



Matériaux de construction alternatifs

BÉTON DE SABLE HAUTE PERFORMANCE : FORMULATION, PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES ET DURABILITÉ

HIGH PERFORMANCE SAND CONCRETE: FORMULATION, PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY

Dalila BENAMARA¹, Leila ZEGHICHI² et Bouzidi MEZGHICHE³

¹ Laboratoire de Génie Civil, Université Ziane Achour, BP 3117, 17000 Djelfa (Algérie) benamara_dalila@yahoo.fr

² Laboratoire de Géomatériaux, Université de M'sila, BP 166, 28000 M'sila (Algérie)

³ Laboratoire de recherche en génie civil LRGCB, Université Mohamed Khider, BP 145, 07000 Biskra (Algérie)

1. INTRODUCTION

Les performances mécaniques du béton ne constituent pas l'unique critère de jugement de la qualité du béton, un bon nombre de propriétés spécifiques du béton de sable rendent préférentiels pour certains usages. Toutefois, leur classification des selon leur performance mécanique en particulier, et leur résistance en compression à 28 jours reste un critère déterminant pour leur utilisation. D'une manière générale, les performances mécaniques du béton de sable sont inférieures à celle des bétons ordinaires. En particulier la cinématique de l'augmentation en résistance qui est en général plus

lente pour les bétons de sable, ce qui peut éliminer leur usage pour des bétons mis en charge rapide. Ceci est due : à la quantité d'eau importante utilisée dans le mélange, la quantité d'éléments fins et les nombreux micro-pores existant dans la structure durcie du béton de sable [1].

Cependant avec le développement de la technologie des matériaux à nos jours, en particulier l'émergence des super plastifiants, le béton de sable peut être de haute performance présentant des résistances très élevées (atteignant 90 MPa) pour répondre à des exigences mécaniques précises, sa haute résistance est une fonction inverse de son contenu de vide total [2,3].



Le béton de sable à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que le béton de sable. Les constituants de ce nouveau matériau sont le sable de préférence celui de rivière avec granulométrie continue, du ciment Portland ordinaire (ciment Portland à haute résistance initiale), lorsque des résistances élevées au jeune âge sont nécessaires à un dosage important de (400 à 600 kg/m³), et il est constitué aussi par la fumée de silice (généralement de 5 à 25% de la masse totale du liant), et parfois par d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau granulé broyé afin d'améliorer la compacité, l'ouvrabilité et la résistance mécanique [4,5,6], contenant également un super plastifiant réducteur d'eau ($\geq 1,5\%$) avec un très faible rapport E/C inférieur à 0,35. L'utilisation de béton de sable à haute performance (BSHP) a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons dans les régions riches en différents types des sables. Grâce à la porosité limitée, la grande durabilité, les qualités rhéologiques et ses propriétés mécaniques remarquables, son emploi se développe fortement. De nombreuses années de recherche ont été nécessaires pour produire ce type de béton spécial [2,7].

Vu l'intérêt que peut présenter ce nouveau béton dans la classe des matériaux de construction, il serait intéressant de tenter d'améliorer certaines caractéristiques peu connues et d'éliminer les inconvénients du béton de sable pour lui assurer sa valeur économique et d'obtenir une bonne performance surtout dans les régions riches en sable comme le sud Algérien.

Les améliorations utilisées dans cette étude sont :

- L'incorporation d'un faible pourcentage des granulats.
- L'ajout d'un super plastifiant à forte efficacité (réducteur d'eau).
- L'ajout des ultras fines active et inerte.

2. MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un Ciment Portland à haute résistance aux sulfates (CEM I 42,5 HRS), sa composition minéralogique C3S=60%, C2S=25,55%, C₃A=2% et le

C₄AF=12,45%. La masse volumique du ciment anhydre est de 3,23 g/cm³. La surface spécifique est de 3880 cm²/g.

2.2. Additions

Deux types d'additions ont été utilisés :

2.2.1. Sable de dune broyé

La masse volumique réelle est de 2650 Kg/m³ et sa surface spécifique de Blaine est de 6300 cm²/g.

2.2.2. Fumée de silice

La masse volumique réelle est de 2194 Kg/m³ et sa surface spécifique de Blaine est supérieure à 15.000 (cm²/g).

La composition chimique du ciment, fumée de silice et le sable de dune broyé est donnée au tableau 1.

2.3. Granulats

Le sable utilisé est un sable d'oued ayant un poids spécifique de 2,7, une impureté de 3,70%, un module de finesse de 3,2 et une humidité de 0,3%. Quant au gravier, la classe 3/8, a un poids spécifique de 2,65 avec un Los Angeles 18%.

2.4. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération de type « MEDAFLOW 145 ». C'est une solution de Poly carboxylates, d'extrait sec 31%, de couleur brai clair de PH = 5-6.

3. FORMULATION

La première phase présente la détermination de béton de sable témoin (ciment, eau et sable), la méthode utilisée pour la formulation c'est une approche expérimentale adaptée de la méthode SABLOCRETE [1]. Pratiquement cette approche expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs gâchées successives, caractérisées par des mesures de la maniabilité (maniabilimètre) et de la masse volumique apparente. L'optimum du squelette granulaire est atteint lorsque la masse volumique apparente théorique avoisine la masse volumique réelle et pour une maniabilité normale.

Les échantillons	P.A.F. %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	K ₂ O %	Na ₂ O %
Ciment	1,47	22,31	4,39	5,52	63,89	0,8	1,11	0,41	0,09
Sable de dune	1.76	89,51	1,64	0,72	5,94	0,07	0,03	0,20	0,06
Fumée de silice	-	93,17	0,6	1,25	1,4	1,02	2,3	1,0	-

Tableau 1. Compositions chimiques des constituants.



3.1. Étapes de la formulation

3.1.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous cherchons à déterminer une formulation d'un mètre cube constituée de ciment, d'eau, et de sable, ayant une maniabilité normale.

- Choix de la teneur en ciment :

Le dosage de ciment est donné par l'équation suivante en fonction Dmax des granulats : $C_{opt} = (550 \text{ ou } 700) / D_{max}$ [1]. Lorsque la valeur de Dmax=5 mm, et c'est le cas du béton de sable, le dosage en ciment est entre 380 à 480 Kg/m³, pour un béton de sable haute performance, on a choisi un dosage de ciment égale à 450 Kg/m³.

- Fixation d'une teneur en eau :

À ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau E (L/m³), suffit pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience, alors on prend un dosage approximatif en eau pour 450 Kg en ciment égal à 315 L.

- Détermination du dosage en sable :

Les quantités de ciment et d'eau sont connues. Nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ce qui donne la relation suivante :

$$V_C + V_E + V_{sab} = 1000 \quad (\text{les volumes sont exprimés en litres}) \quad (1)$$

Soit :

$$\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol du ciment}} + \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse vol de l'eau}} +$$

$$\frac{\text{Masse de sable}}{\text{Masse vol du sable}} = 1000$$

$$\text{Masse de sable} = 1000 -$$

$$\left(\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol du ciment}} + \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse vol de l'eau}} \right) \times \text{masse vol du sable}$$

- Réglage de la maniabilité et du rendement de la formulation :

La composition du béton de sable témoin utilisé est présentée dans le tableau 2.

La deuxième phase, D'après SABLOCRETE [1], le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable chargé. Quatre taux de gravillons (3 /8) ont été utilisés dans cette recherche pour le renforcement des bétons de sable avec une substitution par une partie du sable (G/S : 0%-0,15%-0,25%-0,35%) à condition qu'on fixe le rapport E/C. Ces pourcentages sont donnés en volume total du béton de sable. Les différentes compositions sont représentées dans le tableau 3.

On constate une augmentation de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation des dosages des granulats. Cette augmentation due à la qualité et la forme des granulats concassés utilisés qui donne une meilleure adhérence matrice-granulats. Le diamètre des granulats n'affecte pas directement la résistance.

3.1.2. Détermination du dosage en fines d'addition

La troisième phase après avoir trouvé la formulation optimale des bétons de sable chargé qui donne la résistance maximale pour chaque formulation, on prend la composition (N° 4). Donc les additions minérales ont substitués une partie du ciment avec différentes teneurs (5%-10%, 15% et 20%) à condition qu'on varie le rapport E/L dans le sens d'une réduction de la quantité d'eau de gâchage par l'introduction de super plastifiant (haut réducteur d'eau). D'après plusieurs essais préliminaires, les compositions finales sont reportées sur le tableau 4.

3.1.3. Optimisation de la résistance maximale à la compression

La quatrième phase présente la mesure de la résistance à la compression de chaque composition, ensuite on sélectionne les formulations optimales qui donnent la résistance

Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Eau (L)	Eau/Ciment	Rc 07 j(Mpa)	Rc 28j (Mpa)
450	1335	315	0,70	15,2	19,9

Tableau 2. Squelette granulaire adopté pour 1m³ de béton de sable.

constituants les gâchées	n°01	n°02	n°03	n°04
eau/liant	0,70	0,7	0,7	0,7
ciment (kg/m ³)	450	450	450	450
sable (0/5) (kg/m ³)	1335	1135	1035	935
G/S (%)	0	0,15	0,25	0,35
RC 07J(MPa)	15,2	17,3	19	21,3
RC 28J(MPa)	19,9	20,8	23,2	27,1

Tableau 3. Les compositions finales des bétons chargés utilisés.



Bétons Constituants	BS 1	BS 2	BS 3	BS 4	BS5	BS6	BS7	BS8	BS9	BS10
Sable de dune broyé		-	-	5%				5%	10%	20%
Fumée de silice	-	-	-	10%	10%	15%	20%			
Superplastifiant (%)	-	-	1,5	1,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5
Eau/liant	0,70	0,7	0,5	0,35	0,5	0,4	0,35	0,6	0,40	0,35
Ciment (Kg/m ³)	450	450	450	382,5	405	382,5	360	427,5	405	360
Sable (0/5) (Kg/m ³)	1335	935	935	935	935	935	935	935	935	935
G/S = 0,35	-	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Aff (cm)	6	5	10	9,5	11	9	8	11	13	15
RC07	15,2	21,3	27,7	26,9	27,9	28,3	28,8	26,6	25	23
Rc28	19,9	27,1	34,7	54,3	48	57,8	51	37,9	41	38

Tableau 4. Compositions finales des bétons.

Les abréviations suivantes seront utilisées :

BS : Béton de sable

BSHP : Béton de sable à haute performance

FS : Fumée de silice

SD : Sable de dune broyé

BS 1 : Béton de sable témoin

BS 2 : Béton de sable chargé

BS 3 : Béton sable chargé avec superplastifiant

BS4 : Béton sable chargé (superplastifiant + fumée de silice + sable de dune broyé)

BS 5 - BS 6 - BS7 : Béton sable chargé (superplastifiant + fumée de silice)

BS8 - BS9 - BS10 : Béton sable chargé (superplastifiant + sable de dune broyé)

maximale selon le type d'ajout, avec une ouvrabilité acceptable.

La résistance en compression des différentes compositions des bétons (avec et sans ajouts) utilisées est représentée dans le tableau 5.

Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir un béton de sable haute résistance, correspond aux : BS6 (15%FS) = 57,8MPa et BS4 (10%FS+5%SD) = 54,3MPa.

Les constatations suivantes peuvent être tirées :

- Le super plastifiant a joué son rôle de densification du squelette de béton, qui permet la dispersion des particules de ciment et donc éliminer le phénomène de flocculation des grains de ciment en chassant toutes les bulles d'air et donc le mouillage et l'hydratation de tous les grains de ciment, qui permet d'obtenir une réduction maximale d'eau, une bonne ouvrabilité, une rhéologie satisfaisante du béton pendant la mise en œuvre, et par

suite une résistance remarquable avec un taux d'augmentation de 21% par rapport au béton de sable témoin.

- Le sable de dune broyé a donné un optimum de 10 %, la résistance à la compression diminue en fonction du pourcentage du sable de dune ; ceci est dû au fait que la réaction pouzzolanique n'a pas eu lieu aux jeunes âges, donc l'ajout du sable de dune (par substitution) a engendré une diminution de la partie active. Mais à long terme et pour un rapport E/L=0,4 la résistance à la compression est supérieure à celle du béton chargé avec un dosage de 10% du sable de dune ; ceci est dû à la fixation de la chaux sous forme de CSH qui améliore la résistance ; par contre pour 15% elle reste inférieure à celle du béton chargé, en raison de la forte teneur en produits inertes [8].

- Pour le béton de sable avec fumée de silice la teneur optimale est de 15 %, cette composition a présenté une résis-

Résistances	Bétons	BS 1	BS 3	BS 4	BS6	BS 9
RC07		15,2	27,7	26,9	28,3	25
Rc28		19,9	34,7	54,3	57,8	41

Tableau 5. Formulation finale utilisée.

tance de 58 MPa en compression (à 28 jours), soit une augmentation de 18% par rapport au BS1.

La résistance à la compression à 7 jours se rapproche de celle du béton chargé mais à long terme elle devient supérieure à celle-ci. De plus elle reste supérieure à celle du béton de sable à base de sable de dune finement broyé ; ce qui explique la fixation de la chaux en présence des CSF (réaction pouzzolanique) qui se déroule avant le 7^e jour de cure contrairement à celle du sable broyé qui est tardive. L'augmentation de la teneur de fumée de silice au-delà de 15% ne provoque pas une augmentation de la résistance du béton. Il est également évident qu'un volume de la fumée de silice supérieure à 15% n'est pas vraiment plus efficace puisque le surplus ne peut se fixer à la surface des granulats [6].

La substitution partielle du ciment par 5% du sable de dune avec 10% de fumée de silice conduit à augmenter les performances mécaniques qui atteignent 54,3 MPa. Cette combinaison, conduit bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons de sable à hautes résistances. Alors on peut minimiser l'utilisation de la fumée de silice pour un béton de sable de résistance à la compression de 55MPa et un affaissement de 11 cm, étant donné que la fumée de silice est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton. Donc la formulation optimale qui a donné la résistance maximale avec une maniabilité acceptable est mentionnée au tableau 5.

4. ANALYSE DES RÉSULTATS À L'ÉTAT DURCI

Une fois les compositions optimales sont sélectionnées un programme expérimental est établi afin d'estimer les propriétés des bétons.

4.1. Mesure du retrait

Les essais de retrait, ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³ conservées à l'air libre à une température ambiante du laboratoire (20±2C). Les résultats obtenus, sont représentés sur la figure (1) qui donne l'évolution du retrait en fonction de l'âge de l'éprouvette.

— Le phénomène de retrait est très complexe. Il est influencé par plusieurs paramètres non quantifiables, tels que la finesse, la composition chimique du liant utilisé, la température, l'humidité ambiante, la chaleur d'hydratation du liant, le rapport E/C, et même la forme des éprouvettes a un effet sur le retrait.

Le résultat indique clairement que le retrait du béton est influencé par la quantité d'eau de gâchage. En effet lorsque le rapport E/L augmente le retrait augmente. Ceci est dû au fait que le béton contenant une grande quantité d'eau les pores sont nombreux, le séchage est ainsi augmenté.

La figure (1) montre que l'introduction de 10% de sable de dune engendre une diminution du retrait. Cette réduction

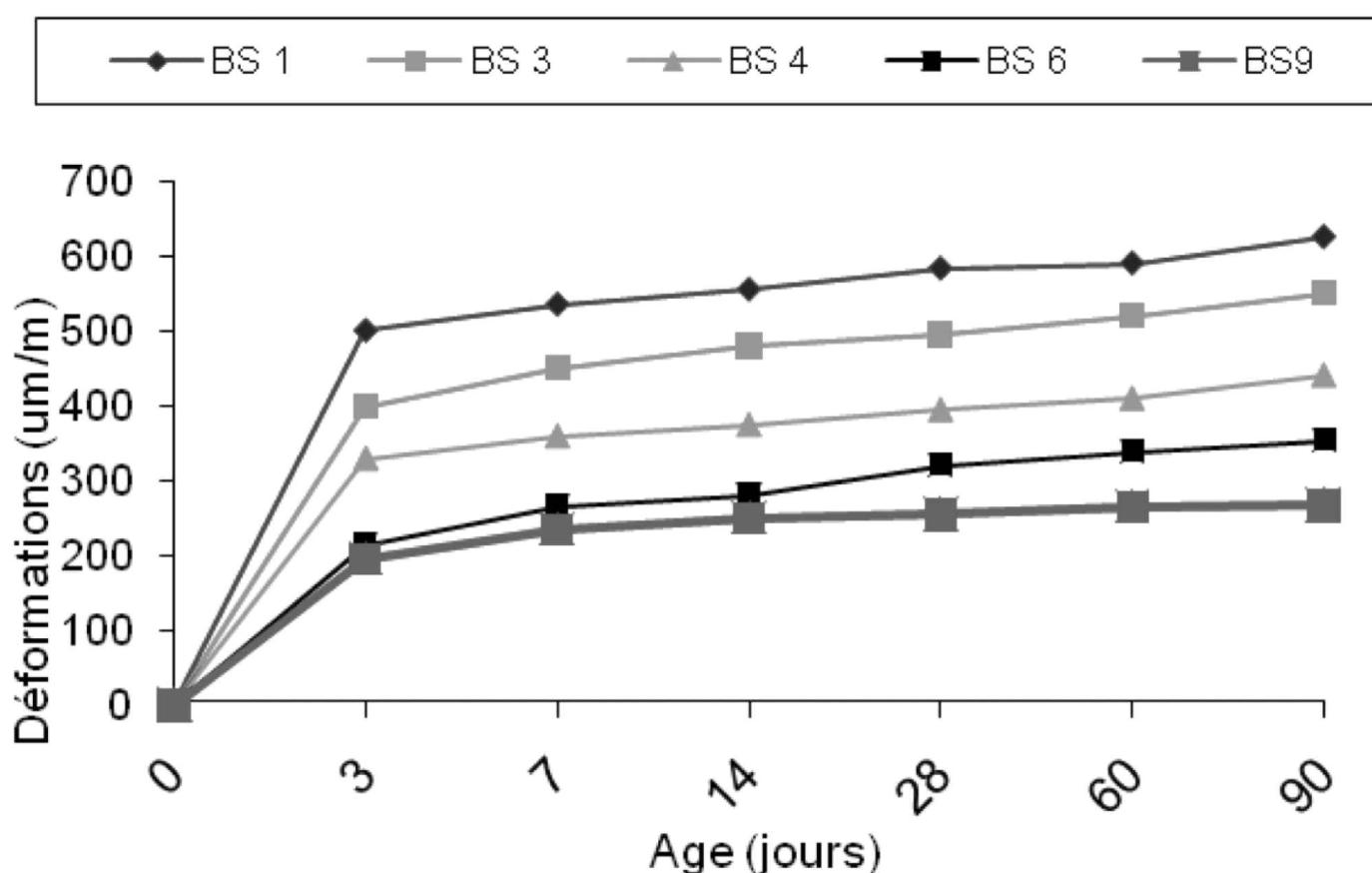


Figure 1. Influence de la nature des ajouts sur le retrait des différents bétons de sable en fonction du temps.

du retrait est encore plus prononcée avec une proportion d'ajout de 15% de fumée de silice B6 ou BS4 (5% SD + 10% FS). Ceci est dus à la formation des CSH supplémentaire, issus de la réaction pouzzolanique, qui densifient la matrice du béton empêchant ainsi sa contraction, ces derniers aussi remplissent les pores capillaires et réduisent leurs volumes libres. Ce qui évite la migration de l'eau et le séchage. En revanche la surface spécifique très grande ($> 15 \text{ m}^2/\text{g}$), les particules de la fumée de silice étant sphériques, lisses et très petites, viennent combler les interstices entre les grains de ciment. C'est grâce à un produit défloculant que cet effet granulaire peut être obtenu et conduira à une réduction importante de retrait.

L'effet pouzzolanique de la fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir une diminution nettement supérieures à celles engendrées par le SD.

4.2. Mesure de l'absorption capillaire

La mesure de l'absorption capillaire a été effectuée sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. L'essai consiste à placer les éprouvettes dans un bac contenant du sable saturé en eau sur une face d'about de l'échantillon. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uni axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces.

$$AC = 100.P/S\sqrt{t} \quad (2)$$

P : poids d'eau absorbée en g

S : surface de la face sciée en cm^2

T : temps en heures ($t = 72$ heures)

La figure (2) représente les résultats des mesures :

Ces résultats montrent que plus le rapport E/L diminue est plus l'absorption capillaire (AC) diminue.

Pour les bétons avec ajouts, l'absorption capillaire diminue lorsque le % de sable de dune augmente (5%, 10 et 20%). Ceci est attribué outre le rôle pouzzolanique partiel de SD, à son rôle physique de remplissage. De par la finesse du SD, supérieure à celle du ciment, les grains de SD s'insèrent entre ceux de ciment engendrant ainsi une diminution des dimensions et du pourcentage des pores capillaires. Les FS se comportent de la même manière que le sable de dune, néanmoins leur influence sur la compacité du béton est plus accentuée en raison de leur grande finesse et leur état vitreux qui leurs confère une importante réactivité pouzzolanique et donc une réduction notable de l'absorption capillaire.

4.3. L'effet du type de mûrissement sur la résistance en compression

Les échantillons ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) ont été mûris dans de l'eau à 20°C pendant 28 jours, d'autres cubes de bétons ont subi le mûrissement suivant : 3 jours dans l'eau à 90°C ensuite conservés dans l'eau à 20°C , jusqu'à l'échéance du temps de l'essai.

Les essais sont effectués conformément à la norme ASTM C109 (Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar).

La résistance à la compression des différents bétons en fonction de leur mûrissement est donnée dans la figure 3. La figure 3 indique une augmentation en résistance à la compression pour les différentes compositions des bétons, qui ont subi un traitement thermique de 3 jours dans l'eau à 90°C .

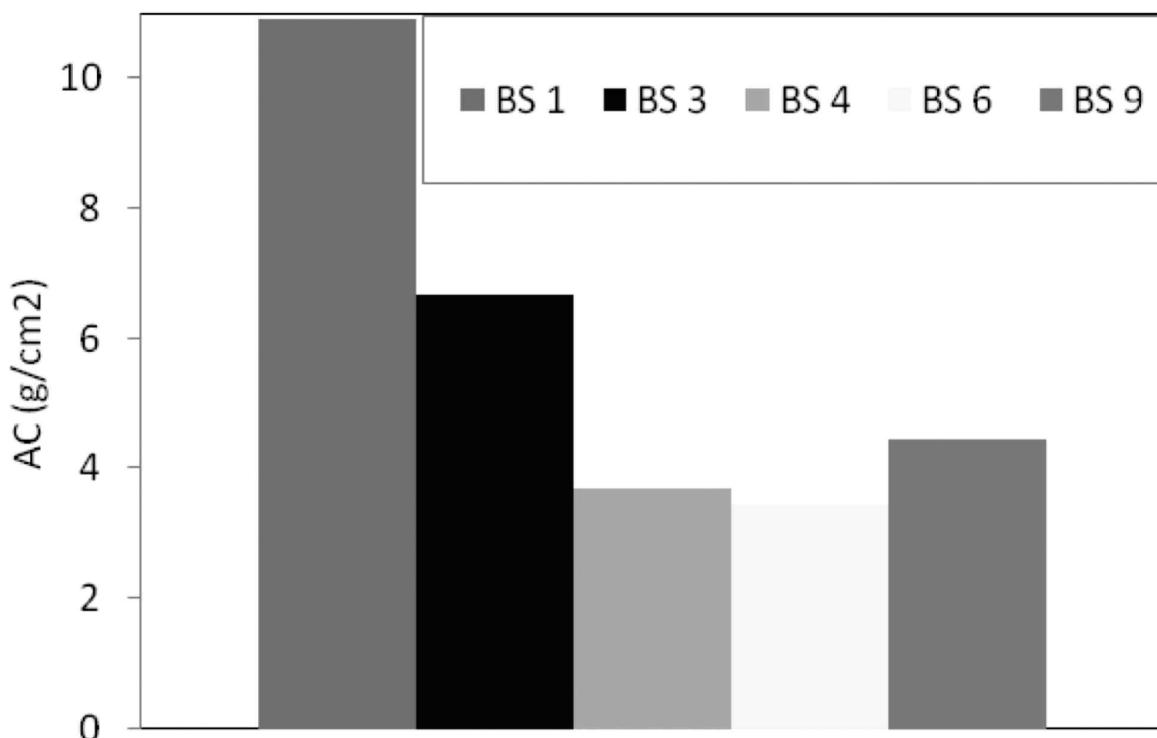


Figure 2. Absorption capillaire des différentes compositions (%).

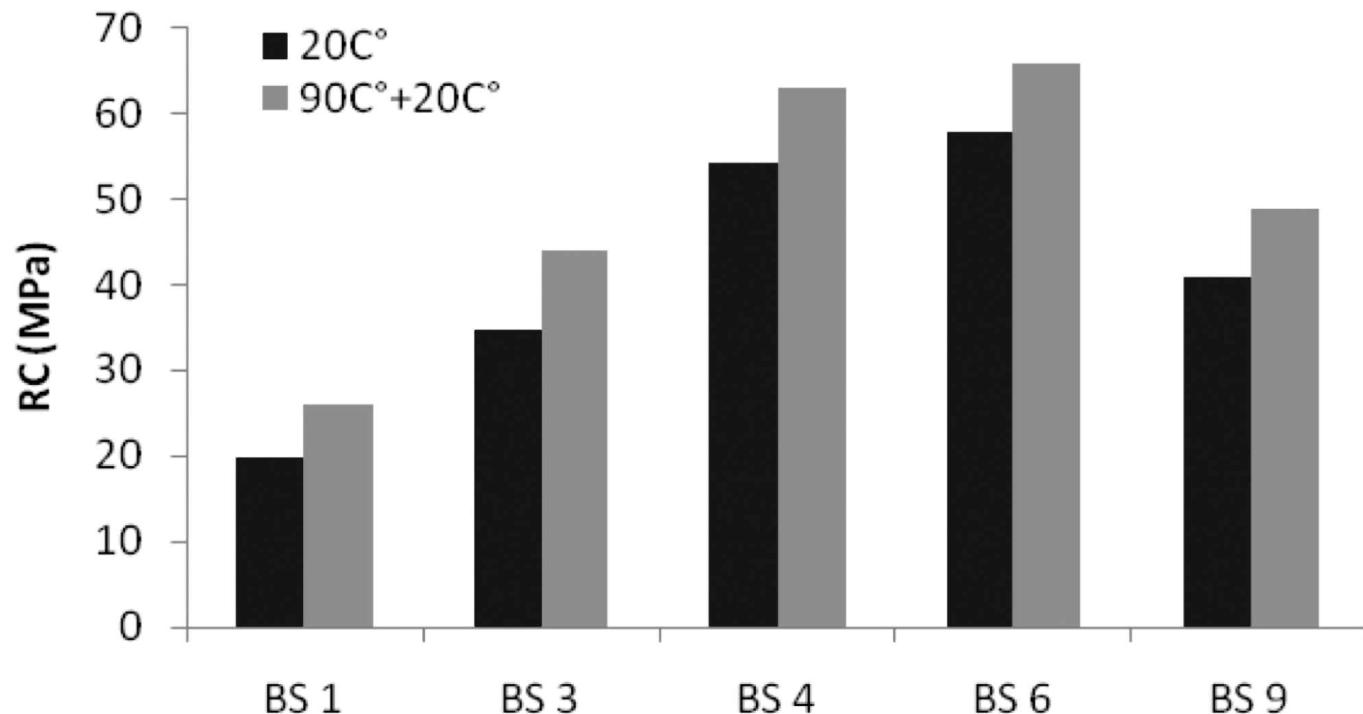


Figure 3. Résistance en compression sur cubes des BS.

Dans l'ensemble des effets produits par le traitement thermique, les bétons de sable qui contiennent de la fumée de silice ou sable de dune broyé, affichent une forte réaction pouzolanique à une température comprise entre 65°C et 90°C, qui modifié la structure des hydrates formés.

Comme la plupart des réactions exothermiques, l'hydratation du ciment est accélérée par la chaleur. Ainsi, quand on considère l'évolution de la résistance d'un béton en fonction du temps, on voit que dès l'origine, le phénomène évolue à des vitesses différentes, suivant la température de traitement appliquée [4,9].

Le dosage en eau des bétons traités par la chaleur est primordial, car l'eau est l'un des constituants du béton de sable haute résistance, qui se dilate le plus. Aiexanderson [9] a étudié les causes de perte de résistance à 28 jours sur les éprouvettes traités à la chaleur (tous les bétons qui ont été mûri par la chaleur donnent des résistances à long terme plus faibles que celles des bétons ayant durci normalement). Il a montré que les pertes sont principalement dues à l'augmentation de la porosité et à la fissuration, ainsi la pression de l'air dans les pores est responsable de ces dégradations.

Aujourd'hui on sait contrer ce phénomène en utilisant, un superplastifiant (donc un rapport E/C très faible) et la fumée de silice. De plus, dans un BS par suppression des gros granulats, on augmente son homogénéité qui fait qu'il soit proche d'un matériau céramique que d'un béton traditionnel. D'autre part, il est essentiel que la vitesse d'élévation de la température et le refroidissement se fassent lentement pour éviter la fissuration due aux chocs thermiques.

En fin le traitement thermique constitue pour les BS un moyen d'améliorer leurs performances mécaniques. Le processus s'effectue après la fin de la prise en atmosphère humide ou sèche à la pression atmosphérique.

4.4. Résistances des bétons aux sulfates

Pour évaluer la durabilité des bétons vis-à-vis l'attaque chimique, nous avons déterminé, la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion d'une série d'éprouvettes dans une solution de sulfates (5%). Les figures (4 et 5) représentent les résultats de la variation de la résistance à la compression des différents types de bétons en fonction de la durée d'exposition.

Nous constatons que la résistance à la compression des bétons de sable utilisés immersés dans l'eau potable augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute pendant 9 mois figure (4). En revanche un petit gain de résistance pour les éprouvettes mis dans la solution agressive jusqu'à l'âge de 90 jours est noté. Cette augmentation de la résistance semble être dûe à l'hydratation continue des produits anhydres de ciment et la réaction de Na_2SO_4 avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former le gypse primaire et l'ettringite primaire, qui complètent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur la résistance mécanique. Au-delà de cette période, on a observé une réduction de la résistance pour le béton de sable témoin et le béton chargé mis dans la solution agressive figure (5). La chute de résis-

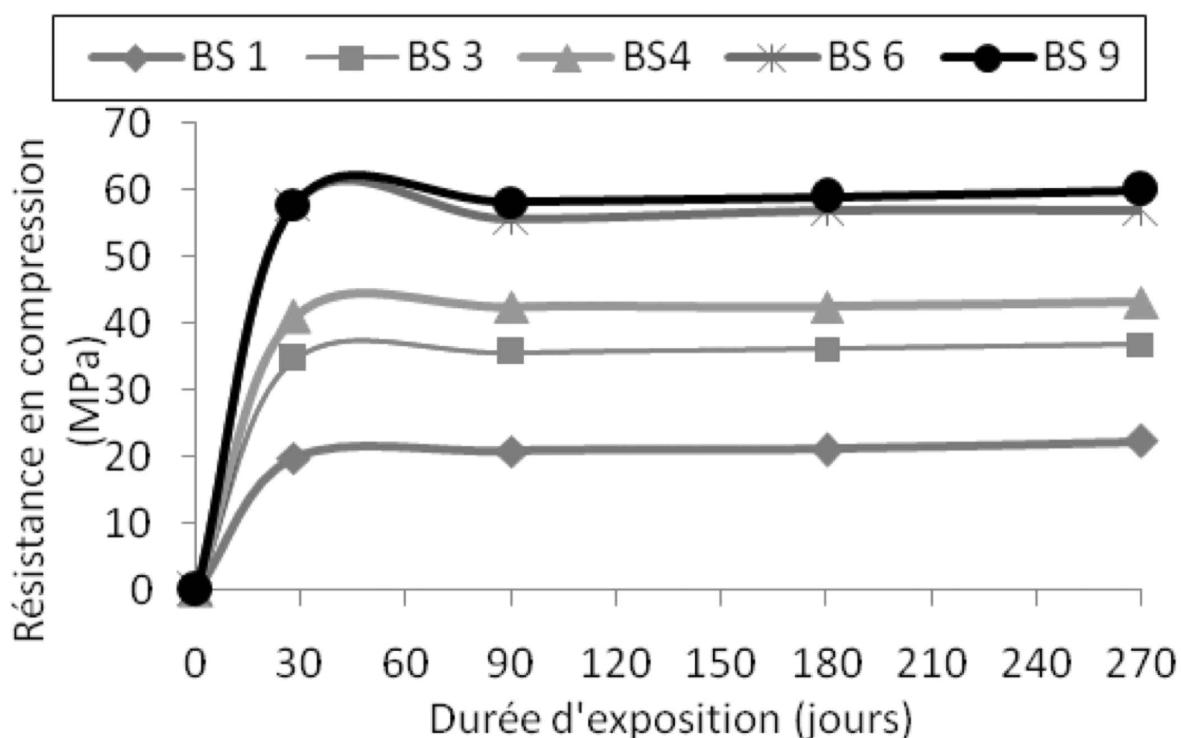


Figure 4. Résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion dans l'eau potable.

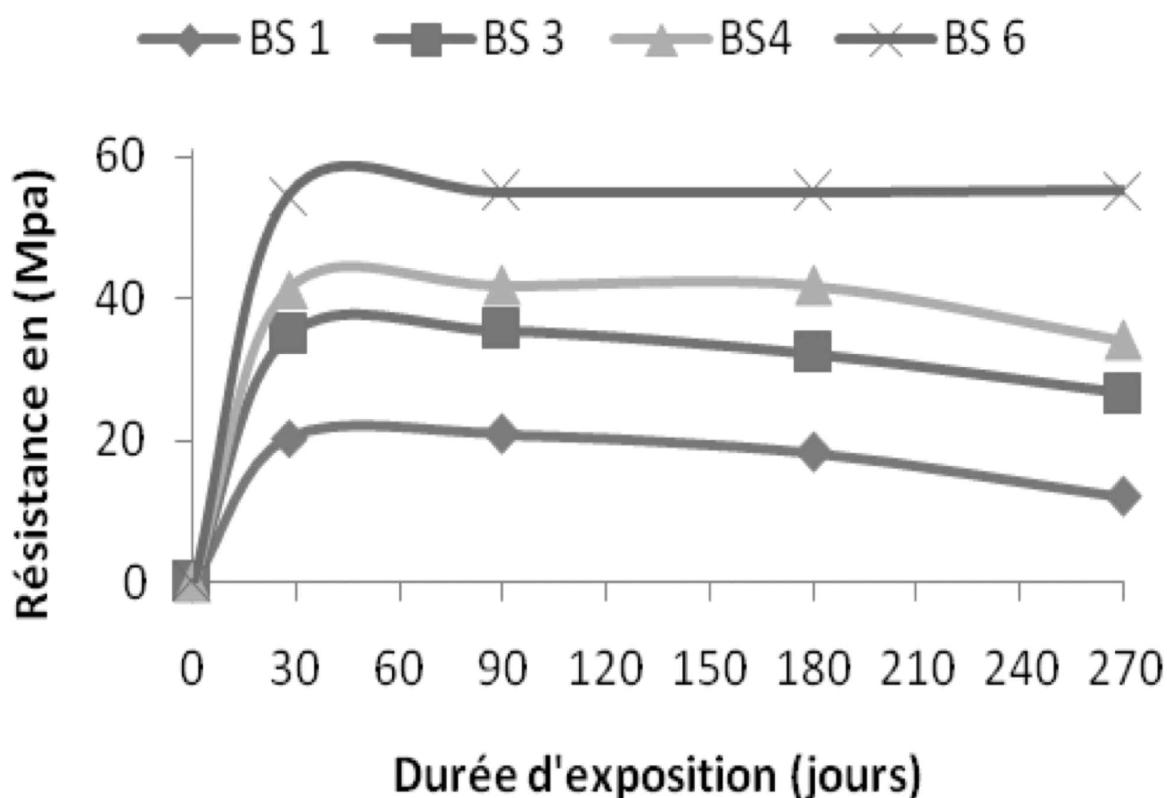


Figure 5. Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates.



tance est attribuée à la réaction entre la portlandite issue de l'hydratation du ciment avec les sulfates pour former du gypse et de l'ettringite secondaire expansive causant des microfissures qui engendrent la réduction de la résistance [10].

Pour BS9, la chute de la résistance est retardée jusqu'à 180 jours d'immersion car la substitution par le sable de dune finement broyé conduit à la formation d'hydrosilicates supplémentaires issues de la fixation de la portlandite par les ultrafines particules de silice, ce dernier va remplir les pores, en effet ce processus a une influence directe sur le squelette de la pâte du ciment et du béton et permet de diminuer les possibilités de pénétration des agents agressifs externes, on obtient ainsi des bétons plus durables et plus compacts [11].

Le BS 4 (5%SD+10%FS) et BS6 (15%FS) présente une résistance presque stable jusqu'à 270 jours, ce qui explique que la résistance à l'attaque par les sulfates de sodium est proportionnelle au taux de l'ajout incorporé au ciment. Cela est dû principalement à la réduction de la portlandite dans les bétons proportionnellement au taux de la fumée de silice substituée, ce qui retarde et empêche la formation de gypse et de l'ettringite secondaire.

En revanche le facteur temps joue un rôle important concernant la valeur ultime de l'expansion. Plus l'expansion est retardée, plus sa valeur ultime est faible, car il y a plus de temps pour un déplacement de l'ettringite dans l'espace vacant des pores capillaires de béton de sable avec

substitution partielle par la fumée de silice. En outre, la réaction pouzzolanique engendre la formation des gels secondaires C-S-H qui forment une enveloppe sur les aluminates et d'autres phases réactives, ce fait gêne la formation de l'ettringite. Le remplacement d'une partie du ciment par la FS a également réduit la quantité de C₃A dans le liant.

La fumée de silice, amorphe et riche en silice, peut se combiner à la chaux lors de l'hydratation du ciment, afin de donner des hydrates supplémentaires. Ce mélange permettra d'obtenir des performances nettement supérieures à celles engendrées par le SD.

4.4.1. Analyse par diffraction des rayons x

La diffraction des rayons X est appliquée pour identifier les produits formés dans les bétons de sable durcis conservés dans la solution de 5% de sulfates de sodium. En utilise cette méthode, pour confirmer et affiner les résultats obtenus par les essais sur les bétons. Le diffractomètre (X'Pert) utilisé est couplé à un système d'informatique. Pour les différents types de bétons, on a prélevé des échantillons en poudre de la surface des éprouvettes ayant atteintes l'âge de 270 jours.

L'analyse du spectre des figures (6 et 7), permet de signaler les constations suivantes :

- La présence des traces de portlandite [P] Ca(OH)₂
- La présence de Gypse [G] (CaSO₄.2H₂O)
- La présence de l'ettringite [E] (C₃A.3CaSO₄.32H₂O)

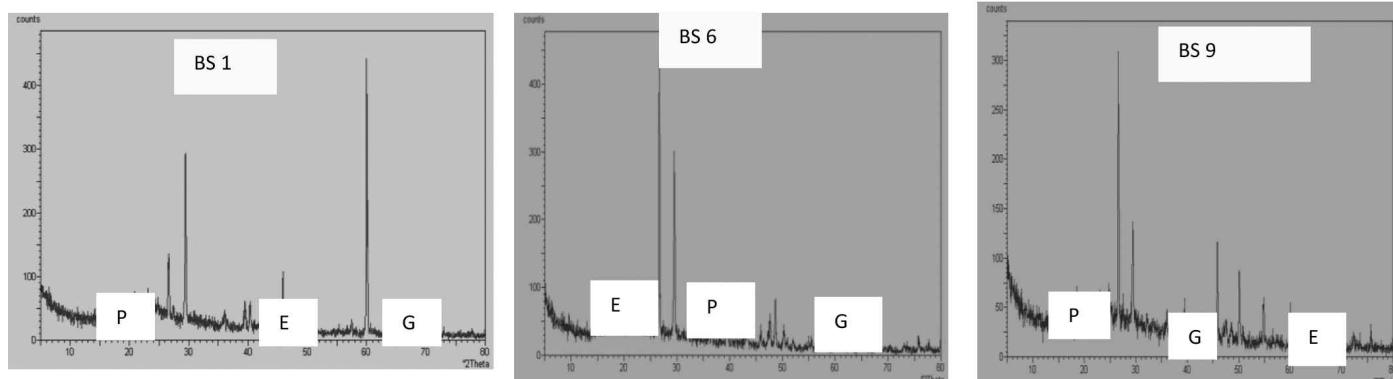


Figure 6. Béton de sable immergé dans l'eau après 270 jours.

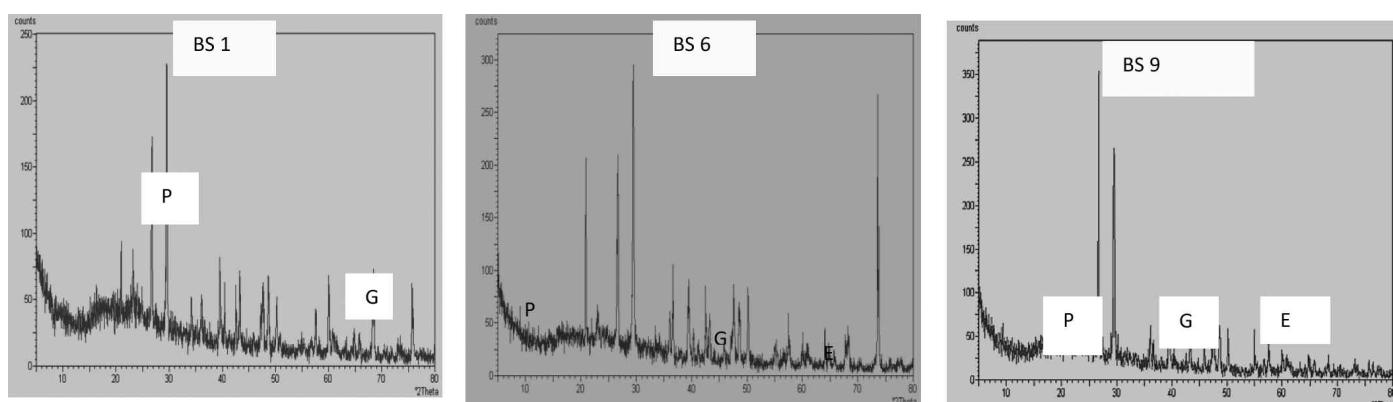


Figure 7. Béton de sable immergé dans NaSO₄ (5%) après 270 jours.

Nous constatons que pour les éprouvettes des bétons de sable avec ou sans ajouts, l'intensité de la portlandite est faible dans le milieu témoin (eau potable) qui explique l'absence d'attaque figure (6), tandis que, dans le milieu agressif figure (7) les pics caractérisent le gypse (G), l'ettringite (E) et la portlandite sont plus visibles et plus intenses dans le béton témoin que ceux du à BS avec ajouts. La portlandite dans le béton témoin, est responsable de la formation du gypse et de l'ettringite secondaire. Ces deux phases cristallines sont issus des réactions sulfatiques, ce sont des agents destructifs pour le béton, car ils sont expansifs et provoquent l'éclatement du béton suite à sa réaction avec les sulfates. Par contre dans le béton avec ajouts, l'intensité de la portlandite dans le milieu agressif est très faible, ce qui explique sa consommation par la réaction pouzzolanique suivant l'équation :



Ce résultat confirme que l'addition ultrafine permet de réduire l'effet des attaques chimiques par réduction de la perméabilité du matériau, de la taille des pores et du pourcentage de $Ca(OH)_2$. Cependant le sable de dunes finement broyé n'est pas inerte et participe à la formation de nouveaux C-S-H qui rendent le béton de sable plus dense et plus compact.

5. CONCLUSION

L'objectif de ce travail est d'étudier les possibilités d'obtenir des bétons de sable hydrauliques à hautes performances par réduction de la porosité interstitielle de la pâte de ciment en remplissant les espaces inter-granulaires du ciment par des ajouts finement broyés.

À la lumière des essais réalisés, cette étude nous a permis d'extraire certains nombres de points majeurs méritent d'être soulignés :

- La formulation et la fabrication des bétons de sable dont la résistance en compression à 28 jours atteint plus de 58 MPa est aujourd'hui possible en Algérie.
- La substitution d'une partie de sable par une quantité de gravier augmente la résistance, l'écart est de 26%. Cette augmentation est due à la qualité et la forme des granulats concassés utilisés qui donne une meilleure adhérence matrice-granulats. Le module de finesse élevé du sable utilisé ($Mf=3,2$) et la composition optimale permettant de gagner quelques MPa.
- La combinaison de la fumée de silice et de sable de dune dans les mélanges a eu comme conséquence une microstructure très dense et une faible porosité qui produisent ainsi un béton de perméabilité améliorée et donc très résistant à la pénétration des agents agressifs, cette combinaison permet d'obtenir un béton haute performance économique.

- Le traitement thermique constitue pour les BS un moyen d'améliorer leurs performances mécaniques.
- Il faut noter que, même après 270 jours de conservation dans le milieu agressif, les caractéristiques du béton de sable avec substitution partielle du ciment par la fumée de silice ne sont pas affectées par les dégradations, probablement à cause de la porosité très faible qui forme un frein à la pénétration des agents agressifs et à la sortie des cations.

6. RÉFÉRENCES

- [1] Sablocrete « Béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation » – Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1994.
- [2] Aïtcin P.C. « Bétons haute performance » Édition, Eyrolles, Paris, 2001.
- [3] A. Guettela, B. Mezghiche, R. Chebili. « Strength comparison between rolled sand concrete and dune sand concrete ». The 6th international conference on concrete technology for developing countries. Jordan 2002, pp. 621-630.
- [4] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M.M. Khenfer, A. Bali, M. Queneudec. « Effect of the addition of wood shavings on the termal conductivity of sand concrets : Experimental study and modelling ». Construction and building materials. 21 (2007), pp. 662-668.
- [5] M. Bederina, B. Laidoudi, A. goullieux, M.M. Khenfer, A. Bali, M. Queneudec. « Effect of the treatment of wood shavings on the physio-mechanical characteristics of wood sand concretes ». Construction and building materials. 23 (2009), pp. 1331-1315.
- [6] K. Gadri, A. Guettela, L. Zeghichi. « Effect of silica fume in sand concrete for repair purposes. Concrete in the low carbon era ». Proceedings of the international conference, Dundee – Scotland – Uk 2012. pp. 1392–1402.
- [7] D Benamara, B. Mezghiche. « Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux (BHP) » Courrier du Savoir scientifique et technique. Revue périodique de l'Université Mohamed Khider Biskra – Algérie, ISSN – 1112-3338, Avril 2010, N° 10, pp. 09-14. Biskra, 2010.
- [8] S. Guettala et B. Mezghiche « Influence De L'addition Du Sable De Dune En Poudre Au Ciment Sur Les Propriétés Des Bétons ». European Journal Of Environmental And Civil Engineering - Taylor & Francis Vol. 15(10), pp. 1483-1507. Décembre 2011.
- [9] J. Alexanderson « Sireng losses in He& Cured Concrete ». Swedish Cernent and Concrete ReserchInstihi at the RoyrIIkstzlute of Techoilogy, Stochoim, pp. 132-135, 1992.
- [10] D. Achoura, B. Redjel, R. Jauberthiel et C. Lanos « Influence des conditions de maturation sur les comportements physico-chimique et mécanique des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment », Matériaux & Techniques 96, pp. 189-199, 2008.
- [11] A. Guettela, B. Mezghiche. « Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder ». Construction and building materials 25 (2011). pp. 1263-1269.