

Valorization of the crushed sand and of the desert sand in the composition of the self compacting concrete

Valorisation du sable de concassage et du sable du désert dans la composition des bétons autoplaçants

A. R'mili^{1,2} et M. Ben Ouezdou¹

¹Laboratoire de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Université Tunis El Manar, Tunisie.

²Ecole Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis, Université de Tunis, Tunisie.

Abstract. Self-compacting concretes (SCC) are highly fluid concretes that require high proportions in sand and fine particles with respect to the ordinary concrete (OC). The crushed sand (CS), spread granulometry, is a by-product of crushing rock mass. The desert sand (DS) is an extra fine sand, characterized by a tight distribution of grain size. Containing significant levels of fine sand, these two sands can be both interesting components of the SCC. This research is to incorporate the CS in the composition of concrete and to study the effect of its gradual replacement by the DS on the behavior of the fresh and hardened SCC. The experimental study shows that parameters of SCC workability are improved when the SC is partially replaced by the DS (<30%). However, at high levels of DS (> 30%), additional quantities of water and superplasticizer are necessary to meet the self-compacting properties. The mechanical strength decreases when adding DS to CS, but they are reaching acceptable values for DS in moderate proportioning. The performance of SCC is much better than those of OC using the same aggregates.

Specification tests of durability show that the coefficients of water absorption by capillarity and by immersion increase when adding DS to CS, while the coefficient of permeability decreases.

Résumé. Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides qui demandent des dosages élevés en sables et en éléments fins par rapport au béton ordinaire (BO). Le sable de concassage (SC), à granularité étalée, est un sous-produit de concassage des roches massives. Le sable du désert (SD) est un sable extra-fin, caractérisé par une distribution serrée de grosseur des grains. Renfermant des teneurs importantes en fines, ces deux sables peuvent être des composants intéressants des BAP. Cette recherche consiste à incorporer le SC dans la composition des bétons et étudier l'effet de son remplacement progressif par le SD sur le comportement à l'état frais et durci des BAP. L'étude expérimentale montre que les paramètres d'ouvrabilité des BAP sont améliorés lorsque le SC est partiellement remplacé par le SD (< 30%). Cependant, à une teneur

élevée en SD (> 30%), des quantités supplémentaires en eau et en superplastifiant sont nécessaires, pour répondre aux propriétés autoplaçantes. Les résistances mécaniques diminuent en ajoutant le SD au SC, mais elles atteignent des valeurs acceptables pour des dosages modérés en SD. Les performances des BAP sont nettement meilleures que celles des BO confectionnées avec les mêmes granulats. Les essais de spécification de la durabilité montrent que les coefficients d'absorption d'eau par capillarité et par immersion augmentent en ajoutant le SD au SC alors que le coefficient de perméabilité diminue.

1 Introduction

En Tunisie, les granulats pour bétons sont constitués exclusivement par des sables roulés et des graviers concassés. Beaucoup de régions du pays souffrent d'un manque remarquable en sable alluvionnaire approprié. Or les carrières de roches massives produisent des quantités considérables de sable de concassage (SC) qui sont écartés jusqu'à présent de la composition des bétons [1]. En outre, le sud du pays renferme des quantités inépuisables de sables de désert (SD) qui n'a jamais été exploité sérieusement dans le domaine de la construction. Cependant ces sables (SC et SD) qui renferment naturellement des teneurs élevées en fines peuvent constituer une source intéressante pour la composition des bétons autoplaçants (BAP) [2, 3]. Ces BAP nécessitent, entre autres, des teneurs élevées en sables et en fillers par rapport au béton conventionnel [4].

Cette étude consiste à l'analyse du comportement des BAP à l'état frais et durci en substituant le SC par le SD. Différents mélanges de BAP sont confectionnés en utilisant des matériaux et produits fabriqués en Tunisie : un ciment Portland ordinaire CPA CEM I 42.5, un super plastifiant SIKA (SP), un gravier (4/16), un filler calcaire et les 2 sables SC (0/6.3) et SD (0/0.315).

L'étude expérimentale sur l'ouvrabilité des BAP montre qu'à un dosage faible en SD par rapport à SC, la fluidité, la viscosité et la capacité du remplissage sont améliorées. Par contre pour des dosages en SC élevés, les BAP demandent des quantités en eau et en superplastifiant supplémentaires pour répondre aux critères d'un BAP. Les résistances mécaniques diminuent en ajoutant le SD, elles atteignent des valeurs élevées pour des teneurs faibles en SD et décroissent au delà de ce pourcentage. Les résistances des BAP sont meilleures que celles des bétons ordinaires confectionnés avec les mêmes matériaux. L'étude comprend aussi l'effet de la combinaison de SD et SC sur les caractéristiques de spécification de la durabilité (perméabilité, absorption d'eau...).

2 Matériaux constitutifs

- Les granulats qui ont servi à la composition des bétons de cette étude sont constitués d'un sable gros de concassage calcaire (SC) ($\text{CaCO}_3 > 95\%$) provenant du nord du pays, d'un sable extra-fin, alluvionnaire et siliceux (SD) ($\text{SiO}_2 \approx 93.7\%$) provenant du désert du sud tunisien et d'un gravillon (G) calcaire concassé (4/16) provenant de la même carrière que le sable de concassage (tableau 1 et figure 1).
- Le liant est constitué d'un ciment CEM I 42.5 conforme à la norme NT 47.01 et d'un filler calcaire (F) ($\text{CaCO}_3 > 99\%$) provenant du Centre-ouest de la Tunisie (Kasserine) (figure 1).
- L'adjuvant utilisé est un superplastifiant-haut réducteur d'eau (produit de SIKA-Tunisie).

Tableau 1. Caractéristiques physiques des granulats

Granula	Dmax (mm)	Fines < 80µm	Module Finesse	Equivalent	Valeur de Bleu	MVA* (g/cm ³)	MVR* (g/cm ³)
SC	6.3	12.77	2.82	78.6	1.23	1.584	2.703
SD	0.315	33.31	0.94	61.5	3.02	1.393	2.639
G	16	-	-	-	-	1.407	2.706

* MVA : masse volumique apparente, MVR : Masse volumique réelle

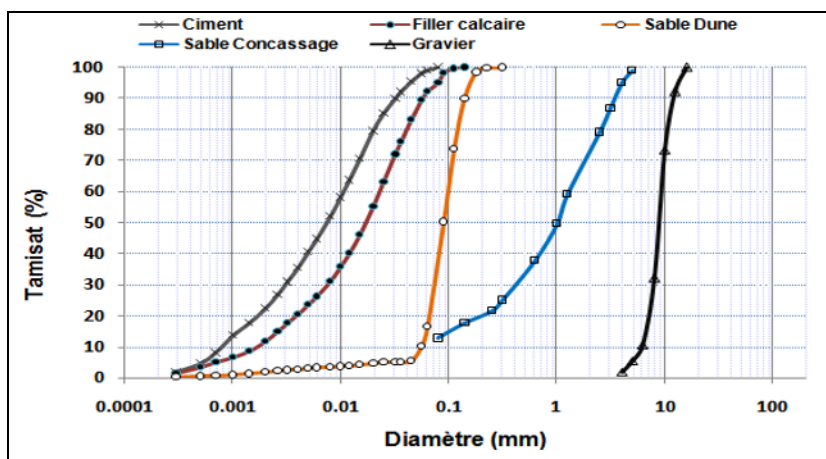


Fig. 1. Courbes granulométriques des liants et granulats

3 Formulation des BAP

3.1 Paramètres de formulation

La méthode de formulation des BAP adoptée se base sur le remplissage des vides intergranulaires par la pâte liante garantissant un comportement autoplaçant des bétons. Le rapport volumique de sable sur granulat (V_s/V_{gr}) est égal à 0.5, le dosage de ciment est de l'ordre de: $C = 350 \text{ kg/m}^3$, la teneur en air est de 1.5% (volume) et le facteur d'empilement (PF) est égal à 1,18.

Le dosage en eau requis, pour la conception du mélange des BAP, est déterminé pour obtenir un étalement relatif de la pâte $R_p = 1$ [5].

L'empilement optimal des 2 sables (SC et SD), déterminé par le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) en utilisant le logiciel René-LCPC, est obtenu pour 15 % de SD et 85 % de SC [6].

En plus de ce mélange optimal, d'autres combinaisons ont été étudiées en remplaçant progressivement SC par SD (de 15 à 100 %) (Tableau 2).

Les proportions de superplastifiant ont été variées de 0,7, 1, 1.3 et 1.6 % par rapport au dosage en liant (ciment + filler).

3.2 Formulation des BAP

Après le choix des paramètres de formulation et les dosages de ciment, d'eau et du superplastifiant (SP), la détermination des dosages en granulat et en filler (F) se base sur les approches suivantes :

Les masses des sables (M_S) et du gravier (M_G) sont calculées par les formules suivantes (éq.1) [7] :

$$M_S = PF \times MVA_S \times \frac{V_S}{V_{gr}} \quad \text{et} \quad M_G = PF \times MVA_G \times \left(1 - \frac{V_S}{V_{gr}}\right) \quad (1)$$

Dans laquelle PF , MVA_S , MVA_G , V_S et V_{gr} sont respectivement le facteur d'empilement, la masse volumique apparente du sable et du gravillon, les volumes des sables et des granulats (sables et gravillons ensemble)

La teneur volumique en filler est calculée par (éq.2) [8] :

$$V_F = \frac{V_V - V_{air} - V_C \left(1 + a_C R_p + b_C + \frac{m_{Sp} n \rho_C}{\rho_{Sp}}\right)}{1 + a_F R_p + b_F + \frac{m_{Sp} n \rho_F}{\rho_{Sp}}} \quad (2)$$

Dans laquelle :

- V_V , V_{air} et V_C sont respectivement les volumes des vides, d'air et du ciment dans 1 m³ de BAP,
- ρ_C , ρ_F et ρ_{Sp} sont respectivement les densités du ciment, du filler et du superplastifiant,
- m_{Sp} et n sont l'extrait sec et la proportion du superplastifiant,
- R_p , a_i et b_i sont respectivement l'étalement relatif et les paramètres correspondants au ciment et au filler [5, 8,[9].

4 Caractéristiques des BAP à l'état frais

Les BAP formulés pour les 4 proportions en SP et pour les 7 combinaisons de SC et SD sont soumis aux essais de caractérisation d'ouvrabilité à l'état frais pour évaluer leurs propriétés autoplaçantes tels que la fluidité, la viscosité et la capacité de remplissage. Le choix est porté sur deux essais qui décrivent la mobilité en milieu non confiné et deux essais pour la mobilité en milieu confiné.

IL s'agit respectivement des essais d'étalement au cône d'Abrams et d'écoulement à l'entonnoir d'une part et des essais de capacité de remplissage à la boîte en U et du taux de remplissage à la boîte en L d'autre part. Il est à rappeler que les critères de validation de ces essais sont respectivement un diamètre d'étalement compris entre 60 et 75 cm, un temps d'écoulement entre 6 et 14 secondes, une hauteur de remplissage supérieur à 30 cm et un rapport des hauteurs de remplissage amont et aval supérieur à 80 %.

4.1 Mobilité en milieu non confiné

La mobilité des BAP en milieu non confiné, pour différentes combinaisons de sables, est décrite par les l'étalement (figures 2) et le temps d'écoulement (figures 3).

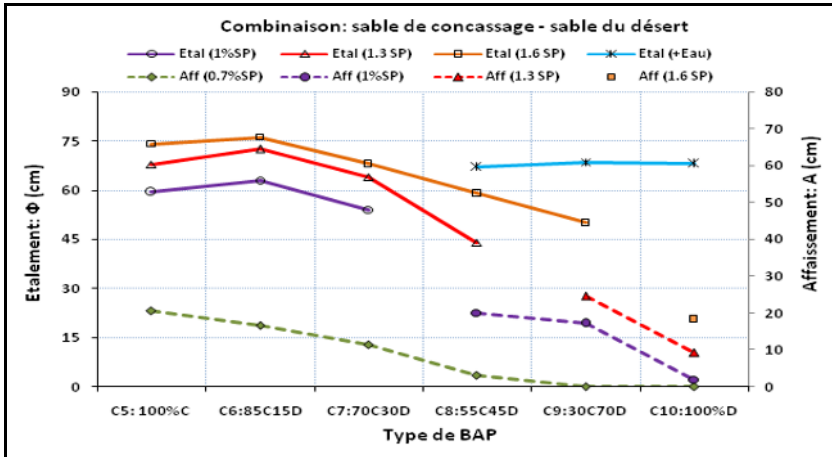


Fig. 2. Étalement au cône d'Abrams des BAP

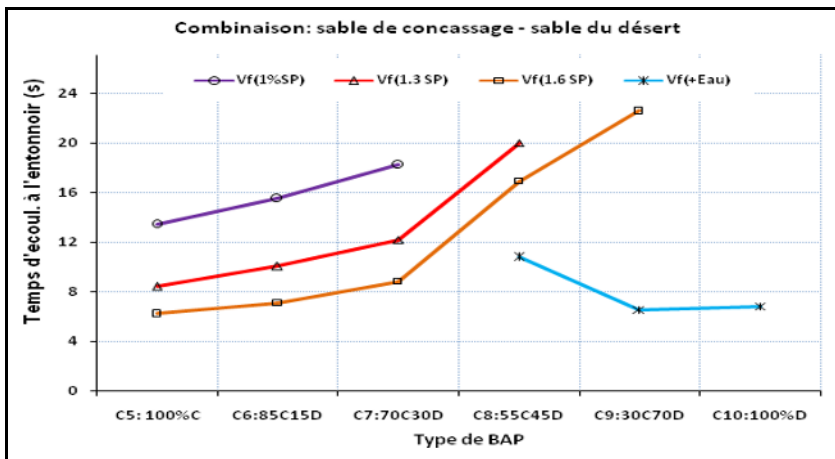


Fig. 3. Temps d'écoulement à l'entonnoir des BAP

4.2 Mobilité en milieu confiné

La mobilité des BAP en milieu confiné, pour différentes combinaisons de sables, est décrite par la capacité de remplissage (figure 4) et le taux de remplissage (figure 5).

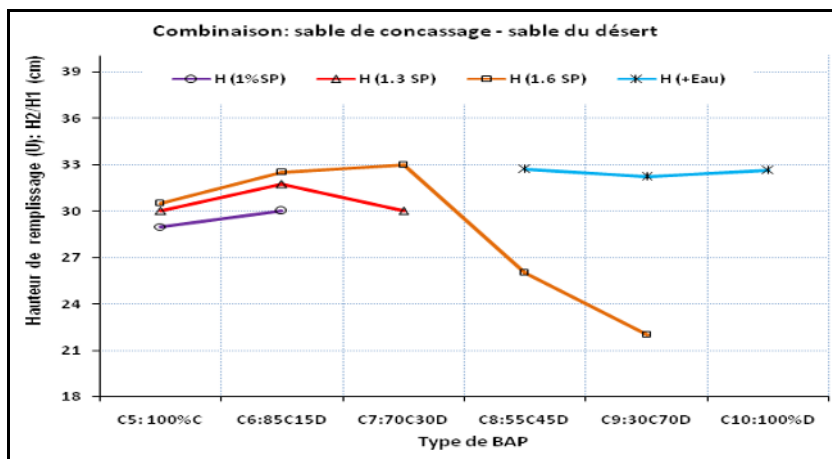


Fig. 4. Capacité de remplissage à la boîte en U des BAP

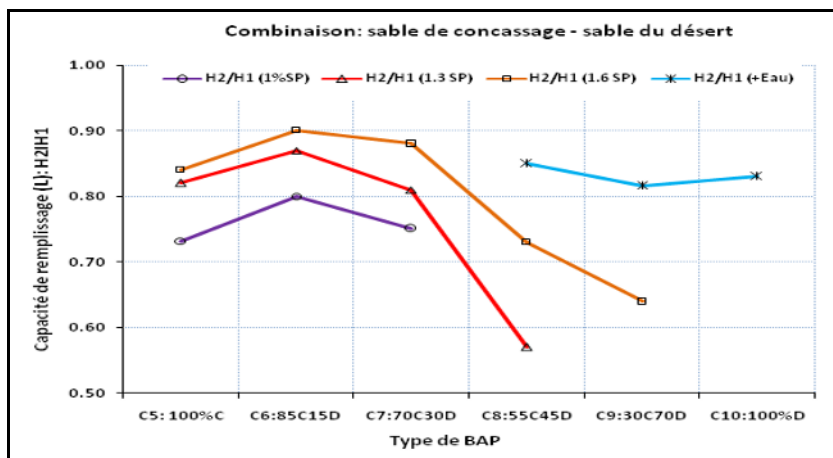


Fig. 5. Taux de remplissage à la boîte en L des BAP

Les courbes représentées par les figures 2, 3, 4 et 5 montrent que :

- Pour tout dosage en superplastifiant (SP), l'ajout du sable du désert (SD) au sable de concassage (SC) jusqu'à 15 % améliore les paramètres rhéologiques d'ouvrabilité (étalement, capacité et taux de remplissage). Au delà de cette teneur en SD ces paramètres diminuent et ne répondent pas aux critères d'un béton autoplaçant (BAP). A des dosages en SP faible et à des teneurs en SD élevé, les BAP se comportent comme un béton ordinaire.
- A des dosages modérés en SD ($\leq 30\%$), le temps d'écoulement mesuré montre que l'ajout de SD au SC améliore la viscosité des BAP [9].
- A des teneurs élevées en SD ($> 30\%$), les BAP ont nécessité un ajout supplémentaire en eau et en superplastifiant pour avoir des propriétés autoplaçantes [9].

4.3 Composition des BAP retenus

Suite aux résultats des essais d'ouvrabilité présentés au paragraphe précédent, les BAP retenus, ont été choisis tel que leur étalement à l'essai au cône d'Abrams est égal à ≈ 65 cm. Leurs compositions sont présentées au tableau 2 suivant :

Tableau 2. Compositions des BAP retenus

Code des BAP	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Combinaison de sables	100 % SC	85% SC 15% SD	70% SC 30% SD	55% SC 45% SD	40%C 60%D	100%SD
Sable de concassage SC	872.614	776.931	636.915	496.302	263.807	0.000
Sable du désert SD (kg)	0.000	132.948	265.984	398.320	608.930	773.102
Gravillon (kg)	814.176	811.055	809.101	806.462	803.256	798.200
Ciment (kg)	346.846	345.517	344.685	343.560	342.195	340.041
Filler (kg)	174.030	147.716	148.532	150.578	161.129	219.652
Eau (litres)	178.407	173.737	173.602	173.795	176.219	193.590
Superplastifiant (litres)	6.77	6.41	7.89	7.91	8.05	8.96

5 Essais sur bétons durcis

5.1 Résistances mécaniques

Les BAP retenus ont été soumis à des essais d'écrasement pour la détermination des résistances à la compression et à la traction à 7 et 28 jours.

De même, des bétons témoins en béton ordinaires (BO) ont été confectionnés à base de 100% de SC ou SD pour les comparer aux BAP correspondants. Les résultats de ces essais (figures 6 et 7) montrent que les résistances les plus élevées sont obtenues pour les BAP à fort dosage en SC. Au-delà de 30 % de SD, ces résistances chutent remarquablement. Les résistances mécaniques des BAP sont nettement meilleures que celles des BO à base de 100% de SC ou 100% de SD [10].

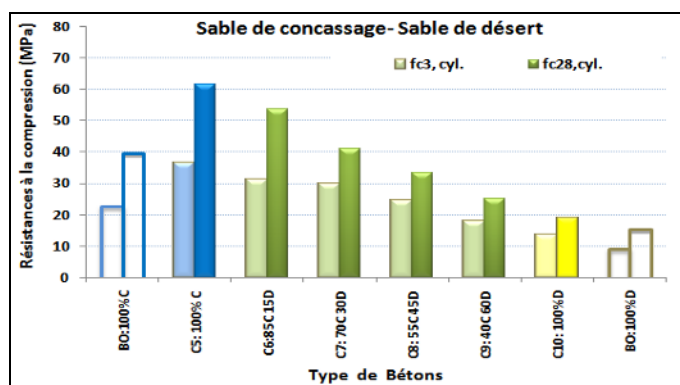


Fig. 6. Résistances à la compression des BAP et BO

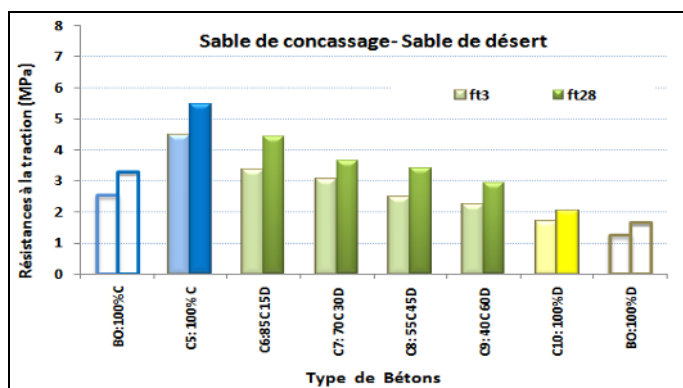


Fig. 7. Résistances à la traction des BAP et BO

5.2 Paramètres de durabilité

Les figures 8 et 9 montrent que les coefficients d'absorption par capillarité et par immersion augmentent avec la teneur en SD.

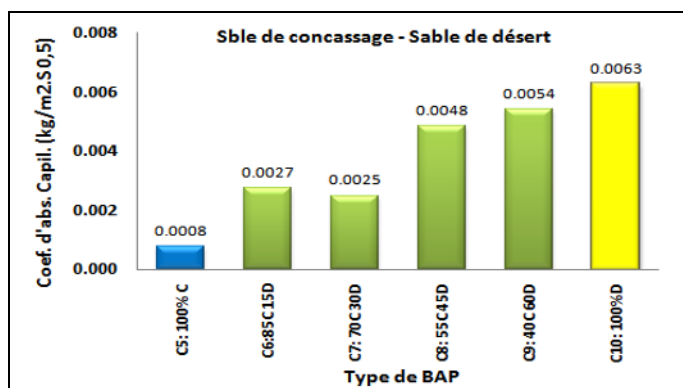


Fig. 8. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des BAP retenus

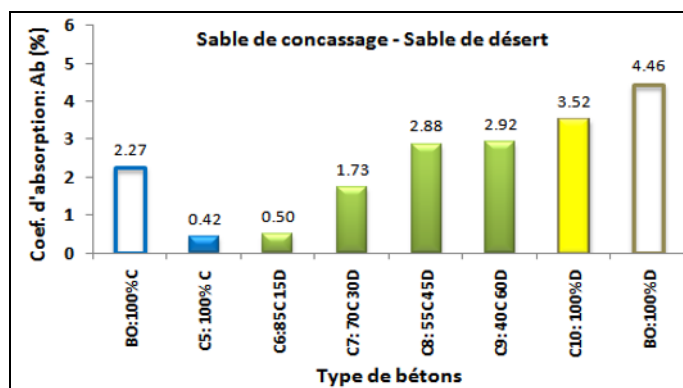


Fig. 9. Coefficient d'absorption d'eau par immersion des BAP et BO

La figure 10 montre que l'ajout de SD au SC diminue le coefficient perméabilité au gaz des BAP. Il est à noter que ce coefficient est égal à $5,2 \cdot 10^{-12}$ et $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ pour les BO à base de 100% de SC et 100% de SD respectivement. La perméabilité des BO (de l'ordre de 10^{-12}) est donc nettement supérieure à ceux des BAP (de l'ordre de 10^{-15}) [10].

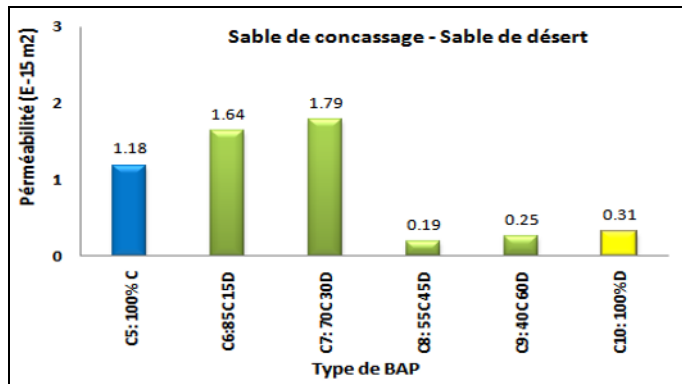


Fig. 10. Coefficient de perméabilité des BAP

5. CONCLUSION

Cette étude a montré que la substitution partielle ($\approx 15\%$) du sable de concassage (SC) par le sable du désert (SD), dans la composition des bétons autoplaçants BAP, contribue à l'amélioration des paramètres d'ouvrabilité à l'état frais. A des teneurs élevées en SD ($> 30\%$), les caractéristiques rhéologiques ne sont pas satisfaites, ce qui a nécessité l'augmentation des teneurs en eau et en super-plastifiants.

Les résistances à la compression et à la traction des BAP ont diminué en ajoutant le SD au SC ($fc_{28} \approx 50 \text{ MPa}$ pour 15% de SD/SC). Mais ces résistances atteignent des valeurs intéressantes pour des proportions modérées en SD ($fc_{28} \approx 30 \text{ MPa}$ pour 40% de SD/SC). L'absorption d'eau des BAP augmente en ajoutant le SD au SC mais la perméabilité diminue.

Les performances des BAP sont nettement supérieures à celles des bétons ordinaires témoins (BO) confectionnés avec les mêmes composants (un gain de 50% de résistance à la compression est observé pour le BAP par rapport au BO confectionnés avec 100% de SC).

Les sables concassés calcaires sont une alternative intéressante au remplacement des sables alluvionnaires siliceux (roulés) pour la confection des bétons de tout genre. L'incorporation partielle du sable de désert dans la composition des BAP peut apporter une solution pour certains travaux dans les régions désertiques du sud du pays.

Références

1. T. Achour, A. Lecomte, M. Ben Ouedzou, R. Mensi, I. Joudi, Mat. Str., **5**, 41(2008)
2. M. Bederina, M.M. Khenferb, R.M. Dheilleyc, M. Queneudec, Cem. Con. Res.,**35**, (2005)
3. G. Zhang, J. Song, J. Yangb, X. Liu, Building and Environment, **41**(2006)
4. H. Okamura, M. Ouchi, 1st Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, (1999)
5. P. Domone, CH. Wen, Cem. Con. Res., **27** (1997)
6. T. Sedran, F. De Larrard, Bul. Lia. Lab. Ponts et Chaussées, **194**(1994)
7. S. Nan, M. Buquan, Cem. Con. Com., **25** (2003)
8. HJH. Brouwers, HJ.Radix, Cem. Con. Res., **29** (2007).
9. A. Rmili, M. Ben Ouedzou, M. Added, I. Ghorbel, Part I, Int Jou Con Str Mat, **1**, 3 (2009)
10. A. Rmili, M. Ben Ouedzou, M. Added, I. Ghorbel, Part II, Int Jou Con Str Mat, **1**, 3 (2009)