

Study of the adaptation of the sand concrete as repair material associated with an ordinary concrete substrate

Etude de l'adaptation d'un béton de sable comme matériau de réparation associé à un substrat en béton ordinaire

Karima Gadri[✉], Abdelhamid Guettala

1 Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université Mohamed Khider. BP 145 RP 07000 Biskra, Algérie

Received 31 October 2016

Revised 11 December 2016

Accepted 24 April 2017

Published online: 7 May 2017

Keywords

Sand concrete
Crushed sand
Substrate
Repair concrete
Elastic modulus
Bond strength

Abstract: In this paper, a particular importance is given to the sand concrete as a new repair material. A study is conducted to evaluate its mechanical and physical properties. By targeting the compactness and workability, three crushed sand concrete series were made from a fixed choice of the cement content. Once the sand concrete intended for repair is chosen; its characterization is realized by mechanical and physical tests, namely compression and splitting tensile, measurement of modulus of elasticity and the shrinkage. A repair simulation is applied on half-cylinders of ordinary concrete with two ranges of strength, (BO40) and (BO25). The substrates are prepared with two surfaces of different textures: roughness (RIG) and surface with drilled holes (PER). The bond strength and its quality are determined by a splitting tensile test. The result showed a significant improvement in mechanical strength, a low elastic modulus of 21315 MPa and a moderate shrinkage of 426 μ m/m after 28 days. Similarly, significant bond strength is recorded between sand concrete and ordinary concrete, reflecting a good adhesion with the substrate.

© 2017 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

Résumé: Dans cet article, une importance particulière est accordée au béton de sable, afin de l'utiliser comme matériau de réparation. Une étude est menée pour évaluer ses propriétés mécaniques et physiques. En visant la compacité et la maniabilité, trois séries de béton de sable concassé ont été formulés à partir d'un choix fixe du dosage en ciment. Une fois le béton de sable destiné à la réparation est choisi; on a procédé à sa caractérisation par des essais mécaniques et physiques, à savoir, la compression et la traction par fendage, la mesure du module d'élasticité et le retrait. Une simulation de réparation est appliquée sur demi-cylindres en béton ordinaire avec deux classes de résistances, (BO40) et (BO25). Les substrats sont préparés avec deux surfaces de textures différentes : rugueuse (RIG) et perforée (PER). La force d'adhérence et sa qualité sont déterminées par l'essai de fendage. Les résultats ont montré une amélioration importante des résistances mécaniques avec un faible module d'élasticité de 21315 MPa, et un retrait modéré de 426 μ m/m à 28 jours. De même, une significative force de liaison est enregistrée entre le béton de sable et le béton ordinaire, ce qui reflète une bonne qualité d'adhérence avec le substrat.

Mots clés : Béton de sable ; Sable concassé ; Substrat ; Béton de réparation ; Module d'élasticité ; Force de liaison.

1. Introduction

Parmi les réparations qui peuvent être exécutées sur les structures dégradées en béton armé, la réparation mince (non structurelle), celle où l'épaisseur soit inférieure à 100 mm (Morgan 1996; Hassan et al. 2001). En conséquence, l'association d'un béton jeune avec un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimiques que mécaniques, liés à la compatibilité des deux matériaux en contact (Bissonnette et Pigeon 2000). La compatibilité déformationnelle n'est jamais parfaitement assurée, notamment en ce qui concerne les variations volumiques. La capacité d'adaptation du matériau sera un paramètre important pour la durabilité de la réparation. Il est nécessaire que le matériau de réparation et le support soient compatibles en termes de déformation (Morgan 1996; Hassan et al. 2001).

Une diversité d'essais est appliquée afin de déterminer la résistance de l'interface entre un béton de réparation avec son substrat et estimer sa performance d'adhérence. D'après certains auteurs (Courard et Bissonnette 2004), les différentes méthodes d'essais sont partagées en trois catégories : dans la première, il s'agit des tests de traction, comme le Pull off et l'essai Brésilien (traction par fendage) (Momayez et al. 2005; Espeche et León 2011; Tayeh et al. 2012). Dans la seconde, il s'agit des tests de flexion, et dans la troisième, il s'agit des tests de cisaillement par compression. Cette dernière est partagée en deux groupes d'essai : cisaillement direct et indirect abordé par certains auteurs (Tayeh et al. 2013; Zanotti et al. 2014; Elbakry et Tarabia 2016).

Dans cet article, le choix du matériau de réparation mène à un nouveau béton cimentaire, qui n'a pas été abordé dans des recherches précédentes sur la réparation en béton, c'est le

[✉] Corresponding author. E-mail address: karima.gadri@gmail.com

"Béton de sable". Le béton de sable est un béton fin, défini par la norme NF P 18-500 (Bédérina et al. 2005; Belkacem 2014; Hadjoudja al. 2014). Le composant principal de ce béton est le sable : (dune, rivière ou concassé), il ne contient pas de gravier, mais dans le cas où il peut y avoir, c'est avec un rapport G/S <0,7 (Hadjoudja al. 2014). Il se compose aussi du ciment, de l'eau et du filler (naturel ou industriel). Eventuellement, il peut contenir différents adjuvants comme les superplastifiants.

De nombreuses recherches sur les bétons de sable ont montré leurs avantages économiques et leur spécificité technologique (Chauvin et Grimaldi 1988; SABLOCRETE 1996; Bédérina et al. 2005). Ils sont comparables aux bétons ordinaires; ils ont les mêmes dosages de ciment (250 à 400 kg / m³), de plus, ils sont en mesure de les remplacer dans certaines structures (SABLOCRETE 1996; Serykh 1997; Benaïssa et al. 2008).

L'utilisation des fillers est essentielle dans la composition du béton de sable, afin d'obtenir la compacité, et la résistance conséquente (Chauvin et Grimaldi 1988). De même ils contribuent à la réduction du taux de consommation de ciment, ce qui fait la différence entre les mortiers et les bétons de sable. La présence des particules fines dans la composition de ces derniers demande une quantité supplémentaire d'eau pour obtenir une ouvrabilité élevée; d'où l'utilisation des superplastifiants est indispensable.

Le béton de sable peut être considéré comme un béton spécial qui s'adapte aux différentes applications telles que: béton de sable compacté, utilisé pour les chaussées (Khay et al. 2010); béton de sable auto-plaçant (Tayeb et al. 2011; Bouziani et al. 2012; Bouziani et al. 2014) ; béton de sable projeté (Benaïssa et al. 2008; Benaïssa et al. 2015) et béton de sable léger (Bederina et al. 2007; Bederina et al. 2009); et pourquoi pas comme béton de réparation.

Le béton de sable a des caractéristiques prometteuses, son caractère non fissurant qui est justifié par l'absence de gros granulats, son faible module d'élasticité et par suite sa grande déformabilité, sa porométrie fine, son homogénéité et uniformité de séchage, (Benaïssa et al. 1992; Belkacem 2014), le rend souhaitable dans le cas des réparations minces. Tout cela, présente l'intérêt de son choix, et de son utilisation dans cette recherche comme béton cimentaire de réparation. L'obtention d'une meilleure adhérence avec une capacité d'adaptation satisfaisante au support (substrat) constitue l'objectif principal de cette étude.

2. Matériaux Utilisés

2.1 Sable

Il s'agit d'un sable concassé provenant de la ville de Biskra, avec une granulométrie continue, qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les sables à béton selon la norme (EN 12620), comme il est présenté par la courbe granulométrique montrée dans la Figure 1. Les caractéristiques physiques du sable utilisé sont représentées au Tableau 1.

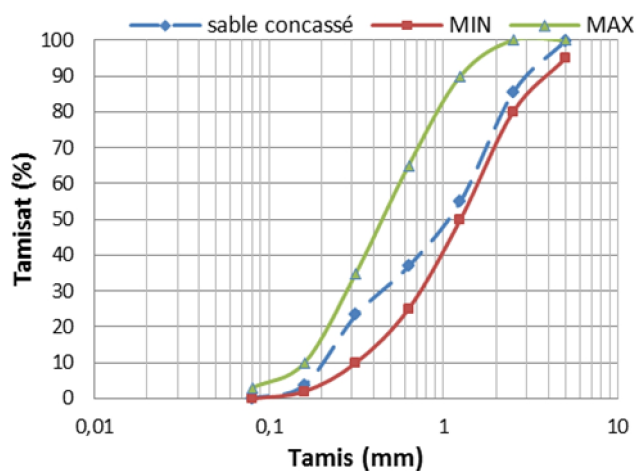


Fig. 1. Courbe granulométrique du sable concassé.

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sable concassé et du filler calcaire.

	Sable	Filler calcaire
Densité apparente (g/cm ³)	1,46	1,09
Densité absolue (g/cm ³)	2,51	2,7
Module de finesse	3	-
Equivalent de sable à piston [%]	66	-

2.2 Ciment

Le liant utilisé est un ciment (CPJ-CEM II/A 42.5) provenant de la cimenterie (SCIMAT) Aïn-Touta, de densité absolue 3,1 g/cm³ et une finesse de 3500 cm²/g. La composition chimique communiquée par le producteur est donnée par le Tableau 2.

2.3 Filler calcaire

Il s'agit de roches calcaires broyées, disponibles dans la majorité des carrières d'Algérie. Le filler calcaire utilisé dans cette étude provient de la carrière d'Oum Settas (El Khroub), de diamètre moyen 23µm. Les caractéristiques physiques sont présentées au Tableau 1, la composition chimique est donnée par le Tableau 2.

2.4 Adjuvant

Un superplastifiant haut réducteur d'eau appelée «MEDAFLOW 145» est utilisé; fourni par la société **GRANITEX**, de densité absolue de 1.065 ± 0,015, conçu à base de poly-carboxylates d'éther modifiés.

Tableau 2. Composition chimique du ciment et du filler calcaire

(%)	Ciment	Filler calcaire
SiO ₂	20,52	0,01
CaO	63,86	55,88
Al ₂ O ₃	5,13	0,01
Fe ₂ O ₃	3,36	0,01
MgO	1,27	0,14
Na ₂ O	0,14	0,01
K ₂ O	0,76	0,01
SO ₃	2,26	0,11
Cl ⁻	0,027	0,005
L.O.I	1,09	43,90

3. Programme Expérimental

3.1 Formulation du béton de sable

Il n'existe pas de méthode propre pour la formulation du béton de sable ; sa composition est préparée selon une formulation fondamentale appuyée sur une approche expérimentale (Chauvin et Grimaldi 1988; SABLOCRETE 1996; Benaïssa et al. 2008). Cette méthode est basée sur le critère d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Partant d'une composition de base avec un choix fixe du dosage de ciment (C) à 350 kg/m^3 (Chauvin et Grimaldi 1988), la quantité de sable est évaluée par un coefficient de compacité (γ) du mélange (George et Jean 1998). Le coefficient de compacité (γ) est égal à 0,775, qui correspond à un mélange avec $D_{\max} \leq 5 \text{ mm}$ et une consistance ferme. Le dosage du sable [S] étant déterminé selon la formule suivante: $[S] = 1000\gamma - C$.

La composition de base du béton de sable noté (BS) avec les caractéristiques mécaniques correspondantes est montrée au Tableau 3.

Pour améliorer les caractéristiques mécaniques obtenues, ainsi que l'ouvrabilité du BS, on a visé d'abord la compacité par l'ajout du filler calcaire dans la composition de base, substituer et remplacer chaque fois une quantité de sable par du filler calcaire (le sable utilisé contient un faible pourcentage en fines de 0,1%), jusqu'à l'obtention d'une compacité élevée avec une résistance optimale; par suite la maniabilité par l'ajout d'un superplastifiant avec un pourcentage allant de 0,5% à 2,5% par rapport au poids de ciment; et enfin la résistance mécanique par la réduction du rapport E/C. Les différentes compositions du BS confectionné sont indiquées au tableau 4.

Selon Chanvillard et Basuyaux (1996), la variation du rapport (filler/ciment) agit sur la résistance sans effet majeur sur la maniabilité. En effet, la maniabilité est améliorée par l'ajout du superplastifiant et la réduction du rapport E/C.

3.2 Essais réalisés

Les essais réalisés sont divisés en deux groupes; le premier groupe est destiné à la caractérisation du BS dont la confection et la conservation des éprouvettes ont été faites suivant la norme NF P18-405.

Tous les bétons formulés ont été soumis à différents essais mécaniques: essai de compression sur des éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) selon la norme NF EN 12390-3; la traction par fendage suivant la norme NF EN 12390-6 et la mesure du module d'élasticité à la compression non normalisé, réalisés sur des éprouvettes cylindriques ($16 \times 32 \text{ cm}^2$).

Tableau 3. Composition et caractéristiques mécaniques correspondantes du BS à l'âge de 28 jours.

Composition (Kg/m^3)	Ciment	Sable	E/C
	350	1660	0,75
Résistances mécanique (MPa)	Compression		Traction
	19,5		1,9

Tableau 4. Les différentes compositions du béton de sable (optimisation de formulation)

	Mélange	Ciment (Kg/m^3)	Sable (Kg/m^3)	Filler (Kg/m^3)	E/C	E/C+F	Sup (%)
Série 01	BS1	350	1500	160	0,75	0,51	/
	BS2	350	1480	180	0,75	0,49	/
	BS3	350	1460	200	0,75	0,47	/
	BS4	350	1440	220	0,75	0,46	/
	BS5	350	1420	240	0,75	0,44	/
Série 02	BS2-SP1	350	1480	180	0,75	0,49	0,5
	BS2-SP2	350	1480	180	0,75	0,49	1
	BS2-SP3	350	1480	180	0,75	0,49	1,5
	BS2-SP4	350	1480	180	0,75	0,49	2
	BS2-SP5	350	1480	180	0,75	0,49	2,5
Série 03	BS2-SPE1	350	1480	180	0,7	0,46	2
	BS2-SPE2	350	1480	180	0,6	0,40	2
	BS2-SPE3	350	1480	180	0,59	0,39	2
	BS2-SPE4	350	1480	180	0,58	0,38	2
	BS2-SPE5	350	1480	180	0,57	0,37	2

Des essais de caractérisation physique ont été également effectués pour mesurer le retrait et la perte en masse sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) pour le béton de sable ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) et pour le béton ordinaire selon la norme NF P 15-433. Le deuxième groupe d'essais est destiné à la réparation, il s'agit d'un test d'adhérence (traction par fendage) appliqué sur des éprouvettes cylindriques ($16 \times 32 \text{ cm}^2$), composées en bicouches: béton de sable associé à un béton ordinaire selon la norme ASTM C496 (Momayez et al. 2005). Tous les résultats exposés représentent la moyenne de trois valeurs pour chaque essai.

4. Résultats et Discussions

4.1 Caractéristiques mécaniques

4.1.1 Résistance à la compression

En première étape (série 01), on a étudié l'effet de variation de la teneur de filler calcaire sur la résistance mécanique à la compression, dont les résultats sont présentés sur la figure 2. Dans cette figure, une amélioration de la résistance à la compression est constatée en fonction d'ajout du filler calcaire. La meilleure résistance est obtenue par la composition BS2, qui a donné une augmentation optimale de 28% et 27% respectivement à l'âge de 28 et 90 jours.

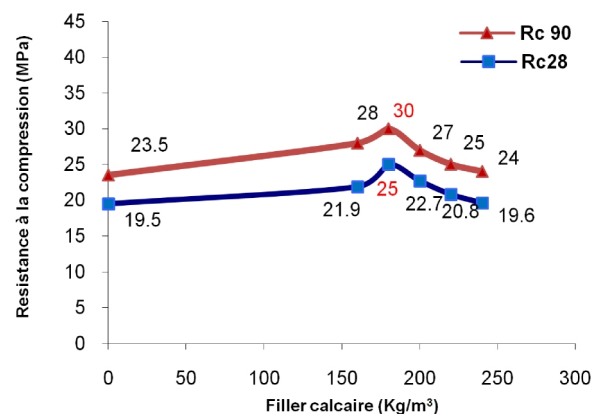


Fig. 2. Effet du dosage en filler calcaire sur la résistance à la compression.

Il a été constaté une compacité optimale du mélange atteinte à 180 Kg/m³ due au remplissage des vides entre les grains de sable par le filler calcaire, qui assure une activité physico-chimique et favorise l'accélération de l'hydratation du clinker (Ramachandran 1986; Bédérina al. 2005). Comme on a remarqué que l'augmentation du taux de filler calcaire au-delà de 180 Kg/m³ a un effet négatif sur la résistance, qui conduit à une diminution de 21% par rapport à la résistance optimale. Cette diminution est due à la chute de la densité du mélange causé par l'occupation des filler la place des grains de sable, qui ont diminué leur proportion dans le mélange.

En deuxième étape (série O2), l'objectif est d'obtenir des gains de résistance appréciables avec une meilleure maniabilité. Selon Lukovic et al. (2012), une maniabilité et une fluidité adéquates sont des propriétés primordiales du matériau de réparation qui influencent le développement de la force d'adhérence entre le support et béton de réparation. De ce fait, un ajout du superplastifiant est indispensable. D'après la figure 3, on remarque une augmentation des résistances en fonction du superplastifiant. La meilleure résistance à la compression enregistrée à l'âge de 28 et 90 jours est obtenue par une teneur de 2% du superplastifiant (soit le BS2-SP4) avec une augmentation de l'ordre de 26% par rapport au témoin. Cela peut être expliqué par l'effet principal des superplastifiants, qui offre une meilleure distribution des grains de ciment, et par conséquent d'une meilleure hydratation, (Neville 2000).

En dernière étape (série O3), on a réduit le dosage en eau et on a fixé le dosage en superplastifiant à 2% afin d'améliorer la résistance à la compression et réduire la porosité. Selon la figure 4, on enregistre une résistance optimale à la compression avec le même rapport (E/C= 0,6) pour les deux âges 28 et 90 jours; ce rapport désigne la quantité d'eau nécessaire et suffisante pour l'hydratation. Mais au-delà de ce rapport, l'excès d'eau reste sans aucun doute le principal paramètre influençant la fluidité du béton, faisant toute fois chuter la résistance. En fait, l'addition de l'eau peut diminuer les contraintes de cisaillement dues à la cohésion et au frottement interne dans le béton et rend, par conséquent, sa viscosité plus faible.

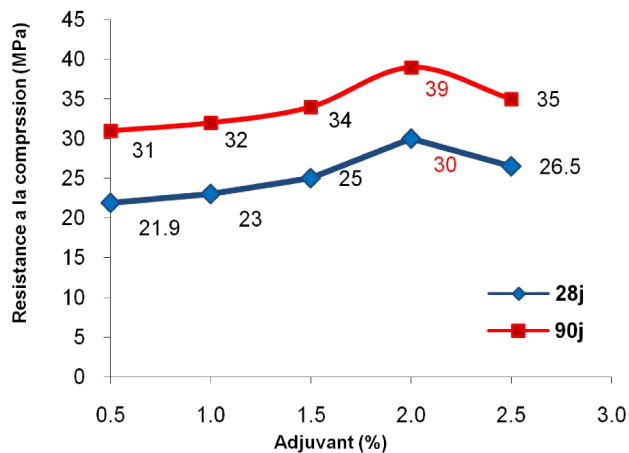


Fig. 3. Effet du dosage en superplastifiant sur la résistance à la compression.

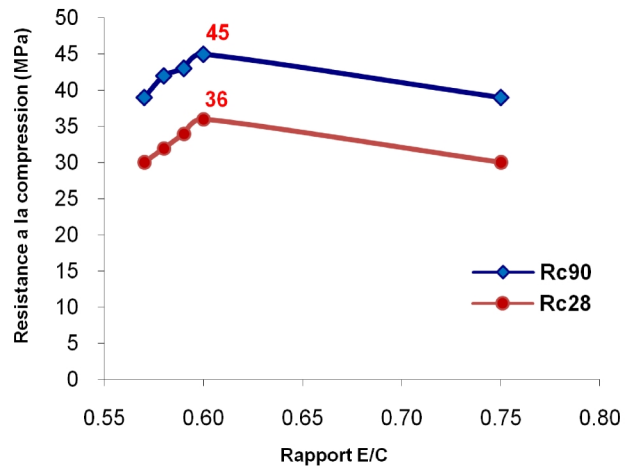


Fig. 4. Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression.

D'après les résultats obtenus précédemment ; le meilleur choix du béton de sable qui sera destiné à la réparation s'oriente vers la composition optimale BS2 –SPE2 motionnée par BSR vu sa maniabilité adéquate et sa meilleure compacité.

4.1.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité est une des propriétés principales contrôlant la compatibilité déformationnelle des réparations. Il contrôle la répartition des charges dans un système combiné composé de deux matériaux (béton de réparation / substrat). Pour mesurer la déformation longitudinale, on a utilisé une cage extensométrique. D'après le tracé de la courbe contrainte-déformation longitudinale du béton de sable (BSR), présenté dans la figure 5, on a remarqué: un comportement quasi-linéaire en première phase, jusqu'à un taux de déformation 0.0007 qui correspond à une contrainte $\sigma = 14.928$ MPa. La pente à l'origine de cette courbe (droite) est le module de déformation longitudinale à l'origine. Selon la loi de Hook nous obtenons $E_{b0} = \text{tg}\alpha_0 = \text{cst}$ correspond à: $E = 21315$ MPa

Dans la deuxième phase, on a une allure parabolique, jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale, avec un comportement plastique où on observe le développement de la microfissuration jusqu'à la rupture. On a enregistré un module d'élasticité modéré, donc une faible rigidité justifiée par l'absence de gros granulats; et c'est pourquoi les bétons de sable sont plus déformables.

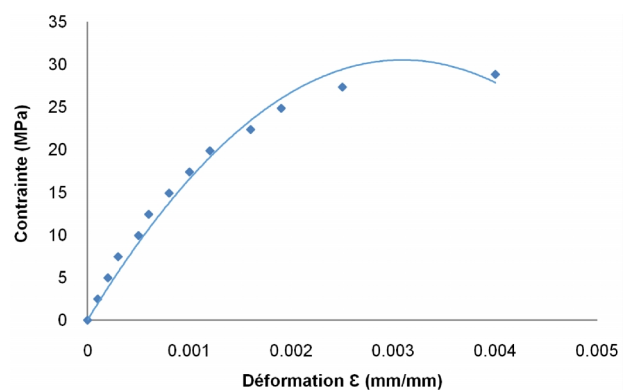


Fig. 5. Courbe contrainte-déformation longitudinale du béton de sable BSR.

Bédérina (2000) a trouvé trois valeurs différentes du module d'élasticité expérimentale pour trois bétons à base de différents sables. Un béton de sable dunaire ($E=20000 \pm 816$ MPa), un béton de sable d'oued ($E= 220000 \pm 1225$ MPa), et un béton avec un mélange des deux sables ($E= 25000 \pm 1470$ MPa), et c'est le module le plus important.

Généralement le module élastique est fonction de la teneur des granulats et de leur dimension, ainsi que leur rigidité. Selon (Neville 2000), le module d'élasticité des bétons résulte du module de déformation des granulats et de leur fraction volumique. D'après certains auteurs (Benaïssa et al. 1992; Bédérina 2000), les modules d'élasticité des bétons de sables sont inférieurs à ceux des bétons ordinaires, d'où une plus grande déformabilité et donc moins de fissuration.

D'après (Lukovic et al. 2012), quand un module d'élasticité d'un matériau de réparation est faible par rapport à celui du support (le substrat), son utilisation est souhaitable dans le cas des réparations non structurelles, afin d'atteindre une compatibilité déformationnelle entre les deux matériaux. Mais dans le cas contraire, il est plus judicieux de l'utiliser dans la réparation structurelle. Par contre lorsqu'ils sont identiques, le matériau de réparation est destiné à partager des charges avec la structure existante.

4.2 Caractéristiques physiques

4.2.1 Retrait total et la perte en masse

Selon les résultats présentés dans la figure 6, une amplitude de retrait importante de 426 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours est enregistrée, ce qui est acceptable comparativement aux résultats de certains auteurs (Hassan, Brooks et al. 2001; Qiao et al. 2010), sachant bien que les bétons de sable ont une tendance de retrait élevé. Des chercheurs comme Bederina et al. (2012) ont enregistré un retrait total de 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ dans trois mois pour un béton de sable mélangé (alluvionnaire plus dunaire). Par contre, (Benaïssa et al. 1993) ont trouvé une amplitude de 592 $\mu\text{m}/\text{m}$ à l'âge de six mois pour les bétons de sable de dune. Les résultats donnés par le graphe de la figure 7, montrent des pertes de masse importantes, qui atteignent 4%.

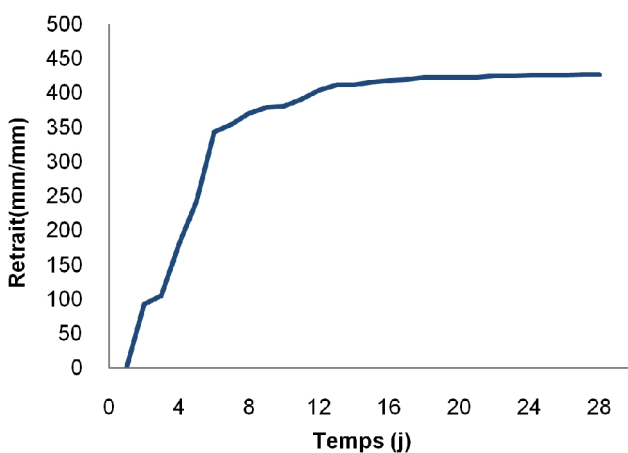


Fig. 6. Déformation du retrait total du BSR.

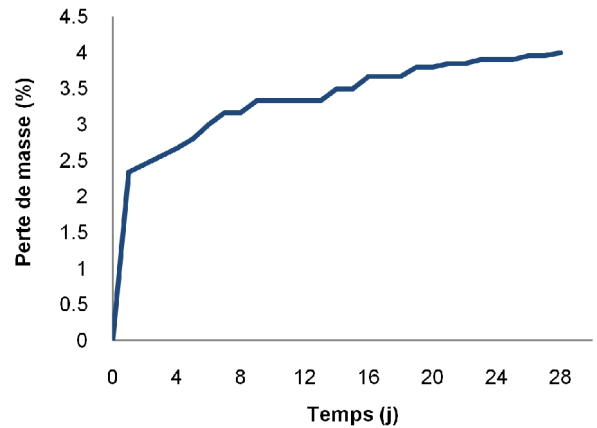


Fig. 7. Perte en masse du BSR.

D'après (Benaïssa et al. 1993) le séchage du béton de sable se manifeste très rapidement, dès les 1ères heures, en raison de leur uniformité de séchage. On peut dire aussi qu'il y a un développement de retrait très rapide pendant les 7 premiers jours, mais après cet âge les déformations de retrait se stabilisent rapidement, ce qui est confirmé par (Benaïssa et al. 1992; Benaïssa et al. 1993).

4.3 Test d'adhérence

Dans cette étude, l'adhérence entre le BSR et le substrat est déterminé par un test qui se base sur le protocole de l'essai de fendage. L'objectif consiste à évaluer la force de liaison entre deux bétons différents sous un chargement de traction: un béton de sable associé à un béton ordinaire. Une simulation de réparation est appliquée avec un béton de sable, coulé dans un état plastique sur des substrats en demi-cylindre saturés superficiellement secs. Les substrats âgés de 24 mois sont en béton ordinaire avec deux classes de résistances différentes: (BO40) avec du superplastifiant et (BO25) sans superplastifiant, de deux surfaces de textures différentes. Les substrats en demi cylindres sont le résultat d'un fendage des éprouvettes cylindriques (16x32) cm^2 . Après un nettoyage profond et brossage avec une brosse métallique, un demi-cylindre est réservé pour une surface de texture rugueuse (RIG), et l'autre est perforé, afin d'avoir une texture perforée (PER) avec des trous de 5mm en profondeur et un diamètre de 10mm, comme présenté sur la figure 8. Le béton de sable est coulé sur les substrats à l'intérieur des moules cylindriques.

Après le démoulage des composites (béton de sable de réparation / substrat) la cure est partagée en deux étapes : une cure humide

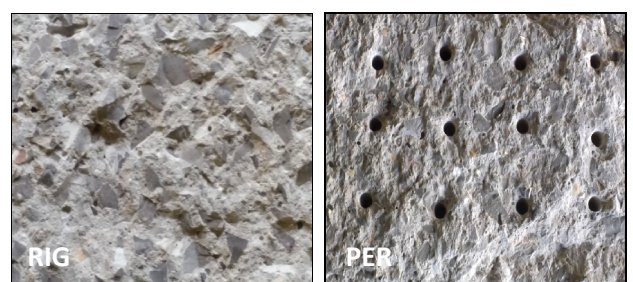


Fig. 8. Textures des surfaces de substrat.

de 28 jours, suivie par une autre à l'air libre durant douze semaines au laboratoire. En fin de compte, cela fait une cure totale de quatre mois avant la réalisation de l'essai. Vu la différence d'âge entre le béton de réparation BSR et les bétons des substrats lors de l'application de l'essai, nous sommes basés sur les caractéristiques mécaniques et physiques à l'âge de 28 jours des deux matériaux comme présentées au tableau 5.

L'histogramme présenté sur la figure 9 montre que les meilleures résistances de traction par fendage sont obtenues par les composites avec des surfaces rugueuses (RIG). On a constaté aussi, des valeurs appréciables de 2,1 et 1,9 MPa respectivement pour les deux classes de résistances du béton du substrat BSR/BO40 et BSR/BO25. En outre, pour le cas de texture perforée (PER), une diminution remarquable de 9,5 à 15,7% de la résistance par rapport aux surfaces rugueuses avec des valeurs de 1,9 et 1,6 MPa des composites BSR/BO40 et BSR/BO25. Cette diminution de résistance est due aux microfissures produites lors de perforation du substrat ce qui contribue à la réduction de résistance.

Par ailleurs, les modes de rupture des éprouvettes composites (béton de sable de réparation/ substrat) après essai présentent différentes formes de défaillance, causées par la force de liaison. Dans notre cas, on a remarqué deux modes de rupture qui reflètent deux à trois cas sur trois éprouvettes pour chaque essai, comme il est montré par la figure 10.

- **Mode A:** Rupture dans l'interface, sans détérioration du substrat, avec une couche légère du matériau de réparation attachée au substrat, (figure 10.a).

- **Mode B:** Rupture dans l'interface et détérioration partielle du matériau de réparation avec attachement d'une couche importante au substrat, (figure 10.b).

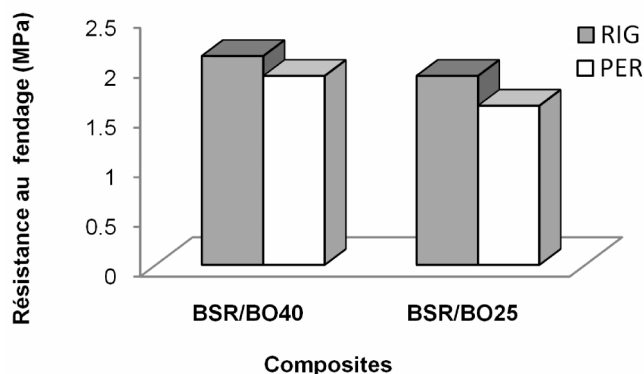


Fig. 9. Résistance au fendage des composites.

Une séparation parfaite qui se produit entre le matériau de réparation et le substrat donne une réparation non réussie. L'articulation entre le matériau de réparation et le béton du substrat est l'endroit le plus faible dans l'éprouvette combinée. Par contre un échec dû à l'écrasement du matériau de réparation, l'écrasement du substrat ou une combinaison des deux, indique un succès de réparation où l'articulation entre le matériau de réparation et le béton du substrat ne présente pas une zone faible dans l'éprouvette (Soliman et Shalaby 2014).

Ces modes de défaillance produits par les composites indiquent que la liaison de béton de sable BSR est significative dans le cas d'un substrat de haute rugosité (RIG), ou on constate une compatibilité adéquate entre les deux bétons, contrairement aux composites avec un substrat perforé (PER), où la liaison est moins importante.

En conséquence, de faibles zones sont produites à l'interface, à cause de l'ancrage insuffisant dans les trous. L'évaluation de la qualité de liaison en termes de force, est déterminée selon la classification proposée par Sprinkel et Ozyildirim, présenté au tableau 6, cité par (Tayeh, Bakar et al. 2013).



(a) Mode A



(b) Mode B

Fig. 10. Mode de rupture des différents composites.

Tableau 5. Caractéristiques mécaniques, physiques du béton de réparation et les bétons des substrats à l'âge de 28 jours.

Bétons	Résistance de compression (MPa)	Traction par fendage (MPa)	Module de Young (GPa)	Retrait total ($\mu\text{m/m}$)
BSR	36	2,4	21	425
BO25	25	2.0	29	405
BO40	40	3.1	35	356

Tableau 6. La qualité de liaison en termes de force, selon (Tayeh, Bakar et al. 2013).

Qualité de liaison	Force de liaison (MPa)
Excellente	≥ 2,1
Très bonne	1,7 – 2,1
Bonne	1.4–1.7
Passable	0.7–1.4
Mauvaise	0.0–0.7

Tableau 7. Evaluation de la qualité de liaison en termes de force.

	Eprouvettes combinées	Force de liaison (MPa)	Qualité de liaison	Mode de rupture
Texture (RIG)	BSR/BO40	2,1	Très bonne	B
	BSR/BO25	1,9	Très bonne	B
Texture (PER)	BSR/BO40	1,9	Très bonne	B
	BSR/BO25	1,6	bonne	A

La norme européenne de la réparation EN1504-3, indique que la résistance à la traction (force de liaison) doit être d'au moins 2 MPa dans le cas d'une réparation structurelle et 1 MPa pour les réparations non structurelles. Par conséquent, les résultats présentés au Tableau 7 paraissent acceptables, étant donné que la force d'adhérence est comprise dans l'intervalle [1,6 -2,1] MPa.

Finalement, à part le cas du composite BSR/BO25 avec substrat de textures perforées, qui a présenté une liaison moins importante, on a constaté une très bonne liaison pour les deux classes de résistances et pour les deux états de surface de substrat. On peut rendre ces résultats satisfaisants, à savoir, l'état hydrique des substrats lors du coulage du béton de réparation, la maniabilité adéquate qui a contribué à la propagation rapide et la pénétration du matériau de réparation dans les cavités et les entailles du substrat, la composition fine et homogène du béton de sable dépourvu d'éléments grossiers, et enfin le faible module d'élasticité du béton de sable qui produit plus de déformabilité au matériau de réparation et permet d'avoir de la compatibilité déformationnelle entre les deux différents bétons.

5. Conclusions

L'objectif de ce travail est de formuler un béton de sable et de développer ces performances afin d'obtenir un matériau de réparation cimentaire ayant une meilleure adhérence au support (substrat) et une capacité d'adaptation acceptable.

Il a été établi que les superplastifiants contribuent à l'amélioration de la maniabilité et de la résistance à la compression des bétons de sable. Un faible module d'élasticité, caractérisant le béton de sable concassé, est constaté favorable pour la réparation mince, non structurelle, qui offre une compatibilité adéquate entre les deux bétons. De plus, un retrait modéré de 426µm/m est obtenu à l'âge de 28 jours.

Les forces d'adhérence significatives sont produites avec de bonnes qualités de liaison entre le béton de sable et le substrat en béton ordinaire dont les surfaces sont rugueuses.

Références

- Bédérina, M. (2000) Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Thèse de Magister, Université de Laghouat, Algérie.
- Bederina, M., M. Gotteicha, B. Belhadj, R. Dheily, M. Khenfer and M. Queneudec (2012) Drying shrinkage studies of wood sand concrete-effect of different wood treatments. *Construction and Building Materials* 36: 1066-1075.
- Bédérina, M., M. Khenfer, R. Dheilly, M. Quéneudec (2005) Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cement and Concrete Research* 35(6): 1172-1179.
- Bederina, M., B. Laidoudi, A. Goullieux, M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec (2009) Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials* 23(3): 1311-1315.
- Bederina, M., L. Marmoret, K. Mezreb, M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec (2007) Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials* 21(3): 662-668.
- Belkacem, B., Madani Bederina, Khadra Benguettache, Michele Queneudec (2014) Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete. *Advances in Concrete Construction* 2(1): 13-27.
- Benaïssa, A., A. Kamen, K. Chouicha, S. Malab (2008) Panneau 3d au béton de sable. *Materials and structures* 41(8): 1377-1391.
- Benaïssa, A., P. Morlier, V. Tram (1992) Le béton de sable un matériau non fissurant. *Revue Algérie Equipement* 66: 7-11.
- Benaïssa, A., P. Morlier, C. Viguier (1993) Fluage et retrait du béton de sable. *Materials and structures* 26(6): 333-339.
- Benaïssa, A., P. Morlier, C. Viguier, J. Chauvin (1992) Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable. *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics* No. 504 (EM239).
- Benaïssa, I., B. Nasser, S. Aggoun, S. Malab (2015) Properties of fibred sand concrete sprayed by wet-mix process. *Arabian Journal for Science and Engineering* 40(8): 2289-2299.
- Bissonnette, B., M. Pigeon (2000) Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations." *Materials and structures* 33(2): 108-118.
- Bouziani, T., M. Bederina, M. Hadjoudja (2012) Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (Fsc). *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6(1): 59-64.
- Bouziani, T., A. Benmounah, Z. Makhloufi, M. Bédérina, M. Queneudec T'kint (2014) Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology* 28(18): 1823-1834.
- Chanvillard, G., O. Basuyaux (1996) Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*: 49-64.
- Chauvin, J., G. Grimaldi (1988) Les bétons de sable. *Bulletin de liaison Laboratoires des Ponts et Chaussées (LCPC)*(157): 9-15.
- Courard, L., B. Bissonnette (2004) Essai dérive de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation: analyse des paramètres d'essai. *Materials and structures* 37(5): 342-350.
- Elbakry, H. M., A. M. Tarabia (2016) Factors affecting bond strength of RC column jackets. *Alexandria Engineering Journal* 55(1): 57-67.

- Espeche, A. D., J. León (2011) Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. *Construction and Building Materials* 25(3): 1222-1235.
- Georges D, F. Jean (1998) *Nouveau guide du béton et de ses constituants* [New guide of concrete and its constituents]. 8th ed. Edition Eyrolles.
- Hadjoudja, M., M. Khenfer, H. A. Mesbah, A. Yahia (2014) Statistical models to optimize fiber-reinforced dune sand concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39(4): 2721-2731.
- Hassan, K., J. Brooks, L. Al-Alawi (2001) Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment. *Cement and Concrete Composites* 23(1): 93-101.
- Khay, S. E. E., J. Neji, A. Loulizi (2010) Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements. *Construction and Building Materials* 24(9): 1790-1795.
- Lukovic, M., G. Ye, K. Van Breugel (2012) Reliable concrete repair: a critical review. In *Proc. of international conference Structural Faults & Repair*.
- Momayez, A., M. Ehsani, A. Ramezani pour, H. Rajaie (2005) Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research* 35(4): 748-757.
- Morgan, D. (1996) Compatibility of concrete repair materials and systems. *Construction and Building Materials* 10(1): 57-67.
- Neville, A. M. (2000). *Propriétés Des Bétons*, Eyrolles.
- Qiao, F., C. Chau, Z. Li (2010) Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material. *Construction and Building Materials* 24(5): 695-700.
- Ramachandran, V. (1986) Cement with calcium carbonate addition. *Proceedings of the 8th International Congress on the Chemistry of Cements*, Rio de Janeiro, 22–27 September 1986 III, FINEP, Rio de Janeiro (1986), pp. 109-119.
- SABLOCRETE (1994) *Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation*. Ed. Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Serykh, M. M. (1997) Acquired experience in the use of sand concrete in Russia. In *French-Russian congress on sand concrete*, Bordeaux, France, pp. 17-8.
- Soliman, H., A. Shalaby (2014) Characterizing the performance of cementitious partial-depth repair materials in cold climates. *Construction and Building Materials* 70: 148-157.
- Tayeb, B., B. Abdelbaki, B. Madani, L. Mohamed (2011) Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal* 5: 25-29.
- Tayeb, B. A., B. A. Bakar, M. M. Johari (2013) Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite. *Materials and structures* 46(5): 743-753.
- Tayeb, B. A., B. A. Bakar, M. M. Johari, Y. L. Voo (2012) Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. *Construction and Building Materials* 36: 538-548.
- Zanotti, C., N. Banthia, G. Plizzari (2014) A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement and Concrete Research* 63: 117-126.