana. Ses propriétés physiques sont : Surface spécifique Blaine, 3308 cm²/g ; masse volumique apparente, 1.02 g/cm³ et densité, 3.12. La composition minéralogique déterminée selon les formules de Bogue est : C₃S, 47.15% ; C₂S, 25.69% ; C₃A, 2.41% ; C₄AF, 15.12%. La composition chimique du ciment a été déterminée au moyen de l'appareil de marque PANalytical de la cimenterie Lafarge à Oggaz (Algérie), Figure 1. Cette composition chimique est représentée par le Tableau 1.

Tableau 1 : Composition chimique élémentaire du ciment

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	RI	PAF
63.89	21.35	4.59	5.52	2.72	0.41	0.13	1.37	0.22	2.47

PAF : Perte au feu ; RI : Résidus insolubles.



Figure 1 : L'appareil de marque PANalytical utilisé pour la détermination des taux des oxydes du ciment.

2.1.2 La pouzzolane naturelle

Après un séchage de 105°C pour éliminer l'eau libre, la pouzzolane a été broyée finement jusqu'à obtenir des fines particules moins que 80 µm, Figure 2. Ses propriétés physiques sont comme suit : densité, 2.75 ; masse volumique apparente, 0.98 g/cm³ ; Surface spécifique Blaine, 4255 (cm²/g). La composition chimique est présentée dans le Tableau 2. La Figure 3 présente l'analyse sédimentométrique de la pouzzolane naturelle dont la vitesse de chute des grains dans le fluide est calculée grâce à la loi de Stokes.

Tableau 2 : Composition chimique de la pouzzolane naturelle en (%)

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
Les teneurs	45.90	17.10	10.60	10.20	3.40	1.50	1.80	4.05	4.20



Figure 2: (a) Scories de la PN avant broyage; (b) Poudre de la PN après broyage.

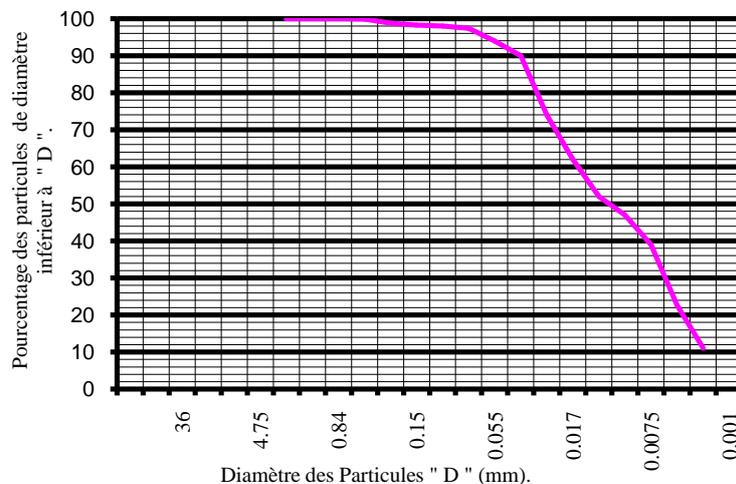


Figure 3 : Courbe sédimentométrique de la PN de Béni-Saf.

La microstructure a été étudiée en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) couplé à la microanalyse (EDX). Les données de la microanalyse ont été recueillies à l'aide d'un microscope classique de balayage type JEOL-JSM-6400 en utilisant une tension d'accélération de 20 kV et une distance de travail de 39 mm. Tous les produits de départ ont été observés avant broyage. La micrographie MEB et les spectres élémentaires de rayons X de la PN montrent la microstructure complexe de la pouzzolane naturelle, Figure 4. Les spectres élémentaires de rayons X de la pouzzolane naturelle extraites d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie dans un microscope électronique à balayage montrent la présence de grandes quantités de silice (Si), des quantités modérées de l'alumine (Al), des quantités mineures d'alcalin (Na, K) et de magnésium (Mg), et des traces de fer (Fe) et de calcium (Ca). La microanalyse par EDX confirme les observations de l'analyse par diffraction. La composition minéralogique de la pouzzolane naturelle a été déterminée par la diffraction des rayons X (DRX) et est présentée en Figure 5. Selon les données de la DRX, la pouzzolane naturelle contient des minéraux cristallins. D'après les pics les plus intenses, la pouzzolane est composée de :

- Prévalence de Zéolite (analcime: $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et cordiérite: $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$;
- Feldspath (plagioclase including albite: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ and anorthite: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$);
- Pyroxene (augite: $(\text{Mg},\text{Fe})_2 \cdot 2 \text{SiO}_6$);
- Cristobalite: SiO_2 ;
- Illite: $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$.

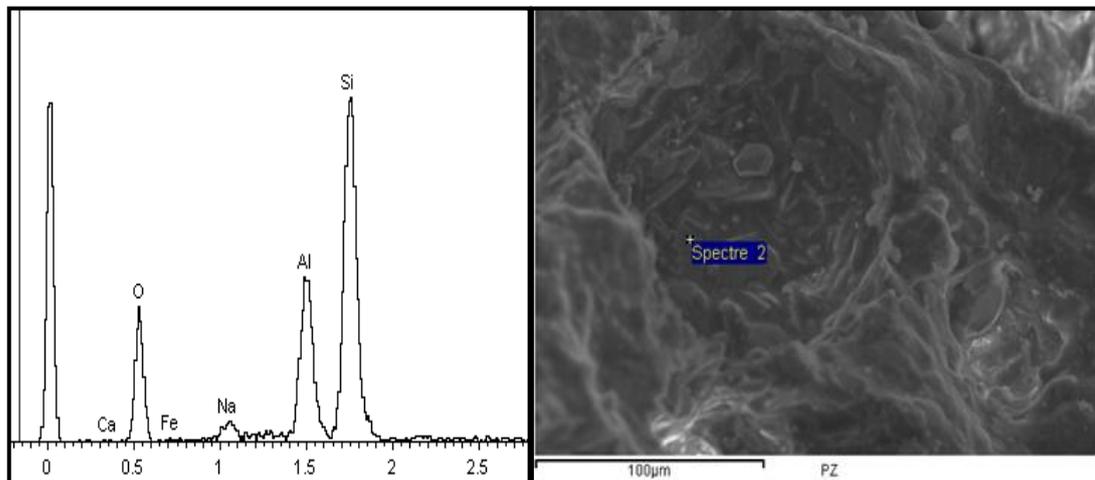


Figure 4 : Micrographie et spectres élémentaires de rayons X de la PN.

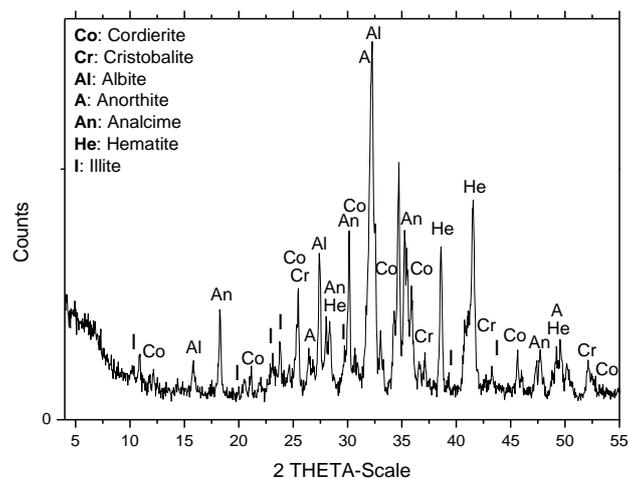


Figure 5: DRX par diffraction de la PN.

2.1.3 La solution acide

La solution agressive utilisée est une solution d'acide sulfurique produit par la société Fisher Chemical avec un degré de pureté de 97% soit une concentration équivalente de 18.10 mol/l, Figure 6.

2.2. Préparation des échantillons et procédure des essais

Les mortiers destinés à la confection des éprouvettes de dimensions $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ furent mélangés et préparés selon les procédures de la norme NF EN 196-1 [8], utilisant un ciment Portland ordinaire CEM I – 42.5 N. Les taux ciment/sable et eau/ciment furent pris égaux respectivement à 1:3 et 1:2 pour toutes les éprouvettes. La procédure de malaxage est celle préconisée dans la norme NF P 15-403 [9]. Les éprouvettes en nombre de douze par solution soit trois éprouvettes pour chaque mélange de mortier, seront démoulées après 24 heures, et conservées dans l'eau saturée en chaux pendant 28 jours à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, avant d'être soumis à l'attaque acide. Après cette période de cure, les éprouvettes seront pesées pour déterminer leur poids initial avant l'attaque chimique, puis immergées dans les solutions à 5% de H_2SO_4 . Après l'attaque chimique et à

l'échéance considérée, les éprouvettes seront pesées avec une balance de précision de 0.01g après les avoir nettoyées trois fois avec l'eau de robinet pour éliminer le mortier altéré et laissées sécher pendant 30 mn, Figure 7. Cette opération de mesure de pesées sera effectuée aux échéances 15, 30, 45, 60, 75, 90 et 105 jours. La résistance aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans les solutions acides sera évaluée selon la norme ASTM C 267 [10] en mesurant la perte de masse. L'évaluation s'effectuera en mesurant la perte de masse des échantillons de la manière suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1 - M2)/M1] \times 100 \quad (3)$$

Où M1 est la masse de l'éprouvette avant immersion et M2 est la masse de l'éprouvette nettoyée et séchée après immersion. Les éprouvettes préparées avec le ciment type CEM I – 42.5 N et 0, 10, 20 et 30% de PN en masse de ciment furent dénommés M0, M10, M20 et M30 respectivement.



Figure 6 : Mortiers immergés dans la solution acide 5% H₂SO₄ en concentration massique.



Figure 7 : Pesée des échantillons, balance de précision à 0.01g.

2.2.1. Maniabilité des mortiers frais

Les maniabilités de mortiers frais furent déterminées par la table à secousse selon la norme ASTM C 1437 [11] avec une quantité d'eau constante pour la préparation de toutes les pâtes ($e/l = 0.5$) et les valeurs des résultats sont données dans la Figure 8. La maniabilité des mortiers pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle. Cette diminution de la maniabilité relative aux mortiers pouzzolaniques est traduite par l'augmentation proportionnelle de la surface spécifique des pâtes grâce à la grande finesse de la pouzzolane et donc une nécessité supplémentaire en eau. L'augmentation de e/l des mortiers pouzzolaniques pour avoir un affaissement voisin de celle du mortier normalisé sans pouzzolane peut influencer négativement sur les caractéristiques mécaniques.

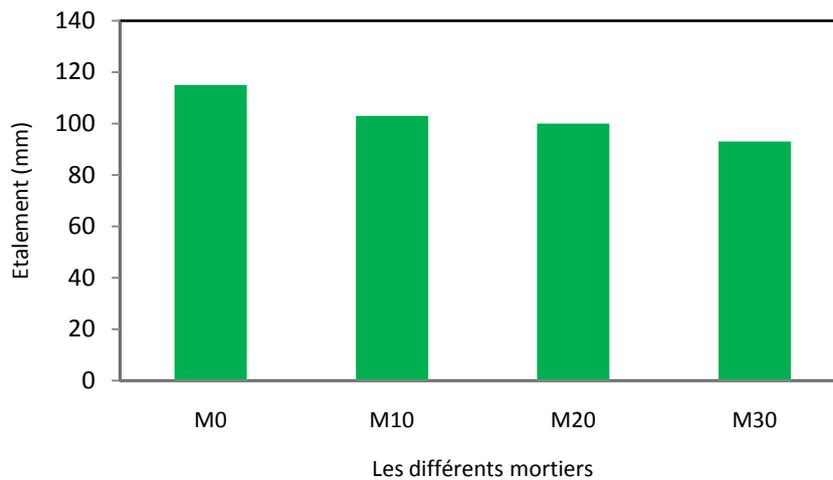


Figure 8: Influence de la PN sur la maniabilité des mortiers à $e/l = 0.5$.

2.2.2. Consistance normale et temps de prise

Les essais de consistance normalisée ont été réalisés et les temps de début et fin de prise mesurés selon la norme NF EN 196-3 [12] avec des consistances (e/l) de 24, 25, 25.5 et 26% pour les mortiers M0, M10, M20 et M30 respectivement. Les résultats de ces essais physiques de caractérisation des pâtes normalisées de ciment avec et sans PN sont présentés dans la Figure 9.

On voit clairement dans cette figure que les pâtes de ciment avec différents taux de pouzzolane ont besoin plus d'eau pour l'obtention d'une consistance normale, en outre, plus le pourcentage de PN est grand et plus la demande en eau est grande. Cette augmentation de la consistance normale des pâtes pouzzolaniques est due probablement à l'augmentation progressive de la surface spécifique du liant ce qui entraîne naturellement un fort appel aux molécules d'eau afin de mouiller toute la pâte. On déduit donc que l'incorporation de la PN dans les mélanges modifie le besoin en eau, influe sur le processus d'hydratation du ciment et augmente les temps de début et de fin de prise proportionnellement aux pourcentages de la PN.

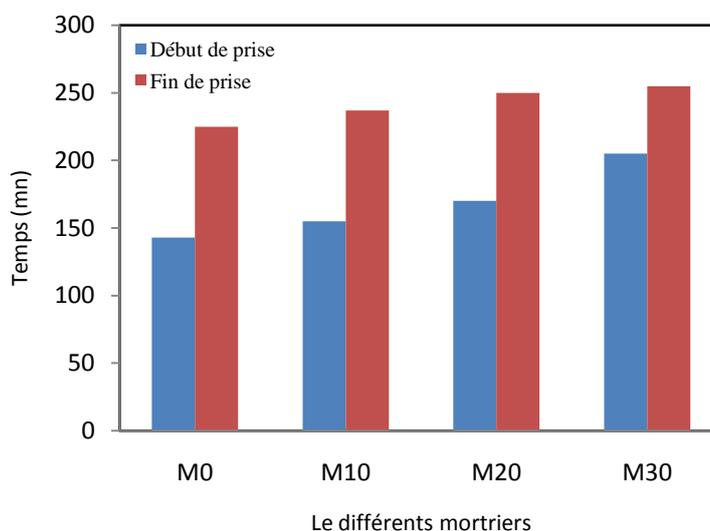


Figure 9: Influence de la PN sur le temps de prise

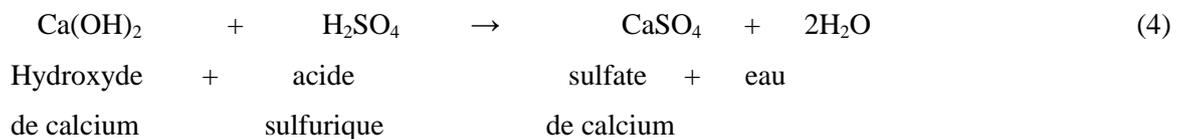
3. Résultats et analyse

3.1. Action de l'acide sulfurique

La Figure 10 montre la variation de la perte de masse des mortiers M0, M10, M20 et M30 confectionnés avec et sans ajout de la PN avec différents pourcentages, en fonction de la période d'immersion dans la solution de 5% H_2SO_4 pendant 105 jours. On constate d'abord que tous les mortiers avec et sans ajout de la pouzzolane de PN,

sans exception, accusent des pertes de poids permanents à toutes les périodes considérées. Il est remarquable d'apercevoir que tous les mortiers pouzzolaniques sans exception accusent des pertes en masse inférieures à celle du mortier sans pouzzolane M0 et ceci à toutes les échéances de la période d'immersion. On peut affirmer que la PN a joué un rôle important pour permettre aux mortiers pouzzolaniques de résister à l'agression de l'acide sulfurique.

La réduction de perte de masse par rapport à M0 est de 15.24, 17.86 et 19.80 pour les mortiers M10, M20 et M30 respectivement à l'échéance 105 jours. Mais c'est le pourcentage de pouzzolane naturelle de 30% qui affiche les pertes de masses les moins élevées, donc plus le pourcentage de pouzzolane naturelle est grand plus la résistance du mortier est grande à l'agression acide sulfurique (5% H₂SO₄). La réaction pouzzolanique fixant la chaux, les pores capillaires sont réduits par formation des gels de 2^{ème} génération [CSH], bloquant ainsi l'absorption de la solution acide, d'où une réduction de la perte de masse pour l'ensemble des mortiers pouzzolaniques par rapport au mortier de référence. De plus, la perte de masse observée pour l'ensemble des mortiers pouzzolaniques est due au fait que le ciment, après hydratation, libère une partie considérable d'hydroxyde de calcium libre [Ca(OH)₂] qui peut être lixiviée à l'extérieur quand elle est soumise à l'attaque par l'acide sulfurique [H₂SO₄] en donnant du gypse, selon la réaction chimique suivante :



La Figure 11 nous permet de constater la quantité importante de gypse déposée au fond du bac après 45 jours de conservation dans l'acide 5% H₂SO₄.

Senhadji [13] et Ghrici [14] qui ont travaillé sur la même pouzzolane naturelle ont trouvé que la PN était bénéfique en résistant aux attaques acides mais à des pourcentages de pouzzolane naturelle différents. Cette différence est essentiellement due à l'influence des facteurs suivants : le type de ciment utilisé, la finesse de la pouzzolane utilisée, la durée de conservation des échantillons dans les solutions acides et les concentrations des solutions utilisées.

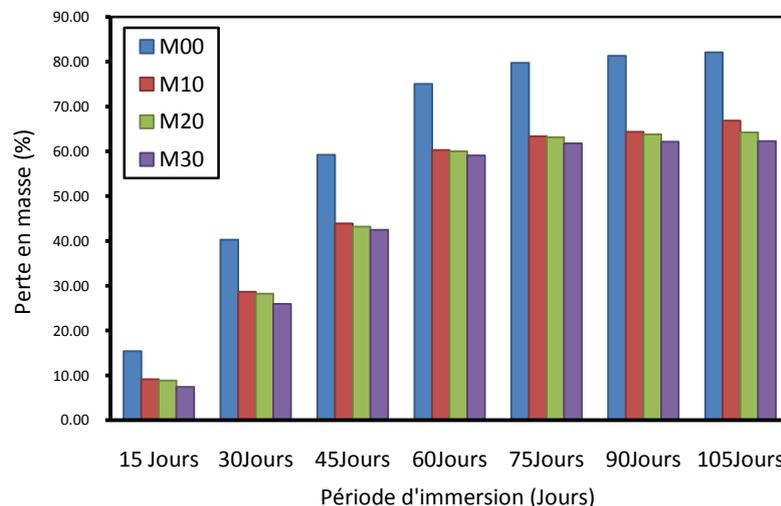


Figure 10 : Evolution de la perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 5% H₂SO₄

3.2 Le suivi de la lecture du pH de la solution d'attaque

Le suivi de la lecture du pH de la solution acide est réalisé grâce à un pH- mètre portable de paillasse de marque "pHTestr2" durant la période d'immersion des éprouvettes, Figure 12. Les résultats obtenus permettent d'évaluer le degré d'attaque de la solution acide sur les différents échantillons pour montrer l'effet de l'ajout de la PN sur la résistance des mortiers à l'acide sulfurique (5% H₂SO₄) par le suivi de la lecture du pH, pour une période donnée allant jusqu'à une date où le pH devient basique (date à laquelle la correction de la solution acide est nécessaire). La Figure 13 présente les relevés de ces pH au cours des premiers 14 jours pour les

mortiers M0 et M30. Durant cette période, le pH relevé au 1^{er} jour à une valeur de 1.8 pour les deux mortiers, il atteint 3.7 et 4.5 pour M0 et M30 respectivement. Nous constatons donc que le mortier sans pouzzolane M0 a une réaction accélérée par rapport au mortier sans pouzzolane M30, cela veut dire que la pouzzolane naturelle a réagi avec l'oxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée lors de l'hydratation du ciment, formant du sulfate de calcium déposé comme gypse engendrant une perte de masse par sa dissolution.



Figure 11 : Dépôt du gypse au fond du bac après 45 jours d'immersion.



Figure 12 : Lecture du pH de la solution acide 5% H_2SO_4 .

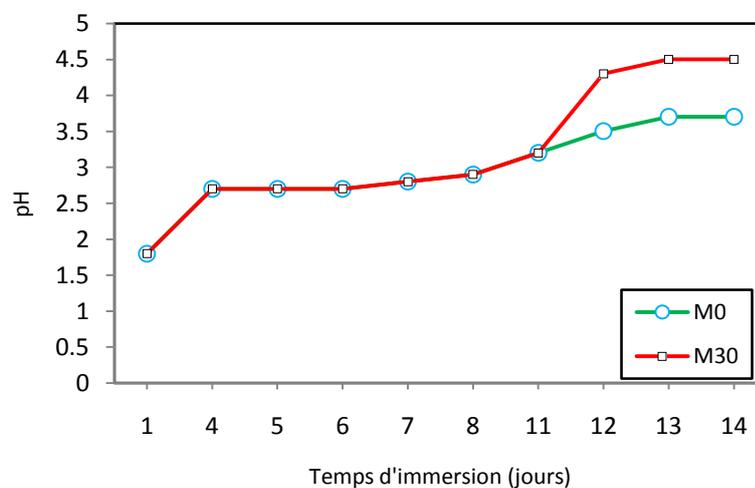


Figure 13 : Variation du pH au cours du temps du mortier M0 et M30 dans 5% H_2SO_4 .

Durant toute la durée de 105 jours d'exposition des éprouvettes à la solution acide de 5% H_2SO_4 nous avons procédé à 4 corrections de la solution acide. La Figure 14 présente les valeurs des pH de la 4^{ème} et dernière correction. Nous constatons que le mortier M30 a une perte d'acidité accélérée par rapport au mortier M0 puisque le pH est de 6.3 pour le premier (M30) et de 5.1 (M0) pour le deuxième à l'échéance 105 jours. Cela veut dire que le mortier M0 a une perte de masse élevée par rapport au mortier M30 pour la même échéance.

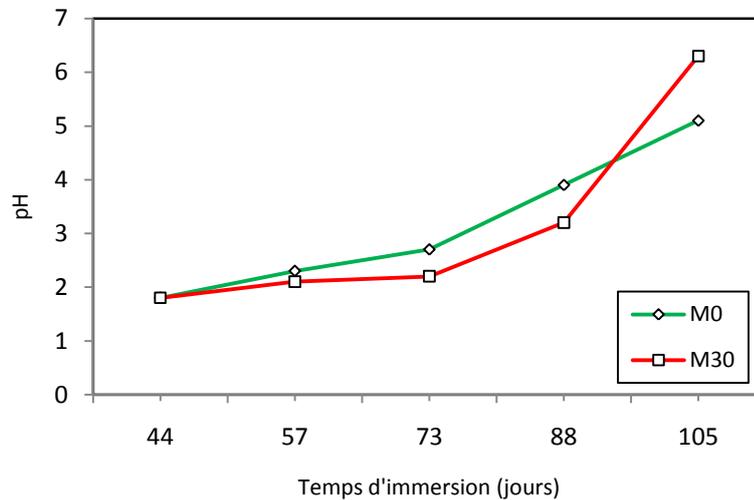


Figure 14: Suivi de pH du mortier M0 et M30 après la 4^{ème} correction.

3.3 Le suivi de l'évolution des dimensions des échantillons

Le suivi des éprouvettes immergées dans la solution acide sulfurique (5% H_2SO_4) à différents âges, par l'évolution de leurs dimensions, est effectué à l'aide d'un pied à coulisse, Figure 15. La mesure des dimensions des éprouvettes nous permet de comparer et de confirmer les résultats obtenus par les essais de pertes de masse en suivant la variation de leur volume. Les résultats de ce suivi de l'évolution des dimensions des échantillons sont donnés dans la Figure 16.



Figure 15 : Mesure des dimensions des échantillons.

Dans la Figure 16, nous constatons des pertes de volume croissantes et permanentes pour l'ensemble des éprouvettes qui reflètent en premier lieu les résultats de pertes de masse obtenus pour chaque mortier et en second lieu l'effet positive de l'incorporation de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers vis-à-vis de l'acide sulfurique. C'est le mortier M30 qui affiche les volumes d'éprouvettes les plus grands.

3.4. Examen visuel

L'examen visuel des mortiers ayant subis des attaques chimiques en contact avec l'acide sulfurique est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations de l'aspect extérieur des éprouvettes, et de confirmer et comparer les résultats obtenus. L'état de l'ensemble des échantillons avec et sans pouzzolane, après conservation dans la solution acide sulfurique pendant 105 jours, est caractérisé en

première vue par une réduction dans le volume en comparaison avec des échantillons conservés dans de l'eau douce, Figure 17. Les échantillons en contact avec l'acide sulfurique forment une couche blanchâtre sur la surface extérieure. Il s'agit du dépôt du gypse, qui résulte de la réaction entre la portlandite et la solution d'attaque [5% H_2SO_4]. En plus de la réaction avec la portlandite, l'acide sulfurique décompose la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté [C-S-H], ce qui contribue ainsi à la perte en masse des échantillons immergés dans ce type d'acide et donc une réduction de forme déjà observée. Ces résultats sont en accord avec les observations faites par [13, 14, 15, 16,17].

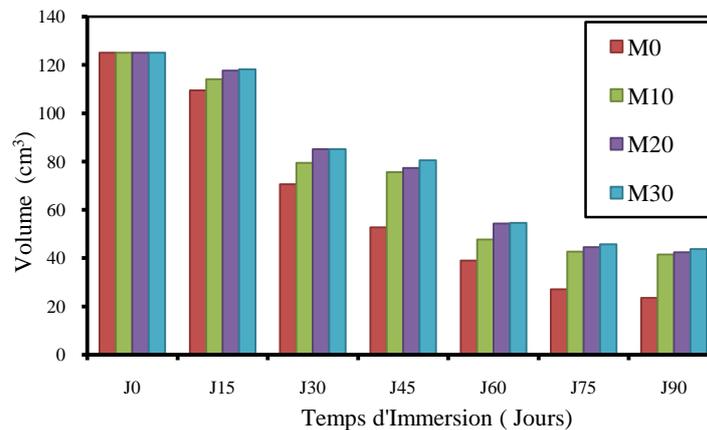


Figure 16 : Suivi de l'évolution des volumes des éprouvettes exposées à l'attaque acide 5% H_2SO_4 .



Figure 17 : Etat des éprouvettes après 105 jours d'immersion dans 5% H_2SO_4 .

Conclusions

Cet article traite de l'ajout d'un matériau naturel bon marché et écologique, la pouzzolane naturelle d'Algérie, en vue d'étudier la durabilité de mortiers pouzzolaniques soumis à une agression acide. A la lumière des essais réalisés au cours de ce travail de recherche nous pouvons tirer les principales conclusions suivantes :

L'incorporation de la pouzzolane naturelle d'Algérie est bénéfique pour la durabilité des mortiers puisqu'elle permet de résister aux agressions acides. Il apparaît clairement que tous les mortiers pouzzolaniques 10, 20 et 30% de PN ont bien résisté à l'attaque acide [H_2SO_4] à tous les âges étudiés dans ce travail, de plus ils ont mieux résisté que le mortier au ciment Portland ordinaire sans pouzzolane. C'est le mortier à 30% de pouzzolane qui a résisté le mieux : plus le taux de pouzzolane est grand plus la résistance à la solution acide est meilleure.

Le suivi de pH des solutions acides et la prise des dimensions des éprouvettes après immersion dans les solutions acides ont confirmé cette tendance que tous les mortiers pouzzolaniques ont résisté à l'attaque chimique mieux que le mortier sans pouzzolane.

D'autre part la maniabilité des pâtes pouzzolaniques diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle. En outre les pâtes pouzzolaniques ont besoin plus d'eau pour l'obtention

d'une consistance normale, influent sur le processus d'hydratation du ciment et augmentent les temps de début et de fin de prise proportionnellement aux pourcentages de la pouzzolane.

Cependant des essais complémentaires sont nécessaires pour confirmer et développer ces résultats : augmentation de la durée de cure des mortiers pouzzolaniques, puisque la pouzzolane réagit à long terme, et utilisation des adjuvants fluidifiants pour réduire la demande en eau. Cette étude, faisant apparaître ces nouveaux paramètres, fait l'objet d'un prochain article.

Remerciements- Nous remercions le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique pour les subventions allouées à cette étude de recherche ainsi que celles de la CNEPRU n°: J0405520060009. Les auteurs apprécient la collaboration de Mr *Siyoucef M.* et Mme *Boulenoir Z.* à ce travail de recherche. Nous remercions également Mr le professeur T. Langlet et Mr le Doc. Benazzouk A. pour nous avoir ouvert les portes de leur laboratoire pour matériaux innovants (EA 3899), université d'Amiens (France).

Références

1. Lasfar S., Mouallif I., Latrach A., Chergui M., Choukir A., Diab A., *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (10) (2015) 3002-3014
2. Thokchom S., Ghosh P., Ghosh S., *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, 4(1) (2009) 65.
3. Bonakdar A., Mobasher B., *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 61.
4. Khan M. I., Alhozaimy A. M., *Can. J. Civ. Engin.*, 38(1) (2011) 71.
5. Mohammed Belhadj A.H., Mahi A., Kazi Aouel M.Z., Derbal R., Abdelhadi H., *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (2) (2016) 429-437.
6. Liu B., Xie Y., Li J., *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 994.
7. NA 442-2008, Liants Hydrauliques - Ciments Courants, Composition, Spécification et Critères de Conformité", IANOR, Alger (2008).
8. NF EN 196-1-2006, Méthodes d'essais des ciments-Partie 1: détermination des résistances mécaniques.
9. NF P 15 – 403-1996, Sable normal et mortier normal, AFNOR – Paris (2006).
10. ASTM C 267-2001, Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer Concretes, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International (2001).
11. ASTM C 1437-2001, « Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar».
12. NF EN 196-3-2009, Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité (2009).
13. Senhadji Y., L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates). Thèse de doctorat, USTO – Oran (2013).
14. Ghrici M., Etude des propriétés physico Mécaniques et de la durabilité des ciments à base de pouzzolane naturelle. Thèse de doctorat d'état en génie civil. USTMB d'Oran, Algérie (2006).
15. Ghrici M., Kenai S., Meziane E., *J. Mater. Sci.* 41 (2006) 6965.
16. Siad H., Influence du type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat, INSA de Rennes, France (2010).
17. Laoufi L., Comportement Mécanique et Structurel du Béton dans un Environnement Agressif, thèse de doctorat, ENPO, Oran, Algérie (2015).

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com/>