



Valorisation des sous-produits de hauts fourneaux dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable (Valorisation of under products of blast furnaces in the manufacture of a new sandcrete range)

F.Z. Melais^{1,*}, S. Melais¹, D. Achoura¹, R. Jaubertie²

¹ *Laboratoire Matériaux, Géomatériaux et Environnement .Université Badji Mokhtar, BP 12, 23000, Annaba, Algérie*

² *Groupe de Recherches Génie Civil, INSA de Rennes, 20 avenue Buttes de coësmes, France*

Received 6 May 2014 ; Revised 28 Dec 2014, Accepted 1 Jan 2015

* Courriel auteur. E-mail: melaisz@yahoo.fr; Tel: (+213 07 90 00 11 87)

Abstract

This article describes the influence of mineralogical and morphological nature of natural and artificial sands on the properties of sandcretes formulated on the basis of the optimum compactness theory. Two mineral admixtures and artificial sands obtained by grinding or crushing granulated or crystallized blast furnace slag produced by Arcelor Mittal Steel plant of El Hadjar (Algeria) are used. The silica and crushed limestone sands were used in reference concrete. The obtained results show that the rheological properties of fresh concrete (i.e. workability and density) and mechanical strength vary with the mineralogy, morphology, density and grain size distribution of sands used. The microstructure analysis show a dense cement matrix for all concrete specimens tested. While, the cement matrix-aggregate adhesion depends on the nature and texture of sands.

Keywords: Blast furnaces slag, Sandcrete, Mechanical strength, Formulation, Microstructure.

Résumé

Cet article décrit l'influence de la nature minéralogique et morphologique des sables d'origine naturelle et artificielle sur les propriétés des bétons de sable formulées à la base de la théorie de compacité optimale. Deux fillers et deux sables artificiels utilisés sont principalement obtenus par broyage ou concassage des sous-produits de l'usine sidérurgiques d'El-Hadjar (Algérie) (laitier cristallisé et laitier granulé). Le sable siliceux et le sable de calcaire concassé présentent les sables naturels utilisés pour les bétons de référence. Les résultats obtenus montrent que les propriétés rhéologiques du béton frais (maniabilité et masse volumique) et les caractéristiques mécaniques (résistance en compression et en traction par flexion) varient selon la minéralogique, la morphologie, la densité et la granulométrie des sables utilisés. L'analyse de la microstructure montre que la matrice cimentaire est très dense pour l'ensemble des bétons testés. En outre l'adhésion matrice cimentaire-granulat dépend de la nature et la texture des sables.

Mots clés : Laitier de hauts fourneaux, Béton de sable, Formulation, Résistance mécanique, Microstructure.

1. Introduction

Les bétons de sable sont une nouvelle gamme de matériaux de construction qui peuvent présenter une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction comme les éléments de remplissage (brique, parpaings..) ainsi que les fondations, préfabrifications, ouvrages d'art ...etc [1,2]. Le béton de sable est un matériau confectionné à partir d'un ou plusieurs sables, de ciment, d'eau et de fillers naturels ou industriels [1, 3-6]. Les performances mécaniques restent parmi les critères les plus utilisés pour le jugement de la qualité des bétons et leurs classifications. Plusieurs recherches ont été réalisées afin de réduire au maximum les inconvénients du béton de sable, d'améliorer ces qualités mécaniques et sa durabilité par la correction de l'étendu granulaire, le choix du type et du dosage de sables et fines d'ajout et par l'addition des adjuvants ... [7,8]. Pour obtenir un béton de bonne qualité, en plus du type et du dosage en ciment et en fillers, d'autres paramètres entrent en jeu tel que le choix approprié de la minéralogie, la forme et la granulométrie des granulats [9,10]. L'Algérie est un pays riche en sable de différentes dimensions et nature. D'autre part le complexe sidérurgique « El-Hadjar » qui produit chaque année des quantités énormes de déchets et sous-produits tel que le laitier concassé, laitier granulé et scorie [1]. Le laitier granulé comme fines d'ajout possède plusieurs qualités intéressantes: composition chimique proche de celle du ciment, régularité de composition pour une même source de production, réactivité latente activée en présence de ciment portland, c'est un ajout très

couramment utilisé dans la fabrication des différents types de ciments [11, 12]. Les qualités spécifiques des laitiers du Haut-Fourneau ont permis à la fois la mise au point des ciments aux laitiers et pour produire des granulats de béton. La valorisation des laitiers du haut fourneau dans la production des sables présente un double intérêt économique et écologique [13]. Le laitier cristallisé correspond à une forme minéralogique stable, il est chimiquement stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, ne peut être que modeste. La résistance mécanique du laitier cristallisé est en fonction de la nature des constituants minéraux formés (composition chimique) et de leur dureté ainsi que de la dimension des cristaux [11].

Le laitier cristallisé d'El Hadjar ne peut être considéré comme un déchet industriel, mais un sous-produit industriel valorisable dans les techniques routières et dans la fabrication du béton [14]. Cette étude vise à analyser et à évaluer l'influence de la nature minéralogique et morphologique des sables sur les propriétés des bétons frais, le comportement physico-mécaniques et la microstructure des bétons de sable. La finalité de ce travail est la valorisation des sous-produits industriels dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable.

2. Matériaux et procédure expérimentale

2.1. Matériaux

2.1.1. Sables

Quatre types de sable de nature minéralogique différente sont utilisés dans cette étude dont deux sables naturels (sable fin siliceux, sable de calcaire concassé) et deux sables artificiels (sable de laitier granulé et sable de laitier cristallisé) issus des sous-produits de l'industrie sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). L'observation au MEB des grains de sables de différentes natures illustrée au niveau des figures (1, 2, 3 et 4) a permis d'analyser leurs morphologies (géométrie et état de surface). L'objectif de cette analyse est de mieux comprendre certains phénomènes physiques ou mécaniques dans le béton à l'état frais et durci. Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont regroupées dans le tableau 1.

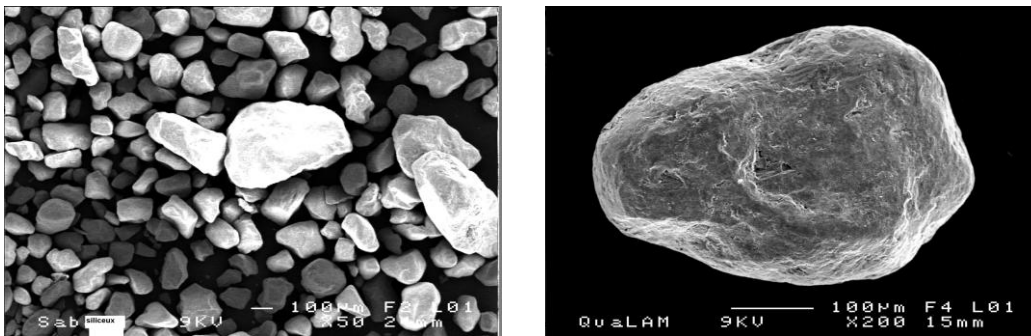


Figure 1. Morphologie et état de surface de sable siliceux

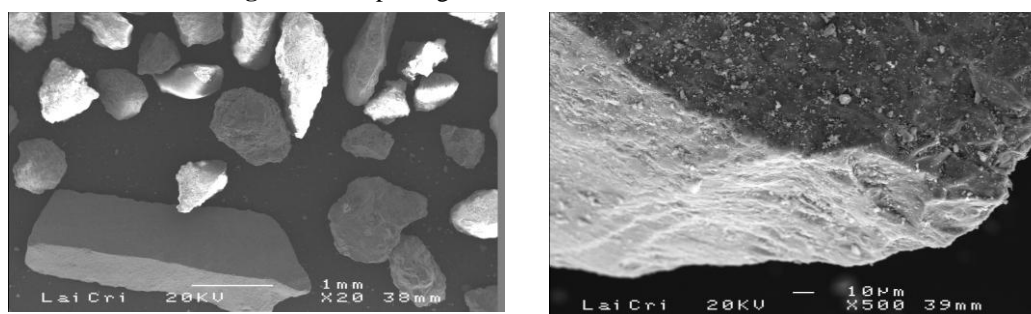


Figure 2. Morphologie et état de surface de sable de laitier cristallisé

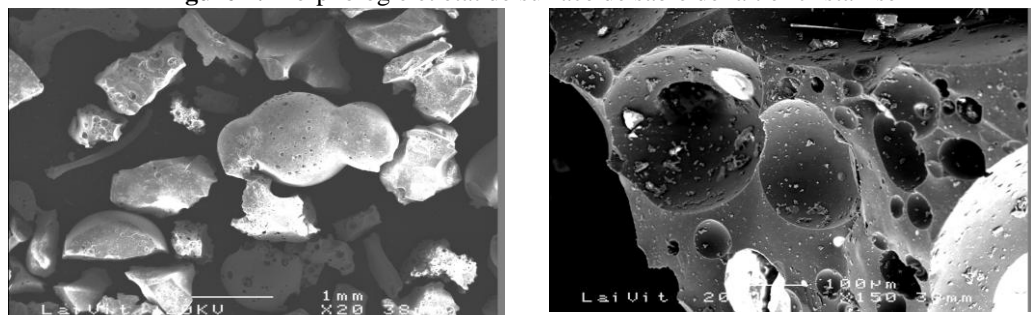


Figure 3. Morphologie et état de surface de sable de laitier granulé

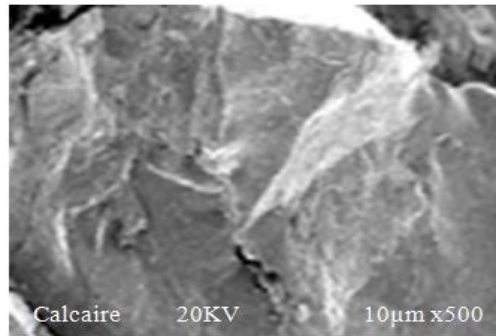


Figure 4. Morphologie et état de surface de sable de carrière

Tableau 1: Caractéristiques physiques des sables

Caractéristiques	Unité	Sable siliceux	Sable de carrière 1	Sable de carrière 2	Sable de laitier granulé	Sable de laitier cristallisé
Module de finesse	-	2.15	2.91	3.90	2.93	2,45
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.42	1.39	1.45	0.81	1.76
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.65	2.62	2.62	2.80	2.70
Porosité intergranulaire	%	46.57	46.94	35.13	59.5	34.70
Equivalent de sable	%	92.26	79.54	84.87	87.00	89,28

2.1.2. Ciment et fines d'ajout

Deux types de ciment sont utilisés un CPA CEM I 52.5 d'origine française et un CPJ-CEMII/A 42,5 d'origine Algérienne avec ajout de laitier granulé. Les fines d'ajouts utilisés sont des fillers de laitier granulé et laitier cristallisé obtenus par broyage au laboratoire des sous-produits de l'industrie sidérurgique du haut fourneau d'El-Hadjar. La composition chimique et les caractéristiques physiques sont représentées aux tableaux 2 et 3. On peut considérer que les laitiers du haut fourneau et les ciments sont composés essentiellement d'un mélange de quatre oxydes : silice SiO₂, chaux CaO, alumine Al₂O₃ et magnésie MgO, pour 94% à 97% de leur composition, le complément étant constitué par des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés.

Tableau 2 : Composition chimique des ciments et des fines d'ajout

Principaux constituants chimiques (%)	Matériaux			
	Ciment		Laitier granulé	Laitier cristallisé
	CPA/CEMI52.5	CPJ /CEMII-A 42.5		
CaO	65.13	58.59	39.2	40.01
Al ₂ O ₃	5.18	6.58	8.98	8.62
SiO ₂	20.15	24.92	38.9	37.60
Fe ₂ O ₃	2.76	3.65	0.85	2.30
MgO	0.69	1.21	9.59	7.98
MnO	-	-	2.30	2.25
SO ₃	2.85	2.17	-	-
S	-	-	0.1	1.07
P.A.F	1.16	1.7	1.86	0.17

2.1.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est superplastifiant hautement réducteur d'eau commercialisé par la société Algérienne Granitex et sous l'appellation 'MEDAPLAST SP 40'. Il est de forme liquide; de couleur marron; d'un PH égale 8,2, de densité 1,20 ± 0,01 et d'une Teneur en chlore < 1g/L.

2.2. Procédure expérimentale

La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF EN 12390-1 [15]. Le malaxage est réalisé à l'aide d'une bétonnière de capacité de 25L. La durée de malaxage totale est de 3 minutes. La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable. La durée de vibration est 30 + 30 secondes. Après 24 heures de conservation en salle humide, les éprouvettes sont conservées en humidité saturante (température ambiante, Humidité relative à 100%) dans un bac pendant 28 jours. La caractérisation mécanique est obtenue en exploitant les mesures de la résistance en traction par flexion et en compression sur des éprouvettes 4x4x16 cm³ et 10x10x10 cm³ conformes à la norme NF EN 12390-5[16] et

NF EN 12390-3 [17]. Deux tests sont utilisés pour caractériser la maniabilité. Le maniabilimètre LCPC (norme NF P18-452 [18]) est utilisé pour déterminer la maniabilité de la première série de bétons et l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams (NF EN12350-2 [19]) pour caractériser la maniabilité de la 2^{ème} série bétons. La compacité est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges de béton frais.

Tableau 3 : Caractéristiques physiques des ciments et des laitiers de haut fourneau

Bétons de sable	Dosages en constituants (Kg/m ³)								Maniabilité (S)
	Ciment	Eau	Sable Siliceux	Sable de laitiers cristallisé	Sable de laitiers granulé	Filler de laitiers cristallisé	E/C	E/(C+F)	
BS 1	300	230	1550	-	-	200	0.77	0.46	7
BS 2	300	230	-	1537	-	200	0.77	0.46	18
BS2 C	300	250	-	1537	-	200	0.83	0.50	6
BS 3	300	230	427	-	941.5	200	0.77	0.46	25
BS 3 C	300	275	427	-	941.5	200	0.92	0.55	8

3. Formulation des bétons de sable d'études

L'approche théorique de SABLOCRETE [3] ajustée expérimentalement est utilisée pour la formulation des mélanges de bétons de sable de cette recherche. La composition de la première série de mélanges est récapitulée au tableau 4 et la formulation de la deuxième série de mélanges est rassemblée au tableau 5.

Tableau 4 : Composition des bétons de sable à base de fillers de laitier cristallisé

Caractéristiques	Unités	Ciment		Laitier granulé	Laitier cristallisé
		CEMI52.5	CEMII-A42,5		
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.02	1.06	1.03	0.95
Masse volumique absolue	g/cm ³	3.15	3.10	2.80	2,40
Consistance normale	%	27	29	-	-
Début de prise	H /min	2/50	2/ 34	-	-
Surface spécifique de Blaine	cm ² /g	3300	3480	3650	3500
Résistance à la traction	MPa	9.05	7	-	-
Résistance à la compression	MPa	53.5	39	-	-

BS 1 : béton de sable à base du sable siliceux et fillers de laitier cristallisé.

BS 2 : béton de sable à base du sable et fillers de laitier cristallisé.

BS 2 C : béton de sable à base du sable et fillers de laitier cristallisé avec correction du dosage en eau.

BS 3 : béton de sable avec mélange du sable de laitier granulé et sable siliceux et fillers de laitier cristallisé.

BS 3C: béton de sable avec mélange du sable de laitier granulé et sable siliceux et fillers de laitier cristallisé avec correction du dosage en eau.

Tableau 5. Composition des bétons de sable à base de filler de laitier granulé

Bétons de sable	Dosages en constituants (Kg/m ³)								
	Ciment	Eau	Sable siliceux	Sable de carrière	Sable de laitier granulé	Filler de laitier granulé	SP	E/C	E/(C+F)
BS 4	398	206	1489.3	-	-	163	11.22	0.52	0.38
BS 5	398	206	-	1472.44	-	163	11.22	0.52	0.38
BS 6	398	206	-	-	1573,60	163	11.22	0.52	0.38
BS 7	398	206	744.65	626.22	-	163	11.22	0.52	0.38

BS 4 : béton de sable avec un sable siliceux.

BS 5 : béton de sable avec un sable moyen de carrière.

BS 6 : béton de sable avec un sable de laitier granulé.

BS 7 : béton de sable avec 50% sable siliceux et 50% sable grossier de carrière.

4 . Résultats et discussions

4.1. L'influence de la nature des sables les propriétés des bétons à l'état frais

Les figures 6 et 7 montrent clairement que la nature des sables influence considérablement la maniabilité des bétons testés. Pour une maniabilité constante, des corrections sur le dosage en eau sont apportés pour les différents mélanges de la première série .les quantités d'eau rajoutées aux bétons de sable à base de sable de

laitier cristallisé et sable de laitier granulé sont respectivement de l'ordre de 20 et de 45L/m³. Même avec l'utilisation d'un superplastifiant, la maniabilité reste très affectée avec l'utilisation de sable de laitier granulé. Ceci est dû au caractère absorbant des sables de laitier qui sont généralement poreux comme l'ont montrés les observations microscopiques aux figures 2 et 3. Pour un dosage constant en eau et en ciment et avec une utilisation d'un superplastifiant, Les bétons de sable avec sable de carrière et avec mélange de deux sables (sable de dune + sable de carrière) présentent les meilleures maniabilités avec des affaissements de l'ordre de 9 et 10cm. Par contre le béton de sable avec sable siliceux fin donne un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de 4cm qui correspond un béton ferme cela peut être expliqué par la finesse de ce type de sable.

D'une manière générale la variation de la maniabilité est en fonction de la nature minéralogique, la morphologie (état de surface, types et formes des pores), la granulométrie et la dimension maximale des sables.

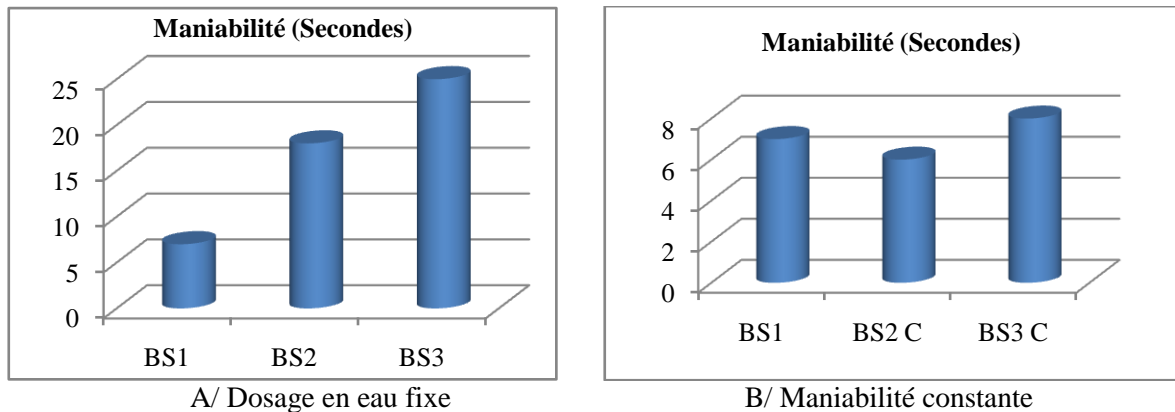


Figure 6. Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de la nature des sables

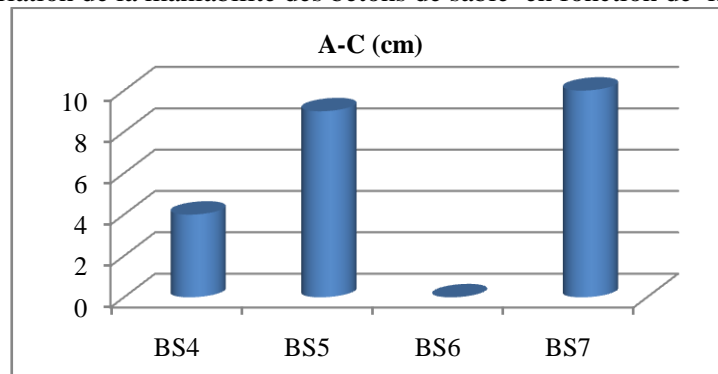


Figure 7. Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de la nature des sables

La figure 8 montre l'effet de la nature des sables sur la masse volumique des bétons de sable à l'état frais. Le béton de sable avec sable de laitier granulé de porosité élevée présente une masse volumique de l'ordre de 1470 Kg/m³ qui sera classé comme béton léger. Les bétons de sable les plus compacte sont ceux avec sable de carrière et le mélange de deux sables (sable et sable de carrière).Ceci est dû essentiellement à la bonne granulométrie de ces sables.

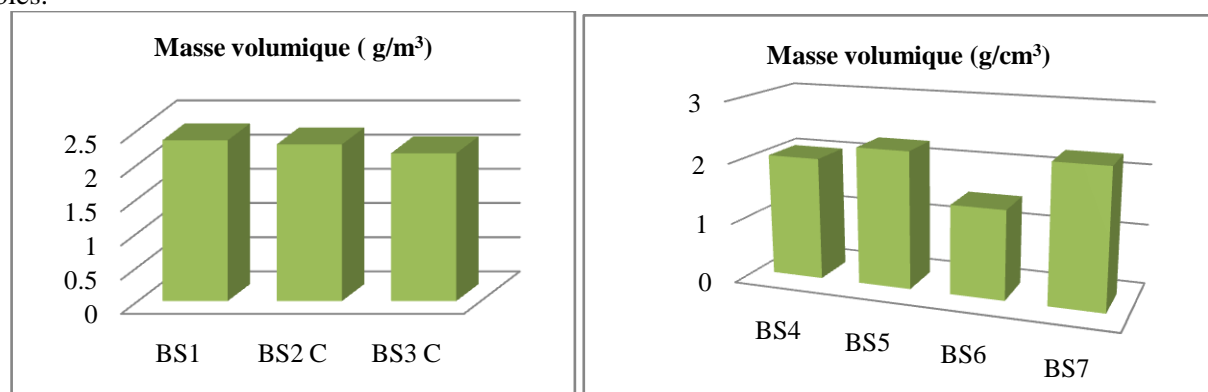


Figure 8. Variation de la masse volumique des bétons de sable avec la nature des sables

4.2. Caractéristiques mécaniques et microstructurales

Si les laitiers de haut fourneau ont donné satisfaction en tant que fillers, ils peuvent être aussi employés dans les bétons de sable comme sable en remplacement partiel ou total du sable siliceux ou de carrière. Bien que la relation existante entre la résistance et le rapport E/C soit incontestable, d'autres facteurs peuvent influencer la résistance, parmi eux les propriétés des granulats. La granulométrie, la forme et l'état de surface des granulats peuvent jouer un rôle secondaire sur la résistance du béton. Au niveau des figures 10 et 11 on peut constater que la résistance mécanique en compression diffère d'un béton à l'autre en fonction de la nature des sables utilisés. Avec fillers de laitier cristallisé, les bétons de sable à base de sable cristallisé présentent les meilleures résistances en compression en comparaison avec ceux à base de sable siliceux et du mélange sable de laitier granulé – sable siliceux. Ceci est dû essentiellement à la bonne granulométrie, l'état de surface rugueuse et la nature minéralogique du sable de laitier cristallisé. Dans le cas de l'utilisation des fillers de laitier granulé les meilleures résistances sont obtenues avec le mélange sable de carrière – sable siliceux qui présente le meilleur étendu granulaire.

Les résistances les plus faibles sont celles du béton de sable avec sable de laitier granulé. Cela peut s'expliquer par l'état morphologique très poreux et par une absorption initiale assez élevée.

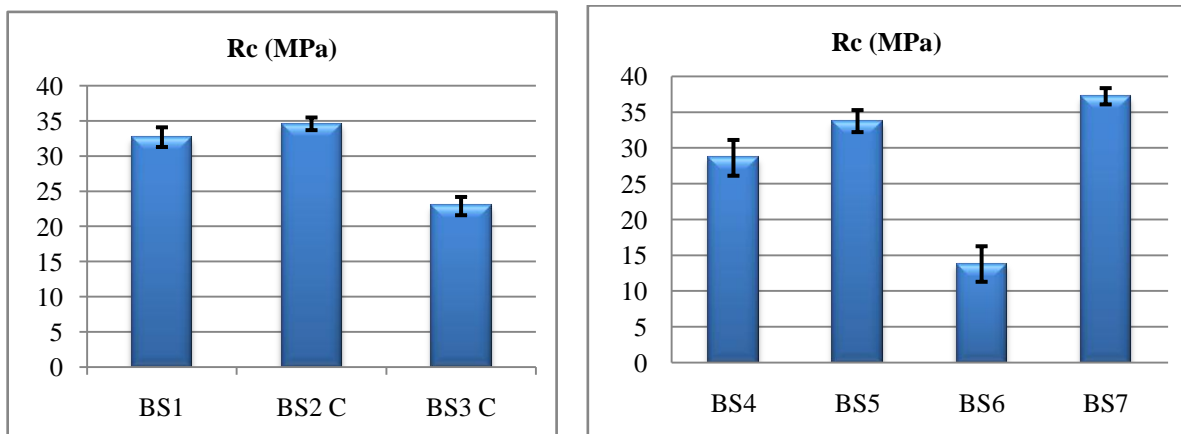


Figure 9. Influence de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la compression

La résistance à la traction par flexion est influencée en premier lieu par la nature des fines d'ajout, la nature minéralogique et l'état de surface des sables utilisés. Dans la première série les résistances de traction par flexion sont très proches pour le BS1, BS2 est légèrement supérieure à celles du BS3. Cela est dû essentiellement à la bonne compacité des deux premiers types de béton et à la porosité intrinsèque du sable de laitier granulé pour le troisième type de béton.

Par contre au niveau de la deuxième série ces dernières, l'influence de la nature des sables est nettement visible. Cela est dû à la nature pouzzolanique des fillers de laitier granulé qui participe à la formation des hydrates secondaires et améliorent ainsi l'adhésivité des granulats à la matrice cimentaire et aussi à la nature morphologique des sables utilisés (état de surface et porosité). Les résistances de traction par flexion les plus élevées sont obtenues avec les sables de carrière et le mélange sable de carrière – sable siliceux.

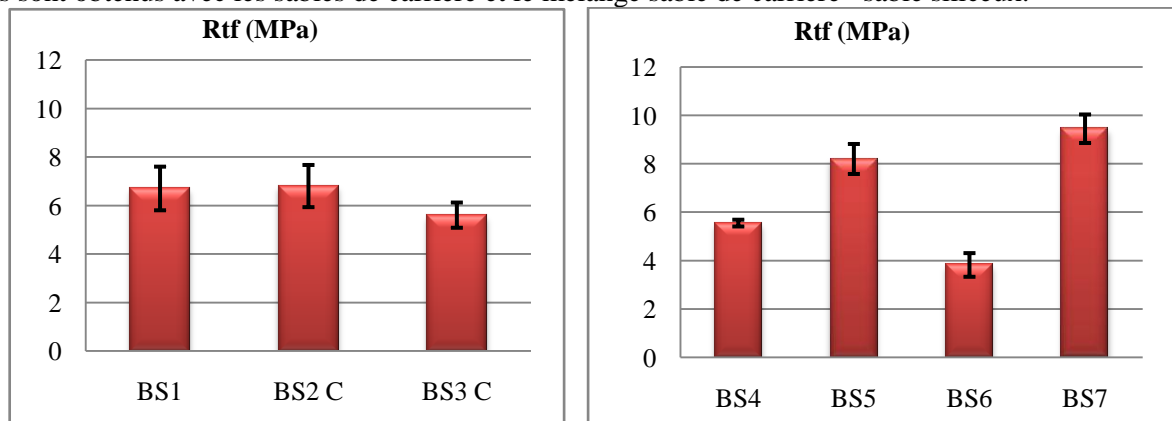


Figure 10. Influence de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la traction par flexion

Les zones d'interface matrice-granulat, la compacité et la microporosité ont été explorées par une visualisation de la microstructure au microscope électronique à balayage (MEB) présentée sur les figures 11, 12, 13 et 14. Cette dernière montre la présence d'un certain nombre de micropores visible qui se diffère d'un béton à un autre. Ceci s'explique par l'arrangement de l'étendu granulaire des mélanges secs. Le dosage et la finesse des fines d'ajout jouent un rôle primordial dans le remplissage de la porosité et de la microporosité. Les figures montrent que l'ensemble des bétons de sable présentent une microstructure dense et avec un minimum de microporosité. L'exploration de la microstructure montre une bonne adhérence matrice cimentaire – granulat pour l'ensemble des bétons de sable. Par l'analyse de la figure 11 on peut constater que pour le même type de sable, la zone d'interface est influencée par la nature des fillers utilisés. Avec les fillers de laitier granulé, la figure 11A montre que cette zone est composée essentiellement de CSH et avec un minimum de portlandite Ca(OH)_2 , en comparaison avec celle à base de fillers de laitier cristallisé (figure 11B) qui présente un certain nombre de lamelles de portlandite.

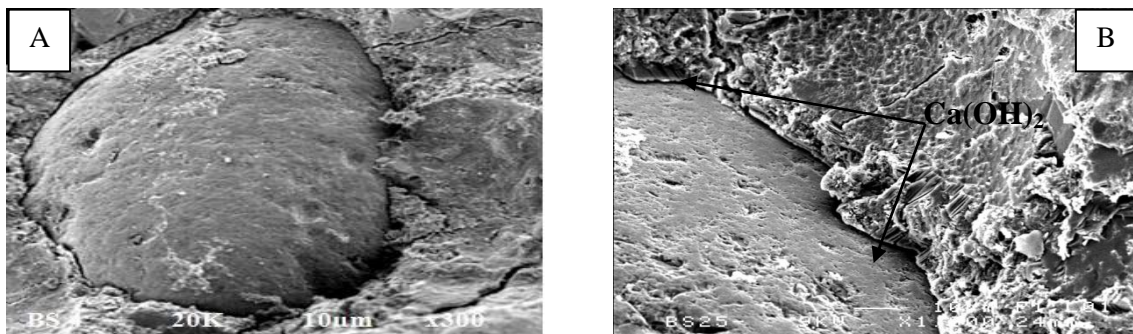


Figure 11. Liaison sable siliceux- matrice cimentaire

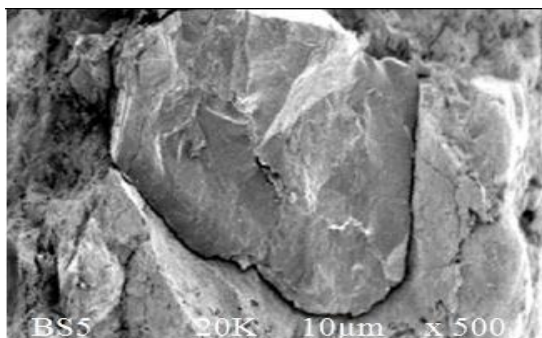


Figure 12. Liaison sable de carrière - matrice cimentaire

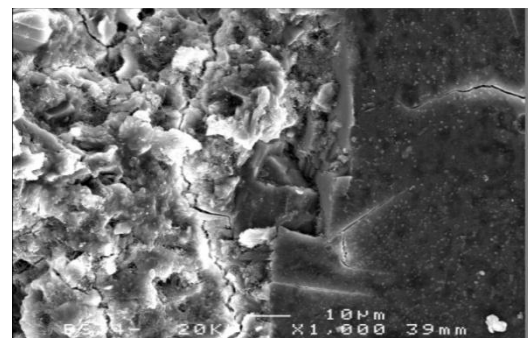


Figure 13. Liaison sable de laitier cristallisé-matrice cimentaire

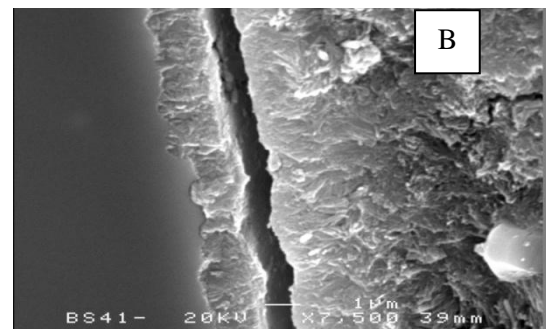
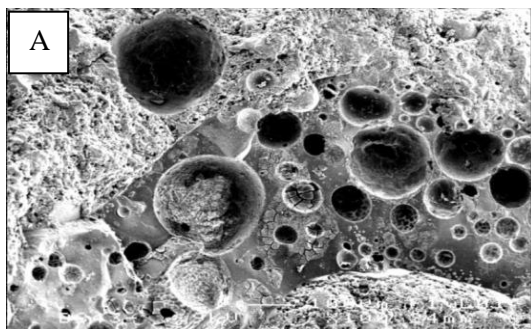


Figure 14. Liaison sable de laitier granulé - matrice cimentaire

Au niveau des figures 12 et 13, on peut voir la bonne liaison sable-matrice cimentaire pour les deux types de béton de sable, respectivement avec le sable de carrière ou de laitier cristallisé. Cela peut être attribué à l'état de surface de ces derniers qui sont généralement rigoureux.

Au niveau de figure 14 on peut voir la structure très poreuse des grains de sable de laitier granulé et la bonne adhésivité de ces grains à la matrice cimentaire. Cette grande intimité de liaison entre granulat de laitier granulé et pâte de ciment à l'interface est nettement visible au niveau de la figure 14B. Cette excellente liaison peut s'expliquer par le fait que les deux produits (granulat et pâte de ciment) sont hydrauliques et présentent une

grande infinité réciproque. Un peu plus loin de la zone d'interface on observe une fissure béante qui marque la ligne de rupture et justifie en plus l'intimité de la liaison grain de sable de laitier et pâte de ciment.

Conclusion

Cette étude a mis en évidence le rôle et l'influence de la nature des sables sur les caractéristiques des bétons de sable et par l'analyse des résultats obtenus nous pouvons énoncer :

La variation de la maniabilité et la masse volumique est en fonction de la nature minéralogique, morphologie (état de surface, types et formes des pores), granulométrie et dimension maximale des sables.

Bien que la relation existante entre la résistance et le rapport E/C soit incontestable, d'autres facteurs peuvent influencer la résistance, parmi eux les propriétés des granulats. La bonne granulométrie du sable de carrière, sable de laitier cristallisé et le mélange de sable siliceux et sable de carrière donnent les bétons les plus compactes et les plus résistants mécaniquement.

Une nouvelle gamme de bétons de sable léger a été définie grâce à l'utilisation du sable de laitier granulé. Ce type de béton de sable dont la masse volumique est de l'ordre de 1470 Kg/m^3 répond à certaines exigences de la construction en particulier l'isolation thermique et phonique. L'emploi du laitier de haut fourneau directement dans la fabrication des bétons de sable entant que fillers et sables peut apparaître intéressant de plusieurs points de vue : mise en œuvre, résistance, économie et écologie.

Les observations de la microstructure au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que l'ensemble des bétons de sable présentent une microstructure dense et avec un minimum de porosité. La zone d'interface granulat – pâte de ciment qui diffèrent d'un béton à un autre en fonction de type de sable et fillers utilisé.

Références

1. Achoura D., contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'El-Hadjar, thèse doctorat, département de génie civil, Université Badji-Mokhtar de Annaba, Algérie, (2005) 175.
2. Achoura D., Redjel B., Béton de sable : caractérisation et comportement, 1^{er} colloque maghrébin de génie civil, université de Badji-Mokhtar Annaba, Algérie, (1999) 17-25.
3. Sablocrete, béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, (1994) 230.
4. Z. Boudaoud, D. Breyse, Etude des effets du cobroyage d'un sable et d'un clinker sur les propriétés d'un béton de sable, Materials and Structures, *Matériaux et Constructions*, 35 (2002) 310-316.
5. Denis A., Attar A., Breyse D., effect of coarse aggregate on the workability of sandcrete, *cement and concrete research* 32 (2002) 701-706.
6. Bedadi L., Bentebba M.T., Etude expérimentale d'un béton de sable de dune pour la fabrication des dalles et pré dalles armées et faiblement armée, *Annales des sciences et technologies*, 3, N°1. Université Kasdi Merbah Ouargla. (Juin 2011) 39-45.
7. Ben Amara D., Formulation et comportement d'un béton de sable de la région de Biskra renforcé de fibre métallique, Thèse, Université de Annaba, Algérie (2002).
8. B. Benabed, L. Azzouz, K. El-hadj, A.S.E Belaidi, H. Somali, Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, France (2012).
9. Makani A., Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons, thèse doctorat, université de Toulouse. (2011).
10. Achour T., Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens, thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy Université & l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (2007) 213.
11. Alexandre J., Sebileau J.L., le laitier de haut fourneau, livre, (1988) 341.
12. Zeghichi L., Mezliche Z., Merzougui A., l'influence de l'activation de laitier sur le comportement mécanique des bétons, *lebanese Science Journal* vol 2, N2 (2007) 105-113.
13. Akcaozoglu A., Duran Atis C., Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates, *Construction and Building Materials*.25 (2011) 4052-4058.
14. Cherfa H., Ait Mokhtar K., Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière, 29èmes rencontre de l'AUGC, Tlemcen (2011) 128-137.
15. Norme européenne NF EN12390-5, Essai pour béton durci, partie5: résistance à la flexion sur éprouvette (Octobre 2001).
16. Norme européenne NF EN12390-1, Essai pour béton durci, partie1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules (Octobre 2001).
17. Norme européenne NF EN12390-3, Essai pour béton durci, partie3: résistance à la compression sur éprouvette (Aout 2000).
18. Norme française NF P 18-452, Bétons: Mesures du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre, (1988).
19. Norme européenne NF EN 12350-2, Essai pour béton frais, partie 2 essai affaissement (Avril 2012).

(2015); <http://www.jmaterenvirosci.com>