

## Formulation des bétons à hautes performances

**Sabah Ben Messaoud \*, Mezghiche Bouzidi**

Département de Génie Civil, Université de Biskra, Algérie

\* Auteur correspondant : e-mail : [benmessaoud.sabah@gmail.com](mailto:benmessaoud.sabah@gmail.com)

*Révisé et accepté : le 15 novembre 2011 / Disponible sur Internet : le 26 décembre 2011*

### Résumé

La production de béton à haute performance (BHP) a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons exposés à un environnement agressif, grâce à la porosité limitée, la grande durabilité, les qualités rhéologiques et les propriétés mécaniques remarquables par rapport à des bétons conventionnels. Son emploi se développe fortement ; de nombreuses années de recherche ont été nécessaires pour produire ce type de béton spécial. L'objectif du travail est de fabriquer un BHP ayant des propriétés (mécaniques, physiques, chimiques, physico-chimiques, rhéologiques, de la durabilité et mise en œuvre) très élevés. Dans ce but les objectifs suivants sont étudiés : (1) La sélection des matériaux de hautes qualités disponibles sur le marché algérien ; (2) L'étude de la compatibilité ciment / superplastifiant ; (3) La formulation d'un BHP qui se caractérise par des propriétés mécaniques et physique intéressantes.

L'étude expérimentale a porté sur la compatibilité ciment / superplastifiant, l'effet du rapport E/C (0,22 ; 0,25 ; 0,30 ; 0,5), l'effet du remplacement d'une partie du ciment par la fumée de silice (8 %), l'effet du remplacement combiné d'une partie du ciment par la fumée de silice (8 %) et la pouzzolane naturelle (10 %, 15 %, 25 %) ainsi que l'effet de fraction des granulats sur les propriétés du béton frais et durci. La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke a été utilisée qui est facile à réaliser et donne de bons résultats. Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible de fabriquer un BHP dans notre Wilaya en utilisant les matériaux existants sur le marché local, ce BHP a des bonnes propriétés physiques et mécaniques.

### Abstract

The production of high performance concrete (HPC) has broadened the field of application of concrete, due to the limited porosity, the high durability, excellent rheological and mechanical properties. His employment is growing strongly; many years of research were needed to produce this special type of concrete. This work aims to realize a HPC with improved properties (mechanical, physical, chemical, physico-chemical, rheological, durability and implementation). For this purpose the following objectives are considered : (1) The selection of materials and components available on the Algerian market ; (2) The study of the compatibility of cement / superplasticizer ; (3) In the final formulation of a HPC which is characterized by physical and mechanical properties of interest.

The experimental study focused on the compatibility of cement / superplasticizer, the effect of water/cement ratio (0,22 ; 0,25 ; 0,30 ; 0,5), the effect of replacing a part of cement by silica fume (8 %), the effect of combined replacement of a part of cement by silica fume (8 %) and natural pozzolan (10 %, 15 %, 25 %) and the effect of fraction of aggregate on properties of fresh and hardened concrete. The mix design method of the Sherbrooke's University has been used which is easy to realize and gives a good

results. The results obtained allow concluding that it is possible to manufacture a HPC in our town with available materials at the local market; this HPC is with good mechanical and physical properties.

*Mot-clés:* ciment, granulats, superplastifiant, fumée de silice, pouzzolane naturelle, béton à haute performance, résistance à la compression, durabilité

*Keywords :* cement, aggregate, superplasticizer, Silica fume, natural pozzolan, high performance concrete, compressive strength, durability

## Introduction

L'Algérie est l'un des pays en voie de développement, il adapte le programme de développement durable dans tous les domaines surtout dans le domaine de l'industrie de construction, donc il est nécessaire de fabriquer des bétons durables.

Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (fumée de silice, pouzzolane naturelle) et des super plastifiants ont mené à la production du béton à haute résistance ( $\geq 50$  MPa) [1]. Sa haute résistance est une fonction inverse de son contenu de vide total. Ainsi, le critère crucial dans la production du béton de haute résistance est l'utilisation de systèmes de rapport E/C (Eau/Ciment) bas, couplée à une consolidation optimale et la cure du béton [2]. Plusieurs autres de ses caractéristiques s'améliorent : la maniabilité, le module d'élasticité, la résistance à la flexion, la perméabilité et la durabilité [3].

L'utilisation des Bétons à Hautes Performances (BHP) est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Le choix du BHP comme matériau a un impact sur les coûts de construction initiaux (superplastifiant, fumée de silice, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite. Il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc., donc le BHP est le béton le plus économique à long terme.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux afin de fabriquer des BHP avec plusieurs caractéristiques rhéologiques et mécaniques améliorées, la durabilité en premier lieu et visant l'aspect économique en deuxième lieu. L'étude porte sur le comportement mécanique des bétons à base des différents types d'ajouts (fumée de silice, pouzzolane naturelle).

## Matériaux et Méthodologie

**Ciment :** le ciment utilisé a été le CPJ-CEM II/A 42.5 provenant de la cimenterie de Aïn Touta (wilaya de Batna).

**Granulats:** les graviers utilisés sont des concassés de nature calcaire de la région de Biskra (ZIANI). Ils sont de classes 5/15 et 15/25 (5/25), 5/10 et ayant un poids spécifique de 2,60, une humidité de 0 % avec coefficient de Los Angeles 23 %. Quant au sable provient de la région de Biskra (Lioua), il a un poids spécifique de 2,50 et un module de finesse de 2,52.

**Superplastifiant :** l'adjuvant utilisé est un superplastifiant local de type «MEDAPLAST HP». C'est une solution de polyacrylates, d'extrait sec 20 %, de couleur ocre clair et de  $\text{pH}=6-6,5$ .

**Les ajouts :** Deux ajouts ont été utilisés:

- Fumée de silice: Il s'agit d'un MEDAPLAST HP adjuvant à base de micro silice (Granitex), caractérisé par sa masse volumique absolue 2,2 ; sa taille des particules  $< 0,1$  microns et sa teneur en silice  $> 85$  %.

- Pouzzolane naturelle: la pouzzolane naturelle utilisée nous a été fournie par la cimenterie de Aïn Touta, c'est une roche concassée sous forme de cailloux, avec une surface spécifique Blaine de 4000 cm<sup>2</sup>/g (après le broyage).

## Analyse des résultats à l'état frais

### La compatibilité ciment/superplastifiant

La perte d'affaissement, le retard de prise, le raidissement ou la perturbation de la teneur en air entraîné sont tous synonymes d'incompatibilité ciment/superplastifiant (Aïtcin P.C., 2001). L'étude de la compatibilité ciment/superplastifiant (C/SP) est faite par l'essai d'écoulement des types cône Marsh.

La méthode utilisée est celle de l'Université de Sherbrooke qui consiste à préparer un coulis et mesurer son temps d'écoulement à 5 et 60 minutes.

Les résultats de la fluidité du coulis sont représentés par une courbe donnant le temps d'écoulement du système C/SP en fonction du dosage en superplastifiant (Figure 1) :

- La combinaison C/SP étudiée est compatible et le point de saturation est très élevé (4,2 %) parce que la teneur en extrait sec du superplastifiant utilisé est plus ou moins basse (20 %).
- Les deux courbes sont très proches parce que le PLASTACRYL 85 est un retardateur.

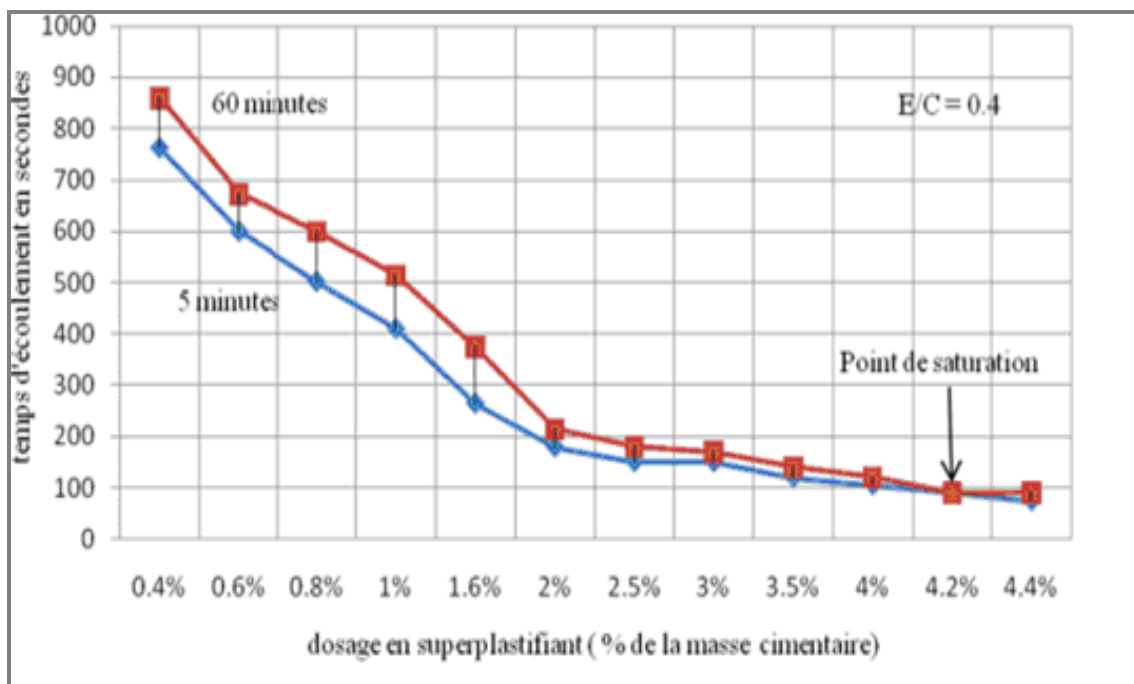


Figure 1. Temps d'écoulement en fonction du dosage de superplastifiant.

### Composition des bétons

La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton est celle de l'Université de Sherbrooke élaborée par P.C.Aïtcin et son équipe [4].

Les Tableaux 1 et 2 présentent la formulation complète des 26 mélanges de béton pour des rapports eau / ciment ou eau/liant de 0,22 ; 0,25 ; 0,30 et 0,5.

Tableau 1. Composition des mélanges de béton pour pierres concassées de fraction 5/15 et 15/25 à proportion (50 %,50 %).

N°	E/C (E/L)	Eau l/m <sup>3</sup>	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Pierres concassées kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>	Super- plastifiant l/m <sup>3</sup>	Fumée de silice (8 %) kg/m <sup>3</sup>	Pouzzolane naturelle kg/m <sup>3</sup>
1ère série								
1	0,22	133	637	1070	544	30,79 (1 %)	/	/
2	0,25	143	620	1070	520	35,96 (1,2 %)	/	/
3	0,30	150	517	1070	603	29,99 (1,2 %)	/	/
4	0,5	165	310	1070	768	17,98 (1,2 %)	/	/
2ième série								
5	0,22	138	648,6	1070	432	40,89 (1,2 %)	56,4	/
6	0,25	143	570,4	1070	502	35,96 (1,2 %)	49,6	/
7	0,30	150	475,64	1070	588	29,99 (1,2 %)	41,36	/
3ième série								
8	0,25	143	508,4	1070	492	35,96 (1,2 %)	49,6	62 (10 %)
9	0,25	143	477,4	1070	486	35,96 (1,2 %)	49,6	93 (15 %)
10	0,25	143	415,4	1070	476	35,96 (1,2 %)	49,6	155 (25 %)
11	0,30	150	423,94	1070	578	29,99 (1,2 %)	41,36	51,7 (10 %)
12	0,30	150	398,09	1070	575	29,99 (1,2 %)	41,36	77,55 (15 %)
13	0,30	150	346,39	1070	566	29,99 (1,2 %)	41,36	129,25(25%)

E/L : Eau/Liant.

E/C : Eau/Ciment.

Tableau 2: Composition des mélanges de béton pour pierres concassées de fraction 5/10 à proportion (100 %).

N°	E/C (E/L)	Eau l/m <sup>3</sup>	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Pierres concassées kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>	Super- plastifiant l/m <sup>3</sup>	Fumée de silice (8 %) kg/m <sup>3</sup>	Pouzzolane naturelle kg/m <sup>3</sup>
1ère série								
14	0,22	133	705	1070	452	40,89 (1,2 %)	/	/
15	0,25	143	620	1070	520	35,96 (1,2 %)	/	/
16	0,30	150	517	1070	603	29,99 (1,2 %)	/	/
17	0,5	165	310	1070	768	17,98 (1,2 %)	/	/
2ième série								
18	0,22	138	648,6	1070	432	40,89 (1,2 %)	56,4	/
19	0,25	143	570,4	1070	502	35,96 (1,2 %)	49,6	/
20	0,30	150	475,64	1070	588	29,99 (1,2 %)	41,36	/
3ième série								
21	0,25	143	508,4	1070	492	35,96 (1,2 %)	49,6	62 (10 %)
22	0,25	143	477,4	1070	486	35,96 (1,2 %)	49,6	93 (15 %)
23	0,25	143	415,4	1070	476	35,96 (1,2 %)	49,6	155 (25 %)
24	0,30	150	423,94	1070	578	29,99 (1,2 %)	41,36	51,7 (10 %)
25	0,30	150	398,09	1070	575	29,99 (1,2 %)	41,36	77,55 (15 %)
26	0,30	150	346,39	1070	566	29,99 (1,2 %)	41,36	129,25 (25 %)

## La maniabilité

Les résultats obtenus sont rassemblés sur les Tableaux 3 et 4.

Tableau 3. Affaissements des bétons avec les pierres concassées de fraction 5/15 et 15/25

à proportion (50 %,50 %),					
Affaissements (cm)					
E/C (E/L)	1ère série	2ième série	3ième série		
0,22	7	23	/		
0,25	21	21	20	20	20
0,30	20	21	21	21	21
0,5	20	/	/		

Tableau 4. Affaissements des bétons avec les pierres concassées de fraction 5/10 à proportion (100 %).

Affaissements (cm)					
E/C (E/L)	1ère série	2ième série	3ième série		
0,22	22	20	23		
0,25	20	20	21	21	21
0,30	22	21	21	21	21
0,5	21	/	/		

On voit que l'utilisation de 1 % de superplastifiant de la masse de ciment avec 140 l/m<sup>3</sup> d'eau (selon la méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke) donne un béton plastique, mais l'utilisation de 1,2 % de superplastifiant de la masse de ciment avec d'eau de 155 l/m<sup>3</sup> donne toujours un béton fluide. Il suffit donc d'ajouter environ 0,2 % de superplastifiant et 15 L d'eau pour faire passer le comportement rhéologique du béton d'un comportement plastique à un comportement fluide. Plus le rapport E/C ou E/L est réduit plus le béton est visqueux et nécessite la vibration. La fluidité de béton est augmentée avec l'utilisation de la fumée de silice, en raison de leurs petites particules sphériques et de leur immense surface spécifique qui peuvent combler l'espace entre les grains de ciment au lieu qu'il soit occupé par l'eau et cause généralement une réduction de la quantité d'eau exigée pour le béton maniable (plus grande quantité d'eau libre qui va fluidifier le béton) [4].

## Analyse des résultats à l'état durcis

### Caractéristiques mécaniques

#### Résistance à la compression

A partir des courbes représentées dans les figures (2, 3) on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec E/C de 0,50 ; 0,30 ; 0,25 et 0,22.

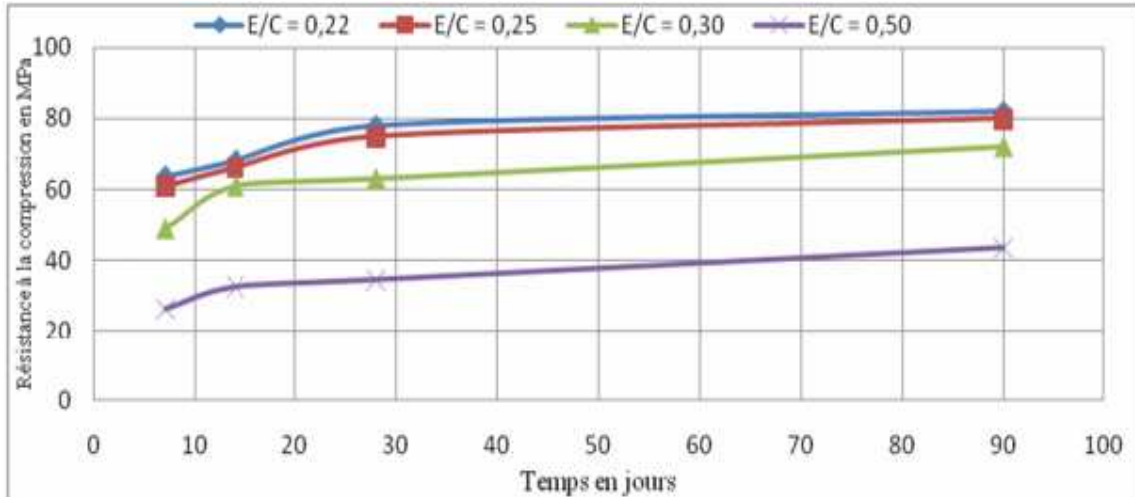


Figure 2. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et du rapport E/C des granulats de la fraction 5/15 et 15/25.

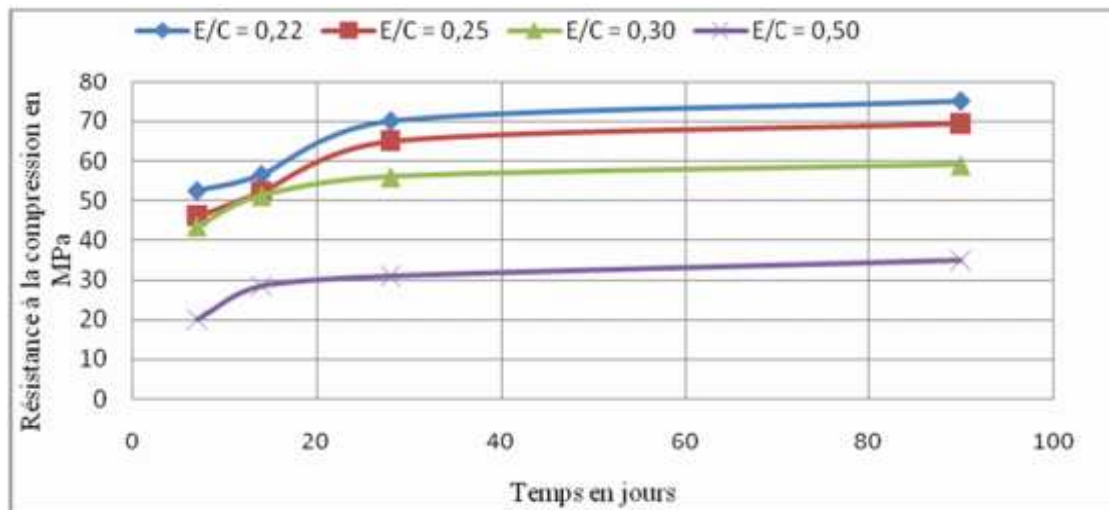


Figure 3. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et du rapport E/C des granulats de la fraction 5/10.

L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant à la floculation des grains de ciment [5], donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue.

Le rapport E/C réduit signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées, ce qui améliore la durabilité.

La cinétique de montée en résistance notée est rapide, ceci résulte du dosage en ciment élevé (finesse de mouture et la teneur en aluminates), la teneur en retardateur de prise, ainsi que, bien sûr, de la température du béton.

A partir des courbes représentées dans les figures (4, 5) on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de la fumée de silice par rapport à l'échantillon témoin, de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 80 MPa.

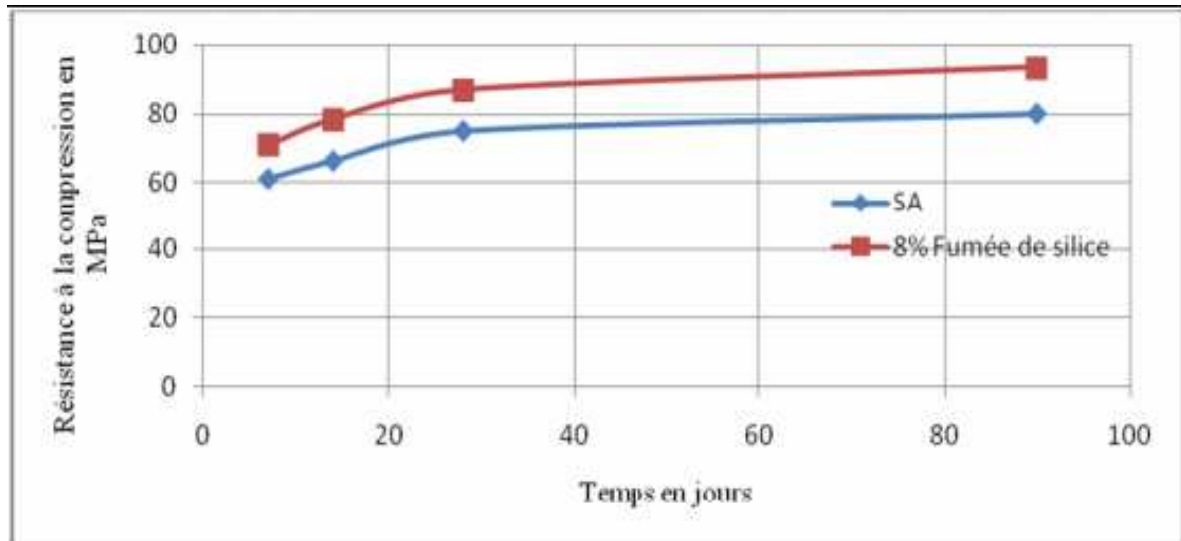


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice des granulats de la fraction 5/15 et 15/25 pour E/L=0,22.

SA : Sans ajouts,  
FS : Fumée de silice.

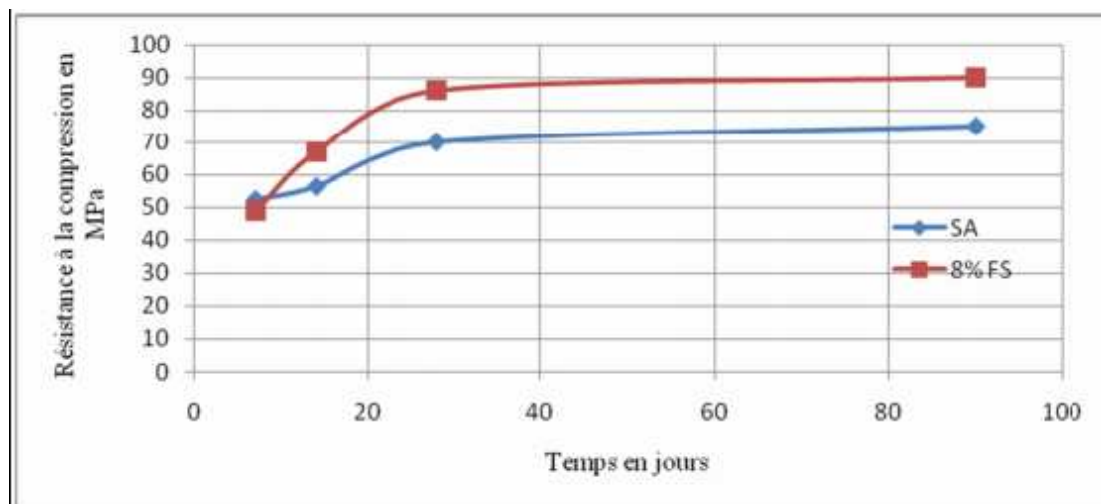


Figure 5. Evolution de la résistance à la compression de béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice des granulats de la fraction 5/10 pour E/L = 0,22.

La cinétique de montée en résistance notée est plus rapide, cela peut être expliqué par le double rôle de la fumée de silice : il y a d'abord l'effet pouzzolanique correspondant à l'association partielle ou totale des fines avec l'eau et la chaux libérée par l'hydratation du ciment. La fumée de silice fixe la portland dite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en une combinaison peu soluble [6], ensuite il y a l'effet filler (ou de remplissage) caractérisé par une mouture poussée qui facilite leur pénétration entre les grains de ciment et la diminution du rapport E/L [7]. La fumée de silice jusqu'alors reconnue comme jouant le mieux ce rôle est la plus efficace (ajout actif) grâce à sa finesse très élevée. Elle permet de combler les minuscules vides dans la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie, sa largeur n'est que de 40  $\mu\text{m}$  [8], mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton.

A partir des figures (6, 7, 8, 9, 10, 11) on voit clairement que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combiné de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif, c'est-à-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle.

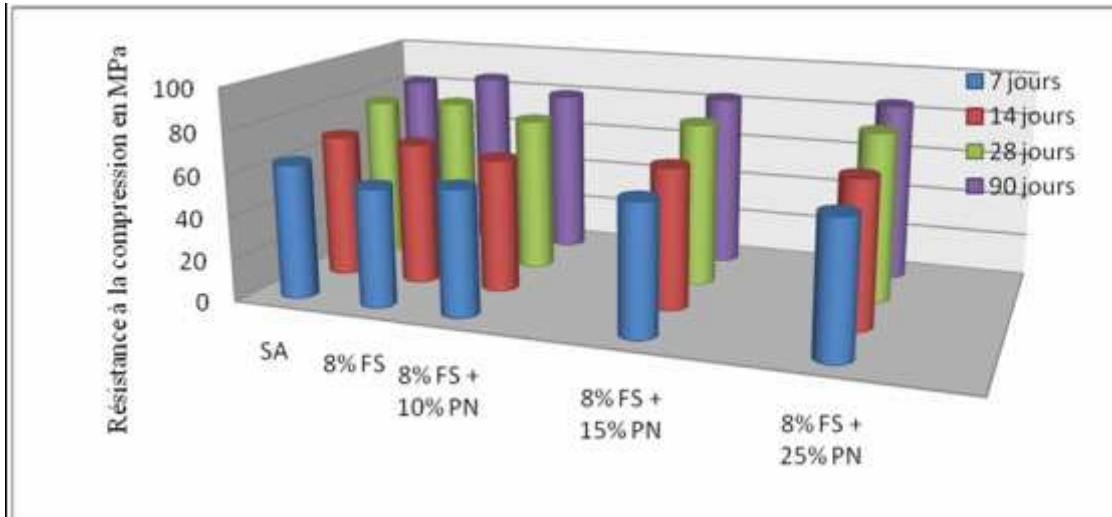


Figure 6. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle des granulats de la fraction 5/15 et 15/25 pour E/L = 0,25.

PN : Pouzzolane naturelle

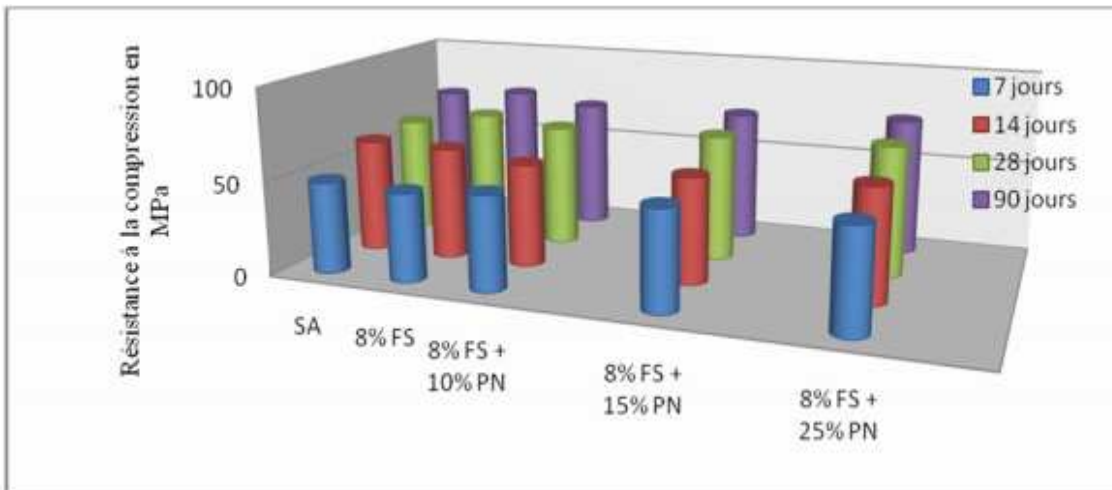


Figure 7. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et la de pouzzolane naturelle des granulats de la fraction 5/15 et 15/25 pour E/L = 0,30.

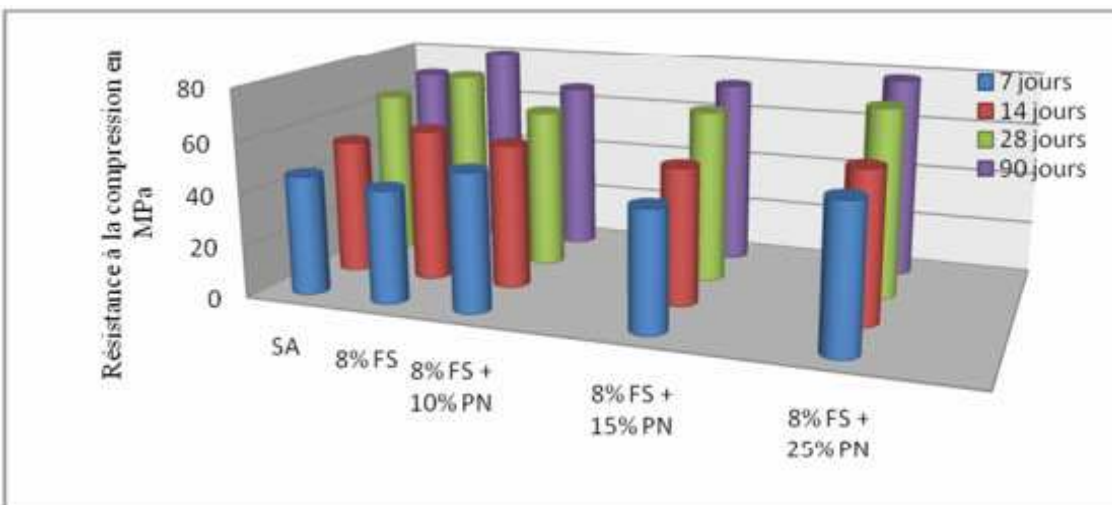


Figure 8. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle des granulats de la fraction 5/10 pour E/L = 0,25.



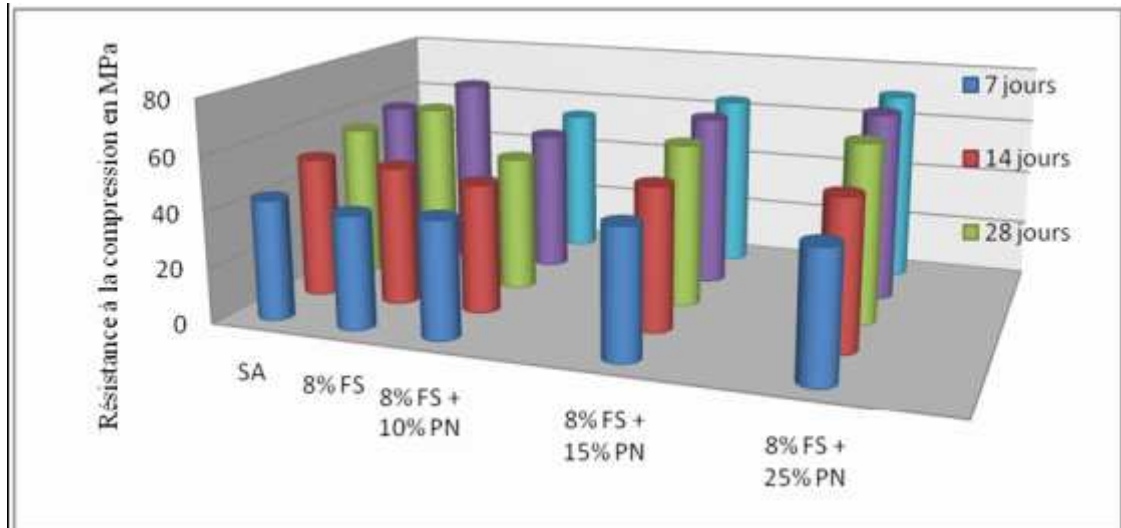


Figure 9. Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle des granulats de la fraction 5/10 pour E/L = 0,30.

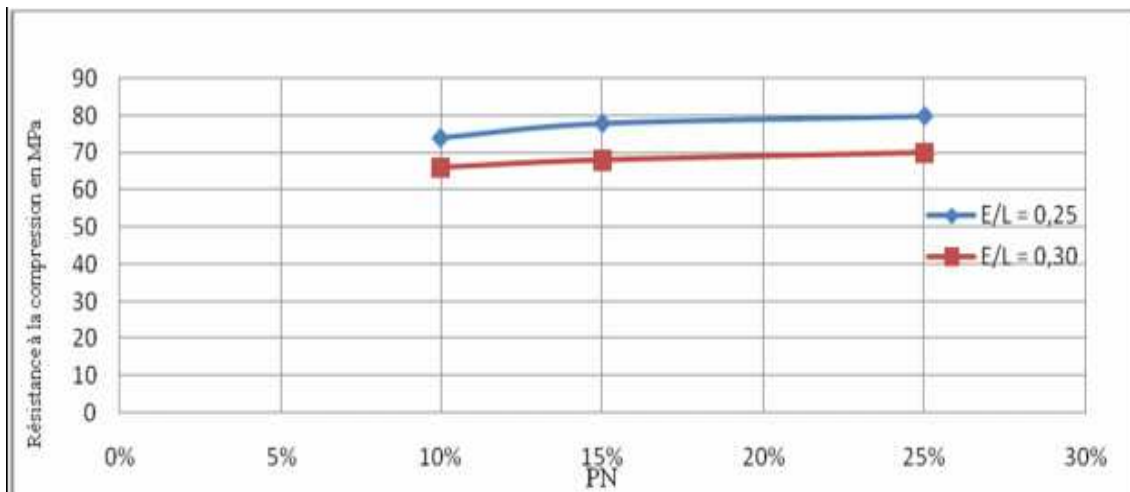


Figure 10. Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de béton en fonction de l'ajout de 8 % de la fumée de silice et (10 %, 15 %, 25 %) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L des granulats de la fraction 5/15 et 15/25.

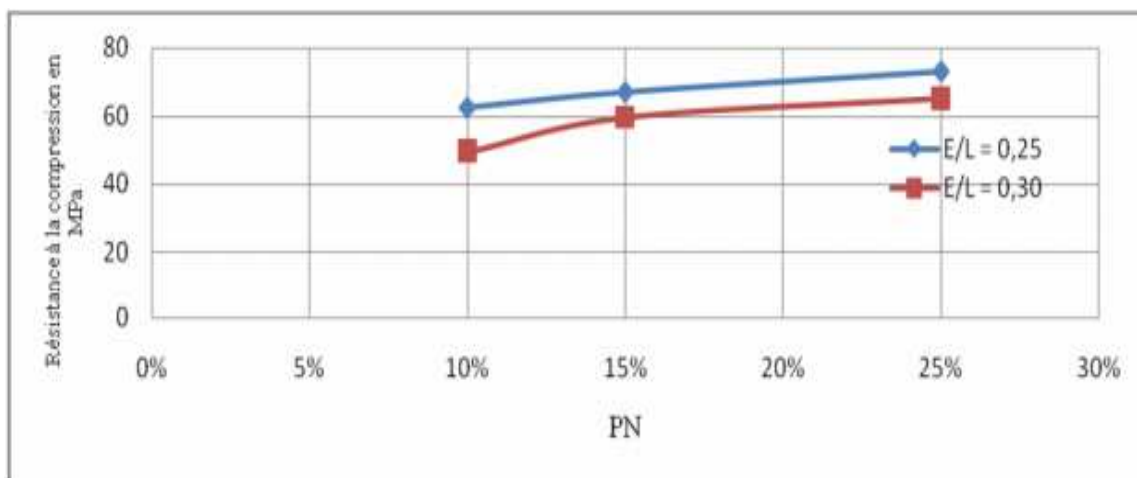


Figure 11. Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de béton en fonction de l'ajout de 8 % de la fumée de silice et (10 %, 15 %, 25 %) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L des granulats de la fraction 5/10.

On remarque que l'ajout de 25 % de pouzzolane naturelle a présenté un meilleur résultat par rapport aux autres dosages d'ajouts, l'ajout combiné de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle conduit bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons à hautes performances, la cinétique notée en résistance est moins rapide. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité.

Les essais de compression simple effectués à 28 jours sur les bétons gâchés montrent sur toutes les figures présentées que la diminution de la taille maximale des granulats a une influence minime sur la résistance mécanique du béton (l'écart entre les deux fractions est faible). Ceci est surprenant puisque les travaux de Pierre Claude Aïtcin (2001) ont montré que la résistance mécanique du béton augmentait lorsque les particules des granulats sont petites (10 à 12) mm, plus elles sont résistantes, par suite de concassage qui élimine les défauts internes des granulats, tels que les gros pores, les microfissures et les inclusions des minéraux. Quand la roche-mère (d'où proviennent ces granulats) est suffisamment forte et homogène, des granulats de 20 à 25 mm peuvent être utilisés sans affecter négativement la maniabilité et la résistance du béton. Alors cela revient à nous de faire des essais d'affaissement et de compression sur des bétons à base de plusieurs fractions de granulats et d'avoir de nouveaux résultats.

#### Résistance à la flexion

Dans le cadre de cette étude, on a effectué cet essai sur les meilleures compositions des bétons à base des deux fractions de granulats utilisées :

- Les pierres concassées de fraction 5/15 et 15/25 (50 %, 50 %) ;
- Les pierres concassées de fraction 5/10 (100 %).

En utilisant la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, les deux bétons sont réalisés avec un remplacement combiné de 8 % de la masse de ciment par la fumée de silice et un remplacement de 25 % de la masse de ciment par la pouzzolane naturelle avec  $E/L=0,25$ , les résultats sont portés sur la Figure 12.

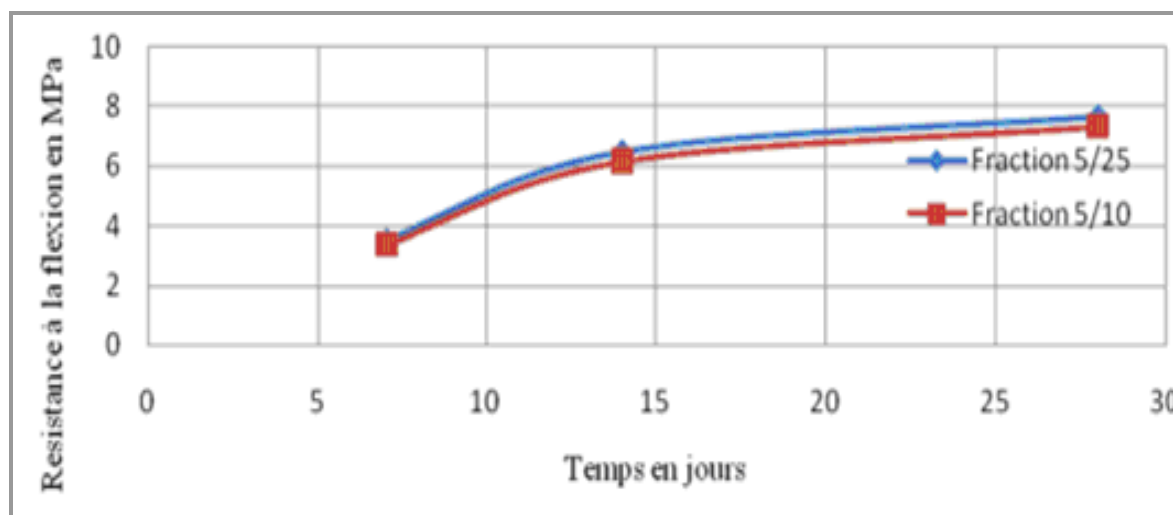


Figure 12. Evolution de la résistance a la flexion de béton en fonction du temps et de deux fractions utilisées

On peut conclure que les particules ultra-fines de la fumée de silice, qui consistent principalement en silice amorphe et les particules fines de la pouzzolane naturelle augmentent la résistance à la flexion du béton par des actions pouzzolaniques et physiques. Les résultats de la recherche actuelle indiquent que l'influence de la diminution de la taille maximale des granulats sur la résistance à la flexion du béton est minime.

## Durabilité des bétons

### Absorption d'eau massive par immersion

On a choisi l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation de la porosité de béton. Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction des fractions des granulats sont illustrées dans la Figure 13.

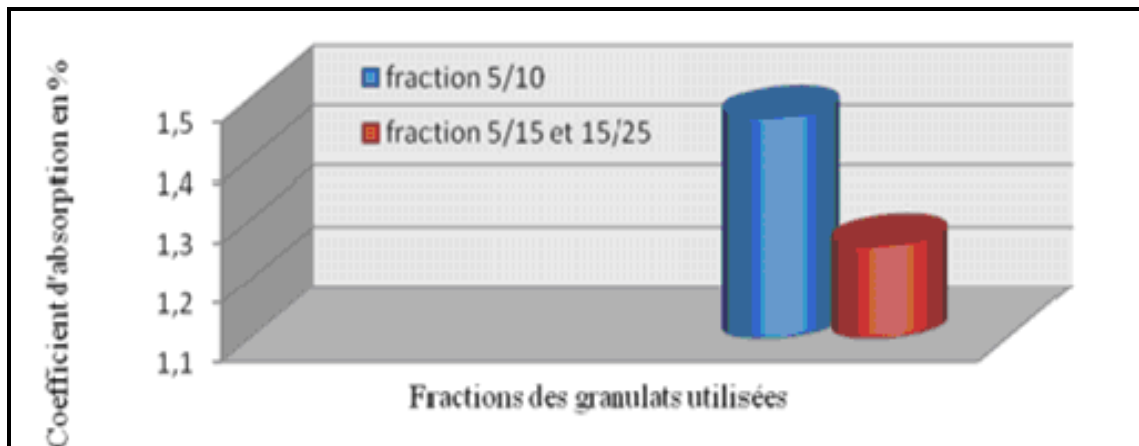


Figure 13. Variation de coefficient d'adsorption en fonction de la fraction des granulats  
(E/L=0,25 avec 8 % FS+25 % PN)

Les coefficients d'absorptions obtenus sont inférieurs à 5 %, ce qui signifie que notre béton est un très bon béton selon la norme NBN B 15-211 (1989). Il est nettement visible que les bétons à base de fraction 5/15 et 15/25 sont moins poreux que les bétons à base de fraction 5/10, notre BHP a des coefficients d'absorptions réduits en raison de la porosité qui est réduite (selon la composition : 8 % FS+25 % PN) et qui améliore les performances du béton, cela accroît considérablement la durabilité du béton qui conditionne la durée de vie des ouvrages.

### Le coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau ( $R_{sat}$ ) à la résistance à la compression du matériau sec ( $R_{sec}$ ). Les valeurs du coefficient de ramollissement en fonction des fractions des granulats sont clairement exposées sur la Figure 14. Le coefficient de ramollissement caractérise la résistance à l'eau des matériaux, l'essai est réalisé à 28 jours.

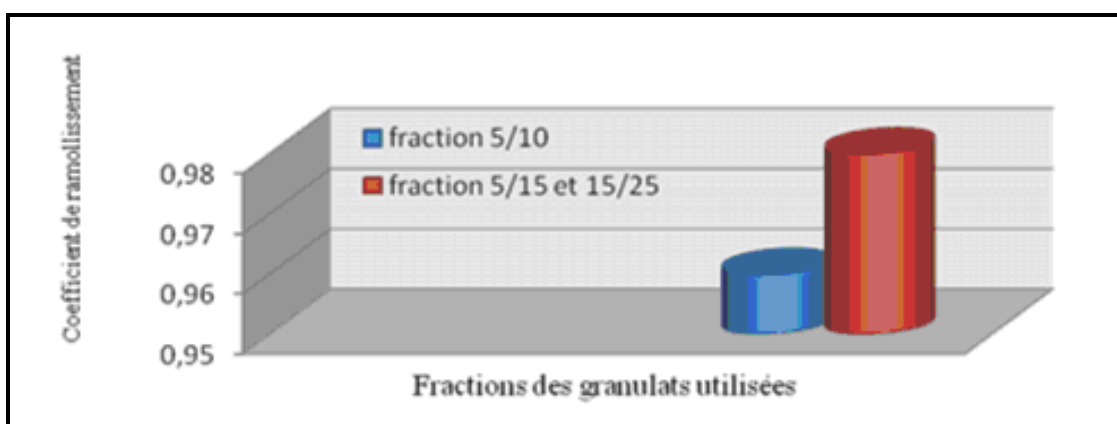


Figure 14. Variation de coefficient de ramollissement en fonction de la fraction des granulats  
(E/L=0,25 avec 8 % FS et 25 % PN).

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que les bétons à base de fraction 5/15 et 15/25 se comportent à l'eau mieux que les bétons à base de fraction 5/10. Cela est lié à

la perméabilité réduite des bétons avec ajouts (8 % FS+25 % PN), cela accroît considérablement la durabilité du béton.

## Conclusion

La formulation et la fabrication des bétons dont la résistance en compression à 28 jours atteint plus de 56 MPa voire 86 MPa est aujourd'hui possible à Biskra et il faut qu'elle n'est plus du domaine expérimental. L'addition de la fumée de silice aux bétons a montré un bon développement de résistance entre les âges de 7 et 28 jours selon la composition des mélanges. Le béton avec 8 % de la fumée de silice avec un rapport E/L de 0,22 a une résistance à la compression plus haute que les autres bétons. Les bétons avec la fumée de silice sont plus résistants que les bétons sans fumée de silice, donc on peut avoir des bétons avec une résistance à la compression de 78 MPa pour la fraction 5/15 et 15/25 et de 70 MPa pour la fraction 5/10 avec E/C de 0,22 sans fumée de silice. Alors on peut éviter l'utilisation de la fumée de silice pour un béton de résistance à la compression de 70 ou 78 MPa et un affaissement de 20 cm, étant donné que la fumée de silice est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton, c'est très important du point de vue économique. Un facteur principal en produisant le béton de haute résistance qui est au-dessus de 80 MPa est d'employer la pouzzolane naturelle moins réactive (que la fumée de silice) combinée avec la fumée de silice et un rapport E/L très bas de 0,25 et de 0,30. La combinaison de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle dans les mélanges a eu comme conséquence une microstructure très dense et une faible porosité qui produisent ainsi un béton de perméabilité améliorée et sont donc très résistants à la pénétration des agents agressifs, cette combinaison permet d'obtenir un béton économique. L'effet des fractions des granulats est minime sur les caractéristiques des bétons frais et durcis. Les durées de cure plus longues réduisent la perméabilité et a comme conséquence une structure des pores plus fins.

C'est très important pour le béton directement exposé à un environnement agressif, la cure diminue aussi le retrait endogène des BHP. Le béton contient 8 % de la fumée de silice est le béton le plus durable. Il a également été observé que le BHP peut être employé pour obtenir de hautes résistances à la compression, à la flexion, et durabilité élevée dans des structures spéciales, comme les structures marines, superstructures, parkings, pistes d'avion, ponts, tunnels, constructions industriels (centrales nucléaires). Avec la disponibilité des matériaux et une bonne connaissance des technologies des ajouts cimentaires, il est possible de produire un béton durable et améliorer ces qualités pour la plupart des applications.

## Références bibliographiques

1. Nehdi M. Microfiller effect on rheology, microstructure, and mechanical properties of high-performance concrete, Thèse de doctorat, The University of British Columbia, 1998.
2. Feret R., *Bull. Soc. Encourage. Indust. Nat. Paris*, **1987**, 2, 1604.
3. Aïtcin P.C. *Bétons hautes performances*, Ed. Eyrolles, Paris, 2001, 683.
4. Aïtcin P.C., Malier Y. *High Performance concrete, from Material to Structure*, Ed. E&FN Spon, London, 1992, 14-33.
5. Aïtcin P.C., L'interaction ciment/superplastifiant : cas des polysulfonates. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, juillet-août 2001.
6. Dron R., Voinovich I.A. L'activité hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes. In *Le béton hydraulique*, Eds. J. Baron et R. Sautery, Paris, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
7. Faouzi A. M., Mouloud B., High Performance Concrete in Algeria, for a More Economical and Durable Concrete, State of the Art Report. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, **2007**, 2(11), 1607-1612.
8. FEBELCEM Fédération de l'industrie Cimentaire Belge, Le Béton à haute performance, Dossier ciment, juillet 2007.