

INFLUENCE DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LA DURABILITÉ DES MORTIERS CONSERVÉS DANS DES MILIEUX AGRESSIFS

Mohamed salhi¹, Mohamed ghrici² Hamid khellafi³

¹Centre universitaire de Relizane BP 48000 Bourmadia, Algérie

² Université de Chlef, BP 151 Hay Es-salam, Chlef, Algérie

³ USTO, BP 1505 El-M'naouer, Oran, Algérie

Reçu le : 16/09/2013

Accepté le : 24/06/2015

RESUME: Ce travail de recherche consiste à étudier la durabilité des mortiers contenant des ajouts cimentaires utilisés dans la fabrication des ciments en Algérie. Une étude expérimentale a été menée dans le but d'évaluer les effets de trois types d'ajouts cimentaires (laitier, calcaire et pouzzolane naturelle) sur la durabilité des bétons dans quatre environnements de cure (Eau douce; Sulfate de magnésium "3% $MgSO_4$ "; Sulfate de magnésium et chlorure de sodium "3% $MgSO_4$ + 19,6% $NaCl$ " et Eau de mer). La durabilité des mortiers après 270 jours d'immersion dans les quatre milieux est quantifiée, d'une part, par des essais physico-mécaniques (expansion, résistances à la compression), et d'autre part par des analyses minéralogiques sur différentes pâtes de liants à l'aide de diffraction des rayons «X». Les résultats obtenus ont permis de montrer l'efficacité des ajouts cimentaire actifs (la pouzzolane naturelle et le laitier) dans l'amélioration de la durabilité des bétons vis-à-vis des agents agressifs tels que les sulfates.

MOTS CLES : Pouzzolane naturelle, Calcaire, Laitier, Eau de mer, Sulfate, Durabilité

ABSTRACT: This research is to study the durability of mortars containing two additives used in cement manufacturing in Algeria. An experimental study was conducted in order to evaluate the effects of two types of additions (slag, limestone) on the durability of mortars cure in four environments (fresh water, magnesium sulphate "3% $MgSO_4$ ", magnesium sulphate + sodium chloride "3% $NaCl$ + 19.6% $MgSO_4$ " and seawater). The durability of mortars after 270 days of immersion in the four environments is quantified, on one hand, by mechanical tests (compressive strength), and on the other hand by mineralogical analyzes on different pasta binders by means of ray diffraction "XRD". The results have shown the effectiveness of the active cement addition (slag) in improving the durability of concrete vis-à-vis aggressive agents such as the sulphates.

Keywords: Pouzzolan, Limestone, Slag, Sea water, Sulfates, Durability.

1. INTRODUCTION

La durabilité du béton en milieu marin est une préoccupation importante, l'Algérie comporte plus de 1200 km de cote et le nombre d'ouvrage construit en bordure de mer représente un enjeu économique notable, il s'agit également d'un problème complexe en raison du nombre de facteurs pouvant intervenir lors d'une attaque par l'eau de mer (complexité des réactions chimiques susceptibles de se produire en relation avec la diversité des ions présents dans l'eau de mer (action simultanée des chlorures, des sulfates, des carbonates) [1], certaines réactions pouvant avoir un effet atténuateur (carbonatation, précipitation de brucite $Mg(OH)_2$) ; est souvent la cause principale des dommages constatés sur les ouvrages en milieu marin. L'objectif principal de cette étude est d'apporter une contribution à l'évaluation des effets des ajouts cimentaires tels que le laitier de haut fourneau d'El-Hadjar, la pouzzolane naturelle et le calcaire sur la durabilité des bétons vis-à-vis des attaques chimiques.

2. MATERIAUX ET ESSAIS

Le clinker utilisé dans les ciments provient de la cimenterie de Oued Sly-Chlef (ECDE), mélangé avec du gypse pour régulariser la prise, qui varie avec la composition chimique du ciment, le CEMI a une finesse de 3000 cm^2/g , le calcaire utilisée est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment de Chlef, il est broyé à une finesse d'environ 3380 cm^2/g , la pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi à Béni-Saf, a une masse volumique absolue de 2650 kg/m^3 , le laitier utilisé, extrait des déchets de l'usine d'El Hadjar (Annaba), est broyé à une finesse d'environ 3900 cm^2/g , la composition chimique des trois liants est donnée dans le tableau 1 et les analyses par DRX du calcaire et du laitier sont données dans la figure 1. Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé (CEN EN, 196-1), conformément à la norme NF 196-1, cinq

combinaisons ont été préparées à partir du pourcentage optimum d'ajouts un CEMI, C10 (10% calcaire), PZ20 (20% pouzzolane), L40 (40%laitier) et un CRS (ciment résistant au sulfate). Les essais de la durabilité ont été réalisés sur des mortiers normalisés de dimension $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, les effets des trois ajouts (calcaire, pouzzolane, laitier) sur la durabilité du mortier conservé dans les quatre milieux [eau douce (T), $3\% \text{MgSO}_4$ (Mg), $3\% \text{MgSO}_4 + 19,6\% \text{NaCl}$ (Mg+Na), eau de mer (EM)] sont caractérisée d'une part par la résistance à la compression et l'expansion, et d'autre part par des analyse minéralogiques des cinq pâtes de liants après 6 mois d'immersion dans les quatre environnements, l'eau de mer utilisée est celui de la cote de Ténès (mer méditerranée).

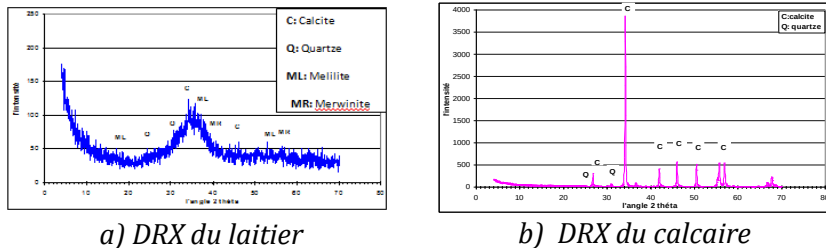


Figure 1 : Analyse par diffraction des matériaux utilisés

L'effet des trois ajouts (calcaire, laitier et pouzzolane) sur la résistance à la compression a été étudié à long terme sur des éprouvettes de mortier normal de dimension $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Les essais de la durabilité ont été réalisés sur des mortiers normalisés. On se basant sur des résultats des essais mécaniques de la bibliographie. Les pourcentages optimums d'ajouts utilisés sont: 10% de calcaire 20% de pouzzolane naturelle et 40% de laitier d'El-Hadjar.

Tableau 1 : Compositions chimiques et minéralogiques des différents liants

Compositions (%)	CEMI	PZ20	L40	C10	CRS
SiO ₂	21,66	26,08	29,08	19,8	20,12
Al ₂ O ₃	5,24	7,5	6,58	4,94	3,73
Fe ₂ O ₃	3,33	4,17	2,61	3,10	5,04
CaO	65,13	54,76	56,99	64,30	61,57
MgO	0,95	1,34	1,69	0,96	2,27
SO ₃	1,92	1,76	1,96	1,75	/
PAF	2,33	2,94	1,42	⁹	2,30
K ₂ O	0,75	0,92	0,80	0,71	/
Na ₂ O	0,12	0,31	0,18	0,11	/
C ₃ S	57,88	48,74	36,56	54,83	65,43
C ₂ S	16,18	13,63	10,22	15,33	8,35
C ₃ A	8,11	6,83	5,12	7,68	1,35
C ₄ AF	10,00	8,42	6,32	9,48	15,33
CaO libre	0,33	0,66	0,66	0,66	0,66

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20 °C pendant 28 jours avant d'être soumises à l'immersion dans quatre environnements de conservation (eau douce, 3% MgSO₄, 3% MgSO₄ + 19,6 NaCl, eau de mer). La solution sulfatique est préparée à partir d'eau déminéralisée, à laquelle est ajouté du sulfate de magnésium MgSO₄ pour obtenir une concentration en ions sulfates SO₄²⁻ de 30 g/l, à laquelle est ajouté du chlorure de sodium NaCl pour obtenir une concentration en ion chlore Cl⁻ de 196 g/l. La solution est homogénéisée, et réglée à pH compris entre 6 et 8 par ajout de 3ml de H₂SO₄. 3 N dans chaque récipient deux fois par semaine on utilisant un papier pH. La résistance à la compression dans les quatre milieux est mesurée sur des éprouvettes de mortiers contenant cinq types de liants (ciment témoin CEMI, C10, PZ20, L40, CRS).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Résistance mécanique

La figure 2 présentent l'évolution des résistances à la compression des cinq liants utilisés (CEMI, PZ20, C10, L40, CRS) immergés dans les quatre milieux de conservation [T (eau douce), Mg (3 % MgSO_4), (Mg + Na) (3 % MgSO_4 + 19,6 % NaCl), EM (eau de mer)]. Nous constatons que l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de tous les mortiers utilisés conservés dans l'eau douce augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute jusqu'à l'âge de 270 jours. Ainsi, nous remarquons que la résistance est maximale dans le ciment au laitier L40 à l'âge de 270 jours. A 28 jours la résistance du ciment au calcaire dépasse les autres ciments. Ce phénomène s'explique par l'activité lente de la réaction pouzzolanique, cette réaction qui se déclenche entre la silice réactive, qui se situe dans la partie vitreuse de la pouzzolane ou le laitier, et la portlandite Ca(OH)_2 libérée par l'hydratation du CPJ. Ceci donne à la pouzzolane ou le laitier la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances. Néanmoins, l'amélioration de la résistance peut s'obtenir par un broyage avancé (finesse très élevée), une température de cure élevée ou avec l'utilisation des activateurs chimiques. Le prolongement du broyage mène à une augmentation de la résistance des mortiers contenant de la pouzzolane naturelle de 50% à 130% à l'âge de 3 jours ensuite de 10 % à 50 % à l'âge de 90 jours [2], la résistance des mortiers contenant du laitier dépasse celle du mortier témoin de 5 %. Cet effet est dû au fait qu'à long terme, la réaction pouzzolanique continue son effet en formant un C-S-H supplémentaire qui améliore l'interface pâte-granulat, ainsi qu'à la diminution de la porosité capillaire du mortier. Jusqu'au 30 % du laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire contribue à l'amélioration de résistances de 4.5 % et 2.2 % respectivement, en comparaison avec le ciment de contrôle (ciment contenant 10 % de calcaire). Nous

pouvons conclure que la résistance à la compression des mortiers conservés dans l'eau douce évolue positivement et la vitesse d'évolution est importante pour le ciment L40 après (28jours + 1mois). Pour les quatre autres liants, elle est presque constante après la même période. L'analyse des résultats illustrés sur la figure 2.b montre que la résistance à la compression de tous les mortiers conservés dans la solution sulfatique Mg (sulfate de magnésium) se développe positivement jusqu'à 90 jours d'immersion. Au delà de cet âge, nous remarquons une chute de résistance à la compression. Cette chute de résistance est estimée, à l'âge de 270 jours, à 8 % pour le ciment CEMI, à 20 % pour le ciment PZ20, à 27 % pour le ciment au calcaire C10, à 12 % pour le ciment au laitier L40 et à 4 % pour le ciment résistant au sulfate CRS.

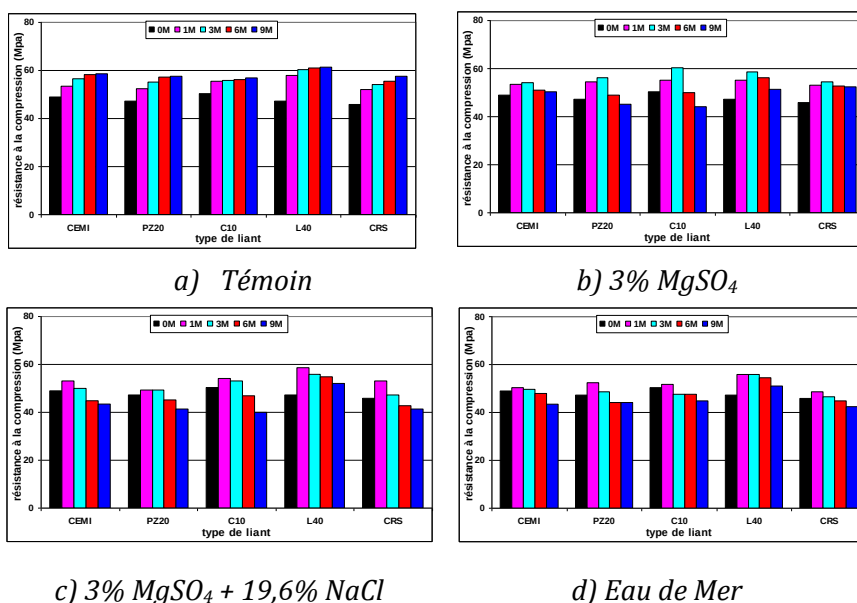


Figure 2 : Résistance à la compression en fonction de type de liant dans les quatre milieux

L'analyse des résultats illustrés sur les figures 2.c et 2.d montre que la résistance à la compression de tous les mortiers conservés dans les solutions (Mg + Na) et EM se développe positivement jusqu'à 30 jours d'immersion. Pour les éprouvettes immergées dans la solution (Mg + Na), le liant L40 atteint une valeur maximale de la résistance à la compression (58,5 MPa) à 30 jours d'immersion qui est supérieure à celle du ciment CEMI (53 MPa) à la même échéance. A partir de cette échéance (30 jours), la résistance à la compression de tous les mortiers commencent à diminuer jusqu'à l'âge de 270 jours. Nous remarquons que le liant contenant du calcaire subit une grande perte de résistance par rapport aux autres liants étudiés.

Même constatation pour les éprouvettes immergées dans l'eau de mer, la résistance à la compression des éprouvettes de tous les mortiers conservés dans l'eau de mer (EM) se développe positivement jusqu'à 30 jours d'immersion. Le liant au laitier développe une résistance à la compression maximale après 30 jours d'immersion (55,9 MPa). La résistance à la compression des liants: CEMI, PZ20, C10 et CRS est de 50.2, 52.3, 51.6 et 48.7 MPa respectivement. A partir de cette échéance (30 jours), la résistance à la compression de tous les mortiers commence à diminuer jusqu'à l'âge de 270 jours.

4. EXPANSION DES EPROUVETTES DE MORTIER

Le changement de longueur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ des cinq mortiers conservées durant 180 jours dans les différents milieux de conservation, a été effectué selon la norme ASTM C1012.

La figure 3a indique que l'expansion des éprouvettes conservées dans la solution sulfatique (Mg) augmente régulièrement en fonction de la durée d'immersion. Ceci se traduit par l'apparition de phases minéralogiques expansives dans le matériau durci (gypse et ettringite secondaire) susceptibles de faire gonfler et fissurer la pâte de ciment. Les mortiers pouzzolaniques permettent de réduire l'expansion de 70 % par rapport au mortier contrôle, tandis que l'expansion du mortier au calcaire est comparable au mortier

témoin. L'efficacité du mélange minéral est plus prononcée avec l'ajout du laitier ou de la pouzzolane et pour une durée d'exposition avancée.

Selon la figure 3b, l'expansion des éprouvettes de mortier conservées dans la solution (Mg +Na) accroissent régulièrement en fonction de la durée d'immersion. L'expansion des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm³ du ciment CEMI, après 180 jours d'immersion dans la solution (Mg + Na), est 0,04 %. Elle est 0,06 %, 0,08 %, 0,20 et 0,05 % pour les liants PZ20, C10, L40 et CRS respectivement.

D'après la figure 3c, nous constatons que l'expansion des éprouvettes accroît régulièrement en fonction de la durée d'immersion. L'expansion des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm³ du ciment CEMI après 180 jours d'immersion dans l'eau de mer est 0,18 %. Elle est 0,16 %, 0,06 %, 0,21 et 0,36 pour les ciments PZ20, C10, L40, et CRS respectivement.

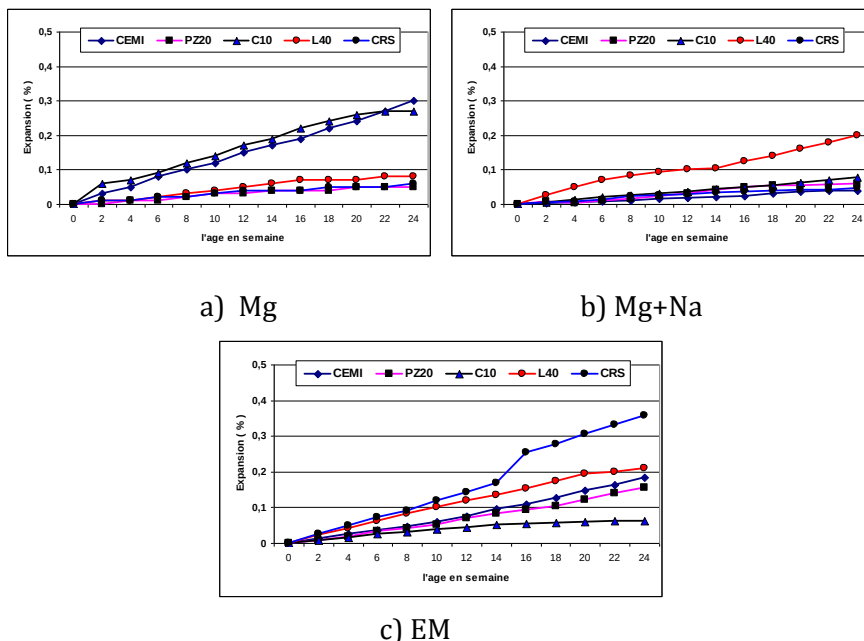
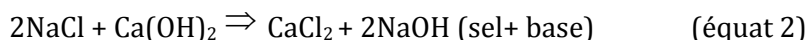
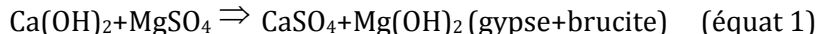


Figure 3: Evolution de l'expansion des éprouvettes de mortiers conservées dans les solutions a)Mg, b) Mg+Na, c) EM

5. DIFFRAGTOGRAMMES DES PATES DE LIANT CONSERVES DANS LES QUATRE MILIEUX

Les figures 4.a- 4.d présentent les spectres DRX des cinq liants après 180 jours d'immersion dans les quatre milieux. Les diffractogrammes des rayons X permet d'identifier les phases hydratées de la pâte et peut aussi nous renseigner si l'hydratation est complète ou non. L'augmentation du degré de désordre dans un matériau a pour conséquence l'élargissement et la réduction de la hauteur des raies de diffraction [6]. Nous constatons que pour les cinq liant l'intensité de la portlandite est fort dans le milieu témoin (eau douce) qui explique l'absence d'attaque [7], tandis que, leur intensité dans les trois autre milieux Mg, Mg+Na et EM est faible, ceci est du probablement à la consommation de la portlandite suite à sa la réaction avec les ions sulfate SO_4^{2-} et les chlorures de sodium NaCl pour former le gypse et le chlorure de calcium CaCl_2 qui est un sel expansif suivant les équations suivant:



Pour l'intensité de la portlandite des liants PZ20 et L40 dans le milieu témoin est très faible, ce qui explique la consommation de la portlandite par la réaction pouzzolanique suivant l'équation :



L'intensité de l'ettringite de la pâte du liant CEMI est supérieure dans le milieu (Mg+Na) comparaison aux autres milieux, même constatation pour la pâte de liant PZ20, ce qui explique la forte perte de résistance dans le milieu (Mg+Na).

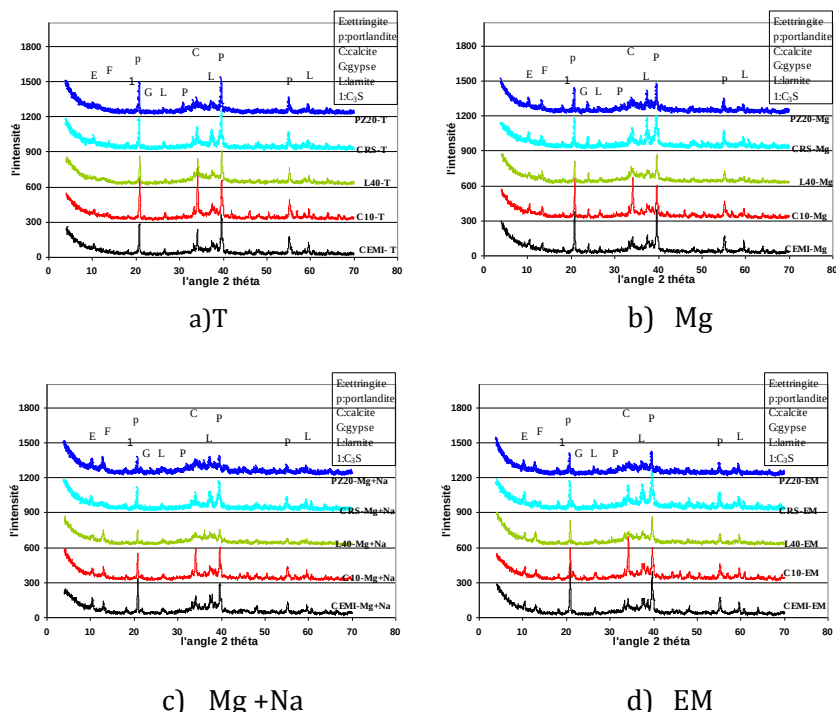


Figure 4 : DRX des cinq pâtes après 6 mois d'immersion dans les quatre milieux a) témoin (T), b) 3%MgSO₄, c) 3%MgSO₄+19,6%NaCl, d) eau de mer

6. CONCLUSION

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

L'attaque chimique des bétons s'effectuée principalement sur la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenue dans la pâte de ciment. Mais l'attaque des silicates d'aluminates n'est pas négligeable. Nous constatons que:

- la substitution de 40 % de laitier dans un ciment Portland améliore la résistance à la compression à long terme;
- le laitier d'El hadjar améliore la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques des sulfates.

- l'ajout des matériaux pouzzolanique permet de réduire l'effet des attaques chimiques par la réduction de la perméabilité du matériau, de la taille des pores et du pourcentage de Ca(OH)_2 .
- la diffraction par rayon X permet de détecter les hydrates formés et leur intensité qui varie suivant le milieu de conservation.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Al-Amoudi, O.S.B. "Durability of Plain and Blended Cements in marine environments," *Advances in Cement Research*, 14(1), in press (2002a).
- [2] Shi C. and Day R.L. "comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans". *Cement and concrete research*, vol. 32, pp. 813-818 (2001).
- [3] Targan S., Elgin A., Erdogan Y., and V. Sevinc, "Influence on natural pozzolan, colematite ore waste, bottom ash on the properties of Portland cement". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp.1175-1182 (2003).
- [4] Menendez G., Bonavetti V., and Irassar E.F, "strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag". *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp.61-67 (2003).
- [5] Boubekeur T, "Evaluation des performances des ciments Portland au calcaire". *Mémoire de magistère, Université de Hassiba Benbouali de Chlef* (2009).
- [6] Cyr martin, " Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires ". *Thèse de doctorat, cotutelle entre l'INSA de Toulouse et l'Université de Sherbrooke (Québec)* (1999).

[7] Thanh Son NGUYEN, "Influence de la nature du liant et de la température sur le transport des chlorures dans les matériaux cimentaires". Thèse de doctorat, (INSA) de Toulouse (2006).