



HAL
open science

Comportement des BHP de laitier soumis aux cycles immersion-séchage

Rabah Chaid, Laurent Molez, Malika Sabria Mansour, Aïssa Talah

► **To cite this version:**

Rabah Chaid, Laurent Molez, Malika Sabria Mansour, Aïssa Talah. Comportement des BHP de laitier soumis aux cycles immersion-séchage. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2016, 3 (1), pp.23-33. hal-01365984

HAL Id: hal-01365984

<https://hal.science/hal-01365984>

Submitted on 13 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Comportement des BHP de laitier soumis aux cycles immersion-séchage

Behaviour of slag HPC submitted to immersion-drying cycles

Rabah Chaid^{a,*}, Laurent Molez^b, Malika Sabria Mansour^a, Aïssa Talah^c

^a *Unité de recherche : Matériaux - Procédés et Environnement, UMBB, Algérie.*

^b *Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et du Génie Mécanique, INSA-Rennes, France.*

^c *Laboratoire de Bâti dans l'Environnement, USTHB, Algérie.*

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 19 novembre 2015

Révisé : 11 février 2016

Accépté : 13 mars 2016

Mots clés:

BHP

Durabilité

Laitier

Immersion-Séchage

Keywords :

HPC

Durability

Slag

Immersion-Drying

RESUME

Cet article constitue une partie d'une synthèse des travaux élaborés conjointement au Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique de l'INSA de Rennes et l'Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement de l'Université de Boumerdès. Un des objectifs visés était en effet de valoriser, par des études de variantes, l'utilisation des ajouts cimentaires locaux dans la formulation des bétons à hautes performances (BHP). La contribution liante des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des bétons a été évaluée par une méthodologie expérimentale originale permettant de subjuguier leur effet granulaire et pouzzolanique. Les résultats obtenus montrent que la contribution du couple ciment - laitier à la densification de la matrice est supérieure à celle obtenue lorsque le ciment n'est pas substitué par l'addition. Par conséquent, une amélioration significative des performances des bétons formulés a été observée, ceci malgré l'action préjudiciable des cycles immersion - séchage maintenus pendant 365 jours.

ABSTRACT

This article is part of a summary of the work developed in conjunction with the Laboratory of Civil Engineering and Mechanical Engineering from INSA Rennes and Research Unit: Materials, Processes and Environment, University of Boumerdes. One of the objectives was indeed to promote, through studies of variants, the use of local cementitious additions in the formulation of high performance concretes (HPC). The binding contribution of mineral additions to the physical, mechanical and durability of concrete was evaluated by an experimental methodology to subjugate their original granular and pozzolanic effect. The results show that the contribution of couple cement - slag intensification of the matrix is higher than that obtained when the cement is not substituted by addition. Therefore, a significant improvement in performance of concretes was observed, despite the adverse action immersion cycles - drying maintained for 365 days.

* *Corresponding author. Tel.: +21324911658.*

E-mail address: chaidr@yahoo.fr

1 Introduction

Depuis quelques années, un regain d'intérêt se manifeste, dans le monde entier, pour le béton à hautes performances (BHP), obtenu grâce à l'emploi de fluidifiants et d'ajout cimentaire. La raison de ce nouveau revirement doit être recherchée, en fait non seulement dans la possibilité d'alléger les structures par une augmentation des contraintes en services, mais plutôt dans l'amélioration de la durabilité du matériau en service.

Il est possible de modifier la microstructure du béton en incorporant des produits minéraux. Ces ajouts cimentaires modifient la microstructure du béton en termes de caractéristiques physiques et chimiques [1].

Le mécanisme de réaction pouzzolanique des ajouts cimentaires peut être brièvement décrit comme la réaction de la silice avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en présence de l'eau. Il en résulte des Hydro Silicates de Calcium à pauvre rapport Ca/Si. Bien que cette réaction soit prompte et précoce, elle est limitée par la quantité d'eau dans les BHP [2].

Le laitier vitrifié, granulé est un produit hydraulique, c'est à dire susceptible de donner par activation basique, des produits d'hydratation stables. Il est obtenu par refroidissement brutal par l'eau sous pression, c'est un sable de granulométrie 0/5 mm.

Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant. L'hydratation intervient d'abord par la dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où en résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution [3].

Dans les ciments au laitier, le clinker est l'activant principal du laitier. Cependant, les premiers hydrates produits seront ceux du clinker ; C-S-H et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui recouvrent uniformément les grains du laitier et du clinker. Par la suite, l'excès de chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ; il en résulte alors des silicates de calcium hydratés et des aluminates tétracalciques hydratés [4].

Cet article rapporte les résultats de l'étude de la durabilité des bétons à hautes performances (BHP) réalisés avec un ciment CEM I seul servant de référence et un ciment avec ajout de laitier de haut fourneau finement broyé et soumis à une campagne d'essais d'humidification - séchage ou cycle de mouillage séchage alterné.

L'évolution des phases cristallines est suivie par diffraction X et les minéraux sont observés au Microscope électronique à balayage (MEB), la micro analyse qui lui est associée permet de confirmer leur composition chimique. Ces déterminations concernent aussi bien les formations superficielles dues aux bains de conservation que les formations internes initiales et leurs évolutions dans le temps. En parallèle à ces essais, nous avons suivi l'évolution des résistances mécaniques en compression à l'aide d'une presse asservie. Enfin, un essai moins habituel pour les BHP mais sensible lui aussi à l'état de surface est la micro dureté Vickers. Il a permis de quantifier la dégradation superficielle des différents bétons soumis aux cycles immersion-séchage pendant un an [5, 6, 7].

2 Matériaux

2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est le CEM I 52,5 N de l'usine Saint Pierre Lacour (France), dont la composition minéralogique calculée par la méthode de Bogue est donnée au tableau 1.

Tableau 1 - Composition minéralogique du ciment CEM I 52,5 N.

Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	79,84	2,22	9,10	9,44

Pour calculer la composition du béton il est nécessaire de déterminer la résistance vraie du ciment utilisé, soit dans notre cas présent le CEM I 52,5 N. Le mortier « normalisé » utilisé est conçu suivant la norme NF P 15-403 avec un rapport eau/ciment égal à 0,5.

Les éprouvettes de mortier (4 x 4 x 16 cm³) sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) jusqu'à la réalisation des essais. Les résultats des essais de ruptures à la traction par flexion et à la compression sont reportés sur le tableau 2.

Tableau 2 - Évolution de la résistance du ciment CEM I 52,5 N.

Résistance (MPa)	02 j	07 j	28 j
Flexion	4,8	6,8	7,7
Compression	30	45	61

2.2 Les granulats

Le sable utilisé est un sable de carrière (0/4) recomposé conformément à la norme NF P 18-540, le module de finesse calculé est 2,47, ce qui correspond à des sables utilisés pour la recherche de résistances élevées, mais en général, il conduit à une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

Cependant, la teneur de la partie supposée argileuse, soit de diamètre inférieur à 0,14 mm est de 7,3 %. Les graviers utilisés sont des graviers concassés de fractions (3/8 et 8/15). Le tableau 3 représente les différentes caractéristiques physiques du sable et des graviers (3/8 et 8/16).

Tableau 3 - Autres propriétés physiques des granulats.

Sable		Graviers	
masse volumique apparente	1 660 kg/m ³	masse volumique apparente	1 468 kg/m ³
masse volumique absolue	2,50 g/cm ³	masse volumique absolue	2,50 g/cm ³
équivalent de sable visuel	95	coefficient Micro Deval	41,6
équivalent de sable à piston	90	coefficient Los Angeles	37,6

2.3 Le laitier

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-hadjar 'Annaba, Algérie', c'est un sable de granulométrie 0/5 mm, et une Surface Spécifique Blaine de 8 500 cm²/g.

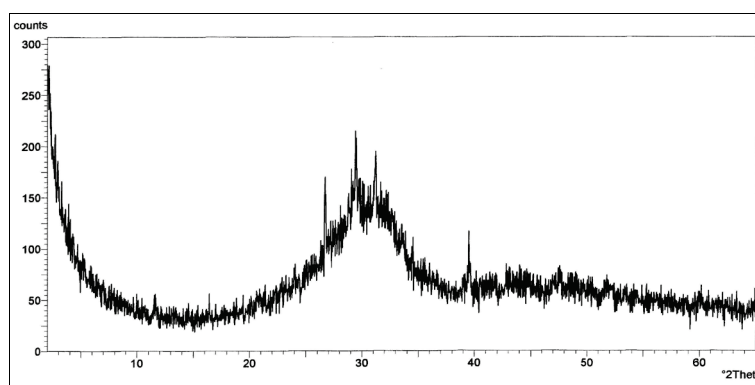


Fig. 1 – Diffractogramme du laitier

Sa composition minéralogique, déterminée par DRX radiogramme (fig. 1), le refroidissement brutal (trempe) du laitier sous un jet d'eau, permet l'obtention d'un état vitrifié (amorphe), ce qui explique l'absence de raie de diffraction dans le diffractogramme de rayons X [8].

2.4 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé, est un plastifiant réducteur d'eau pour bétons à hautes performances conforme à la norme NF EN 934-2 fourni par la société SIKA (France), il permet la confection de bétons à très faible rapport E/L ayant des résistances mécaniques très élevées à toutes échéances et en particulier aux jeunes âges.

Caractéristiques physiques et chimiques :

- Solution aqueuse.
- Densité : $1,23 \pm 0,02$.
- pH : 7 à 11.
- Teneur en ions Cl⁻ : $< 0,1$ %.
- Extrait sec : $40 \pm 1,5$ %.
- Teneur en Na₂O équivalent : 6,0 %.

Dosage : la plage d'utilisation recommandée est 0,4 à 2 % du poids du ciment selon les performances recherchées. Ce dosage pourra être dépassé pour obtenir des réductions d'eau plus importantes notamment lors de la confection des bétons avec silice micronique.

3 Composition des bétons

L'élaboration des bétons a été menée en vue d'obtenir un mélange en deux phases : un béton s'approchant, le plus possible d'une roche massive ayant la plus faible porosité et constitué par le squelette inerte (gravier et sable) déterminé par la méthode Dreux Gorisse, tout en optimisant le diamètre maximal des gros granulats [9].

Tandis que la deuxième phase présente la pâte liante (ciment, superplastifiant, eau et laitier). Cette dernière a été optimisée par coulis expérimentaux. La composition du béton avec ajout de laitier après optimisation est reportée sur le tableau 4.

Tableau 4 - Composition des bétons avec et sans ajout de laitier.

Constituants		Composition	
		BHP	BHPL
Ciment	kg/m ³	500	425
Sable	kg/m ³	573	573
Gravier (3/8)	kg/m ³	130	130
Gravier (8/15)	kg/m ³	915	915
Eau	l/m ³	150	150
Plastifiant	l/m ³	8	8
Laitier	kg/m ³	-	75

4 Programme expérimental

Les différentes éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 14 cm³) de béton préparées, sont conservées en salle humide (20°C, 95% HR) pendant 24 h. Elles sont ensuite soumises aux cycles immersion – séchage, respectivement la nuit dans l'eau et la journée à l'air. La durée de l'essai a été fixée à 28 j, 3 mois et 1 an.

La durabilité des bétons est quantifiée par l'évolution aussi bien de la microstructure interne des bétons que de l'interface matrice - granulats et de la surface externe sur laquelle nous avons procédé à la mesure de la microdureté Vickers.

L'appareil utilisé est un microscope électronique à balayage de marque Jeol (conventionnel JSM 6400), destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie OXFORD Link Isis et couplé à une microanalyse.

Entre autre, des analyses par DRX ont permis l'identification des phases hydratées cristallisées, leur évolution et la transformation des composés cristallins du ciment anhydre dans le temps. L'appareil utilisé est un diffractomètre de type Philips PW3710, avec une anticathode au Cuivre et un filtre au Nickel, l'enregistrement est de type pas à pas.

Les essais de résistance mécanique sont réalisés au moyen d'une presse hydraulique asservie (MOHR & FEDERHAFF Germany, de capacité 600 kN) pour la compression et au moyen d'une machine universelle asservie (Instron 4507, de capacité 300 kN) pour la flexion.

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers les éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion - séchage nous a renseigné sur l'homogénéité du béton.

Nous allons adopter pour tout ce qui suit la légende suivante :

- **BHPL** : Béton avec ajout de laitier.
- **BHP** : Béton de référence.

5 Résultats et analyses

L'approche préconisée dans notre contexte de développement durable consiste à optimiser l'utilisation du laitier de hauts fourneaux (résidu industriel), afin de remplacer une partie du ciment dans les bétons. Ces bétons conçus, fabriqués et utilisés convenablement, peuvent offrir une performance supérieure au béton classique de ciment portland, autant par leurs propriétés mécaniques que par leur durabilité. Les bétons fabriqués avec cet ajout pourront être utilisés dans des applications très variées et ce, conformément aux exigences de performance [10].

5.1 Résistance en compression

L'évolution des résistances mécaniques des éprouvettes de béton conservées dans l'eau courante et celles ayant subi les cycles immersion dans l'eau et séchage à l'air suivie pendant 28 jours, 3 mois et un an est représentée sur la figure 2.

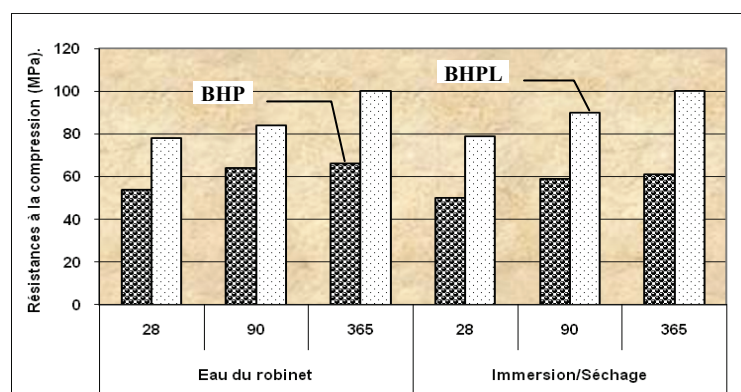


Fig. 2 – Évolution des résistances mécaniques à la compression des bétons en fonction du temps selon le type de conservation.

La figure 2 montre l'augmentation de la résistance des éprouvettes de béton, en fonction de la durée de conservation dans l'eau du robinet et celles soumises aux cycles immersion – séchage. On note que les résistances en compression des bétons avec ajout de laitier et quel que soit le mode de conservation, sont toutes supérieures au béton de référence est

dépassent 60 MPa. Nous avons donc affaire à des bétons de hautes performances. Cette qualité n'est en rien affectée par le milieu environnant [11].

Par ailleurs, on remarque un accroissement notable des résistances à la compression pour les bétons avec ajout de laitier dont les contraintes atteintes à 365 jours sont supérieures de 51 % et 64 % respectivement pour les bétons conservés dans l'eau du robinet et ceux soumis aux cycles immersion – séchage. Contrairement au béton de référence dont les éprouvettes sont dégradées.

En ajoutant du laitier comme ajout minéral dans le béton, il y a formation d'un gel de C–S–H additionnel et une consommation de la chaux, ce qui amène une densification de la microstructure et une diminution de la porosité capillaire. De plus, le laitier ayant une finesse Blaine plus élevée que celle du ciment, comble les minuscules vides et accentue la densification. Par conséquent, les résistances en compression des bétons contenant du laitier finement broyé sont plus élevées que celles des bétons préparés avec le ciment Portland seul.

5.2 Masse volumique

Concernant la variation de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau courante et ceux ayant subi les cycles immersion - séchage, elle a la même tendance que celle des résistances mécaniques (fig. 3). Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est supérieure.

La figure 3 montre l'évolution de la masse volumique des éprouvettes de béton, en fonction de la durée de conservation dans l'eau du robinet et celles soumises aux cycles immersion – séchage.

La mouture élevée du laitier, conjuguée à son interaction avec la portlandite pour former des produits d'hydratation non solubles, favorisent l'accroissement de la compacité des bétons durcis. Ce qui explique l'augmentation de leurs masses volumiques par rapport au béton de référence. En effet, le laitier ayant une finesse plus grande que celle du ciment utilisé, s'insèrent dans les vides et les pores capillaires, et densifie le squelette du béton [12].

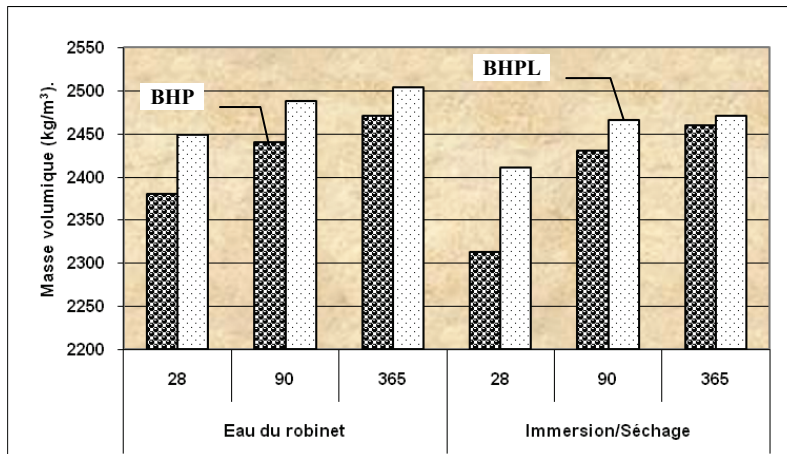


Fig. 3 – Évolution des masses volumiques des bétons en fonction du temps.

5.3 Microstructure interne

5.3.1 Observations au MEB

L'étude de la microstructure est réalisée par microscopie électronique à balayage. Les examens sont réalisés en utilisant la technique des électrons secondaires sur des cassures fraîches obtenues par fractures des éprouvettes.

Après 12 mois de cycles immersion - séchage, l'hydratation de la matrice cimentaire conduit à la formation de la portlandite CH, de gel silico hydraté C-S-H et de l'ettringite $C_3AS_3H_31$ [13]. Sur la figure 4, on observe une structure poreuse du béton de référence, où d'importantes fines aiguilles (formes habituelles de l'ettringite) sont présentes dans les pores. Ce qui explique, ses faibles masses volumiques et résistances mécaniques des BHP (béton de référence).

Tandis que, pour le béton avec ajout (BHPL), le laitier comblet les vides et l'empilement granulaire est plus compact. En conséquence, le béton possède de meilleures performances mécaniques, sa porosité est diminuée et sa durabilité s'en trouve améliorée.

5.3.2 Microanalyse

Une microanalyse globale étalée sur une plage (x 200) des éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion - séchage, confirme la présence importante de l'ettringite dans le cas du béton de référence allant du simple au double (0,08 et 0,16%) par rapport au béton de laitier.

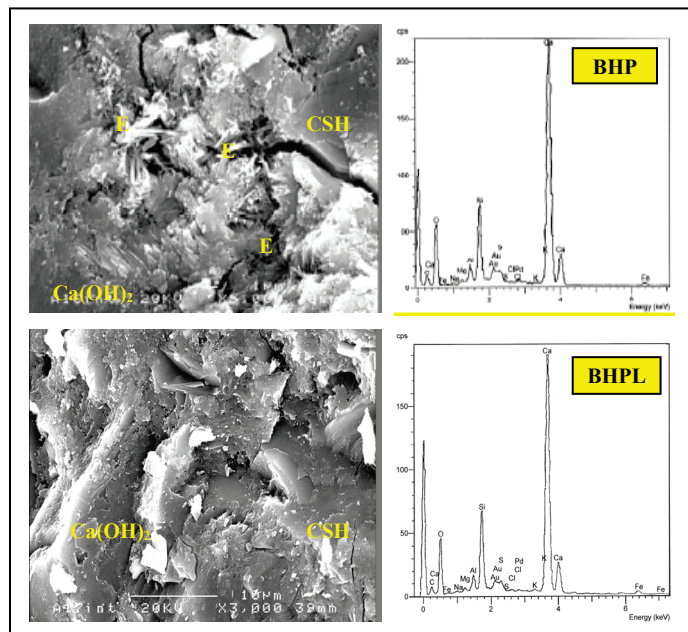


Fig. 4 – Observation au MEB de la microstructure interne des éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion – séchage pendant 365 j.

Pour ce qui est du rapport Ca/Si, il passe de 1/1 pour le béton de référence à 1/3 pour le béton de laitier. Ce fait explique évidemment, la quantité d'hydrates fournis par l'hydratation, mais aussi la façon dont ces hydrates s'assemblent, leur arrangement dans l'espace et leurs liaisons [14].

Ces deux résultats viennent confirmer le rôle non négligeable du laitier d'El hadjar sur les performances des bétons, ceci malgré l'effet préjudiciable des cycles immersion - séchage.

5.3.3 Analyse par diffraction X

L'analyse par diffraction des rayons X (figure 5) illustre l'influence des cycles immersion - séchage sur les différentes formations. Les hydrosilicates de calcium formés (habituellement appelés C-S-H) sont semi - cristallins ou amorphes et difficilement identifiables par diffraction X ; Seules quelques raies apparaissent mais elles sont superposées aux raies des autres phases cristallines [15].

Les phases cristallines (intérieur des éprouvettes) des différents bétons paraissent identiques. Cependant, l'hydratation des composés anhydres pour les bétons avec ajout de laitier finement broyé se trouve freinée, contrairement à celles du béton de référence [16].

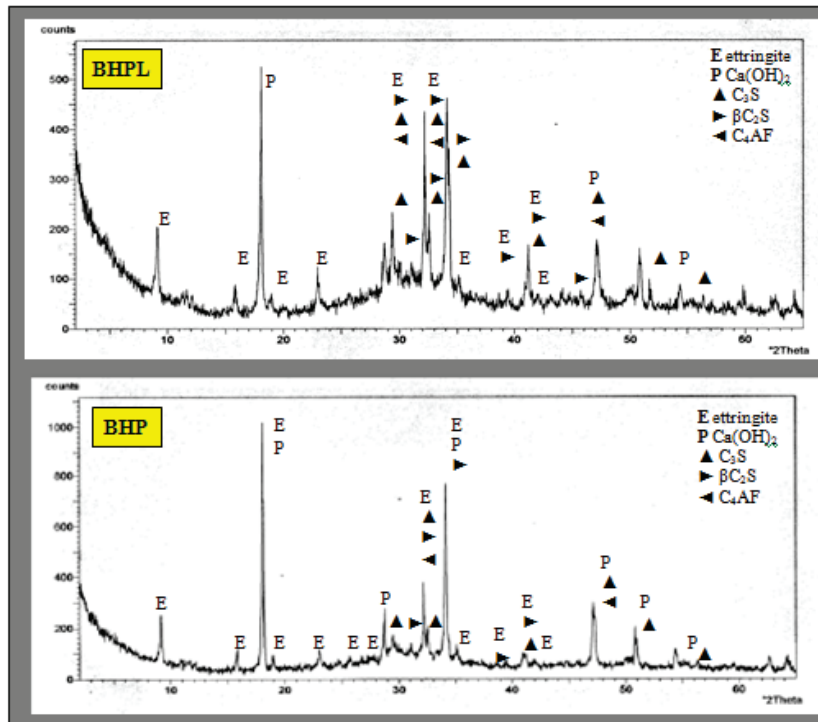


Fig. 5 – Radiogramme des éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion - séchage pendant 365 jours.

5.4 Propagation des ondes ultrasoniques

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton peut nous renseigner sur la résistance en compression. Seulement des différences peuvent exister, si on considère différentes compositions et âges des bétons, dans la relation vitesse des ultrasons - résistance en compression.

D’après les résultats obtenus (fig. 6), on note une vitesse de propagation du son dans toutes les compositions de béton d’autant plus grande que ce dernier est plus âgé, ce qui est en corrélation avec l’évolution de la compacité dans le temps.

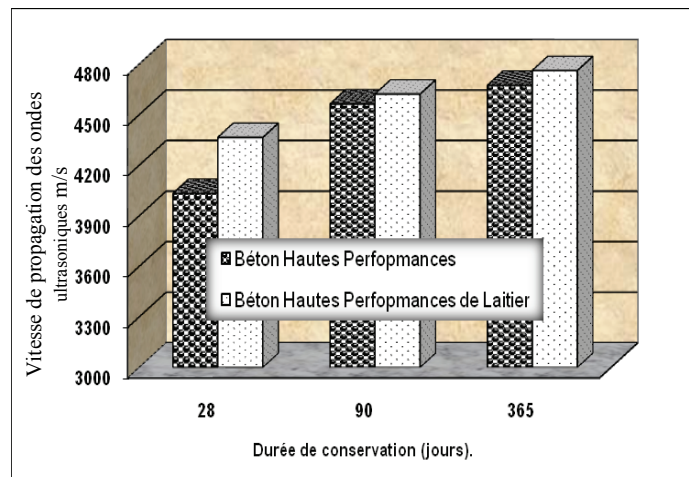


Fig. 6 – Évolution des vitesses de propagation du son à travers les éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion – séchage en fonction de la durée de conservation.

En ajoutant du laitier comme ajout minéral dans le béton, il y a formation d’un gel de C–S–H additionnel et une consommation de la chaux, ce qui amène une densification de la microstructure et une diminution de la porosité capillaire, engendrant ainsi un squelette plus dense et par conséquent un béton plus résistant et plus durable aux cycles immersion - séchage [17].

5.5 Résistance en traction

La structure moins compacte observée pour le béton de référence (fig. 4), traduit une faible adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire suite à l'existence d'une auréole de transition poreuse favorable à la formation de nids d'ettringite secondaire expansive. Par conséquent, des résistances mécaniques particulièrement en traction par flexion plus faibles.

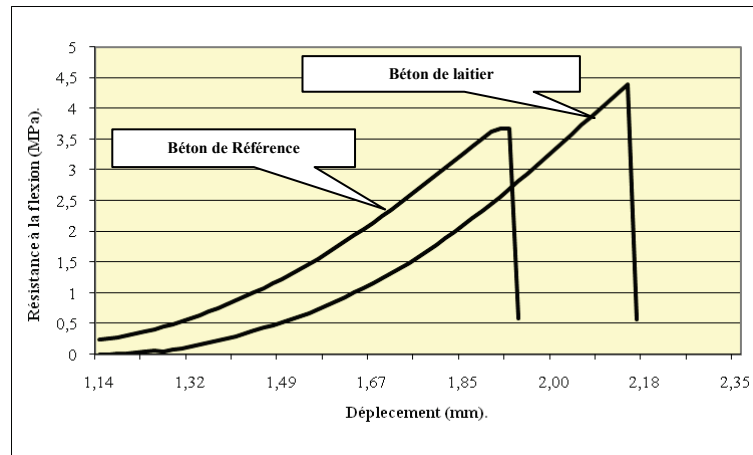


Fig. 7 – Évolution des courbes contrainte-déformation (en flexion) après 3 mois de durcissement dans l'eau du robinet.

La granulométrie du laitier plus fine, permet à ses grains de s'intercaler dans les pores créés par l'hydratation du ciment entre les granulats et les produits d'hydratation, améliorant ainsi la compacité des bétons. Conjugué à son effet pouzzolanique entraînant la multiplication des liaisons microstructurales, le laitier développe l'adhérence granulat - matrice et par conséquent, augmente la résistance en traction par flexion du béton, lequel ses déformations se trouvent plus prononcées (fig. 7).

5.6 Formations superficielles

5.6.1 Observations au MEB

Les éprouvettes soumises aux cycles immersion - séchage pendant 365 jours sont ensuite cassées et leur surface au contact du milieu de conservation est observée au MEB. Les formes cristallines observées sont soumises à la micro analyse (EDS).

Sur la figure 8, on observe des grains de portlandite carbonatée. Pour les deux bétons les cristaux se présentent sous une forme irrégulière. Cependant, dans le cas du béton de laitier, les grains de calcite sont de dimensions relativement plus grandes, que dans le cas où il y a dégradation pour le béton de référence [18].

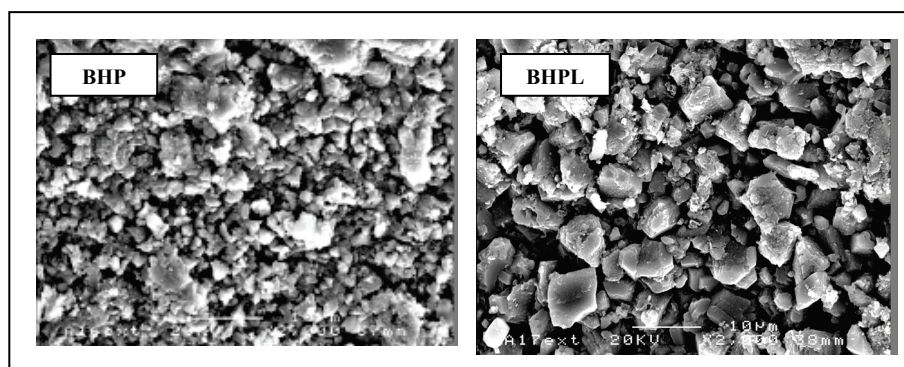


Fig. 8 – Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion - séchage pendant 365 jours.

5.6.2 Micro dureté Vickers

La mesure de la micro dureté Vickers a été précédemment appliquée par Rendell F. lors des suivis de la dégradation des surfaces de béton d'assainissement [19].

Moyennant un certain nombre de précautions et en particulier un nombre de mesures important lié à la présence du sable, la micro dureté Vickers a permis de quantifier la durabilité de différents mortiers après des attaques sulfatiques [20].

Cette technique a été donc appliquée aux différents bétons ayant subi les cycles immersion - séchage pendant 365 jours. Ces microduretés sont mesurées directement sur la surface exposée en ayant soin de ne pas prendre la surface supérieure lors du moulage, les résultats sont illustrés sur la figure 9.

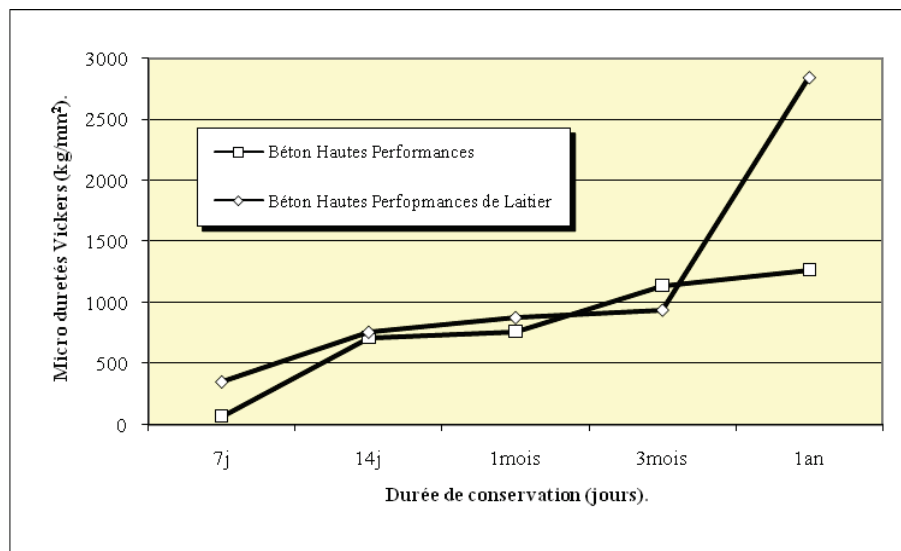


Fig. 9 – Évolution des microduretés Vickers des éprouvettes de béton soumises aux cycles immersion - séchage en fonction du temps.

Les microduretés Vickers sont plus grandes pour les bétons de laitier que pour le béton de référence, suite à la dégradation de la surface des BHP sous l'effet des cycles immersion-séchage (figure 8).

Conclusion

Notre objectif est d'étudier les possibilités d'obtention de bétons hydrauliques à hautes performances par réduction de la porosité de la pâte de ciment interstitielle en remplissant les espaces intergranulaires du ciment à l'aide d'un sous produit industriel local ultrafin.

Moyennant une composition correctement ajustée, l'ajout de laitier finement broyé de l'usine sidérurgique d'El-hadjar conduit bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons hautes performances.

L'ajout de laitier finement broyé a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la masse volumique et de la vitesse de propagation du son au travers les différentes éprouvettes de 56%, conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un béton plus compact.

Ce qui a entraîné en conséquence, une amélioration relative des résistances mécaniques à la compression de 39%, ceci malgré l'action préjudiciable des cycles immersion - séchage maintenus pendant 365 jours. L'identité de ce comportement vient du fait même de la constitution microstructurale des bétons avec ajout de laitier ultrafin, dont la résistance à la traction est accrue de 16%.

La microstructure interne des bétons de laitier, observée au microscope à balayage et confirmée par la microanalyse, montre notamment la densité importante des C-S-H et la consommation de la portlandite, élément favorable à la formation de l'ettringite secondaire expansible.

RÉFÉRENCES

- [1]- R. Dron, I-A. Voinovitch. Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes. Le béton hydraulique. ENPC, Paris : 237-246, 1982.
- [2]- G. Dreux. Nouveau guide du béton. E. Eyrolles. Paris, 1998.
- [3]- J. Baron, J-P Olivier. Les bétons – bases et données pour leur formulation. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques. Éditions Eyrolles, Paris, 1997.
- [4]- S-P. Jiang, J. Grandet. Évolution comparée des porosités des mortiers de ciments au laitier et mortiers des ciments portland. Cement and concrete research. vol. 19: 487-496, 1989.
- [5]- R. Robu, R. Jauberthie, Y. Melinge et Ch. Lanos. Étude diffractométrique de l'évolution des phases au cours du durcissement d'un ciment Portland, Journal de Physique, vol. 4, France, p. 473-479, 2000.
- [6]- R. Jauberthie, J. Fejean et Ch. Lanos. Formation et stabilisation de l'ettringite responsable de la durée de prise du ciment Portland, Rayons X et matière, Strasbourg 4 et 7 Dec. 2001, Journal de Physique, 2002.
- [7]- R. Chaïd, R. Jauberthie, A. Bali, M-T. Abadlia. Apport des fillers calcaires à la durabilité des BHP en milieu sulfatique, Matériaux & Techniques, EDP - sciences, 2006, Vol. 94, p. 199-207.
- [8]- S. Lea. Chemistry of Cement and concrete. fourth Edition by Peter C. Hewlett, 241–289, 2004.
- [9]- R. Chaid, R. Jauberthie, A. Bali, M-T. Abadlia. Formulation des bétons de hautes performances avec des ajouts cimentaires locaux, Revue : Algérie équipement, école Nationale des Travaux Publics, n°38, ISSN 111-5211, 3-7, janvier 2004.
- [10]- S. Miyazawa, T. Yokomuro, H. Fujiwara and K. Koibuchi. Properties of concrete using blast-furnace slag cement type A with modified chemical composition. Cement Science and Concrete Technology, No.64, 240-250, 2011.
- [11]- T. Bouziani, A. Benmounah, Z. Makhloufi, M. Bederina and M. Tkint Queneudec, Properties of flowable sand-concretes reinforced by polypropylene fibers, J. Adhes. Sci. Technol. 28 (18) 1823–1834, 2014.
- [12]- G. Lee, T-C. Ling, Y-L. Wong and C-S. Poon. Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. Construction and Building Materials, 25, 2611–2618, 2011.
- [13]- O. Gildas F. Adegoloye. Valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables dans le béton, These Civil Engineering. Université de Cergy Pontoise, 2014. French.
- [14]- O. Oueslati. Durabilité des matériaux cimentaires Soumis aux acides organiques. Résistance chimique, mécanique et de corrosion, Thèse de Doctorat Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec, 2011.
- [15]- M. Moesgaard, D. Herfort, M. Steenberg, L-F. Kirkegaard and Y. Yue. Physical performances of blended cements containing calcium aluminosilicate glass powder and limestone, Cement and Concrete Research, 41, 359-364, 2011.
- [16]- N. Lemonis, P.E. Tsakiridis, N.S. Katsiotis, S. Antiohos, D. Papageorgiou, M.S. Katsiotis and M. Beazi-Katsioti. Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan. Constr. Build. Mater. 81 (15) 130–139, 2015.
- [17]- R. Chaid, A. Bali, R. Jauberthie, A.Talah. Comportement des BHP de laitier en milieu sulfatique, Revue : Synthèse, ISSN 1114-4924, n° 24, 91-99, avril 2012.
- [18]- R. Chaïd, S. Kenaï, H. Zeroub, R. Jauberthie, « Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment », European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 19, Issue 2, 2015, pages 219-237.
- [19]- F. Rendell. Le comportement des bétons dans les systèmes d'assainissement, thèse de Doctorat, D00-01, INSA-rennes, France, 1999.
- [20]- R. Jauberthie, J. Fejean, Ch. Lanos. Formation et stabilisation de l'ettringite responsable de la durée de prise du ciment Portland, Rayons X et matière, Strasbourg 4 et 7 Dec. 2001, Journal de Physique, DOI: 10.1051, 6-51, 2002.