

ETUDE DE LA DURABILITE DES MORTIERS POZZOLANIQUES FACE AUX MILIEUX AGRESSIFS

N. KAID¹, K. AYED², A. ABIDELAH¹, H. KHELAFT¹, D. KERDAL¹

¹ *Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran 31000, Algérie kaid.nouria@gmail.com*

² *LabMat, Département de Génie Civil ENSET-Oran, Algérie.*

Résumé

L'objectif de cette recherche répond au souci de valorisation des ressources naturelles abondantes et économiques, que constituent les pouzzolanes naturelles de Béni-Saf en Algérie, et dont l'utilisation n'est encore que partielle dans la fabrication des ciments et bétons. De nombreux travaux de recherches précédents ont montré des améliorations sur le plan des caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons contenant cette pouzzolane. Cependant, ces travaux n'ont pas été élargis à l'étude de durabilité. L'évaluation et la qualification de la durabilité des mortiers pouzzolaniques sont déterminées par des critères performantielles très pertinents et objectifs, basées sur des essais accélérés de laboratoire selon les recommandations françaises AFPC-AFREM. Cette durabilité est quantifiée par un essai accéléré de carbonatation et par la décalcification dans une solution d'acide sulfurique des mortiers pouzzolanique.

Mots clés: durabilité, pouzzolane naturelle, carbonatation accélérée, attaque acide, DRX.

1. Introduction

L'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran. L'objectif de ce travail répond au souci de valorisation des ressources abondantes et économiques, que constituent les pouzzolanes naturelles de Béni-Saf en Algérie et, à la qualification de la durabilité des mortiers pouzzolaniques vis-à-vis des milieux agressifs.

L'utilisation de cette pouzzolane n'est encore que partielle dans la fabrication des ciments et bétons. De nombreux travaux de recherches précédents ont montré des améliorations sur le plan des caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons contenant cette pouzzolane (Khalafi et al, 97), (Kaid 2000), (Belaribi et al, 03) Cependant, peu de recherches (Ghrici et al, 07), (Ezziane et al, 07) ont étudié la durabilité des mortiers et des bétons pouzzolaniques conçus dans des milieux agressifs. La carbonatation atmosphérique est un des facteurs les plus importants de la durabilité du béton armé. Elle repose sur l'action du dioxyde de carbone CO₂ de l'atmosphère qui diffuse à travers le béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification du milieu induit une dissolution de la portlandite qui constitue la réserve de basicité du béton.

Les milieux acides susceptibles d'être agressifs pour le béton débutent aux eaux pures, s'étendent aux eaux douces, peu ou beaucoup chargées en dioxyde de carbone, puis aux pluies acides, pour s'achever aux acides minéraux et organiques, en y incluant les eaux résiduaires (Duval, Hornain 97). Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre et les effluents des industries chimiques peuvent contenir de l'acide sulfurique. La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation du gaz H₂S qui peut être transformé en acide sulfurique par l'activité bactérienne. Ce type d'acide est très vulnérable pour le béton.

L'évaluation de l'effet de la réaction pouzzolanique sur la durabilité des mortiers pouzzolaniques nécessite la connaissance des mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et l'étude de la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations. La qualification de la durabilité des mortiers pouzzolaniques dans des milieux plus ou moins agressifs (milieu riche en gaz carbonique, milieu acide) est déterminée par des critères performantes très pertinents et objectifs, basés sur des essais accélérés de laboratoire selon les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97), (Arliquoie, Hornain 07) et selon les normes ASTM C (ASTM C 267-96, 01). Ainsi, cette durabilité est quantifiée par un essai accéléré de carbonatation et par un essai de décalcification, dans une solution d'acide sulfurique, des mortiers pouzzolaniques pour des taux de substitution de pouzzolane variables. L'interprétation des résultats nécessite des analyses aux diffractions des rayons X. L'ensemble des résultats obtenus permettent ainsi de conclure, que l'utilisation de la pouzzolane de Béni-Saf améliore les performances des mortiers et conduit à l'obtention d'un nouveau matériau de construction économique et écologique.

1. Programme expérimental

L'étude s'appuie sur l'évaluation et la qualification de la durabilité des mortiers à base de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf vis-à-vis de deux milieux agressifs : un milieu riche en gaz carbonique et un milieu riche en acide sulfurique. L'attaque au gaz carbonique est réalisée par un essai accéléré selon les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97), (Arliquoie Hornain. H, 07), et l'attaque à l'acide sulfurique H₂SO₄ est réalisée par un essai de décalcification selon la norme ASTM C 267-96 (ASTM C 267-96, 01). Les échantillons de mortiers pouzzolaniques sont confectionnés à partir de la substitution d'une partie de ciment par : 10, 20, 25 et 30% de pouzzolane. Deux types de ciments sont utilisés : un CEM I/42.5 et un CEM II/42.5. Les résultats obtenus pour les différentes compositions sont comparés à ceux des mortiers de référence sans remplacement du ciment par la pouzzolane.

Comme la réaction pouzzolanique de l'ajout est lente par rapport à la réaction d'hydratation (Baroghel- Bouny. V, 94), il nous a semblé préférable de conserver les éprouvettes de mortiers étudiés dans une cure humide pendant 45 jours.

1.1. Essai de carbonatation

L'objectif de l'essai est de caractériser le comportement d'échantillons de mortier vis-à-vis de la carbonatation. L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur carbonatée d'échantillons de mortier conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone. Il a été effectué dans notre cas sur des échantillons moulés mais peut aussi être appliqué à des échantillons carottés de bétons, ainsi qu'à des mortiers et pâtes de ciment durcis (AFPC-AFREM, 97), (Arliquis, Hornain 07).

Les échantillons testés sont des mortiers normaux de forme prismatique (40x40x160 mm) mis en œuvre suivant la norme NF EN 196-1 (NF EN 196-1, 06). La dimension des éprouvettes choisie respecte celle qui est donnée par les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97), (Arliquis Hornain 07). Pour chaque composition de mortier, trois échantillons subissent l'essai de carbonatation accéléré. La procédure de préconditionnement est la suivante :

- Les éprouvettes sont conservées après démoulage dans une ambiance humide (humidité relative supérieure à $95\pm 5\%$) pendant 45 jours pour toutes les compositions de mortier étudiées.
- Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ (pour favoriser la carbonatation). Les échantillons sont alors pesés puis disposés dans l'enceinte de carbonatation (espacés de 2 cm).

L'enceinte de carbonatation accélérée conçue et réalisée par Kaid au sein du laboratoire LMST de l'USTO (figure 1) est réglée en humidité relative ($65\pm 5\%$) et en dioxyde de carbone (50% volumique). Les échéances de mesure de l'épaisseur de mortier carbonaté sont de 7, 14, 28, 56 jours et même au-delà si possible (jusqu'à carbonatation totale des échantillons). A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de mortier carbonaté sont mesurées. Un morceau de mortier (épaisseur 4 ± 1 cm) est prélevé sur chaque éprouvette par fracturation par fendage. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte.

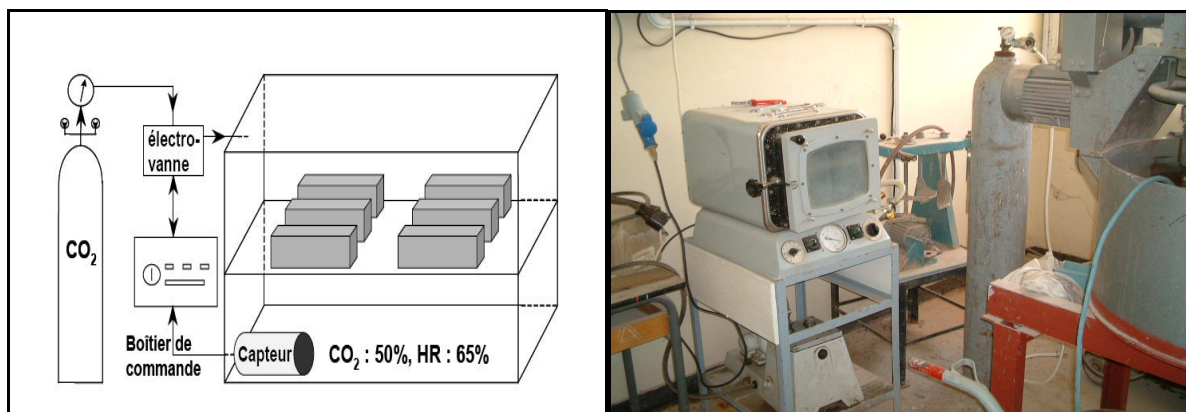


Figure.1. Schéma et photographie de l'enceinte de carbonatation accélérée montée au laboratoire LMST

Les mesures de l'épaisseur de mortier carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée. Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du mortier et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte-granulat) (AFPC-AFREM, 97), (Arliquis, Hornain 07).

Les profondeurs de carbonatation ont été relevées périodiquement jusqu'à carbonatation totale des échantillons, en pulvérisant une solution de phénolphaléine. Un vidéo microscope est utilisé pour la mesure de la profondeur de carbonatation. Il est équipé d'une caméra et d'un objectif autorisant divers grossissements. Ce système optique est en interface avec un logiciel, Videomet, qui permet de traiter les images et notamment de mesurer des distances après avoir pris soin d'étalonner le dispositif. Pour chaque échantillon, l'épaisseur dégradée retenue est la moyenne d'au moins vingt mesures.

1.2. Essai d'attaque acide

Pour la caractérisation de la résistance chimique vis-à-vis l'attaque d'acide sulfurique, des éprouvettes de mortier 50x50x50 mm ont été confectionnées selon la norme NF EN 196-1, conservées 45 jours dans l'eau à une température de 20 °C ± 2 °C après le démoulage.

Après la durée de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer la masse des échantillons de mortiers avant leur mise dans la solution d'attaque. Les échantillons sont ensuite mis dans une solution de 5% H₂SO₄ pour les deux types de ciment (CEM I/42.5 et CEM II/42.5). La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96, les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau distillée pour éliminer le mortier altéré. Après une demi-heure, une pesée est enregistrée. La balance utilisée était de précision 0,01 gr. Cette opération est effectuée chaque semaine pendant 45 jours. La solution d'attaque est renouvelée selon la valeur du pH. Le degré de l'attaque est évalué selon l'expression suivante :

$$M_L = \left(\frac{M_t - M_i}{M_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Où M_t est la masse (gr) à l'instant t

M_i est la masse (gr) initiale avant exposition à l'acide sulfurique.

Des analyses à la diffraction des rayons X sont réalisées sur des échantillons de la partie dégradée du mortier.

2. Matériaux

2.1. Pouzzolane Naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est une lave rougeâtre, extraite du gisement de Bouhamidi de la région de Béni-Saf de l'Ouest de l'Algérie. L'analyse physico-chimique de la poudre résultante du broyage et du tamisage est reportée dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Analyse chimique de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (KAID. N, 2000).

Composants	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Perte au feu	Total
%	56,25	9,83	1,81	16,98	8,57	6,54	99,98

Tableau 2. Caractéristiques physiques de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (Kaid. N, 2000).

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	VALEURS
Surface spécifique Blaine (Perméabilité Blaine) (cm ² /g)	3200
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,75
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0,81

L'étude minéralogique par diffractométrie aux rayons "X" montre que cette pouzzolane naturelle est caractérisée par un halo centré à 32.50°/2θ (Figure 2) qui correspond à la raie principale de la silice à l'état de Quartz (SiO₂).

Cette analyse identifie la présence de deux familles fondamentales de minéraux : celle des composants siliciques où la silice et l'alumine dominant, et celle des composants férriques où l'on trouve surtout du fer et du magnésium.

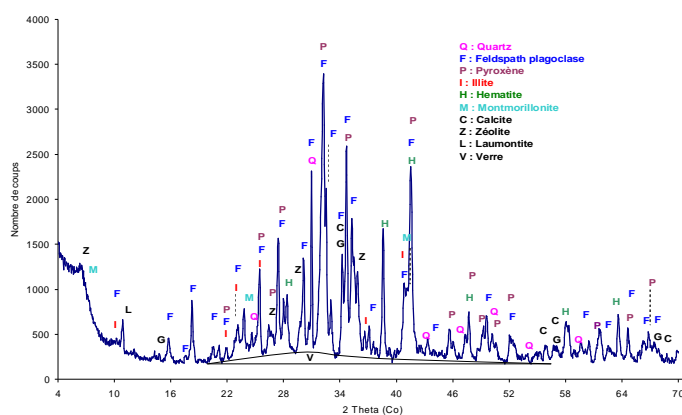


Figure. 2. Spectre de diffraction des rayons X de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf (Kaid et al, 2006).

2.2. Ciment

Deux types de ciment sont utilisés. Un ciment Portland CEM I/42.5 et un ciment composé CEM II/42.5, provenant respectivement de la cimenterie de M'sila et de Ain Touta (Batna). Le ciment composé CEM II/42.5 contient 8 à 10% de fine calcaire comme ajout secondaire. Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des ciments sont données dans le tableau 3.

Tableau.3. Composition des ciments

	CEM I /42.5	CEM II /42.5
Composition chimique (%)		
SiO ₂	24.3	23.19
Al ₂ O ₃	7.2	4.87
Fe ₂ O ₃	5.4	3.32
CaO	59.0	64.22
MgO	0.68	0.21
SO ₃	1.05	2.5
Na ₂ O	0.15	0.06
K ₂ O	0.19	0.1
Perte au feu	1.8	1.6
Composition de Bogue (%)		
C ₃ S	61.0	56.0
C ₂ S	14.5	16.0
C ₃ A	2.4	5.5
C ₄ AF	15.22	12.1
Caractéristiques physiques		
Surface spécifique Blaine (m ² /kg)	350	320
Densité spécifique (kg/m ³)	3050	3090

2.3. Sable

Le sable utilisé est un sable normalisé CEN EN 196-1, de nature siliceuse, à grains arrondis, dont la teneur en silice est égale à 98%. Il est délivré en fractions mélangées en sacs plastiques d'un contenu de 1350 g ± 5 g.

3. Résultats et analyses

3.1. Carbonatation accélérée

La comparaison de la carbonatation du mortier de référence (sans ajout de la pouzzolane) et celle des mortiers contenant respectivement 10, 20, 25 et 30% de pouzzolane s'effectue sur les valeurs moyennes de profondeur carbonatée. Cette profondeur de carbonatation est calculée à partir de vingt points de mesure répartis sur les deux faces de l'échantillon grâce au vidéo microscope, portées sur un graphique en fonction de la racine carrée du temps. Les deux figures 3 et 4 illustrent les évolutions des profondeurs carbonatées des mortiers avec ou sans l'utilisation de la pouzzolane pour les deux types de ciment CEM I et CEM II.

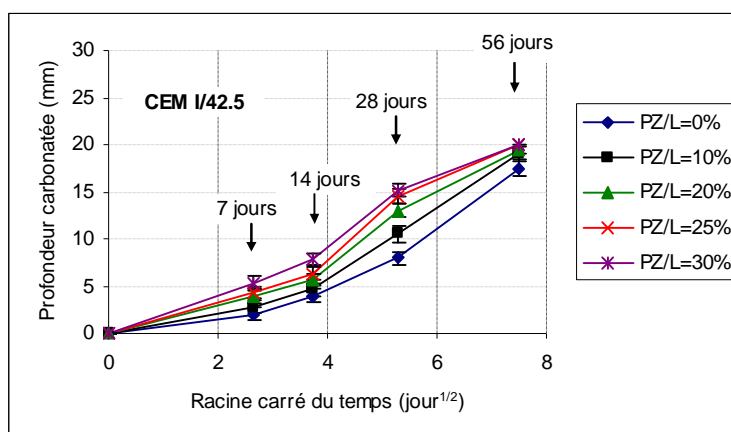


Figure.3. Profondeur de carbonatation (projection de phénolphthaléine) en fonction de la racine du temps (CEM I/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M.

Les cinétiques de carbonatation des différents mortiers sont proportionnelles aux taux de substitution de la pouzzolane. Après 28 jours de carbonatation et compte tenu des dispersions mesurées, l'utilisation de cette pouzzolane dans les mortiers conduit à augmenter la profondeur de carbonatation de 20% à 40% dans le cas du ciment CEM I (Figure 3, Photographie 2) en comparaison à celle des mortiers de référence. Par contre, pour le ciment CEM II (Figure 4) elle augmente de 24% à 47%. A l'échéance de 56 jours, les mortiers confectionnés à partir d'un ciment CEM I se trouvent complètement carbonatés. Par contre, ce ne sont que les mortiers contenant 25 et 30% de pouzzolane (cas du ciment CEM II) qui se carbonatent complètement. A cette échéance, la mesure de la carbonatation devient difficile.

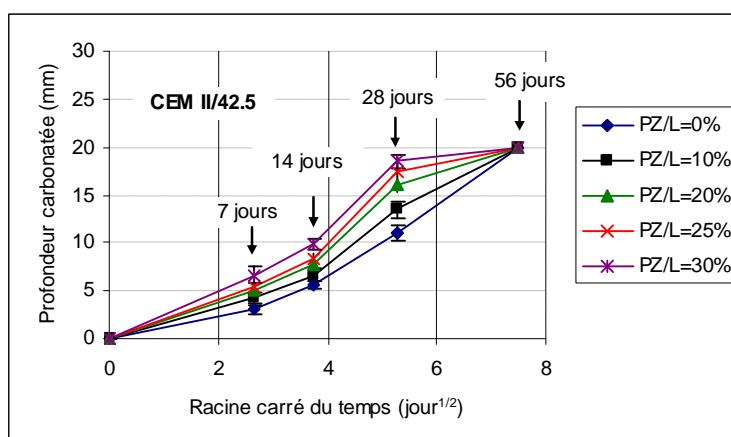
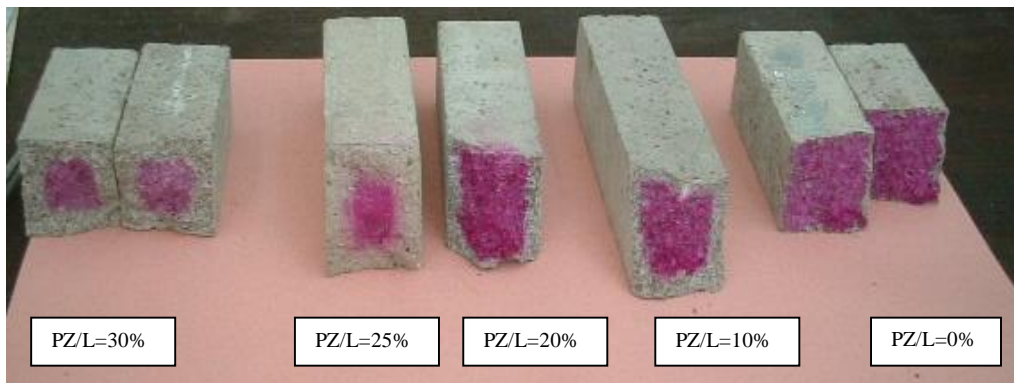


Figure.4. Profondeur de carbonatation (projection de phénolphthaléine) en fonction de la racine du temps (CEM II/42.5) : mode A.F.P.C.-A.F.R.E.M.

Néanmoins, il a été constaté qu'entre 14 et 28 jours et dans le cas du ciment CEM I, ces épaisseurs progressent avec une vitesse de carbonatation qui passe de $2.58 \text{ mm} \cdot \sqrt{j^{-1}}$ ($49.3 \text{ mm} \cdot \sqrt{\text{ans}^{-1}}$) pour le mortier de référence, à $0.89 \text{ mm} \cdot \sqrt{j^{-1}}$ ($17.15 \text{ mm} \cdot \sqrt{\text{ans}^{-1}}$) pour le mortier avec 30% de pouzzolane. Dans le cas de l'utilisation d'un ciment CEM II, ces vitesses passent de $3.44 \text{ mm} \cdot \sqrt{j^{-1}}$ ($65.74 \text{ mm} \cdot \sqrt{\text{ans}^{-1}}$) pour le mortier témoin à $0.94 \text{ mm} \cdot \sqrt{j^{-1}}$ ($18.06 \text{ mm} \cdot \sqrt{\text{ans}^{-1}}$) pour le mortier avec 30% de pouzzolane. Par ailleurs, ces épaisseurs demeurent faibles et ne dépassent pas les 25 mm à 28 jours d'essai. Ces valeurs peuvent être atteintes après 40 ans en condition normale (Kritsada. S, Lutz. F, 07).



Photographie.2. Eprouvettes de mortiers après 28 jours de carbonatation (cas du ciment CEM I)

Dans les mortiers pouzzolaniques la quantité de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sera diminuée par la quantité faible de ciment Portland et aussi par la réaction pouzzolanique (Roziere. E et al, 2008) de ce fait le pH des mortiers pouzzolaniques diminue par rapport à celui du mortier de référence. Dans les mortiers pouzzolaniques, la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sera diminué d'une part par la quantité faible du ciment Portland et d'autre part par la réaction pouzzolanique. Donc, l'introduction de la pouzzolane naturelle conduit à obtenir un mortier à faible teneur en Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Il résulte qu'une plus petite quantité de CO_2 est nécessaire pour réagir avec le calcium pour consommer toute la Portlandite, de sorte que le pH chute plus facilement. Ce qui est très souvent le cas pour les fines pouzzolaniques.

3.2. Attaque acide

Nous avons suivi deux paramètres comparatifs de durabilité sur nos échantillons : pertes de masses et des analyses à la diffraction des rayons X. La mesure des pertes de masses a été faite sur trois échantillons, identifiés à cet effet, préalablement essuyés et nettoyés 3 fois avec de l'eau distillée pour éliminer la solution superficielle et le mortier altéré.

Les figures 5 et 6 montrent, qu'en terme de pertes de masses, les performances du ciment à la pouzzolane sont meilleures que celles du ciment de référence. Ces pertes de masse sont en générale, inversement proportionnelle à la quantité de pouzzolane naturelle substituée au ciment CEM I et CEM II. la substitution de 10% de pouzzolane constitue la seule composition qui a donné une perte de masse comparable à celle du mortier de référence.

Au bout de la première semaine, les mortiers obtenus avec 20, 25 et 30% de pouzzolane subissent un gain en masse. Ce gain traduit un début de gonflement des mortiers, conséquence des réactions chimiques se produisant entre les hydrates et l'acide sulfurique (Zivica. V, Bajza. A, 01).

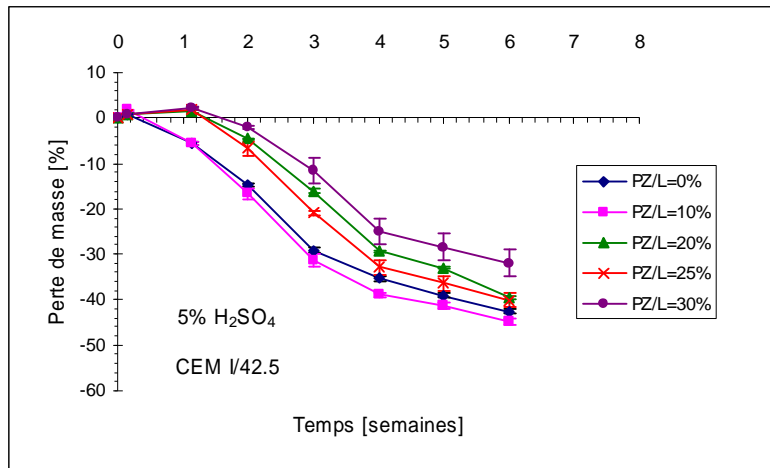


Figure.5. Pertes de masse en fonction du temps d'immersion dans 5% H_2SO_4 (CEM I/42.5)

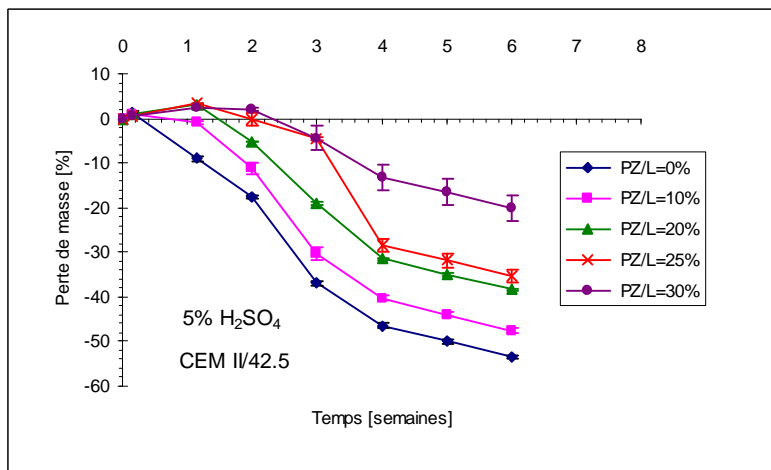
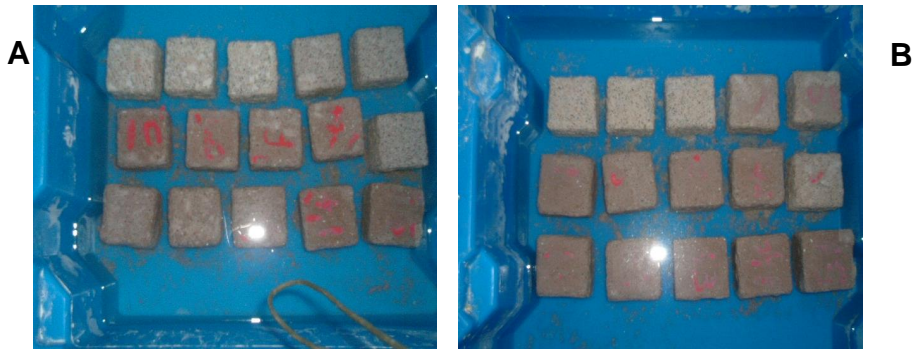


Figure.6. Pertes de masse en fonction du temps d'immersion dans 5% H_2SO_4 (CEM II/42.5)

Après une immersion de 45 jours dans la solution d'attaque, les mortiers à base du ciment CEM I développent un gain maximal dans la perte de masse de 25% pour une substitution de 30% de pouzzolane. Par contre, pour les mortiers à base du ciment CEM II, elle augmente de 60%. Ce qui explique l'effet conjugué bénéfique des fines calcaires et pouzzolaniques dans la densification de la structure poreuse du mélange et dans l'évolution des réactions d'hydratation et pouzzolaniques.

Ce gain est dû au dépôt du gypse, qui se forme suite à la réaction entre la portlandite et l'acide sulfurique.

Le gypse déposé (photographie 3) est ensuite lessivé, ce qui explique la couleur blanche de la solution à partir de la deuxième semaine. La dégradation des matériaux cimentaires dans ces conditions environnementales se caractérise par le passage total en solution de la portlandite et par la décalcification progressive des C-S-H, et, en d'autres proportions, de l'Ettringite et du monosulfoaluminate (Perlot. C et al, 06).



Photographie.3. Etats dégradés des éprouvettes de mortiers (50x50x50mm)

Les analyses à la diffraction des rayons X de la partie dégradée après séchage, broyage et tamisage (passant à 80µm) ont donné les diagrammes représentés sur les figures 7 et 8. Ces derniers confirment la formation du gypse dans la solution d'attaque. L'intensité des pics de gypse est plus importante dans le cas du ciment CEM II que dans le cas du ciment CEM I. La présence du gypse est très faible voir même inexistante dans la solution d'attaque. Ceci est probablement dû à sa forte liaison.

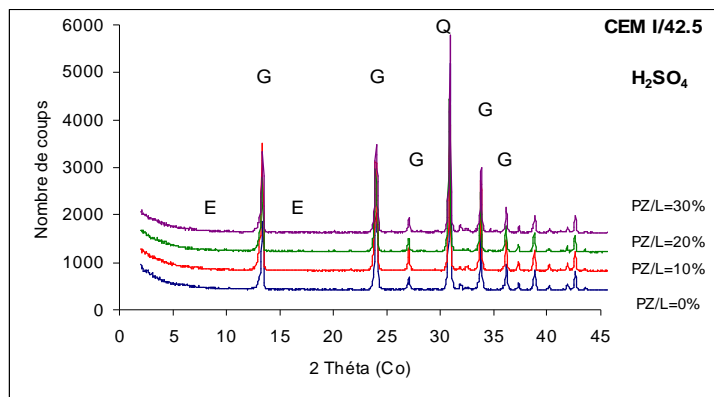


Figure.7. Analyse diffractométrique aux rayons X de la partie dégradée (CEM I/42.5)

L'acide sulfurique réagit avec les constituants dans une matrice de ciment, principalement avec les hydrates d'aluminate de calcium, pour former des produits de réaction volumineux. Ce qui entraîne la formation du gypse et l'Ettringite suivant les réactions suivantes :

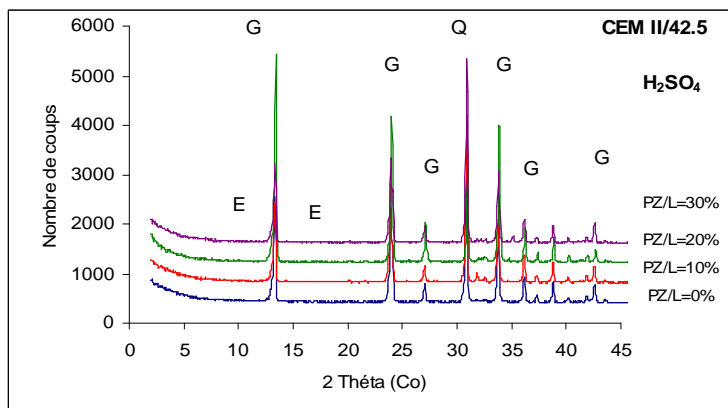


Figure.8. Analyse diffractométrique aux rayons X de la partie dégradée (CEM II/42.5)

4. Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons réussi à qualifier l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni Saf utilisé comme substituant au ciment, sur la profondeur de carbonatation et sur la décalcification dans l'acide sulfurique. Les résultats de cette recherche ont montré que la pouzzolane naturelle de la région de Béni Saf, contribue à l'amélioration de la durabilité des mortiers et bétons vis-à-vis ces deux types d'attaque. D'un côté cette pouzzolane semble être sensible à la diffusion du gaz CO₂. Il est donc préférable d'envisager une épaisseur d'enrobage supérieur à 20 mm dans le cas des mélanges pouzzolanique, afin de pouvoir prolonger la durée de vie d'un béton à la pouzzolane.

Des dégradations dans un milieu acide ne seront effectivement à redouter pour un béton. La pouzzolane naturelle présente un remède à ce problème. Là encore, la perméabilité demeure le facteur essentiel, le taux de la portlandite constituera un indicateur de durabilité primordiale.

Ainsi le choix d'utiliser la pouzzolane comme substituant au ciment est avantageux du point de vue économique et écologique, et offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers voir aussi celle des bétons.

Références bibliographiques

- Arliguie G., Hornain H. 2007. Grandeurs associées à la durabilité des bétons 'GranDuBé'. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées
- ASTM C 267-96. 2001 / Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes Oct 10 2001,
- AFPC-AFREM. 1997, Journées Technique, Durabilité des bétons Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associés à la durabilité, Toulouse, France
- AFNOR. NF EN 196-1. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. April 2006.
- Belaribi N., Semcha M. et Laoufi L. 2003. Influence de la pouzzolane de Béni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Rev. can. /Can. J. Civ. Eng. 30 (3) : 580-584.
- Baroghel- Bouny V. (1994) Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses et résultats. Thèse de Doctorat, LCPC, Paris, France.
- Duval R., Hornain H. 1997, la durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives. LA DURABILITE DES BETONS. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. Sous la direction de Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER.
- Ezziane K., Bougara A., Kadri A., Khelafi H., Kadri E. 2007, Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature, Cement & Concrete Composites 29 (2007) 587–593.
- Ghrici M., Kenai S., Said Mansour M. 2007, Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, Cem. Concr. Compos. 29 (2007) 542-549.
- Kaid N. 2000. Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des mortiers pouzzolaniques. Mémoire de magister Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- Kaid, N 2005. Durabilité d'un béton à base de la pouzzolane naturelle d'Algérie conservé dans deux milieux agressifs -Evaluation de l'effet pouzzolanique- First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures – Hammamet 3-5 May Tunisia
- Kritsada Sisomphon, Lutz Franke, Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1647-1653.
- Khelafi H., Rahal D., frih m., Rahmani M. c. 1997. Vers un béton de haute résistance élaboré à partir de matériaux locaux. Revue marocaine du génie civil n°.70, Aout - Septembre 1997.
- Perlot C., Verdier J., Carcassès M. 2006. Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage. Materials and structures 2006; 39(5): 511-23.
- Roziere E., Loukili A., Cussigh F. 2008. A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation. Construction and Building Materials.
- Zivica V., Bajza A., Acidic attack of cement based materials, a review. Part 1. Principle of acidic attack, Construction and Building Materials 15 (2001) 331-340.