

VERS UN BETON DE HAUTE PERFORMANCE ELABORE DE MATERIAUX LOCAUX «BHP»

DALILA BENAMARA¹ & BOUZIDI MEZGHICHE²

¹Département Génie Civil, Centre universitaire de Djelfa, Djelfa, Algérie.

benamara_dalila@yahoo.fr

²Département Génie Civil, Université de Biskra, Biskra, Algérie.

mezghichebm@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Le matériau béton, demeure depuis son existence au début de *XIX^{ème}* siècle, l'élément clé dans la construction, et présente toujours une partie intégrante dans la construction, de l'ossature de l'ouvrage. Son emploi large et intensif, soulève le problème de sa qualité et de sa durabilité. A l'heure actuelle, il est possible de fabriquer des bétons de 120 *MPa* à condition de pouvoir se disposer, d'un ciment spécialement conçu à cet effet, de fumée de silice, des granulats particulièrement performants et d'un superplastifiant qui n'entraîne pas d'air piégé.

Notre travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, il est basé sur la fabrication d'un *BHP* économique à partir des matériaux existants sur le marché algérien, ayant des propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité très élevée.

Mots clés: BHP, Valorisation, Superplastifiant, Rhéologiques, Mécaniques et Durabilité.

ABSTRACT

The concrete material remains its existence at the beginning of *XIX* century, it is the key element in construction, and it always presents an integrat part in the construction of the whole work, its intensive and large use raises the problem of its quality and durability. At present, it is possible to make and to manufacture concretes of 120 *MPa* in condition to be able to dispose a cement designed especially for this purpose ,also the silica fume and aggregates particularly performance and a superplaster which does not involve the trapped air.

Our work Registers in the frame of the valorization of the local materials, it is based on the manufacturing and producing an economic *HPC* from materials which exist in the Algerian market, has properties rheological, Mechanical and durability very height.

Key words: HPC, Valorization, Superplaster, Rheological, Mechanical and Durability.

1 INTRODUCTION

Pendant longtemps, les concepteurs et l'industrie du béton se sont contentés de prescrire et de mettre sur le marché un béton universel dont la résistance en compression variant entre 15 et 25 *MPa*. La rhéologie de tels bétons est principalement contrôlée par quantité d'eau introduire dans le béton lors de son gâchage ou lors de sa mise en place sur le chantier. Cependant, dans plusieurs pays industries, on a pu voir la résistance à la compression des bétons utilisés dans la construction courant augmenter légèrement (25 à 55 *MPa*) grâce à l'utilisation de réducteur d'eau.

Durant les années 70, on a vu apparaître aux Etats-Unis des bétons ayant des résistances à la compression comprises

entre 50 et 60 *MPa* pour construire les colonnes de gratte-ciel. Ces bétons étaient fabriqués en sélectionnant avec soin les ingrédients entrant dans la composition du béton ainsi que le réducteur d'eau utilisé et en remplaçant une certaine quantité de ciment Portland par une cendre volante performante. (*Aitcin P.C., 2001*).

Les ajouts présentent une activité liante croissante avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance (*Bessa, 2003*).

L'utilisation de la fumée de silice en mélange avec un superplastifiant est connue pour améliorer la résistance

mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances. Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi la granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides. Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cet ajout. Certains d'entre eux considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance de la liaison granulats/matrice de ciment. (Cheng-Yi and Feldman, 1985, Toutanji and El-Korchi, 1995).

Les résistances en compression augmentent lors de substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des pâtes de ciment par double effet: filler et pouzzolanique. (Guetala et al., 2007).

La technologie des adjuvants a fait beaucoup de progrès lorsque toute l'efficacité des propriétés dispersantes des polynaphthalène et sulfonates a commencé à être utilisée, non seulement pour augmenter la fluidité du béton, mais aussi pour diminuer le rapport eau/ciment (Hattori K., 1978). Grâce à l'utilisation de ces polymères synthétiques, il devint facile d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à 100 MPa sans aucun effet négatif sur la rhéologie du béton.

Les bétons à haute performance, qui sont simplement des bétons de faible rapport E/C ou E/L, sont aussi des bétons économiques du point de vue du coût initial, car il est possible de construire une structure équivalente avec moins de coffrage, moins de béton à mettre en place et moins d'armatures. (Coulombe and Ouellet, 1994).

L'objectif de notre travail réside dans:

L'incorporation dans le mélange de béton des ajouts cimentaires ultrafins locaux, au lieu des fumées de silice ou des cendres volantes, tout en substituant les fines argileuses du sable, visant comme objectif la possibilité d'élaboration d'un béton à haute performance.

Étude de la durabilité et du comportement mécanique des bétons à base des différents types d'ajouts (sable de dune broyé, déchet de polissage de carrelage et calcaire).

2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

Les éprouvettes sont préparées à partir des ingrédients suivants: ciment, granulats, eau, adjuvant, et des fillers (calcaire, déchet de polissage de carrelage, sable de dune).

Ciment: le ciment utilisé est CPJ-CEM II/42.5A, (Algérien).

Granulats: les graviers utilisés sont des concassés de nature calcaire. Ils sont de classes 3/8, 8/15 et ayant un poids spécifique de 2,65, une impureté de 3,70% et une humidité de 0,3% avec coefficient de Los Angeles 19%. Quant au sable, il a un poids spécifique de 2,70 et un module de finesse de 3,2.

Adjuvant: l'adjuvant utilisé est un superplastifiant local de type «MEDAFLOW 30» C'est une solution de Polycarboxylates, d'extrait sec 30%, de couleur jaunâtre et de PH = 6-6,5.

Les fillers: trois ajouts ont été utilisés:

1. Calcaire: le calcaire utilisé nous a été fourni par la cimenterie de Chlef, c'est une roche concassée sous forme de cailloux de granulométrie (20/100 mm), avec une surface spécifique Blaine de 11.000 cm²/g (après le broyage), et constituée essentiellement de calcite (CaCO₃).

2. Déchet de polissage de carrelage: nous avons réutilisé ce déchet comme filler dans le but de recycler ce déchet polluant. Ce matériau est constitué un ciment gris (23%) et un concassé de calcaire (77%). Ce filler est caractérisé par une très faible présence d'éléments nocifs avec une surface spécifique est de l'ordre 9000 cm²/g.

3. Sable de dune broyé: Il s'agit d'un sable de dune de la région de Djelfa, caractérisé par sa masse volumique réelle 2.43 et de surface spécifique (Blaine) de 8230 cm²/g, l'analyse chimique montre que leur nature est siliceuse (94,51% de silice « SiO₂ »).

3 ANALYSE DES RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS

3.1 Évolution de la compatibilité liant / superplastifiant

La difficulté majeure qu'on rencontre dans la formulation de béton à haute performance est de choisir le couple liant/superplastifiant le plus efficace qui permet d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité. En utilisant dans cette étude l'essai d'écoulement des types cône de marsh, il est basé sur la mesure du temps de l'écoulement d'un litre de coulis placé dans un cône menu d'un orifice dont le diamètre peut varier de 5 à 10 mm. La première mesure de la fluidité est faite à 5 minutes après le début du malaxage. Ensuite, on effectue une deuxième mesure de l'écoulement à 60 minutes. Pratiquement cette méthode expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs gâchées successives.

Les résultats finals illustrés sur les figures (1, 2 et 3), présentent le dosage de saturation et le temps d'écoulement de différentes couples liant/superplastifiant.

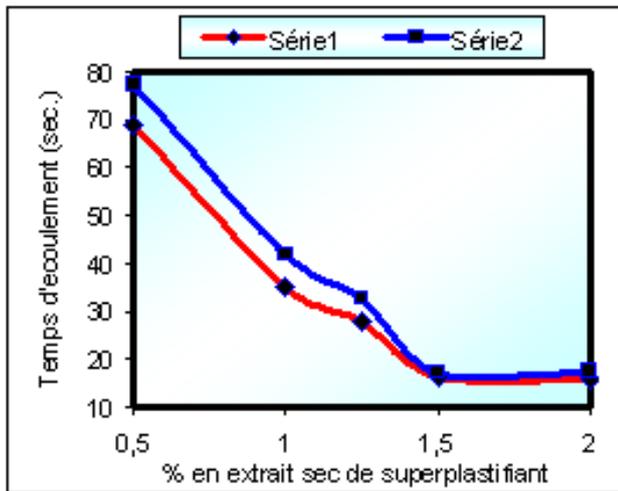


Figure 1 : Couple liant (CPJ42.5 +15% SD)-Meda-Flow30.

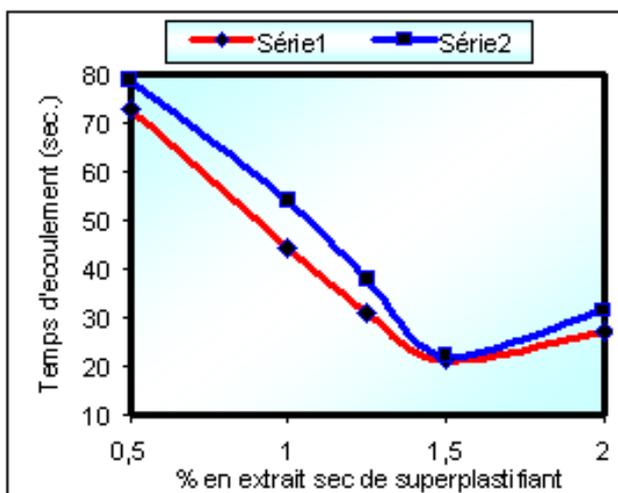


Figure 2 : Couple liant (CPJ42.5 +10% Cal)-Meda-Flow30.

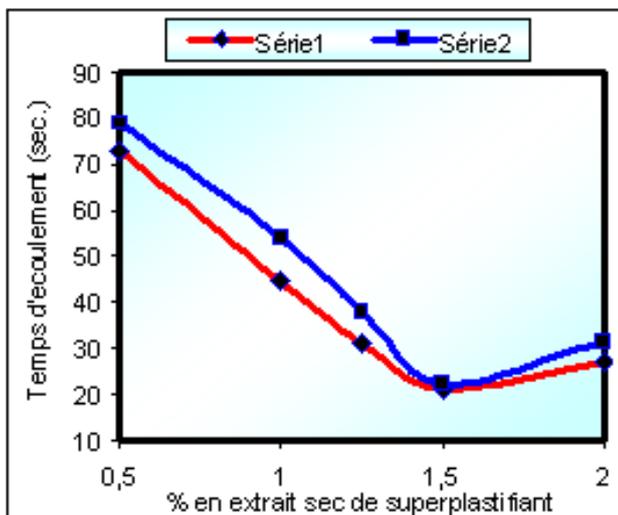


Figure 3 : Couple liant (CPJ42.5 +15% DPC)-Meda-Flow30.

On remarque sur les figures (1, 2 et 3) que les couples sont compatibles, la constatation que nous pouvons faire pour ces couples est que pour un dosage en superplastifiant égale 1.5% nous enregistrons peu de différence au niveau de la fluidité entre 5 et 60 minutes.

3.2 Composition des bétons

L'élaboration des bétons a été menée en vue d'obtenir un mélange en deux phases : un béton s'approchant, le plus possible à une roche massive ayant la plus faible porosité et constitué par le squelette inerte (gravier et sable) déterminé par la méthode Dreux Gorisse, tout en optimisant le diamètre maximal des gros granulats. (Dreux et Festa, 1998).

Tandis que la deuxième phase présente la pâte liante (ciment, superplastifiant, eau et ajouts). Cette dernière a été optimisée par coulis expérimentaux. (De Iarrard, 1988).

Les compositions finales des quatre mélanges des bétons utilisés après optimisation sont reportées sur le tableau (1).

Tableau 1 : Compositions finales des bétons utilisés.

Constituant	Bétons			
	BO	BC	BDPC	BSD
Superplastifiant (1.5%)	0	25	25	25
Eau/liant	0,50	0,26	0,26	0,26
Ciment (Kg/m ³)	450	404.5	382.5	382.5
Sable (0/5) (Kg/m ³)	670	670	670	670
Gravier (3/8) (Kg/m ³)	200	200	200	200
Gravier (8/15) (Kg/m ³)	905	905	905	905
CPJ - 42.5 + 10% Calcaire (Kg/m ³)	-	45.5	-	-
CPJ - 42.5 + 15% Déchet de polissage de carrelage (Kg/m ³)	-	-	67,5	-
CPJ - 42.5 + 15% Sable de dune (Kg/m ³)	-	-	-	67,5

BO: Béton ordinaire.

BC: Béton à base de ciment avec calcaire.

BDPC: Béton à base de ciment avec de déchet de polissage de carrelage.

BSD: Béton à base de ciment avec sable de dune broyé.

3.3 Essais sur bétons frais

Les principaux essais effectués sur les bétons sont suivants: l'ouvrabilité, le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique. Les résultats de ces essais sont donnés au tableau (2).

Tableau 2 : L'air occlus, ouvrabilité et la masse volumique des bétons frais.

Propriétés	BR	BC	BDPC	BSD
% d'air occlus	2.40	1.65	1.30	1,65
Aff. (cm)	7.00	7.70	9.00	7,70
MV (Kg/m^3)	2410	2588	2560	2592

On remarque que l'ouvrabilité des bétons avec des ajouts augmente sensiblement par rapport au béton de référence, par contre le taux de l'air occlus diminue. Cela est dû d'une part à la substitution de la partie fine de sable par l'ajout c'est à dire l'élimination de la partie argileuse qui absorbe beaucoup d'eau, et d'autre part les ajouts utilisés sont finement broyés donc ils remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée. Concernant la masse volumique, elle est relativement élevée pour les bétons avec ajouts par rapport au béton de référence, ce qui explique le rôle de remplissage de ces ajouts. En effet, ces derniers ayant des finesses plus grandes que celles du ciment utilisé, s'insèrent dans les vides et les pores capillaires, ils densifient le squelette du béton et par conséquent, il en résulte une amélioration de la masse volumique du béton frais et une diminution du taux de l'air occlus.

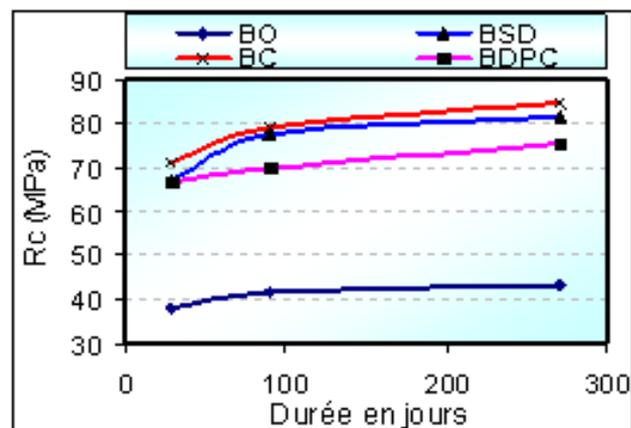
4 ANALYSE DES RESULTATS A L'ETAT DURCIS

4.1 Caractéristiques mécaniques « Résistance à la compression »

La figure (4) donne un exemple des résultats obtenus à température ambiante à des âges respectifs 28j, 90j et 270j. On peut conclure, que pour un rapport E/C égale à 0.26 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ-42.5 et l'ajout de 10% du fine de calcaire, 15% du déchet de polissage de carrelage et 15% du sable de dune présentent des propriétés performantes.

La résistance des bétons avec ajouts présente des valeurs doubles que celle du béton ordinaire. Cette augmentation de résistance était prévisible et concorde parfaitement avec la littérature. (Djaknoun et al., 2005).

Les facteurs les plus responsables de cette augmentation serait bien sûr le choix des types de l'adjuvant, la grande finesse des ajouts utilisés et un autre facteur très important c'est la diminution du rapport E/C, ce paramètre est favorisé la formation des produits d'hydratation internes qui sont caractérisés par une texture très fine et qui ressemble beaucoup plus à une phase compacte ayant une apparence amorphe. Mais cette augmentation de résistance semble être presque linéaire, c'est à dire qu'entre 28j, 90j et 270j, le processus d'hydratation a continué d'une manière presque aussi intense que les premiers jours. Ceci pourrait être une conséquence de la cure appliquée aux bétons.

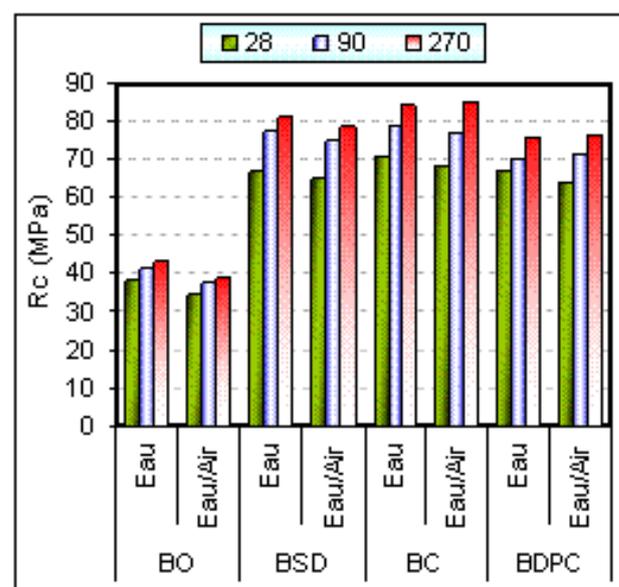
**Figure 4 : Résistance à la compression des bétons.**

4.2 Durabilité des bétons

4.2.1 Mouillage-Séchage

Cet essai est effectué sur les éprouvettes ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 . L'essai a fait l'objet de la norme ASTM D 559-57. Il consiste à soumettre des échantillons de béton, à douze cycles de vieillissement accélérés où chacun est caractérisé par cinq heures d'immersion totale des échantillons dans l'eau, suivi par quarante deux heures de séchage à l'étuve à $71^\circ C$.

L'évolution des résistances mécaniques des éprouvettes de béton conservées dans l'eau courante et celles ayant subi les cycles d'immersion dans l'eau et séchage à l'air pendant 28j, 90j et 270j, est représentée sur la figure (5).

**Figure 5 : Évolution des résistances mécaniques à la compression en fonction des cycles (Mouillage-Séchage).**

Selon (Ollivier, 1975), il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Ce qui explique l'augmentation de la résistance mécanique du béton aux fillers en fonction du temps de conservation, laquelle dépasse celle du béton de référence (sans ajout). Cette observation montre l'intérêt et l'efficacité des fillers sur le comportement mécanique.

4.2.2 Résistance aux sulfates

Les résistances aux sulfates sont déterminées à partir des éprouvettes dont le durcissement était en conditions naturelles pendant 28 jours (temps zéro), puis les éprouvettes sont immergés dans la solution du sulfate de sodium Na_2SO_4 de concentration 5%. Pour évaluer la durabilité des bétons vis-à-vis l'attaque des sulfates, nous avons déterminé, la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion dans la solution des sulfates. Les figures (6 et 7) représentent la variation des résistances à la compression pour les différents types des bétons en fonction de la durée d'immersion dans la solution des sulfates après 90 et 270 jours.

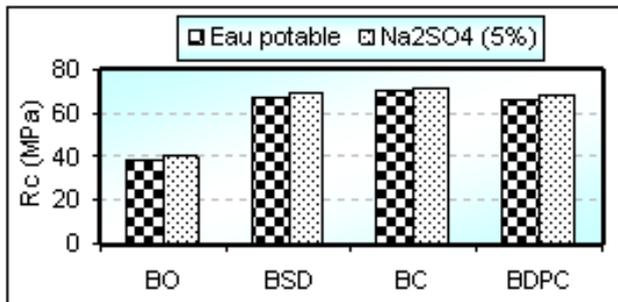


Figure 6 : Évolution de la résistance à la compression à l'âge 90j.

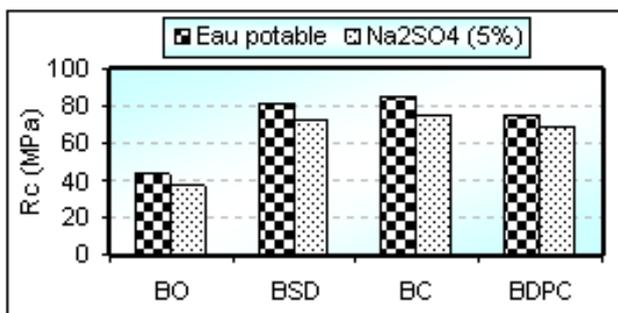


Figure 7 : Évolution de la résistance à la compression à l'âge 270j.

Les résultats indiquent sur la figure (7) un gain de résistance pour tous les bétons pendant 90 jours. Au delà de ce temps, on a observé une réduction de la résistance «figure (8)», L'augmentation de la résistance jusqu'à 90 jours semble être due à l'hydratation continue des produits anhydres de ciment et à la réaction de Na_2SO_4 avec

$Ca(OH)_2$ pour former le gypse et l'ettringite, qui complètent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur la résistance mécanique.

Cependant la diminution de la résistance à l'âge de 270 jours, indique l'effet d'expansion causé par l'attaque de sulfate, la formation d'un hydrate sulfaté gonflant conduit à la création des microfissures signent d'une déstructuration ultérieure du matériau. Cela est conforme aux résultats obtenus par des autres chercheurs. (Benabed et al., 2005, Turker et al., 2003).

4.2.3 Résistance à la température

Les éprouvettes des bétons des dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ sont soumises à la compression simple, les trois types des échantillons sont chauffées à différentes températures, 200, 400, 600 et 900 C° par palier de 100 C° tous les 20 min à une vitesse de chauffage de 5 C°/min , l'écrasement intervient après leur refroidissement à l'air libre à l'âge de 28 jours. Le résultat est représenté par la figure (8).

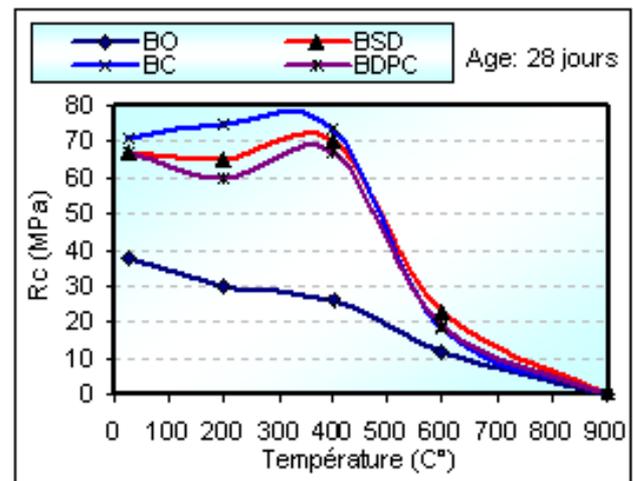


Figure 8 : Évolution de la résistance à la compression des bétons chauffés à l'âge 28j.

On remarque que la résistance des bétons varie suivant une même tendance, en effet pour les différents types des bétons (témoin ou avec ajouts), la courbe légèrement diminue puis augmente pour atteindre le maximum de la contrainte aux environs de 400 C° , cette augmentation de la résistance serait le fruit de l'effet des produits d'hydrations additionnels. Ce gain de résistance a été observé par (Kodur, 2000).

Par contre à 600 C° on remarque une perte de la résistance est attribuée en générale aux endommagements (fissuration interne) causés par: les déshydrations, la pression de vapeur et la destruction des produits d'hydrations surtout au niveau des interfaces granulats/pâte de ciment, et à 900 C° sont déjà très endommagés.

5 CONCLUSION

L'ensemble des essais effectués a permis de tirer les conclusions suivantes:

La confection d'un *BHP* à base de matériaux localement disponibles en Algérie et judicieusement étudiés est possible. Celle a permis d'aboutir des bétons de 71 *MPa* en 28 jours et 85 *MPa* en 270 jours.

L'utilisation du déchet de polissage de carrelage dans la fabrication du béton à haute performance comme filler, est très intéressante sur le plan économique d'une part, car ils ont un faible coût en énergétique, et d'autre part, ils contribuent à la résistance des bétons aux agressions chimiques ce qui améliore la durabilité.

L'incorporation de 15% de sable de dune broyé conduit à augmenter les performances mécaniques et la durabilité des bétons, ce matériau très abondant au sud algérien.

L'ajout de calcaire finement broyé a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la masse volumique, conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un squelette plus compact, ce qui a entraîné en conséquence, une amélioration relative de résistance mécanique malgré les actions préjudiciables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Aïtcin P.C.**, «*Bétons, Haute performance*» Edition, Eyrolles, Paris 683, 2001.
- [2] **Baroghel V., et al.**, «Etude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges. I-Microstructure, propriétés de durabilité et retrait». Bulletin des LCPC, N°217. p 61-73. Paris, 1998.
- [3] **Benabed B., Azzouz L. et Damene Z.**, «Comportement mécanique et durabilité de mortiers a base du sable de dune». Colloque CMEDIMAT Oran, 2005.
- [4] Bessa A., «*Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers*». XXI^{èmes} rencontres universitaires de génie civil, Prix «Rene Houpert», Université de Cergy-Pontoise, 5, Mail Gay-Lussac, 95031 Cergy-Pontoise cedex, 39-48, 2003.
- [5] **Coulombs L.G. and Quellet C.**, «The Montée St-Rémi overpass crossing Autoroute 50 in Mirable: the savings achieved by using HPC». Concrete Canada Newsletter, Vol.2, N° 1, Canada, 1994.
- [6] **Cheng-Yi Huang and Feldman R.F.**, «*Influence of Silica Fume on the Microstructural Development in Cement Mortars*». Cement and Concrete Research, 15, 285, 1985.
- [7] **Dreux G. et Festa J.**, «*Nouveau guide du béton et de ses constituants*». 8^{ème} édition, Eyrolles, Paris, 1998.
- [8] **De larrard F.** «*Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances*». Thèse de doctorat de l'ENPC, Rapport de recherche des LPC n°149, France, mai 1988.
- [9] Djaknoun S. et Benyahia A., «*Caractérisation des bétons à hautes performances*». Journée d'étude sur l'utilisation de la chaux dans les techniques routières, p46-49, 2005.
- [10] Guettala S., Mezghiche B. and Chebili R., «*Interest and effectiveness of the addition of the sand of dune finely crushed to cement, on the properties of the concrete*». Sun Light Publishing Canada, World Journal of Engineering 4 (1) 45-53, 2007.
- [11] **Hattori K.**, «*Experience with Mighty superplasticizer in Japan*». ACI SP 62, PP37-66, Paris, 1978.
- [12] **Kodur V.K.R.**, «Spalling in high strength concrete exposed to fire-concerns, causes, critical parameters and cures». Actes du conger de l'ASCE sur les structures, philadelphie (PA), 2000.
- [13] **Malier Y.**, «Les BHP: caractérisation, durabilité et applications». Presse de l'E.N.P.C, Paris, 1992.
- [14] **Ollivier J.P.**, «Etude de la liaison entre la pâte de ciment et les granulats par observation directe au microscope électronique par transmission» Thèse Doct. Ing. ; Toulouse III, 99p, 1975.
- [15] **Turker F. et al.**, «Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica». Cement and Concrete Composite p 429-437, Paris, 2003.
- [16] **Toutanji H.A. and El-Korchi T.**, «The Influence of Silica Fume on the Compressive Strength of Cement Paste and Mortar». Cement and Concrete Research, 25, 1591, 1995.