

# ETUDE EXPERIMENTALE SUR LES BETONS DE HAUTES PERFORMANCES AUX FUMÉES DE SILICE - Liaison avec l'Armature -

Par

Hamid KHELAFI

Docteur en Génie Civil, Maître Assistant à l'IGCMO - USTO (Oran)

Abderahmane MOKHTARI

Docteur en Génie Civil, Maître Assistant à l'IGCMO - USTO (Oran)

## Résumé

Les bétons de hautes performances (B.H.P) sont des bétons de hautes résistances auxquels sont ajoutées d'autres qualités technologiques et économiques. Les B.H.P connaissent actuellement un net intérêt outre atlantique pour des constructions plus élevées et certaines applications spéciales.

La raison de cet intérêt doit être recherchée, en fait non seulement dans la possibilité d'alléger les éléments de structure par une amélioration des contraintes en service, mais plutôt dans l'amélioration des autres qualités comme :

- ✓ Meilleure compacité et plus grande durabilité.
- ✓ Résistances aux environnements agressifs.
- ✓ Déformations différées de fluage et retrait réduits.

Actuellement, et en dépit de certaines lacunes, l'adhérence acier-béton ordinaire commence à être bien connue. Mais ceci n'est pas valable pour les bétons de conception nouvelle. Comme la perte d'adhérence entre les armatures et le béton d'enrobage peut entraîner la fissuration de ce dernier puis la rupture et la ruine partielle de la structure, il est très important de connaître avec suffisamment de précision les mécanismes qui gouvernent l'endommagement progressif de la liaison acier - B.H.P sous différents modes de chargement.

Le B.H.P que nous avons expérimenté est obtenu par l'introduction d'éléments ultra-fins pouzzoloniques en association avec un fluidifiant efficace.

Nous présentons dans cet article les résultats des essais expérimentaux, que nous avons développés sur les caractéristiques du B.H.P et sur la résistance à la réversibilité et à la rupture de liaison avec l'armature.

**Mots clés :** fumée de silice - fluidifiant - hautes performances - adhérence - réversibilité - microstructure - endommagement.

## 1 INTRODUCTION

Si de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de l'adhérence entre les armatures et les bétons ordinaires, au point qu'on peut presque considérer que les performances de résistances de la liaison acier-béton ordinaire sont "bien connues", il est loin d'en être de même vis-a-vis des B.H.P. Ces derniers sont de conception récente et leur emploi dans la réalisation de constructions reste encore limité. Les B.H.P ont fait l'objet de plusieurs recherches de morphologie et de microstructure de la pâte de ciment [1] [2] [3] [4], ainsi que de composition pour obtenir des performances mécaniques plus élevées et plus stables [5] [6] mais leur association aux armatures métalliques n'a pas, elle, été étudiée systématiquement.

Et cependant, on ne peut envisager de construire en B.H.P armé qu'à la condition de pouvoir être assuré d'une bonne liaison entre les armatures et le béton d'enrobage. Pour cela, il faut avoir étudié :

- Les performances de la liaison d'adhérence acier-B.H.P, au moins pour ce qui concerne sa résistance globale.
- Les mécanismes de détail de fonctionnement de la liaison et de sa dégradation sous charges et actions diverses.

La microstructure du béton d'enrobage est évidemment le facteur qui modifie toutes les conclusions qui ont été tirées des études de ce type réalisées sur béton ordinaire, l'acier de l'armature restant constant dans ses propriétés intrinsèques.

C'est pourquoi, entreprendre l'étude de l'adhérence acier-B.H.P implique qu'au préalable nous avons recueilli les éléments essentiels de connaissance sur l'élaboration, la microstructure et les propriétés de ces bétons de hautes performances [7].

## 2 INTERET DE L'ETUDE DE L'ADHERENCE ACIER-BETON

L'adhérence désigne l'ensemble des forces de liaison qui s'opposent au glissement des armatures, suivant leurs axes, par rapport au béton qui les enrobe.

On sait [8] [9] que la liaison armature-béton se trouve constituée essentiellement par une résistance au frottement. Cette résistance peut être concomitante d'une résistance de butée due aux éventuelles nervures de la barre. Ce type de liaison met en jeu au voisinage de l'armature la résistance du béton aussi bien au cisaillement qu'à la compression.

Il existe aussi d'autres résistances faibles de collage et de serrage dues au béton d'enrobage, mais celles-ci sont détruites pour de très faibles déplacements de l'armature [9] et sortent ainsi du domaine d'étude de la liaison.

Les études de la liaison armature-béton pour les différents essais d'adhérence revêtent plusieurs aspects :

- Etude de l'influence de divers facteurs relatifs au béton, à l'armature et aux conditions de l'essai.
- Etude de la répartition des tensions d'adhérence le long de l'armature sollicitée.
- Etude des relations entre l'adhérence, le glissement de l'armature et le champ de contraintes autour de la barre.
- Etude du mode de sollicitation de l'adhérence et son mécanisme.
- Comparaison des caractéristiques d'adhérence des différents types de profils de barre à haute adhérence.

Il apparaît dans la littérature existante [10] [11] que l'étude expérimentale de l'adhérence acier-B.H.P reste à faire, tant au niveau globale (résistance à l'arrachement, relation effort-glissement...) qu'au niveau local (distribution de contraintes, lois d'adhérence...).

Nous avons retenu d'opérer sur un B.H.P élaboré par ajout de fumée de silice condensée (F.S.C) pour que nos conclusions soient d'une application pratique immédiate (ajout à caractère pouzzolanique en abondance en Algérie).

Les armatures que nous avons mises en œuvre sont des fils de précontrainte crantés qui correspondent à la situation d'exploitation la plus rationnelle de la haute résistance du béton d'enrobage (plus grande limite élastique du fil).

## 3 PROCEDURE EXPERIMENTALE

### 3.1 Caractéristiques des matériaux

#### 3.1.1 Les bétons

Les B.H.P que nous avons expérimentés ont été élaborés à partir d'un mélange de ciment de classe CPA 55R, de granulats de marbre, de F.S.C, d'un fluideifiant, en reprenant une composition performante [6] conduisant à de bonnes qualités d'ouvrabilité, à des caractéristiques mécaniques très élevées, à une bonne résistance à la fissuration, à un minimum de retrait et un coût matériau/résistance raisonnable.

##### 3.1.1.1 Caractéristiques des constituants

#### 1) Ciment

Nous avons utilisé un ciment Portland Artificiel de classe 55R. Le dosage en liant est pris égal à 500 kg/m<sup>3</sup>.

#### 2) Granulats

Les granulats sont concassés, de nature calcaire dolomitique. La courbe granulométrique est représentée sur la figure 1. Les caractéristiques principales de ces granulats sont :

- Résistance moyenne à la compression 90 Mpa
- Module d'élasticité 76 000 Mpa
- Masse volumique 2.72 g/cm<sup>3</sup>

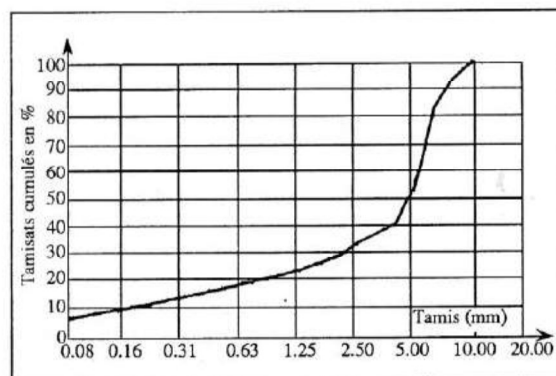


Figure 1 : Courbe granulométrique.

#### 3) Fumée de silice condensée

La F.S.C est une poudre de couleur noire foncée, de masse volumique apparente 600 kg/m<sup>3</sup> et de densité 2.2. Elle est constituée de microsphères amorphes dont la grosseur moyenne varie entre 0.1 et 0.3

microns (contre 10 microns pour le ciment), elle possède une surface spécifique très importante d'environ 18 m<sup>2</sup>/g (contre 0.3 m<sup>2</sup>/g pour le ciment).

L'examen au microscope à balayage, montre que les particules de cette fine poudre sont sphériques et exemptes de pores. Les éléments majeurs rentrant dans la composition de cette F.S.C sont :

	C	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	perte/feu
%	5	81	0.8	1.6	0.1	2.4	2.9	0.5	0.4	0.6	10

#### 4) Fluidifiant

Nous avons utilisé un fluidifiant puissant nommé "sika fluide", qui est un produit de synthèse à base de naphthalène sulphonate. C'est un fluide énergétique neutre, de couleur marron foncée, contenant 60% d'eau et 40% de matière solide. Sa densité est de 1.21. Il est non corrosif et sans chlore.

##### 3.1.1.2 Choix de composition

Les dosages retenus du B.H.P que nous avons expérimentés sont définis dans le tableau 1. Ils correspondent à une composition optimale eu égard aux propriétés du béton frais et du béton durci.

Matériau	Dosage en kg pour 1 m <sup>3</sup> de béton
Ciment CPA 55 R .....	450
FSC .....	50 10% (C + FSC)
Fluidifiant .....	12
Eau .....	155
Granulat .....	1 870

Tableau 1 : Composition du B.H.P.

##### 3.1.1.3 Fabrication et conservation des éprouvettes

Le mélange de granulats, du ciment et de la F.S.C a été effectué d'abord à sec pendant 4 minutes, puis, après introduction de l'eau, nous avons poursuivi le malaxage pendant 4 autres minutes et enfin le fluidifiant a été ajouté pour un malaxage supplémentaire de 2 minutes, dans un malaxeur électrique à axe vertical. Le malaxage à sec est nécessaire pour une meilleure homogénéisation des matériaux secs. Il est déconseillé d'ajouter le fluidifiant en même temps que l'eau car il risque d'être absorbé par les matériaux secs et son effet serait négligeable.

Le béton a été mis en place dans les moules par couches successives d'épaisseur 4 cm, chacune d'entre elles étant vibrée verticalement sous une fréquence de 50Hz pendant 30 secondes. Les éprouvettes d'essai et de contrôle ont été conservées dans une atmosphère saturée d'humidité à une température de 20 °C.

##### 3.1.1.4 Caractéristiques mécaniques résultantes

Nous avons effectué des essais de compression simple et de traction par flexion sur des éprouvettes 7x7x28 cm<sup>3</sup>, à partir des gâchées ayant servi à la confection des corps d'épreuve. Nous présentons les résistances dans le tableau 2. Nous faisons également figurer dans ce tableau les résistances moyennes obtenues sur un "béton de référence". Il est de même dosage en liant et de même maniabilité que le B.H.P.

Résistance (MPa)	AGE (j)				
	1	3	7	14	28
f <sub>c</sub> BHR .....	53.7	72.0	86.0	92.6	106.0
f <sub>c</sub> B référence .....	33.2	46.5	55.8	61.0	64.0
f <sub>t</sub> BHR .....	5.1	6.0	7.0	7.5	7.9
f <sub>t</sub> B référence .....	3.2	4.4	4.8	5.5	5.8
E BHR .....	tangent sécant	45 400 MPa 43 100 MPa			

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques des bétons.

Signalons aussi que la valeur moyenne de chaque résistance du béton a été déterminée à partir de 6 essais de contrôle. Les valeurs des résistances à la traction et à la compression du béton de référence sont plus importantes que celles d'un béton ordinaire.

Nous constatons d'après ces premiers résultats que la résistance à la traction du B.H.P ne s'améliore pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression.

##### 3.1.2 L'armature

Traitement	Patenté Tréfilé à froid Vieilli
σ <sub>rup</sub> réelle (MPa) .....	1 700
σ <sub>rup</sub> garantie (MPa) .....	1 670
σ <sub>c</sub> garantie (MPa) .....	1 470
E garanti (MPa) .....	20.10 <sup>4</sup>
Relaxation à 1 000 h .....	3.10 <sup>-3</sup>

Tableau 3 : Caractéristiques du fil de précontrainte.

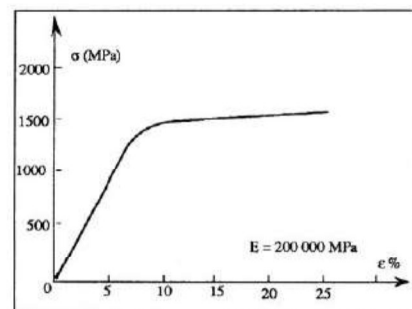


Figure 3 : Diagramme de traction du fil de précontrainte.

L'armature étudiée dans les essais d'adhérence est un fil de précontrainte cranté de diamètre 8mm. Le choix de ce type d'armature est justifié par les applications ultérieures de ce nouveau matériau dans le domaine des bétons précontraints. Les caractéristiques essentielles de ce fil sont données dans le tableau 3. La courbe effort-déformation est donnée sur la figure 3.

Nous avons également utilisé des fils de précontrainte lisses dans le but de mettre en évidence le paramètre rugosité de contact.

### 3.2 Méthodologie expérimentale

#### 3.2.1 Les techniques d'essai d'arrachement direct

L'essai d'arrachement direct consiste à solliciter une extrémité d'une barre enrobée de béton par une force de traction, l'autre extrémité étant libre. L'éprouvette est suspendue par l'intermédiaire de son moule métallique (Figure 4) au bâti fixe de la machine d'essai génératrice de l'effort d'arrachement.

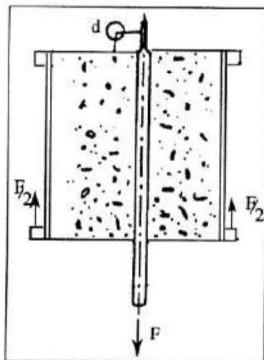


Figure 4 : Essai d'arrachement direct.

#### 3.2.2 Chargement

Les essais d'arrachement direct ont été effectués sur une machine universelle de capacité 6 000 daN en traction, comportant un système de pilotage semi automatique. Conformément à l'objectif de cette étude sur l'endommagement progressif de la liaison, l'intensité maximale de l'effort d'arrachement variait de 2 500 daN à 3 000 daN de façon à couvrir le domaine d'étude escompté. La valeur de la vitesse de charge-

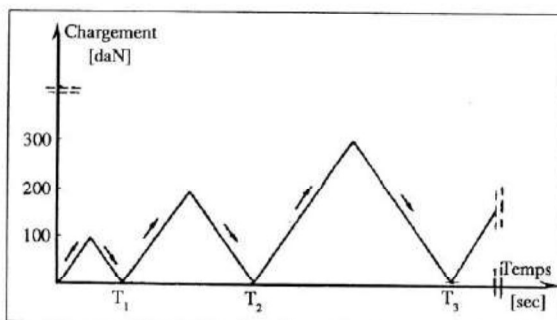


Figure 5 : Trajet de chargement.

ment et de déchargement, quasiment constante, a été fixée à 350 daN/mn afin d'avoir une vitesse assez lente permettant d'éviter l'effet d'impact au moment du chargement mais aussi une vitesse relativement rapide pour que puissent être négligés les effets de fluage.

Nous avons sollicité la liaison à un mode de chargement cyclique d'amplitude continûment croissante. Ce mode de chargement permet en effet l'appréciation de la réversibilité des déplacements de l'armature en fonction du niveau de chargement. La figure 5 présente le trajet de chargement utilisé.

#### 3.2.3 Mesures

Nous avons enregistré au cours des essais, les valeurs des déplacements de l'extrémité libre de la barre à l'aide de capteurs de déplacement à noyau inductif de précision 5%, les capteurs ont été systématiquement placés entre un point de l'armature et un point de section extrême de l'éprouvette en béton suffisamment éloigné de la barre pour être considéré comme immobile. A l'issue de chaque cycle de chargement, nous avons déduit la valeur du degré de réversibilité, R, paramètre scalaire [11], défini comme suit :

$$R = (D_t - D_r) / D_t$$

$D_t$  : déplacement total de la barre  
 $D_r$  : déplacement résiduel de la barre

La variation du degré de réversibilité en fonction de la force d'arrachement permet, en effet, de caractériser par le palier  $R = 100\%$  le domaine dans lequel la liaison reste encore réversible à l'extrémité libre de la barre. Au delà de cette limite, la décroissance des variations de R traduit l'endommagement de la liaison dans toute la zone d'enrobage ainsi que la progression des désordres irréversibles le long de cette zone.

### 3.3 Résultats expérimentaux

#### 3.3.1 Comparaison entre la liaison armature-B.H.P et la liaison armature-béton de référence

Les variations du déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de l'effort d'arrachement sont données sur les courbes des figures 6 et 7. La lon-

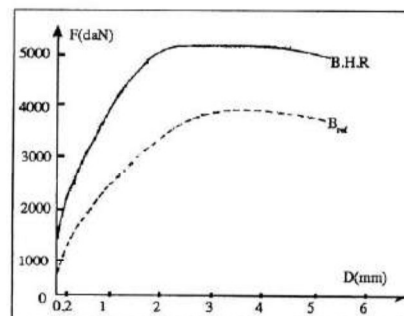


Figure 6 : Déplacement de la barre en fonction de F.

gueur d'enrobage est de 12 cm, la maturité du béton d'enrobage pouvant être considérée comme satisfaisante eu égard à la microstructure du matériau.

On peut constater que la résistance d'adhérence au B.H.P est de beaucoup meilleure que celle observée avec le béton de référence (Figure 6). Pour apprécier par ailleurs le comportement relatif de la liaison entre les deux natures de béton d'enrobage, nous avons tracé les variations du déplacement en fonction de la force d'arrachement rapportée à la résistance du béton d'enrobage à la traction. On constate ainsi que l'amélioration de résistance de la liaison est due essentiellement à l'augmentation de la résistance mécanique du béton d'enrobage (égalité des ordonnées au sommet de chaque courbe, figure 7). On constate également une amélioration de la liaison par un retard à l'apparition des premiers déplacements, correspondant aux premières dégradations dans le cas du B.H.P (ordonnée du point A supérieure à celle du point A') et une rigidification de la liaison dans le cas du B.H.P (courbe AB/courbe A' B'), que l'on ne peut expliquer par la seule augmentation de résistance mécanique du béton d'enrobage puisque précisément les courbes sont "adimensionnelles" en forces. Sans doute l'amélioration de la compacité et de la microstructure du béton par l'ajout de F.S.C est-elle responsable de ce retard à l'apparition et à la propagation de l'endommagement de la liaison armature-B.H.P. Nous retiendrons de cette première série d'étude expérimentale le rôle essentiel que jouerait la microstructure de la liaison avec l'armature et nous nous intéressons dans la suite plus particulièrement à cet aspect en étudiant spécifiquement les premiers désordres irréversibles de la branche AB de la courbe effort-déplacement.

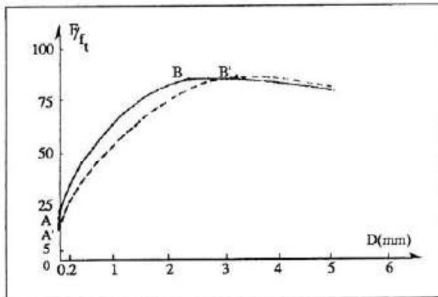


Figure 7 : Déplacement de la barre en fonction de  $F/f_t$ .

### 3.3.2 Influence de l'âge du béton d'enrobage

Les variations du déplacement total de l'armature par rapport au béton d'enrobage et du degré de réversibilité en fonction de l'effort d'arrachement sont données respectivement sur les courbes des figures 8 et 9 pour des âges de 1 jour, 3j, 7j, 14j, 28j, 90j et 6 mois. On peut observer que l'apparition des premiers désordres irréversibles est d'autant plus tardive que le béton est plus âgé. De même la rigidité de la liaison d'adhérence augmente avec l'âge du B.H.P, ce qui traduit le ralentissement de la propagation de

l'endommagement de la liaison avec l'âge.

### 3.3.3 Influence de la rugosité de surface de l'armature

Deux types d'armatures, crantées et lisses, ont été étudiés. Les résultats obtenus sont présentés sur les courbes de la figure 10 donnant les variations de déplacement total de l'armature par rapport au béton d'enrobage pour un âge de 3 jours et de 28 jours. On observe que la présence des crans renforce considérablement la liaison à tous les stades de son évolution.

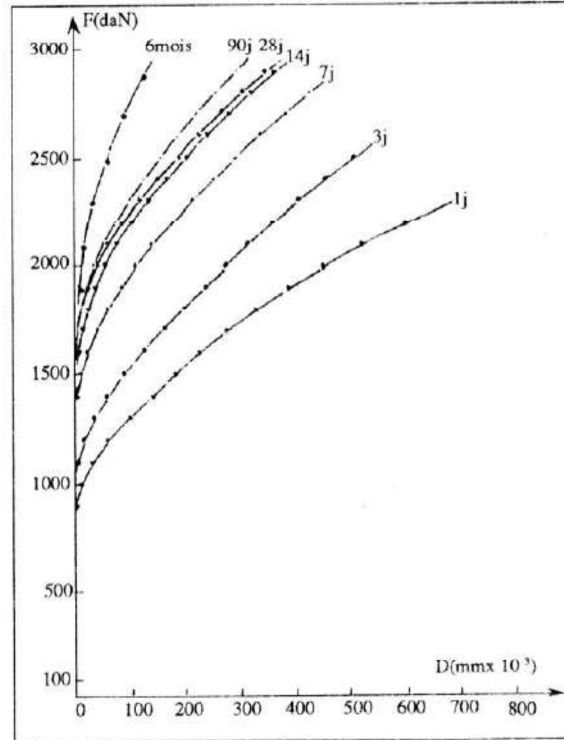


Figure 8 : Déplacement de la barre en fonction de la force à différents âges du BHP.

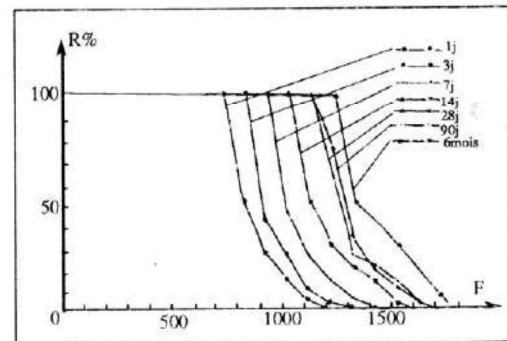


Figure 9 : Degré de réversibilité à différents âges du BHP

## 4 CONCLUSIONS

Les essais que nous avons développés sur la résistance à l'arrachement de la liaison armature-B.H.F dont nous avons rapporté les résultats ci-avant, permet

tent de tirer déjà quelques conclusions. La résistance ultime de la liaison d'adhérence est directement corrélée à la résistance en traction du béton d'enrobage. La résistance à l'apparition et à la propagation de l'endommagement de la liaison résulte non seulement de la résistance mécanique mais aussi de la microstructure du béton d'enrobage. Sur ce dernier point, les effets de l'ajout pouzzolanique, de l'âge du B.H.P d'enrobage et de la rugosité de surface de l'armature ont été systématiquement bénéfiques ④

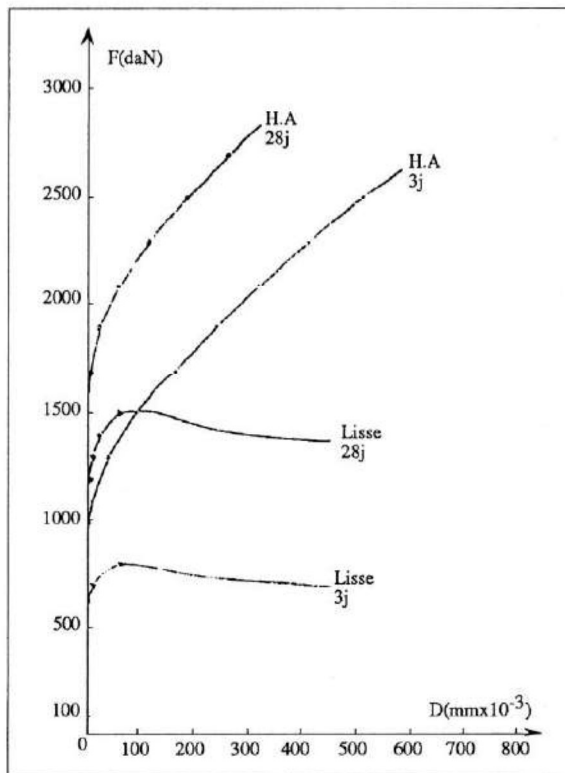


Figure 10 : Déplacement de la barre en fonction de sa rugosité.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.C. Aitcin : "Condensed silica fume". Edition de l'Université de Sherbrook, Québec, Canada 1983.
- [2] P. Pinsonneault : "Influence des fumées de silice sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons et mortiers". Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Génie Civil, Sherbrook, Québec, Canada, 1983.
- [3] M. Regourd, B. Mortureux, P.C. Aitcin et P. Pinsonneault : "Microstructure of field concrete containing silica fume". Département de microstructure, C.E.R.I.L.H., Paris et Faculté des Sciences Appliquées, Université de Sherbrook, Québec, Canada, 1982.
- [4] M.N. Oudjit : "Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment Portland". Thèse de Docteur-Ingénieur, I.N.S.A., Toulouse, 1986.
- [5] F. De Larard : "Formulations et propriétés des bétons à très hautes performances". Doctorat de l'E.N.P.C., Paris, 1987.
- [6] J.M. Pedeche : "Etudes des propriétés mécaniques et du retrait de béton de haute performance". Doctorat de l'U.P.S., Toulouse, 1988.
- [7] H. Khelafi : "Les bétons de hautes performances, bétons aux fumées de silice". Algérie EQUIPEMENT, n° 11 Janvier 1994.
- [8] Y. Saillard : "Mécanisme de la liaison acier-béton". Archiwum Inzynierii Ladowej, Tome IV-4, Varsovie, 1960.
- [9] A. Bichara : "Etude du problème de l'adhérence dans le béton-armé". Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment, n° 117/127, 1951.
- [10] K. Adrouche : "Contribution à l'étude de l'endommagement de la liaison acier-béton sous chargement cyclique de faible fréquence". Thèse de Docteur-Ingénieur, I.N.S.A., Toulouse, 1987.
- [11] H. Khelafi : "Contribution à l'étude de l'association armature-béton de haute performance". Thèse de Doctorat, I.N.S.A., Toulouse, 1988.