Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés

Aldjia Boutiba, Rabah Chaid, Raoul Jauberthie, Laurent Molez

▶ **To cite this version:**

Aldjia Boutiba, Rabah Chaid, Raoul Jauberthie, Laurent Molez. Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés. De l'expérimentation à la modélisation en Génie Civil, May 2013, Cachan, France. 10 p. hal-01005541

HAL Id: hal-01005541
https://hal.science/hal-01005541

Submitted on 12 Jun 2014

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.

Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés

BOUTIBA Aldjia[1], CHAID Rabah[2], JAUBERTHIE Raoul[3]& MOLEZ Laurent[3]

[1]Dpt. Architecture, Faculté du Génie de la Construction, Université de Tizi Ouzou, boualdjedi@yahoo.fr
[2]Unité de recherche : Matériaux - Procédés et Environnement, Université de Boumerdès
[3]Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et Génie Mécanique, INSA-Rennes, France

RESUME : Une panoplie de sulfates en solution se trouve souvent dans les eaux souterraines, les eaux usées ou dans l'eau de mer. Au contact du béton ces sulfates réagissent chimiquement avec ses hydrates, cela peut entrainer la détérioration du béton dans un laps de temps très réduit, selon deux mécanismes physico-chimiques à savoir l'expansion et la perte des propriétés liantes des CSH. Les bétons de haute performance de fibres métalliques sont de plus en plus utilisés dans la construction. Dans le cadre de la politique de développement durable actuelle, ce sont des matériaux qui procurent des gains de masse conséquents, qui permettent d'augmenter la tenue dans le temps des ouvrages, ce qui contribue à la diminution de l'impact des matériaux cimentaires sur l'effet de serre. Dans ce travail, on présente les résultats d'une étude expérimentale portant sur la durabilité après 6 et 24 mois de murissement dans l'eau séléniteuse, d'un béton de haute performance fibré avec substitution de 15% du ciment par du laitier de hauts fourneaux et cela par des essais qui permettent de caractériser sa compacité, la microstructure de sa matrice cimentaire et l'altération éventuelle de ces fibres métalliques.

ABSTRACT: A variety of sulfates in solution is often found in groundwater, wastewater or seawater. To the contact of the concrete these sulphates react chemically with these hydrates, it can entail the deterioration of the concrete in a very reduced time lapse, according to two physico-chemical mechanisms namely the expansion and the loss of the binding properties of the CSH. The high performance concretes reinforced with metallic fibers are used more and more in the construction. Under the current policy of sustainable development, these are the materials that procure gains of consequent mass, which can increase the durability of structures, which contributes to the reduction of the impact of cementitious materials the greenhouse effect. In this work, we present the results of an experimental survey carrying on the durability after 6 and 24 months of ripening in water sulfated, high performance concretes reinforced with metallic fibers with 15% substitution of cement by slag and blast furnace this by testing for characterizing its compactness, the microstructure of the cement matrix and the possible alteration of the metal fibers.

Mots-clés : *BHP, fibre, laitier, sulfate.*
Keywords: *HPC, fiber, slag, sulfate.*

1. Introduction:

Les sulfates sont des sels d'acide sulfurique (H_2SO_4), comme le sulfate de sodium (mirabilite $Na_2SO_4.10H_2O$) ; sulfate de calcium (gypse $CaSO_4.2H_2O$ et anhydrite $CaSO_4$) ; sulfate de magnésium (kisérite $MgSO_4.H_2O$ et epsomite $MgSO_4.7H_2O$) [LERM]. Ces sulfates proviennent des sols, des eaux souterraines, des eaux usées, de l'eau de mer, des pluies acides liées à la pollution industrielle atmosphérique et des déchets radioactifs.
L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans), selon deux mécanismes physico-chimiques à savoir la perte des propriétés liantes des CSH et l'expansion [GCI].
L'altération des propriétés liantes des hydrates engendre une perte de résistance et de masse. Aussi, les aluminates et la portlandite sont les phases les plus vulnérables à l'expansion qui engendre des dommages considérables. Cependant, la détérioration du béton est causée par la formation d'ettringite secondaire (1, 2, 3) et gypse secondaire (4), pression et fissuration conséquentes. Ce qui favorise la dépassivation des fibres métalliques dans le béton et ensuite leur corrosion notamment par des sulfates [GCI, PET04, KHE 09].
1- du C_3A anhydre résiduel :
$C_3A + 3CaSO_4.2H_2O + 26\ H_2O \longrightarrow C_3A, 3CaSO_4.32H2O$
2- du monosulfoaluminate hydraté:
$C_3A, CaSO_4.18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12\ H_2O \longrightarrow C_3A, 3CaSO_4.32\ H_2O$
3- des aluminates hydratés:
$C_4AH_{13} + 2Ca(OH)_2 + 3SO_4 + 17\ H_2O \longrightarrow C_3A, 3CaSO_4.32\ H_2O$
4- la portlandite:
$Ca(OH)_2 + NaSO_4 + 2H_2O \longrightarrow 3CaSO_4.2H_2O + 2NaOH$ (gypse secondaire)

Grâce à leurs performances structurales et économiques, Les bétons de haute performance de fibres métalliques sont de plus en plus utilisés dans la construction. Ils permettent d'augmenter la productivité et de réduire les délais de réalisation sur les chantiers. Ils procurent des gains de masse conséquents, il est possible de construire avec moins de coffrage, moins de béton à mettre en place et moins d'armatures qu'avec les bétons ordinaires. Cela a été montré pour les BHP et les BTHP (gains de 25 à 40%) [AÏT 01, ESC 06].

La confection d'un BHP nécessite un dosage en ciment moyen de 450 Kg/m^3, compte tenue des taxes envisagées sur les émissions du CO_2, les ciments seront de plus en plus chers, en particulier le ciment sans ajout (CEM I). De ce fait la substitution d'une quantité de ciment par du laitier dans la composition de ce type de béton (BTHP) permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre, de valoriser les déchets et d'économiser du ciment. Aussi, l'hydratation du laitier ne produit pas de portlandite, mais consomme, celle produite suite à hydratation du ciment [MAL 96]. Le laitier de haut fourneau améliore la résistance des bétons aux sulfates par dilution des aluminates, par réduction de la teneur en portlandite et par l'accroissement de la compacité des hydrates en relation avec la diminution du volume poreux [LERM, DIV 02].

L'objet de cette étude, qui a été réalisée au laboratoire de génie civil et génie mécanique (matériaux) de l'INSA de Rennes est l'étude de la durabilité du béton de haute performance fibré avec substitution de 15% du ciment par du laitier de hauts fourneaux, par des essais qui permettent de caractériser sa compacité, sa microstructure et l'état des fibres métalliques, le dosage en laitier est utilisé à 15% en remplacement de ciment, car cette teneur qui donnent les meilleures résistances mécanique à 28 jours d'âges [CHA 06] . Pour cette étude on a adopté les conditions du chantier, c'est-à-dire que le mûrissement des bétons d'étude a eu lieu dans l'eau séléniteuse.

2. Matériaux et méthodes :

Les matériaux utilisés pour la confection des bétons d'étude sont :

-Un ciment portland sans ajouts minéraux CEM I 52,5 PM ES CP2 de l'usine Lafarge du Teil-France avec des caractéristiques chimique, minéralogique et physique suivantes :

Tableau 1 : Composition chimique et minéralogique du ciment

Elements	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**K_2O**	**Na_2O**	**SO_3**	**RI**	**PAF**	**CaO_L**
%	66.60	22.40	2.96	2.33	0.95	0.15	0.10	2.13	0.20	1.59	0.50
C_3S = 65.3 %		**C_2S** = 18.6 %			**C_3A** = 4.35 %			**C_4AF** =7.14%			

RI: résidus insolubles**, PAF:** pertes au feu

Les propriétés physiques :

Consistance normalisée H_20

Début de prise……..2h 55mn

Retrait à 28jours…….560 µm/m

Masse volumique absolue…….3.16 g/cm^3

Stabilité chimique……..0.5 mm

Surface spécifique…… 3590 cm^2/g

-Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte, de l'usine d'El-hadjer Annaba-Algérie. C'est un granulé amorphe, broyé jusqu'à une surface spécifique supérieur à celle du ciment, dont la composition chimique est reportée sur le tableau 2.

Tableau 2 : Composition chimique du laitier

Elements	**CaO**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**K_2O**	**Na_2O**	**SO_3**	**RI**	**PAF**
%	39.77	41.69	7.05	1.41	5.49	0.44	0.10	0.15	0.12	0.11

Les propriétés physiques :

Masse volumique absolue ……..... 2,99 g/cm3,

Surface spécifique ...…….…..... 8 500 cm2/g.

Les caractéristiques granulométriques du ciment et laitier mesurées au granulométre à laser CILAS 1180 sont reportés sur la figure 1.

-Un sable (0/2) alluvionnaire de la sablière de VRITZ, deux fractions de graviers (2/6) et (6/12) de concassage, un adjuvant superplastifiant, Sika ViscoCrete TEMPO 9.

-Pour les bétons fibrés, on a utilisés un mélange de fibres courtes et fibres à crochets (fibres encollées Dramix RC-80/50BN). Ces fibres sont ajoutées à raisons de 0,35% par mètre cube de béton chacune.

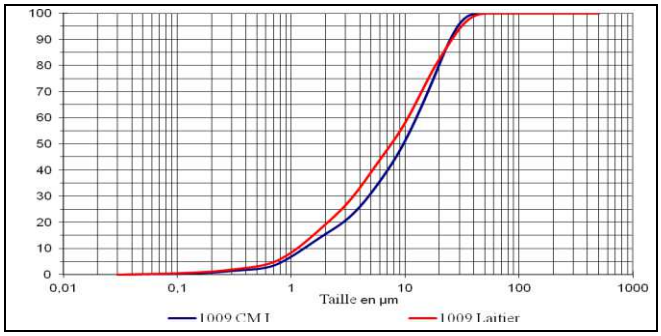

Figure 1: Distribution granulométrique du ciment et laitier

La formulation du béton soumis aux essais (béton d'étude) est réalisée avec la méthode de Dreux-Gorisse en utilisant le logiciel béton lab free du LCPC. Après les essais de convenance la composition de base retenue pour ces bétons est la suivante :
-**Ciment ……**450Kg/m^3
-**Laitier……**67,5Kg/m^3
-**Gravier 6/12 (G1)….**900Kg /m^3
-**Gravier 2/6 (G2)……**86,2Kg/m^3
-**Sable0/2……..**745,3 Kg/m^3
-**Eau ……..**157,5 Kg/m^3
-**Adjuvant……..…..** 0,34% de la masse du ciment.

Les corps d'épreuve c'est-à-dire, les bétons avec du laitier mais sans fibres et les bétons avec du laitier et les fibres sont mis après le démoulage en immersion total à la température de 20°C, dans les différents bains de conservation**:** eau potable, eau séléniteuse (eau gypseuse avec du plâtre jusqu'à 5%), le tableau 1 synthétise la nomenclature des bétons avec les milieux de conservation correspondants.

Tableau 3 : La nomenclature des bétons

Bétons et milieux de conservation	**Dénomination**
Béton avec du laitier et sans fibres, conservé dans l'eau potable	BLEP
Béton avec du laitier et sans fibres, conservé dans l'eau séléniteuse	BLES
Béton fibré avec ajout du laitier, conservé dans l'eau potable	BFEP
Béton fibré avec ajout du laitier, conservé dans l'eau séléniteuse	BFES

Après 6 et 24 mois de mûrissement, les corps d'épreuves sont ensuite séchés dans une salle climatisée d'humidité relative 50%, température 20°C. Les éprouvettes destinées aux essais de capillarité, de porosité à l'eau et de masse volumique, sont séchées dans l'étuve à une température de 100°C jusqu'à stabilisation de la masse

(variation de masse entre deux pesées espacées de 24h inférieure à 0.1%) puis ramenées à la température ambiante dans un dessiccateur.

3. Résultats et discussion :

3.1. Effet des milieux sulfaté sur les propriétés physiques :

a- Porosité accessible à l'eau et masse volumique : La porosité ouverte permet d'apprécier l'évolution de l'hydratation et la structuration des produits hydratés, c'est un paramètre primordial pour l'identification des bétons les plus durables [BES 04].

Le protocole d'essai de la masse volumique et la porosité accessible à l'eau est conforme aux recommandations du groupe AFREM [ARL 07]. Les résultats de ces essais sont représentés sur la figure 2.

On note une très faible différence de porosité entre des bétons conservés dans l'eau potable et ceux conservés dans l'eau séléniteuse. Ceci prouve la bonne tenue des bétons d'études dans ce milieu chimiquement agressive. Aussi, le béton fibré avec ajout de laitier et conservé dans l'eau séléniteuse (BFES) présente une stabilité de porosité entre 6 mois et 2 ans. Mais, la porosité des bétons non fibrés est moins importante que celles des bétons fibrés. Notons que l'incorporation des fibres dans un BHP conduit à une baisse de compacité liée à la réduction des propriétés rhéologique [LAD 10].

La masse volumique augmente avec la diminution de la porosité accessible à l'eau, cela est pour les deux types de bétons indifféremment du milieu de conservation.

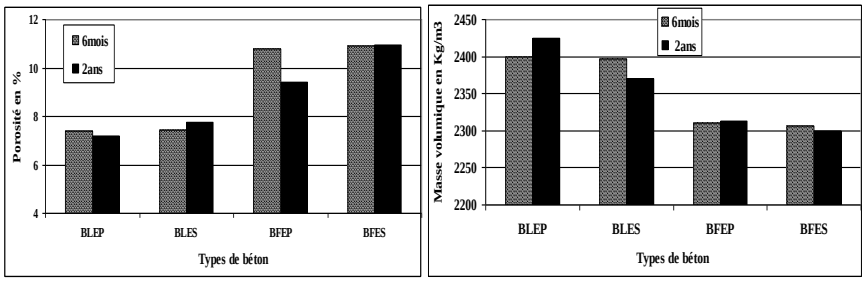

Figure2 : Variation de la porosité accessible à l'eau et la masse volumique des différents bétons

b- L'absorption d'eau par capillarité : L'essai d'absorption d'eau par capillarité consiste à placer la face inférieure de l'échantillon (fond du moule) au contact de l'eau et de suivre en fonction du temps, l'évolution de la prise de masse. La figure 2 illustre l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des bétons d'étude en fonction du temps.

Après 6 mois et 2ans de conservation, les résultats obtenus montrent que la différence du coefficient d'absorption capillaire des bétons non fibrés pour les deux milieux de conservation et le béton fibrés conservé dans l'eau potable sont négligeables. Mais, le béton fibrés conservé dans l'eau séléniteuse présentent une absorption d'eau légèrement plus importante. Aussi, le coefficient d'absorption

capillaire après 2 ans de conservation dans différents milieux et pour les deux types de béton est légèrement supérieur comparé à ceux conservés 6 mois.

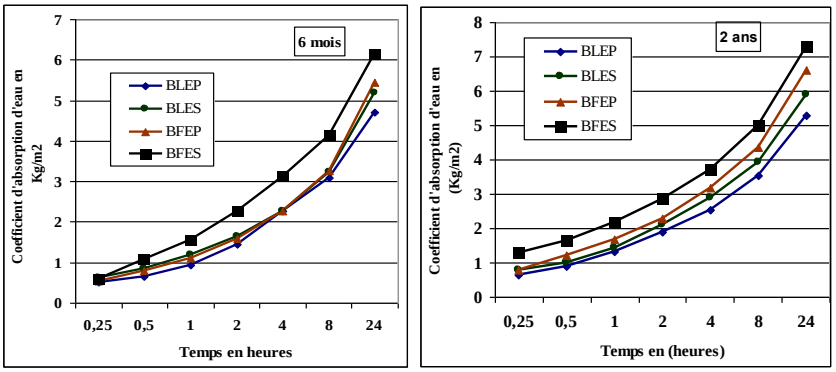

Figure 3 : Coefficient d'absorption capillaire des différents bétons

3.2. Effet des milieux chimiquement agressifs sur les résistances mécaniques :

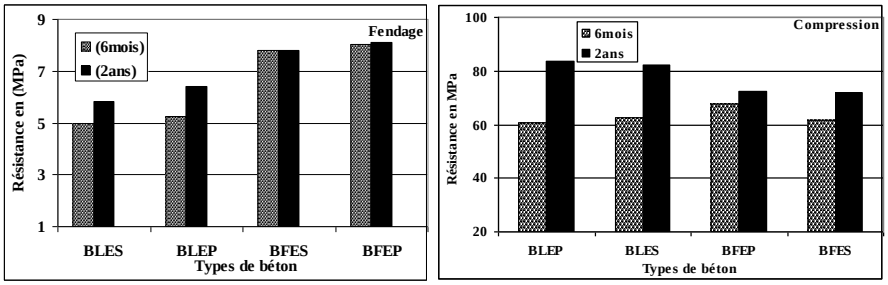

Figure 4: Variation de la résistance à la traction par fendage et à la compression des différents types de béton.

La diminution des résistances mécaniques est la conséquence des réactions chimiques et des modifications microstructurales causées par l'attaque sulfatique [KHE 09].

La Figure 4 exprime l'évolution de la résistance à la traction par fendage des bétons élaborés et mûris dans les deux milieux de conservation. De la même manière on a présenté la résistance à la compression, afin d'estimer l'effet des milieux sulfatés sur les performances mécaniques des bétons d'étude.

A partir des résultats obtenus on peut constater qu'après une durée de 6 ou 24 mois, la différence des résistances des bétons conservés dans l'eau de robinet et celles des bétons conservés dans l'eau séléniteuse est faible et parfois même négligeable. On

peut penser que les bétons testés résistent bien aux sulfates. Donc, il n'y a pas eu de réactions chimiques qui entraînent des chutes de résistances appréciables.
Aussi, la présence des fibres réduit la résistance à la compression, mais entraine un accroissement de la résistance à la traction par fendage, ce qui confirme les résultats obtenus précédemment lors de l'étude de la porosité. La durée de conservation n'a pas eu d'effet sur la résistance à la traction, mais, elle contribue à une légère augmentation de la résistance à la compression.

3.3. Mise en évidence du pH interne et externe du BFES :

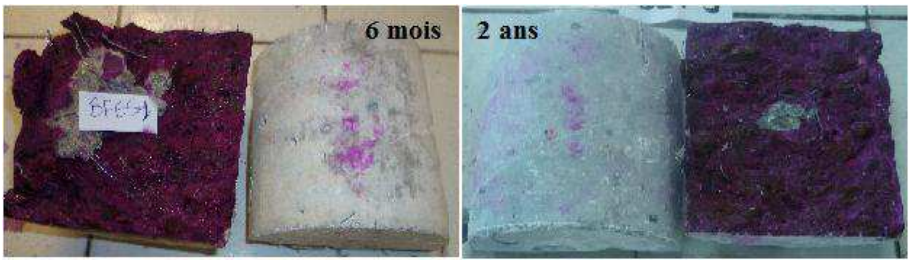

Figure 5 : Evolution du pH du BFES

Après l'essai de traction par fendage, pour illustrer l'ampleur de la dissolution de la portlandite par le milieu sulfatique, on a appliqué de la phénophtaléine à 1% dans l'éthanol sur les parties interne et externe des demi-morceaux du béton de fibre conservé dans l'eau séléniteuse. Les résultats présentés dans la figure 5 ne montrent aucune diminution du pH, donc aucune altération ou perte de matière des bétons.

3.4. Microstructure des éprouvettes de béton examinées au microscope électronique à balayage :

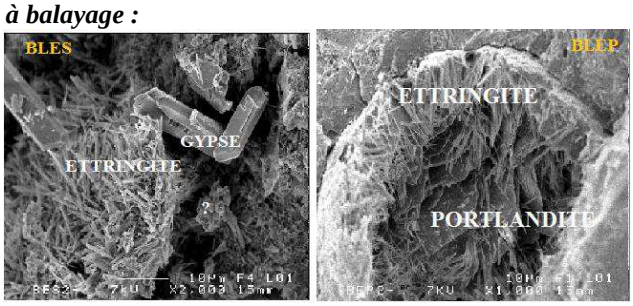

Figure 6 : Observation au MEB de la microstructure
Interne des bétons après 6mois de conservation.

La figure 6 présente les micrographies de la microstructure interne des bétons après 6 mois de conservation dans les deux milieux (sulfaté et eau potable). Les échantillons conservés dans l'eau potable (BLEP), montre la présence de la portlandite et l'ettringite, pour les échantillons conservés dans l'eau séléniteuse (BLES), on trouve le gypse qui se cristallise en forme hexagonal et l'ettringite en fine aiguilles de même morphologie que celle formée dans l'eau potable. C'est-à-dire

de l'ettringite primaire non expansive qui ne cause aucun dommage lors de sa précipitation [KHE 09].

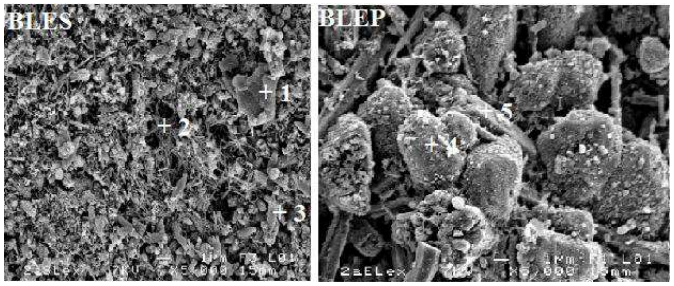

Figure 7 : Observation au MEB de la microstructure externe des bétons après 2 ans de conservation, 1-CSH, 2-Ettringite, 3- CAH ,4- Carbonate, 5- Portlandite

Les micrographies de la microstructure externe des deux bétons après 2ans de conservation sont présentées sur la figure 7. A cette échéance, globalement, la microstructure externe du béton conservé dans l'eau sulfaté ne montre pas d'altération significative. On note, la présence de petites pelotes d'ettringite fines (2), des hydroaluminates de calcium (3) et des hydrosilicates de calcium (1). Il se peut, que le béton a subi une attaque sulfatique externe de faible amplitude.

3.5. Microstructure interne examinées au microscope électronique à balayage :

Les mécanismes d'hydratation de C_3S et C_2S donnent naissance à la portlandite et les silicates de calcium hydratés qui sont majoritairement responsable de la cohésion de la pâte de ciment. Dans les BHP, les CSH des produits d'hydratation internes ressemblent beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe, la portlandite n'est pas en empilement de gros cristaux hexagonaux, et l'ettringite n'est pas en longues aiguilles [AIT 01].

Les observations effectuées par MEB pour les phases internes du béton conservé 2 ans dans l'eau sulfatée (figure 8), présentent une portlandite saine et de fine aiguilles courtes d'ettringite et des CSH compacte (A), des CSH grande compacité (B, C)

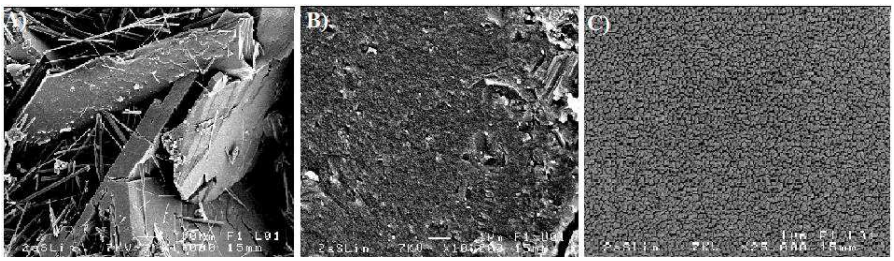

Figure8 : Microstructure interne du BLES après 2 ans de conservation.

3.6. L'état des fibres dans les deux milieux :

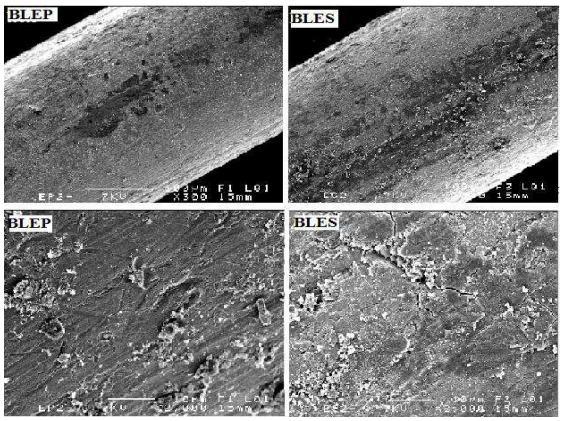

Figure 9 : Observation au MEB de l'état de surface des fibres pour les deux milieux de conservation.

La corrosion de fibres métalliques enrobées par une matrice cimentaire peut être rapprochée de celle des armatures utilisées dans le béton armé. Les armatures en acier se corrodent chaque fois que le pH de la solution interstitielle diminué, suite à la transformation de la portlandite , ce qui n'offre plus de protection souhaitable à la fibre métallique. La plus ou moins grande rapidité d'action des divers agents agressifs est en relation directe avec la porosité du béton et avec la présence de fissures. La corrosion des armatures par les sulfates est un phénomène électrochimique, car il s'agit à la fois de réaction chimique (précipitation, etc.) et aussi de transfert d'électrons [AÏT 01, DUV 92].
Les observations effectuées par MEB (figure 9), montre l'état des fibres qui est quasiment identique pour les deux milieux, on ne voit pas de différence particulières. On peut en conclure, que les fibres ne sont pas altérées, cela prouve que les bétons ne sont pas affectés de façons très sensibles, par l'eau séléniteuse. Ceci explique les résultats des performances mécaniques, de porosité et de masse volumique et de microstructure discutés précédemment.

4. Conclusions :

Cette étude permet de mettre en évidence l'effet des eaux sulfatées sur les BHPF. D'après les résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :
Les résultats des essais physiques et mécaniques ne montrent aucune altération significative des bétons conservés dans l'eau sulfatée même après 2ans de murissement. Aussi, l'essai à la phénophtaléine ne montre aucune diminution du pH, donc aucune altération (perte de matière) du béton.
Les micrographies de la microstructure interne et externe de la matrice cimentaire sont identiques à celle des bétons sains, c'est-à-dire ne révèle ni expansion, ni altération des hydrates.

L'état des fibres pour les deux milieux est quasiment identique, on ne voit pas de différence particuliers. Donc, les fibres ne sont pas altérées. On peut dire que les bétons testés résistent bien aux sulfates.

5.Bibliographie

[AIT 01] AÏTCIN, P-C., *Bétons haute performance*, édition Eyrolles, 2001.

[ARL 07] ARLIGUIE G., HORMAIN H., *GranDuBé*, Recommandation AFREM « Bétons. Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau », Presses de l'école national des ponts et chaussées, 2007.

[BES 04] BESSA A., Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.

[CHA 06] CHAID R., Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux, thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique, Alger, 2006.

[DIV 02] DIVET L., Comment se prémunir des réactions sulfatique dans les bétons, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 240, septembre 2002, réf. 4447, pp87-94.

[DUV 92] Duval R., La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, dans : La durabilité des bétons, par Baron J. et Olivier J-P, presse de l'ENPC, Paris, 1992.

[ESC 06] ESCADEILLAS, G., Les éco-matériaux dans la construction : *enjeux et perspectives, septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF) 2B*, 2006.

[GCI] GCI-714, Cours de génie civil «Durabilité et réparation du béton », Université de Sherbrooke, Canada, Internet ,2008.

[KHE 09] KHELIFA M R., Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplacants, thèse de doctorat, 2009.

[LAD 10] LADAOUI W., Etude expérimentale du comportement à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs, Thèse de doctorats, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.

[LERM] Lettre d'information technique et scientifique sur les matériaux, le soufre, LERM INFOS n°19.

[MAL 96] Maltais, Y. 1996. Étude de l'évolution du degré d'hydratation de ciments et du développement des résistances mécaniques de mortiers et de bétons soumis à différentes températures de mûrissement, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 188 p.

[PET 04] PETROV N, THIBAULT M et TAGNIT-HAMOU A « Attaques externe et internes par les sulfates ; similarités et différences », *1ere Conférence Internationale sur la technologie et la durabilité du béton*, USTHB, Alger, Agérie, 24-26 mai 2004.