

## Comportement d'un béton à hautes performances à base de laitier en milieu sulfatique

Rabah Chaïd<sup>1</sup>, Abderrahim Bali<sup>2</sup>, Raoul Jauberthie<sup>3</sup> & Aïssa Talah<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Matériaux Minéraux & Composites Université M'hamed BOUGARA,  
Avenue de l'Indépendance, 35 000 Boumerdès.

<sup>2</sup>Laboratoire de l'Environnement et Construction ENP Alger, BP 182 - 16200 El-Harrach.

<sup>3</sup>Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et Génie Mécanique INSA-Rennes, 20 Av des Buttes de Coësmes,  
CS 14315 35043 Rennes Cedex, France

<sup>4</sup>Laboratoire de Bâti dans l'Environnement USTHB, BP 32 - 16111 El Alia, Alger

Révisé le 13/10/2011

Accepté le 10/01/2012

ملخص:

استخدام الخرسانة ذات المميزات السامية (خ م س) مع دمج الإضافات الإسمنتية كالرماد المتطاير، دخان السليسيوم أو خبث الفرن العالي ارتفع خلال العقدين الماضيين. منجزات الخرسانة ذات المميزات السامية تدوم أكثر، ومن تم تكاليف صيانة أقل كلفة مقارنة بالخرسانة العادية. بالإضافة، تستعمل كمية قليلة من الاسمنت في الخرسانة ذات المميزات السامية، هذا ما يؤدي إلى انخفاض انبعاث ثاني أكسيد الكربون المتسرب CO<sub>2</sub>. استخدام الخرسانة ذات المميزات السامية المكونة من إضافات إسمنتية يؤدي إلى الحفاظ على البيئة، أرباحا مالية وإنجاز بنايات أكثر استدامة. في الوضع الحالي، فإن البحث في الجزائر فيما يخص الخرسانة ذات المميزات السامية متجه أكثر حول صياغاتها بهدف إنتاج خرسانات أكثر قوة وديمومة. لكن، التركيبة المميزة مرتبطة بعدة عوامل، على وجه الخصوص حسن اختيار المكونات. مع العلم أن اثر الإضافات الإسمنتية ونعومتها لم تؤخذ بعين الاعتبار. ولهذا، نحاول في هذه البحوث، صياغة خرسانة ذات مميزات سامية بإضافات إسمنتية أو بدونها. ونتناول بالبحث تأثير خبث الفرن العالي لمصنع الحديد والصلب للحجار (الجزائر)، بعد طحنه وإدماجه مكان كمية من الاسمنت، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المنجزة.

الكلمات المفتاحية: خ م س - خبث الفرن العالي - ديمومة - كبريت.

### Résumé

L'utilisation de béton à hautes performances (BHP) intégrant des ajouts cimentaires comme les cendres volantes, les fumées de silice ou le laitier hydraulique cimentaire a augmenté considérablement au cours des deux dernières décennies. Les ouvrages en BHP durent plus longtemps et entraînent des frais d'entretien moins élevés que ceux en béton ordinaire. De plus, le BHP utilise moins de ciment, ce qui diminue les émissions de CO<sub>2</sub>. Une plus vaste utilisation du béton à hautes performances intégrant des ajouts cimentaires pourrait donc entraîner des bénéfices tant environnementaux que financiers et construire des ouvrages plus durables. A l'état actuel, la recherche sur les bétons à hautes performances en Algérie est surtout axée sur leurs formulations en vue de produire des bétons de meilleures résistances et durables. Cependant, une composition optimale dépend de plusieurs paramètres, en particulier du choix des ingrédients. L'effet des ajouts cimentaires et leur finesse reste peu entrepris. C'est pourquoi nous nous proposons dans ce travail, de formuler des bétons à hautes performances avec et sans ajout cimentaire et de traiter l'influence du laitier de l'usine sidérurgique d'El-hadjar (Algérie), finement broyé et substitué à une partie de ciment, sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons élaborés.

**Mots clés :** BHP - Laitier - Durabilité - Sulphate.

### Abstract

The use of high performance concrete (HPC) integrating cementitious additions such as fly ash, silica fumes or hydraulic slag has been increased considerably during the last two decades. The works in HPC last longer and involve low maintenance costs which could be less than those of ordinary concrete. Moreover, the HPC requires less cement, which reduces the CO<sub>2</sub> emissions. A larger use of high performance concrete containing cementitious additions could thus involve environmental and economical advantages and build more durable works. In the current state, research on high performances concretes in Algeria is especially centred on their formulations in order to produce durable concretes with better strengths. However, an optimal composition depends on several parameters, in particular on the choice of the ingredients. The effect of the cementitious additions and their smoothness remains less examined. This is why we propose in this work, to formulate high performance concretes with and without cementitious additions and, to study the influence of the slag from the iron and steel plant of El-hadjar (Algeria), finely crushed and substituted to a part of cement, on the physico-mechanical characteristics of the elaborate concretes.

**Keywords:** HPC - Slag - Durability - Sulphatic.

Auteur correspondant : chaidr@yahoo.fr

©UBMA - 2012

## 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 de fumée de silice. 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 dans des milieux chimiquement agressifs [1].

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. Le sulfate de calcium se combine avec les aluminates du ciment pour former un sel (l'ettringite) ou sel de Candlot  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ , dont la cristallisation accompagnée d'expansion provoque la fissuration du béton. Elle facilite la pénétration des agents agressifs jusqu'aux armatures qui sont, à leur tour attaquées.

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

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, 3].

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 dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution.

Ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produits jusqu'à une concentration

entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. C'est cette répétition du cycle dissolution – concentration – précipitation (plusieurs années) qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié [4].

Les précipitations résultantes sont normalement destinées à obturer les grands pores. Cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des ciments Portland ne le sont pas. Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [5].

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  $Ca(OH)_2$  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 [6, 7].

Sarkar *et al.* [8] avaient montré qu'avec un laitier broyé à une finesse de  $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ , on obtient une réduction significative de la chaleur d'hydratation du ciment, un béton à hautes résistances et à structure plus compacte. Péra *et al.* [9] ont montré que plus la finesse de mouture du laitier est élevée, meilleures sont ses performances.

Notre étude a pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme ajout dans les matériaux de construction à matrice cimentaire. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable.

Cette 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 conservés dans l'eau séléniteuse (milieu agressif).

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 avec 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 le passage en solution des minéraux formant la pâte de ciment.

## 2. PROCESSUS EXPERIMENTAL

### 2.1 Matériaux

#### 2.1.1 Le ciment

Le ciment Portland utilisé est un CEM I 52,5 de l'usine Saint Pierre Lacour, dont les compositions chimique et minéralogique du clinker sont reportées sur le tableau 1 et les propriétés physiques du ciment sur le tableau 2.

Tableau 1. Composition chimique et minéralogique du clinker.

| Éléments | Composition chimique |                   |                                |                                |                  |                 | Composition minéralogique |                  |                  |                   |
|----------|----------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|------------------|------------------|-------------------|
|          | CaO                  | SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO              | SO <sub>3</sub> | C <sub>3</sub> S          | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
| %        | 64.50                | 21.01             | 4.90                           | 2.80                           | 0.90             | 3.00            | 65.94                     | 10.47            | 8.24             | 8.52              |
| Éléments | K <sub>2</sub> O     | Na <sub>2</sub> O | RI                             | PAF                            | CaO <sub>1</sub> |                 |                           |                  |                  |                   |
| %        | 0.90                 | 0.20              | 0.20                           | 1.10                           | 0.45             |                 |                           |                  |                  |                   |

Tableau 2. Propriétés physiques du ciment CEM I 52,5

|                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| Masse volumique absolue     | 3.20 g/cm <sup>3</sup>   |
| Surface spécifique          | 3 600 cm <sup>2</sup> /g |
| Consistance normale         | 26 %                     |
| Début de prise              | 2 h 55 mn                |
| Chaleur d'hydratation (12h) | 189 J/g                  |
| Retrait à 28j               | 565 µm/m                 |
| Stabilité chimique          | 0.3 mm                   |

#### 2.1.2 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 0/3 mm, laitier granulé refroidi au jet d'eau, vitrifié c'est-à-dire amorphe. Le tableau 3 donne sa composition chimique. Il est réduit en poudre jusqu'à obtenir une grande

surface spécifique par rapport au ciment. Le laitier d'El-hadjar a l'avantage d'être plutôt acide (le rapport CaO/SiO<sub>2</sub> varie dans les limites de 0.95 – 1.04), il est relativement stable. Le résultat de la micro-analyse (Fig. 1) vient confirmer cette hypothèse

Tableau 3. Composition chimique du laitier

| Éléments | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | RI   | PAF  |
|----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|-------------------|------|------|
| %        | 39.77 | 41.69            | 7.05                           | 1.41                           | 5.49 | 0.15            | 0.44             | 0.10              | 0.12 | 0.11 |

**Autres propriétés physiques :**

Masse volumique absolue ..... 2.99 g/cm<sup>3</sup>,  
 Surface spécifique ..... 8 500 cm<sup>2</sup>/g,

En plus de son pouvoir pouzzolanique, le laitier avec une telle granularité (surface spécifique double du ciment), assurera la densification de la matrice : ces particules peuvent s'insérer entre les grains de ciment.

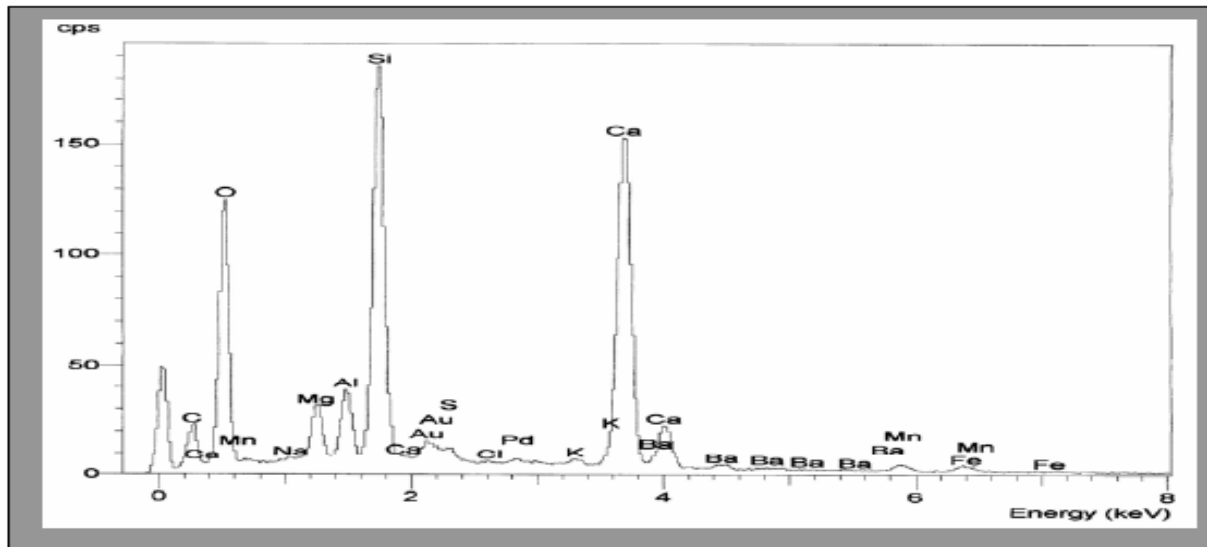


Figure 1. Micro-analyse (x2000) du laitier.

**2.1.3 Les granulats**

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par la mise au point de compositions optimales des différents granulats. Les caractéristiques physiques des granulats utilisés sont résumées sur le tableau 4. Ces granulats sont pour une grande part roulés : dépôt quaternaire de la Vilaine (Ille et Vilaine, France), essentiellement siliceux sous

forme de quartz et, pour une faible partie, concassés : cornéenne et métaquarzite.

Pour ce travail, après des essais préliminaires concernant aussi bien la rhéologie des mélanges de béton que son écrasement en tant que matériau durci, le choix s'est porté sur les granulats de classe 3/8 et 8/15.

Quant au sable utilisé, c'est un sable grossier d'oued (Rennes, France), dont le module de finesse vaut 2.47.

Tableau 4. Caractéristiques physico - mécaniques des granulats utilisés.

| Essais                    | Résultats  |
|---------------------------|--|
| Masse volumique apparente | Sable : 1 660 kg/m <sup>3</sup><br>Gravier : 1 468 kg/m <sup>3</sup> |
| Masse volumique absolue   | Sable : 2.50 g/cm <sup>3</sup><br>Gravier : 2.50 g/cm <sup>3</sup>   |
| Equivalent de sable       | ES (à vue) = 95 %<br>ES (à piston) = 90 %                            |
| Module de finesse         | Mf = 2.47  |
| Essai Micro-Deval         | MD = 41.6  |
| Essai Los Angeles         | LA = 37.6  |
| Essai de propreté         | Gravier (3/8) : 1.96 %<br>Gravier (8/15) : 1.57 %                    |

### 2.1.4 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.

Le SIKAMENT FF 86 permet la confection de bétons à très faible rapport E/C ayant des résistances mécaniques très élevées à toutes échéances et en particulier aux jeunes âges.

### Formulation

Les compositions finales du Béton à Hautes Performances (BHP) sans ajout et celle du Béton à Hautes Performances avec ajout de laitier (BHPL), après optimisation [10] sont reportées dans le tableau 5. Les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des bétons avec et sans ajout de laitier sont comparées.

Tableau 5. Compositions des bétons avec et sans laitier.

| Constituants | Ciment<br>kg/m <sup>3</sup> | Sable<br>kg/m <sup>3</sup> | G 3/8<br>kg/m <sup>3</sup> | G 8/15<br>kg/m <sup>3</sup> | Eau<br>l/m <sup>3</sup> | Adjuvant<br>l/m <sup>3</sup> | Laitier<br>kg/m <sup>3</sup> |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| (BHP)        | 500                         | 573                        | 130                        | 915                         | 150                     | 8                            | -                            |
| (BHPL)       | 425                         | 573                        | 130                        | 915                         | 150                     | 8                            | 75                           |

## 3. RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Masses volumiques et résistances mécaniques

La figure 2 montre l'évolution de la masse volumique des différents bétons conservés dans l'eau séléniteuse. On note, une densification du béton avec ajout de laitier.

En effet, La mouture élevée du laitier, conjuguée à son interaction avec la Portlandite pour former des hydrosilicates de calcium non solubles, favorisant l'accroissement de la compacité du béton durcis. Ce qui explique l'augmentation de sa masse volumique par rapport au béton de contrôle.

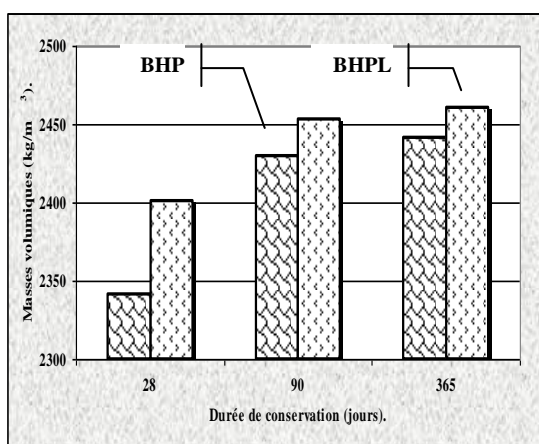


Figure 2. Évolution des masses volumiques des Bétons en fonction de la durée de conservation.

La compression simple est une caractéristique fondamentale à la base du calcul des structures. Elle est la propriété essentielle pour le calcul des ouvrages.

A l'encontre, les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. Cette agression consiste en l'apparition de phases expansives dans le matériau durci, les étapes du processus sont :

- décalcification de la pâte de ciment et pénétration simultanée des anions  $SO_4^{2-}$  par diffusion,
- réaction des ions sulfates avec les ions  $Ca^{2+}$  pour former du gypse, les aluminates anhydres ou hydratés pour former de l'ettringite,
- fissuration due aux pressions internes engendrées accentuant la pénétration des sulfates et provoquant la destruction progressive du béton.

La figure 3 montre l'augmentation de la résistance, en fonction de la durée de conservation dans l'eau séléniteuse. Elle est nettement plus élevée pour le béton avec ajout de laitier (BHPL).

Après 365 jours de conservation, la contrainte atteinte est de l'ordre de 100 MPa, alors que pour le béton sans ajout (BHP) elle n'est que de 69 MPa.

La mouture poussée du laitier a favorisé l'accroissement de la compacité du BHPL, ce qui explique l'augmentation de sa masse volumique par rapport au BHP.

Sur le plan physico-mécanique, le laitier réagit par sa finesse et son activité pouzzolanique, engendrant ainsi un squelette plus cohérent et par conséquent un béton plus résistant et plus durable dans l'eau séléniteuse [11].

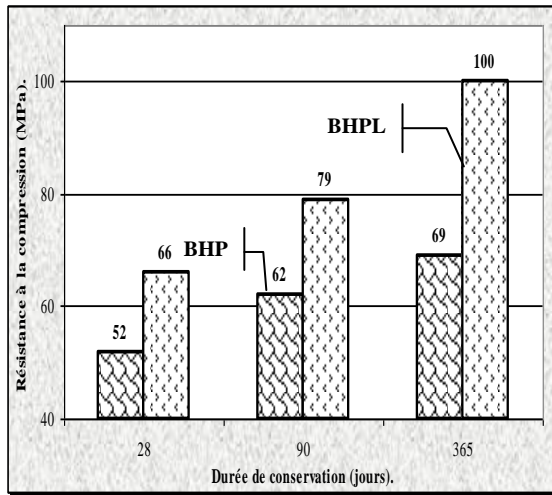


Figure 3. Évolution des résistances à la compression en fonction de la durée de conservation.

### 3.2 Microstructure interne

Les réactions dites pouzzolaniques sont plus rapides en raison de la très faible dimension des particules réactives. Les produits néoformés sont d'une part plus facilement dispersés ou mieux repartis dans les matériaux,

d'autre part, leur composition est plus favorable à l'incorporation des alcalins dans leur structure cristalline.

La microstructure du ciment avec ajout de laitier est caractérisée par une matrice dense avec une croissance des C-H-S sur la surface des particules du laitier. Comparé au ciment, les produits d'hydratations du mélange ciment laitier ont également un faible rapport Ca/Si mais riche en magnésie et en alumine [8]. L'observation au microscope électronique à balayage (Fig. 4) nous a permis d'examiner la microstructure des hydrates formés au sein des bétons au bout de 365 jours de durcissement. Une microstructure relativement améliorée dans les bétons avec ajout de laitier a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées et riches en CSH, caractéristiques des bétons de hautes qualités. Toutefois, on peut y distinguer quelques plaquettes de chaux et la présence d'aiguilles d'ettringite dans les cavités du BHP. Pour le BHPL, la matrice étant devenue très dense, elle ne favorise pas l'épanouissement de certains produits, lesquels trouvent donc un champ libre uniquement dans les bulles d'air et les interfaces matrice granulats.

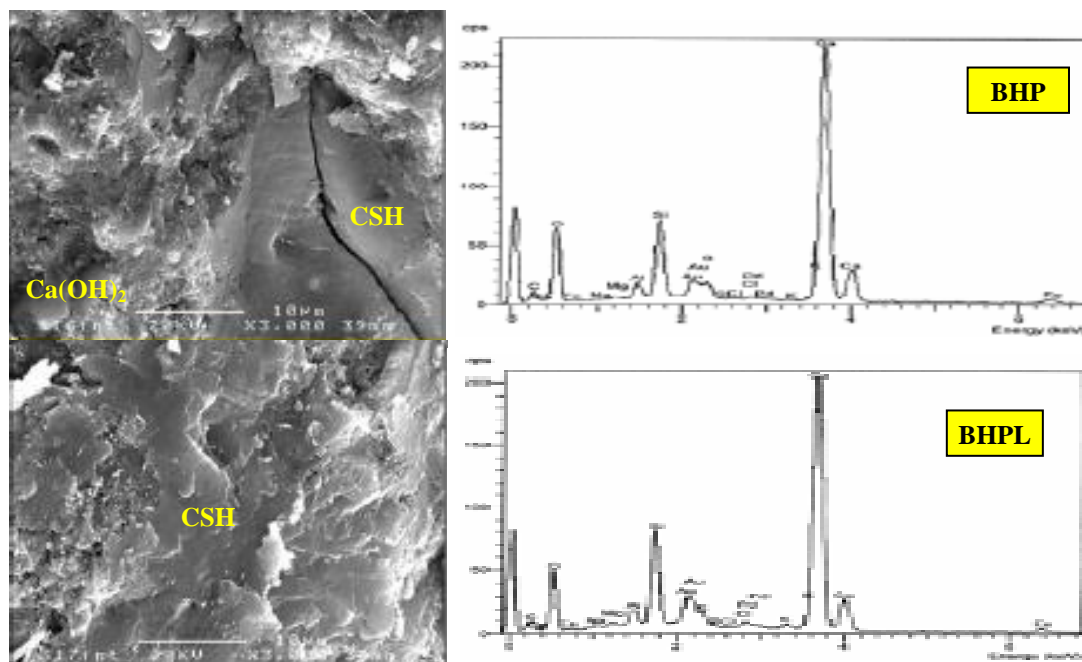


Figure 4. Observation au MEB de la micro structure interne des éprouvettes de béton après 365 jours de conservation.

Les particularités suivantes sont à souligner :

- Dans le béton sans ajout, la chaux en excès se trouvant sous forme de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui se cristallise en plaquettes hexagonales empilées, ceci même à longue échéance (365 jours).

- Le béton de laitier, se caractérise par la présence de composés hydratés très massifs, ce qui explique les résistances mécaniques élevées et les masses volumiques plus denses remarquées précédemment.

L'analyse par diffraction de rayons X (Fig.5) illustre les différentes phases cristallines. Lesquelles sont identiques pour les bétons avec et sans laitier.

Cependant, l'hydratation des composés anhydres du béton de laitier se trouve considérablement freinée, contrairement à celle du béton sans ajout. Ceci, est la conséquence de la densification de la matrice. En favorisant

la formation d'un squelette plus compact et par conséquent des résistances chimiques beaucoup plus élevées.

Les hydroaluminates de calcium sont cristallisés sous la forme de  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) pour l'ensemble des bétons, et sont détectés par certaines raies de diffraction de rayons X. On note l'absence de raies de diffraction de rayons X du gypse, il est totalement consommé pendant l'hydratation et a contribué à la formation d'ettringite.

Le contrôle non destructif par ultrasons est une des méthodes les plus appropriées pour évaluer les caractéristiques mécaniques d'un matériau ou d'une structure. D'une manière générale également, l'accès à cette information se fait en mesurant des évolutions des vitesses de phase de propagation.

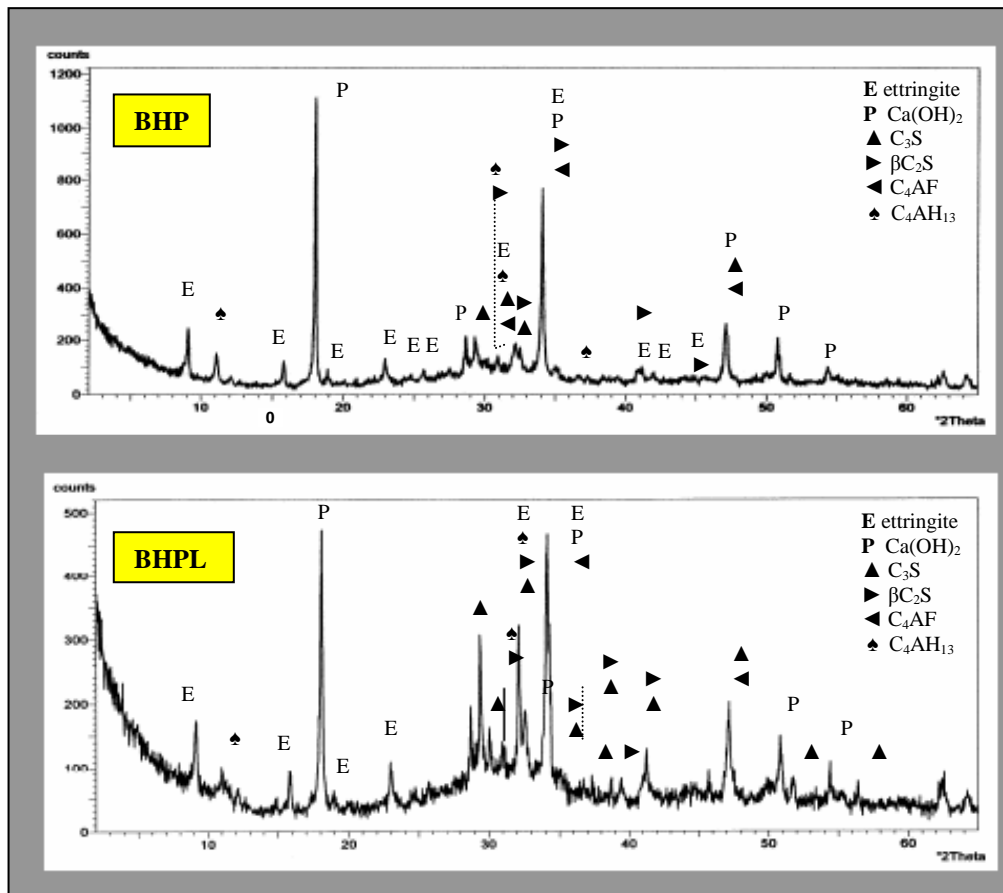


Figure 5. Radiogramme des différents bétons conservés dans l'eau séléniteuse.

Dans le cas du béton, les ondes ultrasonores se propagent en interactions permanentes avec les granulats et défauts potentiels dans la structure

tels que les microfissures ou la porosité. Les ondes sont diffusées et la dispersion du milieu induit une évolution de la vitesse des ondes.



La contribution du laitier à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-chimique et microstructural et un effet chimique. D'une part le laitier est susceptible de modifier le processus l'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, par son caractère pouzzolanique ou hydraulique latent peut réagir en milieu cimentaire et former de nouveaux produits hydratés. Ces deux effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les performances finales des bétons durcis (physiques, mécaniques et de durabilité).

Par ailleurs, l'incorporation du laitier finement broyé engendre également un effet granulaire relatif aux modifications induites sur la compacité du squelette granulaire. Cet effet agit lors du durcissement des bétons et influe sur l'ampleur des modifications apportées sur la porosité de la matrice cimentaire. Ceci explique les vitesses de propagation d'onde assez élevées mesurées sur les éprouvettes de béton de laitier par rapport au béton sans ajout (fig. 6), aux différentes échéances avec une élévation croissante et ce malgré le caractère préjudiciable du milieu de conservation (eau séléniteuse).

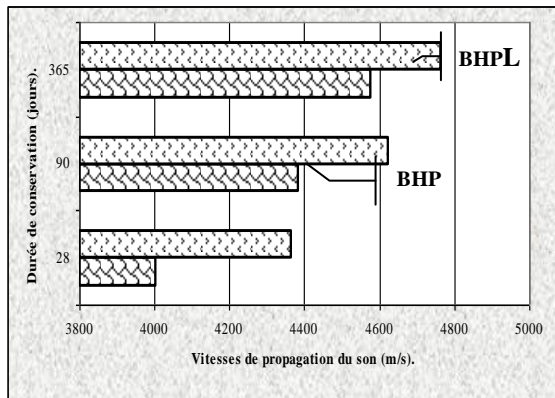


Figure 6. Évolution des vitesses de propagation du son à travers les bétons en fonction de la durée de conservation.

### 3.3 Peau du béton

Sur la surface des éprouvettes conservées dans l'eau séléniteuse on observe un important dépôt d'aiguilles de gypse (Fig. 7), qui couvre pratiquement toute la surface du béton de contrôle contrairement à celle du béton de laitier où la présence des cristaux de calcite sur la surface du béton est relativement plus marquée par rapport au béton de contrôle.

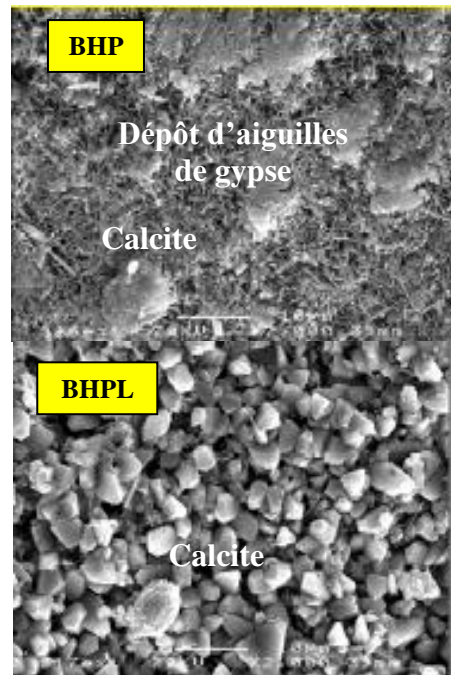


Figure 7. Observation au MEB de la surface des éprouvettes de béton conservées dans l'eau séléniteuse.

Un dépôt considérable des aiguilles de gypse observé sur la figure 7 pour le béton de contrôle met en péril la perméabilité de la peau du béton sans ajout de laitier, ceci a entraîné des résistances chimiques plus faibles.

Par ailleurs, nous constatons que le laitier qui présente la plus forte contribution à la résistance mécanique contribue également à réduire la dégradation de la surface externe des éprouvettes de béton conservées dans l'eau séléniteuse et contribue consécutivement à augmenter leur résistance chimique.

Autrement dit, l'addition de laitier contribue au renforcement des liaisons dans la matrice cimentaire et contribue également à sa résistance chimique par la formation d'une couche imperméable constituée de cristallites de calcite.

Un Microduremètre Leitz, nous a permis de mesurer la micro dureté Vickers sur la surface des éprouvettes au contact du milieu de conservation (eau séléniteuse). La micro dureté Vickers a permis de qualifier la dégradation superficielle des différents bétons conservés pendant un an dans l'eau séléniteuse.

Les résultats illustrés sur la figure 8 montrent que les micros duretés Vickers sont plus grandes pour le béton avec ajout de laitier par rapport au béton de contrôle. En général, la formation de calcite sur la surface des éprouvettes des bétons est à l'origine des duretés Vickers plus élevées.



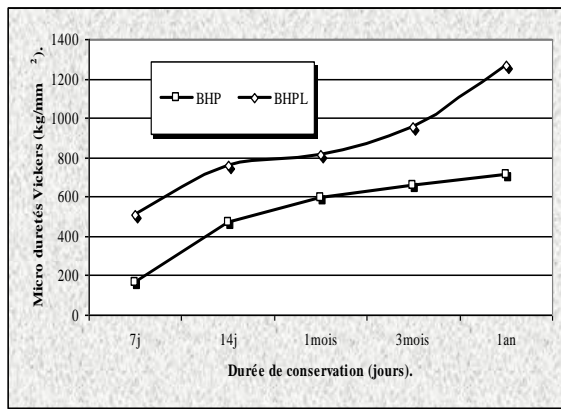


Figure 8. Évolution des micro duretés Vickers après un an de conservation dans l'eau séléniteuse.

#### 4. CONCLUSION

L'étude entreprise au cours de cet article porte sur le suivi des mécanismes de dégradation des bétons avec et sans ajout de laitier par les ions sulfates.

La mouture poussée du laitier a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons. Ceci explique l'augmentation de leurs résistances par rapport au béton sans ajout.

L'observation au microscope électronique à balayage nous a permis d'examiner la microstructure des hydrates formés au sein des bétons au bout de 365 jours de durcissement. Une microstructure relativement améliorée dans les bétons avec ajout de laitier a été remarquée avec des interfaces relativement plus densifiées et riches en CSH.

L'incorporation du laitier finement broyé engendre également un effet granulaire relatif aux modifications induites sur la compacité du squelette granulaire. Sur le plan physico-chimique, le laitier entraîne la formation d'une peau de béton relativement plus imperméable et par conséquent un béton plus durable.

Au terme de ce travail, il est important d'insister sur le fait que l'influence de la finesse du laitier est d'autant plus significative, selon que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants.

#### REFERENCES

[1] Mekki B., 2002. Étude de l'endurance du matériau composite, polymère béton armé avec des fibres, *Algérie Équipement*, Vol. 36, 15-18.

[2] Dron R. et Voinovitch I-A., 1982. Activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes. Le béton hydraulique, l'ENPC, Paris, 237-246.

[3] Dreux G., 1998. Nouveau guide du béton, Edition Eyrolles, Paris.

[4] Alexandre J. et Sebileau J-L., 1988. Le laitier de haut fourneau. Centre Technique et de Promotion des Laitiers (C.T.P.L), Paris. 340p.

[5] Venuat M., 1971. Adjuvant et traitement des mortiers et bétons. Venuat, 1<sup>ère</sup> édition Paris, 40-45.

[6] Baron J. et Olivier J-P., 1997. Les bétons – bases et données pour leur formulation. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris.

[7] Jiang S-P. et Grandet J., 1989. Évolution comparée des porosités des mortiers de ciments au laitier et mortiers des ciments portland. *Cement and concrete research*, Vol. 19, 487- 496.

[8] Sarkar S-L. and XU A., 1996. Why use mineral admixture in high performance concrete. In : *L'Industria Italiana del cement* : Vol. 66, N°714, 715-726.

[9] Pera J. Rols S., Chabannet and Ambroise J., 1998. Influence of cement the type on the resistance on concrete to an agricultural environment. In : *Sidney Diamond Symposium on Materials science concrete*, Edited by Menashi Cohen, Sidney Mindess and Jan Skalny , 419-431.

[10] Chaid R., Jauberthie R., Bali A. et Abadlia M-T., 2004. Formulation des bétons de hautes performances avec des ajouts cimentaires locaux, *Algérie Équipement*, Vol. 38, 3-7.

[11] Chaid R., Jauberthie R., Abadlia M-T. et Bali A., 2008. Durability of the HPC cured in sulphate environment. International Conference on Durability of Building Materials and Component – 11DBMC, Istanbul, Turkey 11-14 may, Vol. I, 237-245.