

INCORPORATION DES SABLES CONCASSES A DIFFERENTS TAUX DE FILLERS DANS LA COMPOSITION DES BETONS A TRES HAUTES PERFORMANCES: COMPORTEMENT MECANIQUE ET DURABILITE

D. Chiheb, M. Belaoura¹, M.N. Oudjit² et A. Bali³

Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
(USTHB), B.P 32 EL ALIA B.E.Z ALGER.

¹Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP). 1Rue Sidi Garidi Vieux Kouba
Alger, Algérie

²Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
(USTHB), B.P 32 EL ALIA B.E.Z ALGER.

³Faculté de Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique (ENSP). El Harrach Algiers Algeria
d_chiheb@yahoo.fr

(Received 4 February 2016 - Accepted 2 November 2016)

RESUME

Chiheb, D., Belaoura, M., Oudjit, M.N. et Bali, A. 2016. Incorporation des sables concassés à différents taux de fillers dans la composition des bétons a très hautes performances: comportement mécanique et durabilité. Lebanese Science Journal, 17(2): 146-165.

La présente étude s'intéresse à la caractérisation des Bétons à Très Hautes Performances en valorisant les sables de concassage à taux élevés de fines calcaires, disponibles en grandes quantités en Algérie, en tant que ressource alternative aux sables roulés surexploités. Les paramètres étudiés ont été le taux de substitution des sables concassés aux sables roulés, le dosage en fumée de silice, en superplastifiant et en ciment. Plusieurs essais ont été réalisés tels que les résistances mécaniques, le retrait et une étude de durabilité afin de cerner les mécanismes qui régissent le comportement de ces nouveaux bétons. Les résultats montrent que le sable de concassage est un matériau fort prometteur, il ouvre de grands horizons pour optimiser les BTHP en Algérie, puisqu'il permet d'obtenir à la fois une très bonne compacité, des meilleures performances mécaniques, un très bon comportement différé et d'excellents indicateurs de durabilité lorsqu'il est associé au sable roulé.

Mots-clés: BTHP, sables de carrières, fillers calcaires, résistance mécanique, anion chlorure, retrait

ABSTRACT

Chiheb, D., Belaoura, M., Oudjit, M.N. and Bali, A. 2016. Incorporation of crushed sand at different rates of fillers in the composition of concretes with very high performances: mechanical behavior and durability. Lebanese Science Journal, 17 (2): 146-165.

This study focuses on the characterization of concretes Very High Performance comparing crushed sand to high levels of fine limestone available in large quantities in Algeria as an alternative resource to rolled sand. The parameters studied were the sand substitution rate to roll crushed sands, and the dosage of silica fume, cement and superplasticizer. Several tests were performed such as mechanical strength, shrinkage and a sustainability study to identify the mechanisms that govern the behavior of these new concretes. The results showed that the crushed sand is a very promising material; it opens up great horizons to optimize VHPC in Algeria, since it provides good compactness, better mechanical performance, very good different behavior and excellent sustainability indicators when combined with rolled sand.

Keywords: VHPC, limestone fillers, mechanical strength, chloride anion, shrinkage.

INTRODUCTION

L'Algérie est un pays en fort développement, les nombreux projets dans les diverses branches du génie civil génèrent une forte consommation des matériaux. La vulnérabilité de la production nationale en matière de sable et le lancement des programmes quinquennaux de réalisation des grands projets (1 million de logements, Grande mosquée d'Alger, 152 ouvrages d'art, l'autoroute des hauts plateaux 1300 km...etc.) posent la problématique de la disponibilité de ce matériau à l'échelle de l'ensemble des wilayas du pays. Cette problématique a suscité la préoccupation du ministère des Ressources en eau, au point de s'atteler à l'élaboration d'un nouveau décret en 2005 [Loi n° 05-12, 2005]. Cette loi sévira d'une manière très stricte concernant l'extraction illicite du sable des oueds qui provoque la pollution de la nappe phréatique non profonde. En 2007, une loi réglementant modifiant et complétant celle du 5 décembre 2005 avait été promulguée, organisant la généralisation progressive de l'usage des sables de concassage dans le bâtiment, en précisant les spécifications techniques auxquelles doivent répondre ces matériaux. Une cartographie nationale a été mise en place en vue de répertorier les carrières susceptibles de fournir des sables de concassage, et des titres miniers ont été attribués pour la production exclusive de ce type de sable. Les sables de construction devraient provenir, désormais, exclusivement des carrières de concassage sur des gîtes de substance minérale. D'où la nécessité de vulgariser le processus de fabrication du sable de carrière, de définir les différents types de matériels et équipements de production du sable de carrière et d'évaluer l'économie de la filière granulats. De nombreuses régions du monde vivent cette situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats à béton. Les sables de concassage sont très souvent l'unique alternative. Il faut cependant qu'ils répondent aux critères de qualité propres à cet usage et être disponibles en quantités suffisantes, à prix raisonnables.

Cette étude s'intéresse à la caractérisation et à la mise au point d'une formulation de BTHP en utilisant des matériaux locaux Algériens en l'occurrence le sable de carrière présentant un taux élevé de fillers calcaires, disponibles en grandes quantités en Algérie en tant que ressource alternative aux sables roulés surexploités. Au vu des normes ces sables sont considérés comme non conformes alors que leur introduction dans les mélanges cimentaires a

donné des bétons performants (Y.Benachour, 2008) et (Z.Guemmedi et al, 2008). Des études récentes (Joudi-Bahri.I., 2012), (Sandeep. K.S, 2014), (Sangjun. P, 2012) ont montré que les sables de carrières peuvent modifier et même améliorer les propriétés des matériaux cimentaires, mais d'autre part, aucune méthodologie expérimentale rigoureuse n'a été proposée pour évaluer la contribution de ces sables aux propriétés des matériaux. L'objectif principal de cette étude est d'analyser et de quantifier la contribution de ces sables ainsi que l'effet liant des fines calcaires résultant de leurs effets physico-chimiques, sur les performances physiques, mécaniques et de durabilité des Bétons à Très Hautes Performances. En s'affranchissant ainsi de l'effet granulaire on peut dégager les domaines d'utilisation optimisée de ces sables dans les mélanges cimentaires.

MATERIAUX ET PROCEDURES

MATERIAUX UTILISES

Ciment

Le ciment que l'on envisage d'utiliser pour réaliser cette étude est le ciment portland artificiel CEM I 52.5 R conformément à la norme européenne EN 197-1 [EN 197-1, 2001] provenant de la cimenterie Lafarge Algérie. Les compositions, chimique et minéralogique (Bogue) sont présentées dans le Tableaux .1.

TABLEAU 1

Compositions du Ciment

Composition de Bogue						
Constituants	C ₃ S	βC ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse	Impuretés inertes
(%) pondéral	56.9	21.33	8.38	8	3.51	2.50
Caractéristiques mécaniques et physiques						
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)		Retrait en μm/m à 28 jours	Début de prise	Chaleur en J/h à 12 heures
		2 jours	28 jours			
3200	3150	25	60	510	03h05min	185
Composition élémentaire (%)						

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂	Ca libre
22.30	4.84	2.63	66.2	0.83	1.63	0.18	0.19	1.30	0.53

Eau

L'eau utilisée pour la confection des mélanges est l'eau potable du réseau.

Granulats

Les granulats qui ont été mis à notre disposition sont des granulats locaux, issus de la carrière ENG (Entreprise Nationale des Granulats, unité d'El Khroub de la région constantinoise - Algérie). Ces granulats sont concassés et lavés et, de ce fait, présentent une excellente interface avec la matrice cimentaire. De plus, ils présentent un faible coefficient d'absorption d'eau, ce qui indique une faible porosité intragranulaire de ce matériau.

Graviers : Les graviers utilisés dans cette étude sont de classe granulaire allant de 3 à 15 mm. Ils sont de nature calcaire (la teneur en calcaire varie entre 41 à 61%), Leur poids spécifique est de 2,60; à savoir:

- **Un gravier de classe granulaire 3/8**, de masse volumique apparente de 1863 kg/m³;
- **Un gravier de classe granulaire 8/15**, de masse volumique apparente de 2066 kg/m³.

Sables : Pour cette étude, nous avons utilisé les sables suivants :

- **Un sable naturel roulé (SR)** propre, riche en gros éléments pour la compacité du squelette et l'ouvrabilité, il est de classe granulaire 0/5 mm, ayant un poids spécifique de 2.50 et un module de finesse de 3.18.
- **Un sable concassé (SC)** de classe granulaire 0/4 mm, ayant un pourcentage en fines (< 80µm) de 15 % et un module de finesse de 2.82. Ce sable sera combiné au sable roulé à différentes proportions pour formuler les différents mélanges.

Les caractéristiques des granulats sont représentées sur le Tableau.2.

TABLEAU 2

Caractéristiques des Différents Granulats

Caractéristiques	Sable Roulé (SR)	Sable Concassé (SC)	Graviers	
	Classe	0/5	0/4	3/8
Nature	Siliceux	Calcaire	Calcaire	Calcaire
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.52	1.36	1.86	2.06

Masse volumique absolue (g/cm³)		2.62	2.62	2.60	2.60
Coefficient d'absorption		0.2	0.3	0.3	0.3
Equivalent de sable	ES (à vue)	93	86.33	/	/
	ES (à piston)	90.5	84.6	/	/
Module de finesse		3.18	2.82	/	/
Pourcentage en fines (%) la fraction fine (< 80µm)		4.28	15	/	/

Superplastifiant

L'adjuvant utilisé pour la confection du béton BTHP est un superplastifiant haut réducteur d'eau local, de forme liquide, conforme à la norme NF EN 934-2 (AFNOR NF EN 934-2, 2005). C'est un superplastifiant pour les bétons de nouvelles générations à base de poly-carboxylates modifiés, dosé à 40 % d'extrait sec, de (MEDAPLAST SP40). Les caractéristiques du superplastifiant sont présentées dans le Tableau 3.

TABLEAU 3
Caractéristiques Générales du Superplastifiant

Forme	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore
liquide	marron	8.2	1,20 ± 0,01	< 1g/L

Additions

L'addition minérale utilisée est la fumée de silice: Il s'agit d'un MEDAPLAST HP adjuvant à base de micro silice, caractérisé par une densité absolue de 2,2 et sa teneur en silice > 85 %. La fumée de silice est conforme à la norme NF EN 13263-1 (AFNOR NF EN 13263-1, 2005). Ses caractéristiques générales sont présentées dans le Tableau.4.

TABLEAU 4
Caractéristiques générales de la fumée de silice

Propriétés physiques		Composition chimique %							
Surface spécifique (cm ² /g)	Densité	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
200 000	2.20	96.0	0.9	0.6	1.6	0.2	0.45	0.9	0.2

Valorisation du sable de concassage pour la formulation des bétons usuels

Dans une première étape, la mise au point des compositions s’est appuyée sur une même formulation de base, en fixant le maximum de paramètres pour mettre en évidence l’influence du sable concassé. Les mélanges ont été évalués avec un rapport eau/ciment de 0.40 et un dosage en ciment de 450 kg/m³, la résistance à la compression visée était de 40 MPa. Le béton usuel a été formulé selon la méthode de CES Dreux-Gorisse. Les différentes formulations préliminaires ont été testées et caractérisées expérimentalement, sur la base d’ajustements successifs des quantités de sable roulé (SR) et concassé (SC), jusqu’à l’obtention de la formulation définitive répondant aux critères souhaités. Les sables roulés ont été successivement substitués à 20, 35, 50, 65 et 80% par de sable concassé comme le montre la figure suivante.

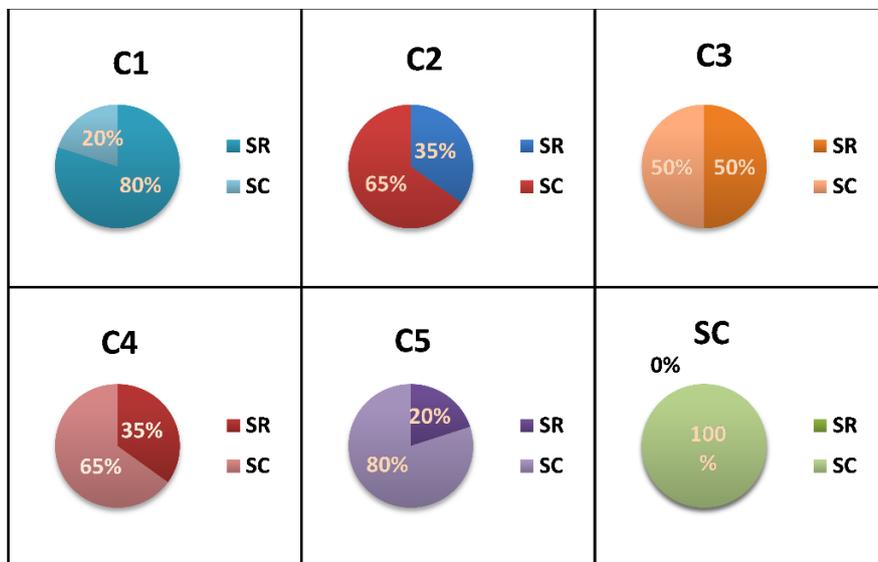


Figure 1. Différentes proportions des sables concassés substitués au sable roulé

Le choix des formulations est guidé par l'analyse de l'influence de la nature minéralogique des Sables concassés sur le comportement de ces bétons en termes de résistance mécanique. Le mélange donnant la plus forte résistance sera sélectionné pour l'élaboration des formulations des bétons THP.

La variation de la résistance à la compression des six bétons est présentée dans la figure.2.

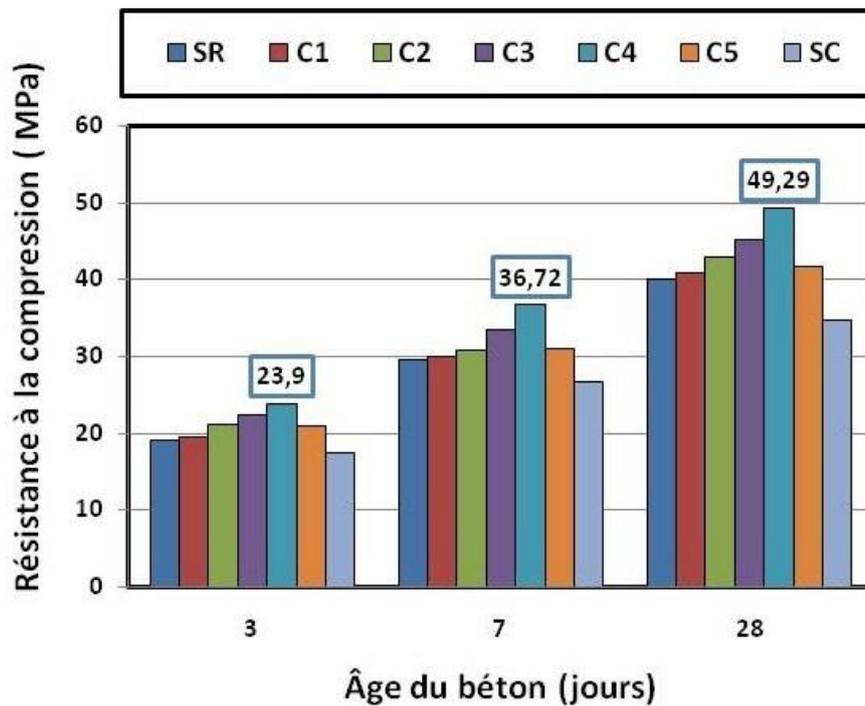


Figure 2. Evolution de la résistance à la compression des différents bétons usuels à base de sable roulé (SR), sable concassé (SC) et sables corrigés.

Les résultats montrent qu'au bout de 28 jours, la substitution de 20 à 80 % de sable concassé aux sables roulés a permis une augmentation de résistance à la compression de 20.5 % pour un optimum de sables concassés de l'ordre de 65 % par rapport au béton de référence (SR). Au-delà de ce pourcentage, on enregistre une chute de résistance qui, toutefois reste meilleure par rapport au béton de référence (SR) pour des ajouts allant jusqu'à 80 % et ce, malgré l'augmentation de la porosité avec l'ajout de fines apporté par les sables concassés. L'amélioration de résistance peut s'expliquer par la formation des aluminates et des carboaluminates du moment qu'il y a réaction chimique entre le carbonate de calcium et l'aluminate tricalcique (Soroka et Stem. 1976).

Mise à part l'effet positif de fines apportées par les sables concassés, leur forme a un effet appréciable sur la maniabilité du béton. Ces sables nécessitent certainement une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et de leurs absorptions (Gallias et col 2000),

mais ils sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités (De Larrard 2000) ; contrairement au granulats roulés, leur consommation en ciment est plus forte à cause de leur mauvaise adhérence à la pâte de ciment.

La combinaison C4 (65 % SC+ 35 % SR) a donné la plus forte résistance, elle sera donc retenue pour la formulation des BTHP.

Valorisation du sable de concassage pour la formulation des BHP et des BTHP

Dans une deuxième étape et après avoir cherché à distinguer la combinaison de sable la plus apte à rentrer dans la composition des bétons THP (Combinaison C4 : 65 % SC+ 35 % SR), l'étude expérimentale se poursuit par la mise au point de plusieurs formulations de BTHP à base de sable concassé seul (BTHPSC), sable roulé seul (BTHPSR) et le mélange des deux sables (BTHPC4), en balayant en ciment (560, 580, 600 et 620 kg/m³) avec un rapport E/C compris entre 0.25 et 0.268 et 10% de fumée de silice. L'ensemble des résultats fera l'objet d'une comparaison systématique entre les BTHP selon le type de sable, le dosage en ciment et l'addition.

Pour s'affranchir de l'influence des autres paramètres de formulation, nous nous sommes appuyés sur une formulation (Belaoura, M. et al, 2013) qui s'adapte le mieux aux BHP et BTHP, il s'agit de la méthode des coulis (De Larrard.F 1997). Cette méthode consiste à formuler un coulis de référence ayant la même composition que le BTHP de référence moins l'eau de mouillage des granulats. Le dosage en super plastifiant est obtenu en mesurant l'évolution du temps d'écoulement en fonction du dosage croissant en adjuvant (Malier Y., 1992), la courbe obtenue (voir figure 3), nous indiquera la dose de saturation qui est dans notre cas de 1.5%.

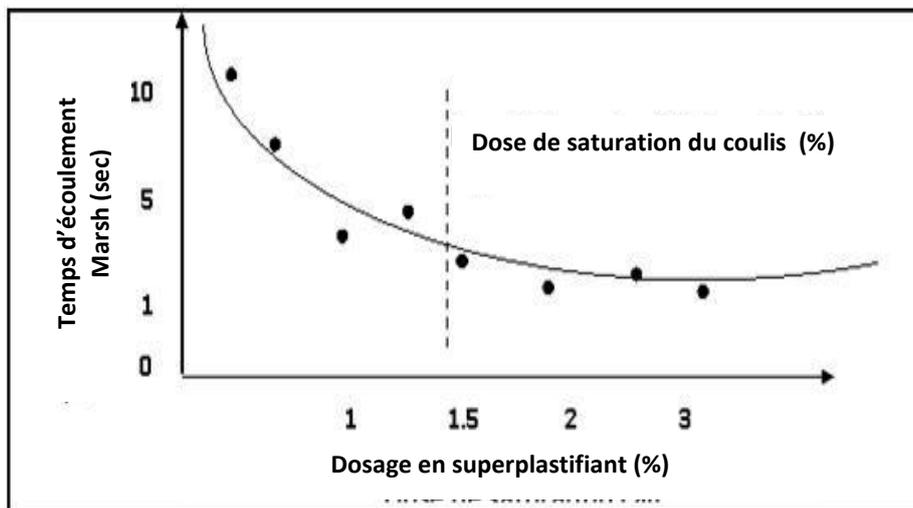


Figure 3. Variation du temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant

Le tableau 5 présente la formulation des 12 mélanges de BTHP.

TABLEAU 5

Formulation des BTHP à 10% de Fumé de Silice.

	Ciment Kg/m ³	E/C	Eau l/m ³	Gravier Kg/m ³	Sable Kg/ m ³		Super plastifiant l/m ³	Fume de silice Kg/ m ³	Total Kg/m ³
					SR	SC			
BTHP1(SR)1	560	0.250	140	1187	478	/	11.17	56	2432.17
BTHP1(SR)2	580	0.254	147.32	1168	481	/	10.32	58	2444.64
BTHP1(SR)3	600	0.251	150.60	1065	453	/	9.50	60	2338.1
BTHP1(SR)4	620	0.251	155.62	1054	461	/	10.04	62	2362.66
BTHP1(C4)1	560	0.267	149.52	1062	407	219	13.65	56	2467.17
BTHP1(C4)2	580	0.271	157.18	961.2	435	261	13.25	58	2465.53
BTHP1(C4)3	600	0.268	160.8	972.8	442	238	12.54	60	2486.14
BTHP1(C4)4	620	0.265	164.3	940.4	409	222	12.34	62	2430.04
BTHP1(SC)1	560	0.264	147.84	1032	/	532	14.62	56	2342.46
BTHP1(SC)2	580	0.267	154.86	984.5	/	541.8	14.52	58	2333.68
BTHP1(SC)3	600	0.265	159	994.54	/	527.4	14.54	60	2355.48
BTHP1(SC)4	620	0.264	163.68	1054.7	/	530	14.36	62	2444.74

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Essais sur béton THP frais

La caractérisation à l'état frais des bétons THP s'est limitée aux essais recommandés par les normes à savoir les masses volumiques, l'affaissement au cône d'Abrams, et la quantité d'air occlus.

Essais sur béton THP durci

Résistances mécaniques

L'une des toutes premières caractéristiques recherchées est la capacité de ces bétons à résister aux efforts de compression et de traction en flexion 3 points. Nous avons confectionné pour ces essais des cubes (10×10×10cm³), d'extrémités planes et parallèles de façon à pouvoir les écraser par contact direct avec les plateaux de la presse. Une fois démoulées, les éprouvettes

subissent une rectification et sont conservées dans l'eau jusqu'à l'échéance déterminée (1, 7, 28 et 90 jours).

Retrait total

Les mesures ont été effectuées sur trois éprouvettes prismatiques de dimension 7 x 7 x 28 cm³ après démoulage à 24 heures. Elles sont conservées dans une salle climatisée à 20 ± 1°C et à 50 ± 5% d'humidité relative. Nous considérons que les échanges hydriques du matériau avec l'ambiance sont possibles.

Durabilité

Absorption d'eau par capillarité

Cet essai a été effectué selon la procédure AFREM (AFREM, 1997) sur des échantillons en forme de disques de 11,8 cm de diamètre et 5 cm de hauteur obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques (Ø11,8 x h23,6 cm) conservées 28 jours à 20 ± 2°C et 95 ± 5% d'humidité relative. Les valeurs du coefficient d'absorption capillaire sont calculées pour les échéances suivantes : 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 et 24 heures.

Diffusion des anions chlorure

Pour la mesure de la perméabilité, des éprouvettes cylindriques (11x22) cm² ont été confectionnées et démoulées après 24 heures et mises dans l'eau jusqu'à 28 jours dans une salle à 20°C. Les échantillons sont ensuite sciés pour obtenir trois disques d'épaisseur 5 cm. Les dosages ont été réalisés conformément à la procédure AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 1997). Les échéances des prélèvements sont effectuées matin et soir durant 7 jours.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

ETAT FRAIS

Les résultats des tests de caractérisation réalisés sont présentés dans le Tableau 6.

TABLEAU 6

Comportement des BTHP à l'Etat Frais.

Dosage en ciment	Masse volumique (kg/m ³)			Affaissement (cm)			Air occlus (%)		
	BTHP (SR)	BTHP (C4)	BTHP (SC)	BTHP (SR)	BTHP (C4)	BTHP (SC)	BTHP (SR)	BTHP (C4)	BTHP (SC)
560 (kg/m ³)	2484	2485	2425	21	18	18	1.9	1.8	1.8

580 (kg/m³)	2491	2493	2446	20	16	18	2	1.9	2
600 (kg/m³)	2492	2493	2454	19	17	17	2.1	1.8	2.1
620 (kg/m³)	2494	2496	2467	17	15	17	2.2	2.1	2.3

Masses volumiques

La masse volumique ρ à l'état frais du béton est calculée en kg/m³ lors de chaque coulage conformément à la réglementation en vigueur [NF EN 12350-6 1999]. Une moyenne sur trois valeurs permet de déterminer cette dernière. Les résultats obtenus conduisent à la conclusion que la masse volumique est très influencée par la présence des fillers calcaires apportés par les sables concassés. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées pour les mélanges incorporant 65% de sables concassés (BTHPC4) et qui ont dépassé celles des (BTHPSR) pour chuter par la suite pour les bétons (BTHPSC).

Ceci peut s'expliquer par le fait que les fillers commencent en premier lieu à remplir les vides autour des grains de sable, jusqu'à l'optimum. Pour de plus grandes quantités d'ajouts de fillers, les vides étant complètement remplis, l'excès de filler occupe la place des grains de sable, d'où une diminution de la proportion de sable, et, par conséquent, de la densité du mélange (Bédrina et al. 2005). Puisque la surface spécifique des fillers est importante cela contribue à la création de nouveaux pores qui engendrent une augmentation de la porosité et une diminution de la densité.

Affaissement

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est réalisé suivant les prescriptions de la norme [NFEN 12350-2 1999]. Nous avons pratiqué des mesures d'affaissement sur les différents mélanges. Les résultats de la maniabilité montrent aussi que le mélange le plus ferme est celui à base de sable roulé substitué à 65% de sable concassé (BTHPC4) ; on retrouve là un effet bénéfique de la fumée de silice comme stabilisant de la pâte liante fraîche.

Air occlus

Cet essai est réalisé en suivant la norme [NF P 18-353, 1985]. A l'opposé de la densité, le pourcentage d'air diminue avec l'ajout de fillers, l'optimum est observé pour le mélange (BTHPSC). Pour les mélanges (BTHPSR) et (BTHPC4), les valeurs sont presque constantes. Les valeurs obtenues ne dépassent pas les 3%, elles sont comprises entre 1.7 et 2.4 %. Elles sont globalement raisonnables et proches pour l'ensemble des formulations.

ÉTAS DURCIS

Evolution des résistances à la compression des Bétons THP

L'évolution de la résistance à la compression des mélanges de BTHP est représentée dans la figure suivante:

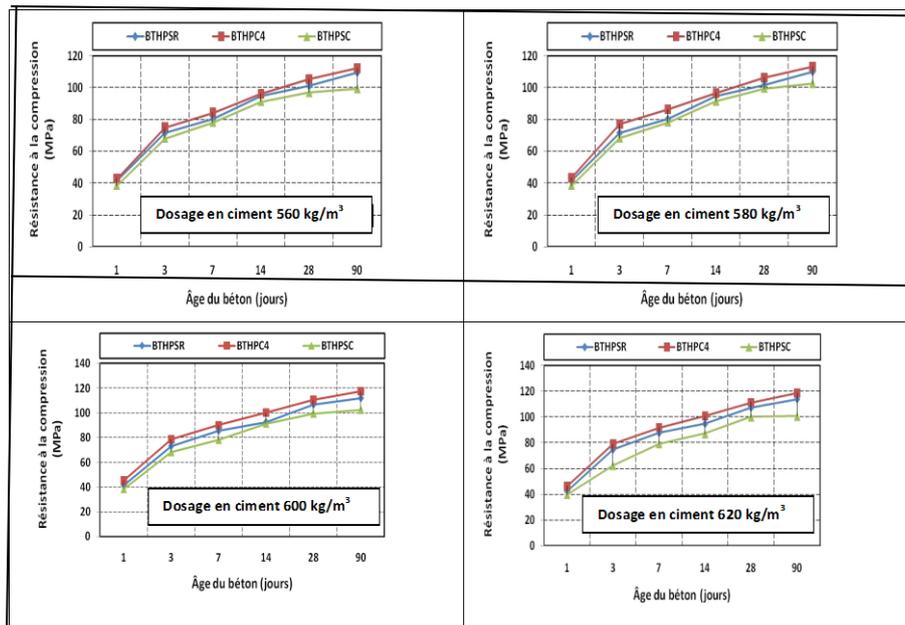


Figure 6. Evolution de la résistance à la compression des différents BTHP à un dosage en ciment de 560, 580, 600 et 620 kg/m³ à 10% de fumée de silice.

Les résultats montrent que l'ajout de sable concassé au sable roulé a permis d'avoir des BTHP ayant des résistances à la compression très intéressantes qui passent de 104,9 MPa à 111.5 MPa à 28 jours. Cette résistance continue son ascension jusqu'à atteindre 112.3 MPa à 90 jours.

Nous avons enregistré donc une augmentation de résistance à la compression de 4 à 8 MPa par rapport au (BTHPSR). Quant aux bétons (BTHPSC), nous avons enregistré des résistances qui n'atteignent que 70 à 85 % par rapport au béton corrigé. La résistance à la compression dépend fortement du dosage en fines calcaires apportés par les sables de carrière et le maximum de résistance est atteint avec un taux de substitution de 65% de sable concassé. Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution ; c'est le cas des mélanges (BTHPSC) qui ont enregistré des chutes de résistance. Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats

(Boziljkov, 2003). D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation (Ye, 2007), mais également en modifiant les produits d'hydratation formés (Xiong, 2003). Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) et a tendance à être négligeable à long terme. Les résultats obtenus ont montré que le dosage optimal en fumée de silice pour l'obtention des hautes résistances a été enregistré aux alentours de 10% de fumée de silice par rapport au poids du ciment pour toutes les séries de BTHP testée lors de cette campagne d'essais. Ce résultat est en parfait accord avec la littérature. Au-delà de ce pourcentage, les performances espérées risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en œuvre apparaissent.

Évolution de la résistance à la traction par flexion trois points

Pour déterminer la résistance à la traction d'un béton, les expérimentateurs privilégient généralement l'essai de flexion qui est moins complexe à mettre en œuvre que l'essai de traction directe. Cet essai a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques 7×7×28 cm. Les échantillons sont soumis à un moment de flexion par application d'une charge constante et continue au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs en trois points sur une presse à vérin hydraulique et d'une capacité de 15 tonnes. La mesure est quasi-statique et la vitesse d'asservissement du compactage est très faible, de 0,1 kN/s ±1% suivant la norme [l'EN 12390-5]. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 7.

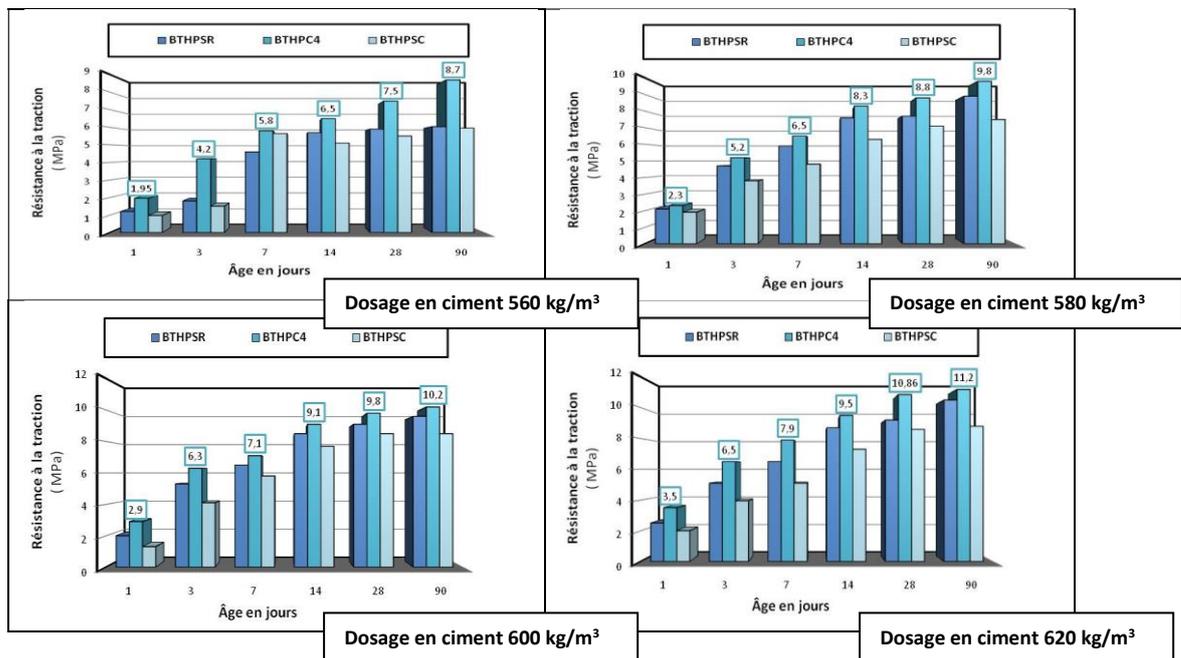


Figure 7. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge du béton des différents BTHP à différents dosages en ciment

Les résultats montrent que l'ajout de sable concassé au sable roulé a permis d'avoir des BTHP ayant des résistances à la traction qui passent de 7.5 MPa à 10.86 MPa à 28 jours pour continuer leur ascension jusqu'à atteindre 8.7 MPa à 11.2 MPa à 90 jours. Nous avons enregistré donc une légère augmentation par rapport au béton de référence (BTHPSR). Quant aux bétons (BTHPSC), les résistances à la traction restent inférieures. La résistance à la traction croît moins vite que la résistance à la compression. Malgré la modification de la microstructure de l'interface pâte/granulat, cette zone reste toujours le point faible du béton à hautes et très hautes performances.

De Larrard (De Larrard, 1988) a montré que la résistance à la traction des BTHP ne s'améliore pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression. La résistance au fendage des bétons THP est généralement comprise entre 4 et 6.5 MPa à 28 jours (soit 7 à 11 MPa en flexion).

La résistance à la traction des BTHP ne s'améliore pas dans les mêmes proportions que la résistance à la compression. Il est remarquable que cette résistance évolue très peu entre 7 et 28 jours, si bien que le rapport résistance en traction /résistance en compression, de l'ordre de 1/12 pour les bétons ordinaires, diminue dans le temps pour atteindre 1/20. Elle dépend principalement de la nature de la roche, indépendamment de la distribution de la taille ou de la concentration en granulats dans le matériau (De Larrard F., 1988).

Le tableau 7 récapitule les valeurs des résistances à 28 jours.

TABLEAU 7

Comportement des BTHP à l'état durci

Dosage en ciment	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)			Résistance à la traction par flexion à 28 jours (MPa)		
	BTHP (SR)	BTHP (C4)	BTHP (SC)	BTHP (SR)	BTHP (C4)	BTHP (SC)
560 (kg/m ³)	103.7	104.9	99.2	6.75	7.5	5.8
580 (kg/m ³)	103.7	106.3	99.5	6.9	8.8	5.8
600 (kg/m ³)	106.8	110.6	99.5	7.3	9.8	6.1
620 (kg/m ³)	107.3	111.5	100	8.1	10.8	6.5

Retrait total

Sur la figure 8 nous présentons les évolutions de retrait obtenues pour les différents BTHP. Les valeurs obtenues sont très élevées dès les premiers jours puis les cinétiques ralentissent très rapidement au bout d'une vingtaine de jours. Après 180 jours, ces valeurs ne varient plus, indiquant que l'équilibre hydrique est atteint ; les cinétiques sont similaires pour l'ensemble des matériaux avec des déformations qui continuent à augmenter légèrement.

Les BTHPSC présentent un retrait plus élevé que les BTHPSR et sont donc plus sensibles à la dessiccation. Ceci est certainement à mettre en relation avec la plus grande plasticité de ces bétons qui conduit à une eau « moins liée » que celle des mélanges avec du sable roulé seul. Après 360 jours, les valeurs de retrait total relevées sont égales à 274 $\mu\text{m/m}$ pour le BTHPSR et 326 $\mu\text{m/m}$ et 395 $\mu\text{m/m}$ respectivement pour le BTHPC4 et le BTHPSC.

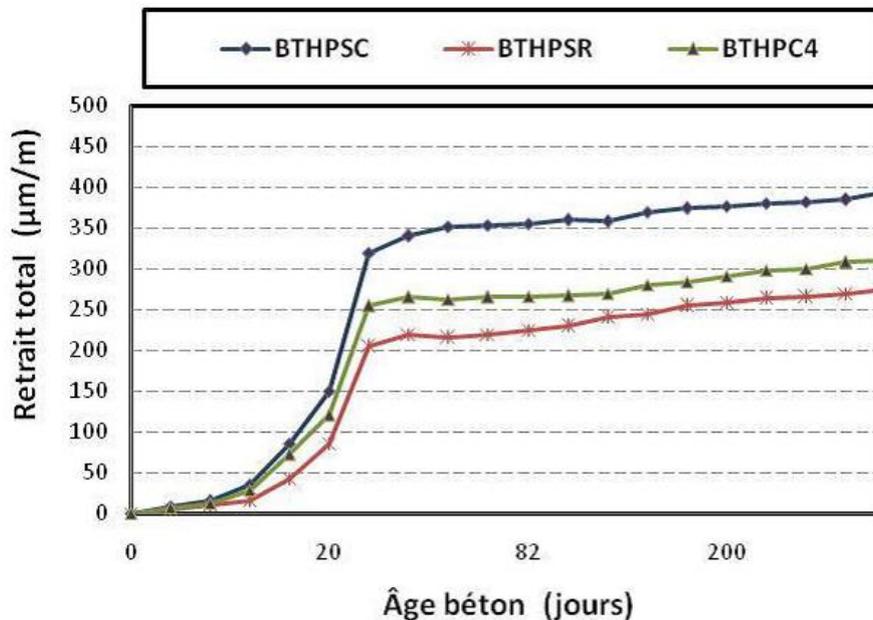


Figure 8. Evolution du retrait total des différents bétons

Les retraits totaux paraissent plus élevés avec le sable concassé et la fumée de silice. Ceci peut s'expliquer par le fait que les BTHP ont été confectionnés avec une quantité d'eau très faible, insuffisante pour assurer l'hydratation totale du ciment. De plus, les réactions pouzzolaniques liées aux additions de fumée de silice contribuent à abaisser cette teneur en eau lors de la transformation de la portlandite en C-S-H. Enfin, le sable concassé, et surtout sa partie fine, peut réagir avec le milieu alcalin pour former des produits hydratés. Tout ceci aurait pour conséquence d'abaisser localement le taux d'humidité relative dans la microporosité ouverte de ces BTHP et de créer un gradient hydrique inversé par rapport à celui prévalant du séchage du matériau. Ainsi, comme ce phénomène n'est vraiment visible que pour le sable concassé, il est

possible que ce dernier interagisse avec la pâte de ciment. Ceci peut expliquer aussi que les résistances mécaniques soient plus élevées avec ce type de sable.

DURABILITE

Absorption d'eau par capillarité

La figure 9 présente les résultats de la mesure des coefficients d'absorption capillaire C_{at} de l'ensemble des éprouvettes de BTHP en fonction de la racine carrée du temps. Le coefficient d'absorption caractérise la capacité d'absorption des éprouvettes à différents instants. Plus le réseau poreux de l'éprouvette est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faibles.

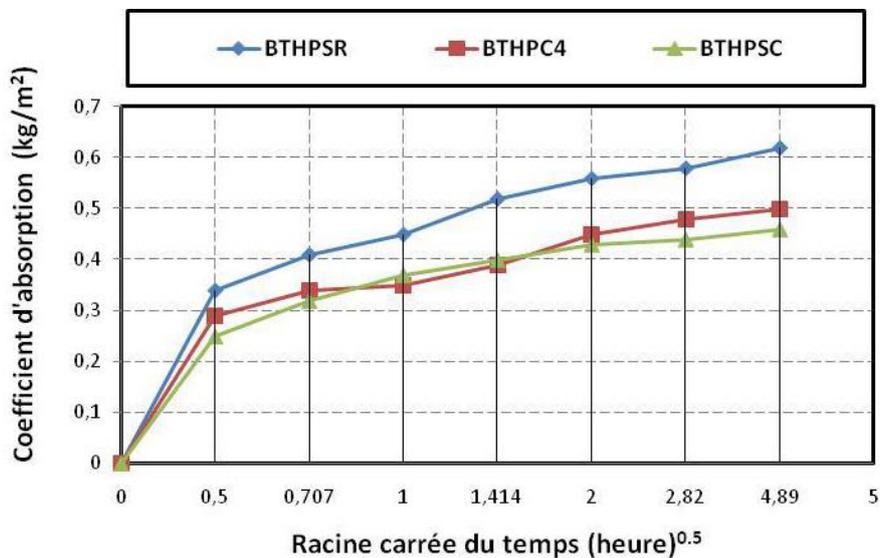


Figure 9. Absorption d'eau par capillarité des différents BTHP.

Nous constatons globalement que les coefficients d'absorption des BTHP à différentes échéances augmentent avec la racine carrée du temps. Les (BTHPSR) présentent des coefficients plus élevés, par rapport aux (BTHPC4) et (BTHPSC). Toutefois, nous pouvons distinguer deux types de comportement ; Il apparaît, d'une part, que toutes les formulations présentent une variation linéaire du coefficient d'absorption jusqu'à 4 heures. Au-delà, nous constatons que ces formulations présentent une variation du coefficient d'absorption qui peut être modélisée par une succession de segments linéaires caractérisés par une diminution de pentes. Cette diminution, indique un ralentissement du phénomène d'absorption.

Ceci peut s'expliquer par le fait suivant: dès que la montée capillaire est accomplie dans les plus gros pores au bout d'un certain temps, elle continue dans les pores de plus en plus fins et par conséquent la cinétique d'absorption des éprouvettes est ralentie, (A.Bessa-Badreddine 2004). Cela explique bien la diminution de la pente.

Diffusion des Anions Chlorures

Le coefficient de diffusion des anions chlorures est un indicateur de la durabilité des bétons dans le cas d'un environnement marin ou en présence de sels de déverglaçage. Ce coefficient est déterminé par un essai de migration en milieu saturé en régime permanent. Sur la figure.10, nous présentons à titre comparative les résultats des coefficients de diffusion des trois bétons formulés lors de cette campagne d'essai à savoir, le béton THP, le béton HP et le béton usuel.

Les valeurs du coefficient de migration des anions chlorures des différents BTHP sont inférieures, tout en restant comparables à celles rapportées par (Delagrave et al. 1998), qui présentent des coefficients de diffusion des anions chlorures de 10 à $18 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, pour des bétons de rapport $E/C = 0.25$.

Les résultats ont clairement démontré que la résistance des BTHP à la migration des ions chlorures est largement supérieure à celle des bétons courants, grâce à leur microstructure plus dense. C'est un des points forts du BTHP vis-à-vis du risque de corrosion des armatures. De plus, ces essais de durabilité n'ont pas permis de différencier les différents sables entre eux, ni les différents dosages des additions pouzzolaniques. Ainsi, l'usage de ces matériaux peut être envisagé sans réserve pour la confection des BTHP performants et durables.

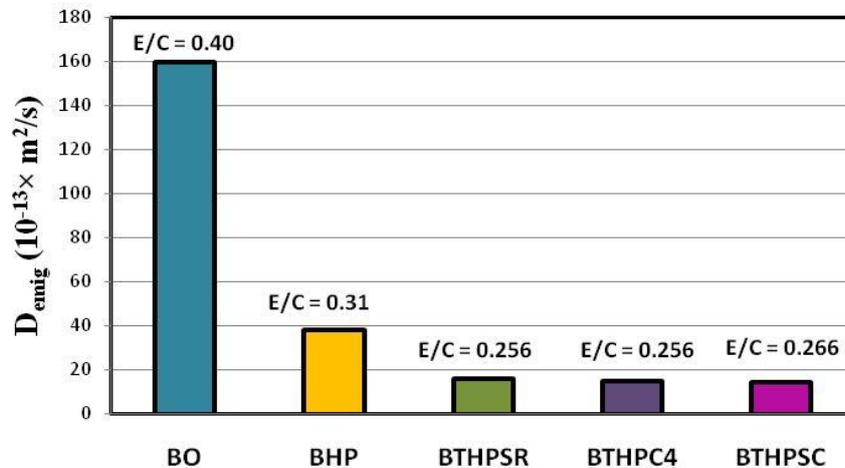


Figure 10. Coefficient de migration des anions chlorures du BO, du BHP et des BTHP

CONCLUSION

Cette étude a permis de répondre à la problématique posée, et a conduit à la proposition d'une méthode de formulation alternative des BTHP reposant sur une

caractérisation simple de chacune des phases du béton. En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Les résultats obtenus à l'état frais ont montré que le pourcentage d'air occlus est légèrement inférieur pour la série de béton (BTHPC4) comparativement aux deux autres séries. Corrélativement, la densité réelle des bétons (BTHPC4) augmente rapidement et diminue pour les deux séries de bétons.

Les fines calcaires ont donc une influence positive, puis négative sur la densité, selon la quantité présente dans les mélanges. D'autre part, les fines confèrent au béton frais une certaine cohésion et un pouvoir de rétention d'eau qui permet le maintien de l'homogénéité, en s'opposant à la ségrégation.

Les résultats de l'étude mécanique montrent que le sable de concassage est un matériau fort prometteur puisqu'il permet d'obtenir à la fois une très bonne compacité des BTHP et aussi les meilleures résistances mécaniques lorsqu'il est associé au sable roulé.

Les essais de déformations différées, réalisés sur les mêmes bétons, ont consisté à suivre l'évolution dans le temps des déformations. Les résultats obtenus montrent que les BTHP avec du sable concassé présentent un retrait plus élevé que les BTHP de référence et sont donc plus sensibles à la dessiccation. Ceci est certainement à mettre en relation avec la plus grande plasticité de ces bétons qui conduit à une eau « moins liée » que celle des mélanges avec du sable roulé seul. Toutefois, dans tous les cas, les valeurs obtenues sont très faibles et sont en accord avec les données de la littérature sur des matériaux comparables.

Les essais de durabilité ont mis en évidence les très hautes performances de ces bétons. Les grandeurs mesurées (coefficient de diffusion des ions chlorures et absorption capillaire) confirment que les comportements des différents BTHP étaient proches ; par contre, aucune incidence du type de sable n'a été notée.

Les résultats ont clairement démontré que la résistance des BTHP à la migration des ions chlorures est largement supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense. C'est un des points forts du BTHP vis-à-vis du risque de corrosion des armatures. De plus, ces essais de durabilité n'ont pas permis de différencier les différents sables entre eux, ni les différents dosages des additions pouzzolaniques. Ainsi, l'usage de ces matériaux peut être envisagé sans réserve pour la confection des BTHP performants et durables.

À l'issue de ce travail, nous avons démontré qu'il était parfaitement possible de réaliser des BTHP en utilisant du sable de carrières. Les résultats ont démontré l'intérêt de la substitution du sable roulé par le sable concassé et confirmé les intérêts de la présence des fines calcaires pour obtenir des performances élevées. L'Algérie a donc besoin de se doter de carrières de sable pour combler ce manque d'une part, et de protéger l'environnement d'autre part. Il reste entendu que les caractéristiques techniques de ces sables doivent répondre aux prescriptions techniques requises des sables de construction.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aquino, C., Masumi Inoue, M.H., Mizuta, M., Okamoto, T. 2010. *The effects of limestone aggregate on concrete properties*. Constr. Build. Mater., 24:2363-2368.

- Bederina, M., Khenfer, M., Dheilily, R.M., Queneudec, M. 2005. Reuse of local sand: effect of lime stone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different concrete sand. *Cement Concrete Res.*, 35: 1172–9.
- Belaoura, M. Oudjit, M. N., Bali, A. 2013. Design of very high performance concretes using local aggregates, *American Journal of Civil Engineering*, 1(2): 68-73.
- Benachour, Y., Davy, C.A., Skoczylas, F., et Houari, H. 2008. *Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar*, Cement and Concrete Research, 38: 727–736.
- Bessa-Badreddine, A., et Gallias, J.L. 2004. *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers*. Thèse de doctorat en génie civil. Université de Cergy-Pontoise.
- Bosiljkov, V.B. 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, *Cement and Concrete Research*, 33: 1279-1286.
- Celik, T. 1996. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Journal of Cement and Concrete Research*, 26:1121–1130.
- Chaid R. 2006. *Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP aux Ajouts Cimentaires Locaux*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algerie, 174 pp.
- Chang, P.K. 2004. An approach to optimizing mix design for properties of high-performance concrete, *Cem and Conc. Res.*, 34(4): 623-629.
- De Larrard, F. 1988. *Formulation des bétons et propriétés des bétons à très hautes performances*, rapport de recherche LCPC N° 149.
- De Larrard, F., Bosc, Catherine, C., and Deflorenne, F. 1997. The AFREM method for the mix design of High Performance Concrete, *Materials and structures*, 30:439–446.
- De Larrard, F., 2000. *Structures granulaires et formulation des bétons*, traduit de l'anglais par Lecomte A., LCPC, OA34.
- Donza H., Cabrera, O., Irassar E.F.2002. *High-strength concrete with different fine aggregate* Cement and Concrete Research, 32: 1755–1761.
- Dreux G., Jean FESTA. 1998. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Edition Eyrolles. Juin. 416 pp.
- Guemmedi, Z., Resheidat, M., Houari, H., Toumi, B. 2008. Optimal cri Joudi-Bahri.I. 2014. *Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien*. Thèse de doctorat, de l'Université de Lorraine, France & de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 193 pp.
- Kim, J. K. 1997. *The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete*. Journal of Cement and Concrete Research, 27:1719–1729.
- Sadhouari, F., Goufi, N., Guezouli, A. 2009. *Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et des bétons*. SBEIDCO –1st. pp. 247-254 *In: International Conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries*, ENSET Oran, Algeria.
- Sandeep, K.S., Vikas, S., Agarwal, V.C., Rakesh, K. and Mehta, P.K. 2014. An experimental investigation on stone dust as partial replacement of fine aggregate in oncrete. *Journal of Academia and Industrial Research*, 3:229-232.
- Sangjun, P. 2012. Study on the Fluidity and Strength Properties of High Performance Concrete Utilizing Crushed Sand, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(4): 231–237.
- Soroka, I. et Stern, N. 1976. *Calcareous fillers and the compressive strength of Portland cement*, Cement and Concrete Research, 6: 367-376.
- Xiong X., Van Breugel K. Hydration processes of cements blended with limestone powder -

Experimental study and numerical simulation, Proceedings of the 11th ICCI, Durban.
Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe AM., Taerwe L. 2007. *Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes*, Cement and Concrete Composites, 29: 94-102.