

---

# Influence de l'ajout de fibres métalliques sur le retrait des bétons de sable de dune

**M. Hadjoudja<sup>a</sup>, H.A. Mesbah<sup>b</sup>, M.M. Khenfer<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Laboratoire de Génie Civil, Université A.Tledji de Laghouat, Algeria

<sup>b</sup> Laboratoire LGCGM, Département de Génie Civil, INSA de Rennes, France

*habib-abdelhak.mesbah@univ-rennes1.fr*

---

*RÉSUMÉ. Ce travail de recherche vise à valoriser les sables de dune en abondance au Sahara algérien dans les bétons de sable et de montrer la possibilité de remplacer avantageusement le béton traditionnel dans certains domaines de la construction. Une étude expérimentale a été menée dans le but d'évaluer l'influence de l'incorporation des fibres métalliques sur le phénomène de fissuration causé par le retrait important enregistré dans le cas des bétons de sable de dune. Pour se faire, des essais de retrait libre et de retrait endogène en présence de fibres ont été réalisés sur le béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques (BSRFM). Les résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus sur le béton de sable de dune sans fibre. La méthode des plans d'expériences a été choisie pour évaluer l'influence de trois facteurs qui sont le rapport eau sur ciment, le dosage en filler calcaire et le pourcentage en volume de fibres sur le retrait total et le retrait endogène des bétons de sable.*

*ABSTRACT. This study aims at valuing the dune sand that is in abundance in Algerian Sahara in sand concrete and to show the possibility of replacing advantageously the traditional concrete in certain domains of the construction. An experimental study was led with the aim of estimating the influence of the incorporation of steel fibers to reduce cracking due to the high of shrinkage in the case of dune sand concrete. For study the influence of volume steel fibers on drying and autogenous shrinkage, shrinkage tests were realized. The results of reinforced sand concrete are then compared with plain dune sand concrete without fibers. Experimental design method was chosen to estimate the influence of three factors which are water to cement ratio, fibers volume and dosage of limestone fillers on the drying and autogenous shrinkage of dune sand concrete.*

*MOTS CLES: Sable de dune, retrait, fibres métalliques, béton de sable, plan d'expériences.*

*KEYWORDS: Dune sand, shrinkage, steel fibers, sand concrete, experimental design.*

---

## 1. Introduction

L'utilisation des sables locaux comme matériaux de construction répond aux considérations économiques et écologiques. Les travaux menés dans le cadre du Projet National Sablocrète ont montré l'intérêt d'un tel matériau, aussi bien sur le plan technologique, que sur le plan environnemental (Chanvillart, 2000, Sablocrète, 1994). Le béton de sable (BS) a fait également l'objet de quelques travaux et de nombreuses applications (Bederina *et al.*, 2005, Breysse *et al.*, 1997, Hadjoudja, 2001).

Le béton de sable est sujet à des variations dimensionnelles de retrait dues à l'inexistence de granulats et à la forte consommation de l'eau pendant la phase d'hydratation ou à son évaporation. Le phénomène de retrait engendre des contraintes significatives qui peuvent donc conduire à la fissuration. Mais de nos jours une nouvelle technique peut être appliquée pour tenter de remédier à cet aspect négatif, cela consiste à l'ajout des fibres métalliques au sein de la matrice, ces derniers pouvant participer d'une manière positive dans la réduction du retrait (Mangat *et al.*, 1988, Swamy *et al.*, 1981).

De nombreuses études se sont intéressées à l'évolution des déformations de retrait du béton de sable (Benaïssa *et al.*, 1992). Il a été remarqué que la cinétique du retrait de dessiccation du BS est extrêmement rapide et le retrait de dessiccation du BS est deux fois plus important que celui du béton ordinaire.

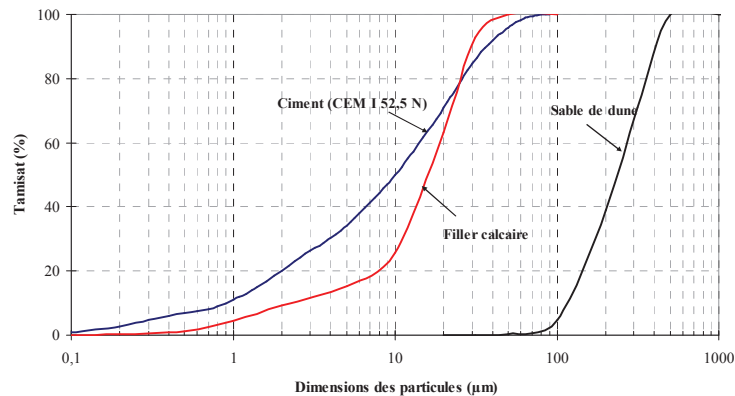
Dans le présent article, nous nous intéressons uniquement aux bétons de sable de dune renforcé avec des fibres métalliques (BSDFM) destinés à la réalisation d'éléments de structure. Deux protocoles sont utilisés pour simplement établir une formulation de base. Nous avons opté pour l'approche associée au logiciel de formulation BétonlabPro du LCPC (BétonlabPro2, 2000) pouvant convenir aux propriétés recherchées, et qui devra être optimisée expérimentalement, en utilisant la technique des plans d'expériences (Goupy, 1988). Ce qui permet à la fois de rationaliser la programmation des essais et d'établir une modélisation empirique des réponses obtenues en fonction des paramètres de l'étude.

## 2. Programme expérimental

### 2.1 Propriétés des matériaux

Un sable de dune fin 0/0,4 mm siliceux a été employé ; il est caractérisé par sa finesse et son homométrie. Dans cette étude du BSDFM, le mélange a été préparé avec un ciment Portland (CEM I 52.5) et une addition minérale type filler calcaire BETOCARB® P2. Des fibres métalliques à extrémités déformées de type DRAMIX SIKA ont été utilisées ( $l/d=55$ ,  $l=30\text{mm}$ ). Un superplastifiant SIKA Viscocrete

TEMPO 9, à base de polycarboxylate a été employé. La figure 1 montre la courbe granulométrique du ciment, du filler calcaire et du sable de dune.



**Figure 1.** *Granulométrie du ciment, du filler calcaire et du sable de dune*

Tous les bétons ont été optimisés à l'aide du logiciel BétonlabPro2 selon les caractéristiques rhéologiques souhaitées. Ce logiciel permet de simuler des gâchées de béton et d'en prédire les propriétés à l'état frais. La structure granulaire des mélanges, qui conditionne l'ensemble des propriétés est décrite par le Modèle d'Empilement Compressible (De Larrard, 2000). Les différentes propriétés des granulats, des liants et des adjuvants sont saisies dans une banque de constituants. Pour prendre en considération l'influence des fibres sur la formulation des bétons de sable, nous avons déterminé expérimentalement les compacités en fonction du volume de fibres. Les résultats obtenus sont ensuite injectés dans le logiciel.

## 2.2 Plan d'expérience

Le travail est mené dans le cadre de la théorie des plans d'expériences qui permet de rationaliser le nombre des essais à effectuer et d'établir une modélisation des réponses obtenues en fonction des paramètres de l'étude. Dans notre cas, les réponses souhaitées sont le retrait libre et le retrait endogène. Le tableau 1 récapitule l'ensemble des facteurs retenus susceptibles d'influencer la réponse étudiée. Ces valeurs définissent les bornes de notre domaine d'étude, dans lesquelles le modèle pourra être utilisé par interpolation. Nous avons étudié l'influence de trois facteurs qui sont le pourcentage en volume de fibres (0%, 0,15 %, 0,60 %, 1,05 %, 1,20 %), le dosage en filler calcaire (64, 100, 200, 300 et 335 kg/m<sup>3</sup>) et le rapport E/C compris entre 0,46 et 0,73. Le dosage en ciment est constant et pris égal à 450 kg/m<sup>3</sup>.

Le modèle retenu à priori est un développement polynomial. La prise en compte à priori de certaines interactions entre facteurs constitue un ensemble d'hypothèses que la méthodologie permettra de rejeter ou de valider (Breysse *et al.*, 1997). Pour cela un plan d'expérience central composite comprenant 17 expériences a été utilisé pour évaluer l'influence de ces trois facteurs sur les caractéristiques de variations dimensionnelles et pondérales du béton BSDFM. La matrice des essais comprend les 8 essais correspondant à un plan factoriel complet, 3 essais dans lesquels les facteurs sont fixés à leurs niveaux 0 dits points centrés et  $2^k$  essais (k:facteurs), dits points en étoile, dans lesquels les facteurs sont fixés successivement aux niveaux  $-\alpha$  et  $+\alpha$ . Le nombre de points centrés est fonction du nombre de facteurs variables et des exigences de l'expérimentateur quant à l'optimalité du plan (isovariance par rotation, précision uniforme, quasi-orthogonalité).

**Tableau 1.** Valeurs codées et absolues pour les paramètres étudiés

Paramètres	Facteurs	Niveau de variation					Intervalle de variation $\Delta\delta$
		-1,353	-1	0	+1	+1,353	
Eau/Ciment	E/C	0.46	0.50	0.60	0.70	0.73	0.10
Dosage des fillers calcaire	F	64,5	100	200	300	335,3	100
Dosage des fibres	Vf %	0	0,15	0,60	1,05	1,20	0,45

**Tableau 2.** Éléments code pour les variables utilisées dans le plan d'expérience

Référence	Type de point	Facteurs		
		F	Vf%	E/C
BSDFM 1	factoriel	-1	-1	-1
BSDFM2	factoriel	-1	-1	+1
BSDFM3	factoriel	-1	+1	-1
BSDFM4	factoriel	-1	+1	+1
BSDFM5	factoriel	+1	-1	-1
BSDFM6	factoriel	+1	-1	+1
BSDFM7	factoriel	+1	+1	-1
BSDFM8	factoriel	+1	+1	+1
BSDFM9	Axial	-1,353	0	0
BSDFM10	Axial	+1,353	0	0
BSD11	Axial	0	-1,353	0
BSDFM12	Axial	0	+1,353	0
BSDFM13	Axial	0	0	-1,353
BSDFM14	Axial	0	0	+1,353
BSDFM15	central	0	0	0
BSDFM16	central	0	0	0
BSDFM17	central	0	0	0

La valeur de  $\alpha$  dépend de  $k$ , dans un plan à trois facteurs  $\alpha = 1,353$  pour respecter le critère de presque orthogonalité (Goupy, 2005]. Le domaine expérimental de l'étude s'étend maintenant aux points en étoile. Le calcul des effets et des interactions permet d'élaborer un modèle quadratique qui doit être validé. Les coefficients «  $a_i$  » du modèle quadratique se calculent à partir des valeurs mesurées. Un logiciel approprié a été employé pour l'analyse statistique des résultats. L'effet de chaque facteur est évalué à cinq niveaux différents. Les valeurs codifiées retenues sont : -1.353, -1, 0, +1, + 1.353. Les 17 combinaisons des BSDFM de mélange exprimées en éléments codés sont données dans le tableau 2.

### 2.3. Dispositifs et conditions expérimentales

Les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur à pales avec mouvement planétaire, avec pour chaque formulation des gâchées de 100 litres. Les compositions des 17 mélanges sont récapitulées dans le tableau 3. Un affaissement pour tous les bétons compris entre 12 et 15 cm correspondant à une consistance plastique a été recherché. Pour cela un ajustement de la consistance a été nécessaire pour quelques formulations avec l'ajout d'un superplastifiant. Des essais de retrait libre conformément à la norme NF P 15-433 ont été effectués sur des éprouvettes 7x7x28 cm équipées de plots métalliques à chaque extrémité. Elles ont tout d'abord été maintenues à une température de 20°C et à 100% d'humidité relative. Puis à 24 heures, après démoulage, les éprouvettes sont placées dans une salle à température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et une humidité relative de 50 %. Pour la mesure du retrait endogène, l'éprouvette est isolée de l'humidité ambiante par une feuille d'aluminium adhésive pour empêcher tout échange d'humidité avec le milieu extérieur. La déformation longitudinale due au retrait est mesurée à l'aide d'un rétractomètre digital, qui permet le suivi de sa longueur.

### 3. Résultats et discussion

Le plan composite a été réalisé et les résultats du retrait en fonction du temps sont présentés dans le tableau 4, les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes différentes fabriquées à partir d'un même mélange. La première étape consiste à déterminer les facteurs influents et à calculer le modèle quadratique permettant de décrire les valeurs expérimentales. Une analyse de variance permet de dissocier les différents effets étudiés à partir de la variance de la réponse mesurée. La signification statistique de chaque effet est ensuite testée en comparant la variance des effets décrits par le modèle obtenu au moyen de la méthode des moindres carrés, avec une estimation de la variance résiduelle due aux erreurs expérimentales. Les résultats de ce plan sont résumés dans les modèles mathématiques du second degré. Ces modèles permettent de tracer les courbes isoréponses.

**Tableau 3.** Proportions des mélanges du béton de sable de dune

Mélanges N°	Sable	F	Vf		E/C	Ciment	Eau	Sp
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>		kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
BSDFM 1	1227	100	0.15	13,5	0.50	450	225	2,14
BSDFM2	1260	100	0.15	13,5	0.70	450	315	0
BSDFM3	1198	100	1.05	94,5	0.50	450	225	2.10
BSDFM4	1194	100	1.05	94,5	0.70	450	315	0
BSDFM5	1080	300	0.15	13,5	0.50	450	225	3.2
BSDFM6	1028	300	0.15	13,5	0.70	450	315	0
BSDFM7	1060	300	1.05	94,5	0.50	450	225	6.12
BSDFM8	1020	300	1.05	94,5	0.70	450	315	0
BSDFM9	1236	64.5	0.60	54	0.60	450	270	0.50
BSDFM10	1066	335.3	0.60	54	0.60	450	270	1
BSD11	1160	200	0	0	0.60	450	270	0
BSDFM12	1129	200	1.20	108	0.60	450	270	0.50
BSDFM13	1178	200	0.60	54	0.46	450	207	3.60
BSDFM14	1095	200	0.60	54	0.73	450	328.5	0
BSDFM15	1146	200	0.60	54	0.60	450	270	6,12
BSDFM16	1146	200	0.60	54	0.60	450	270	6,12
BSDFM17	1146	200	0.60	54	0.60	450	270	6,12

**Tableau 4.** Résultats des mélanges optimisés dans le plan d'expérience

Mélanges	Réponses (retrait en $\mu\text{m}/\text{m}$ )			
	Retrait endogène à 28 jours	Retrait libre à 28 jours	Retrait endogène à 120 jours	Retrait libre à 120 jours
BSDFM 1	364	824	660	1192
BSDFM2	343	835	650	1295
BSDFM3	249	691	460	977
BSDFM4	236	757	443	1188
BSDFM5	320	711	532	965
BSDFM6	309	856	506	1174
BSDFM7	335	656	581	958
BSDFM8	312	800	561	1145
BSDFM9	422	762	701	1213
BSDFM10	254	642	448	1042
BSD11	520	903	1062	1335
BSDFM12	267	688	482	1108
BSDFM13	420	715	726	1037
BSDFM14	358	901	625	1262
BSDFM15	415	791	713	1197
BSDFM16	408	770	680	1199
BSDFM17	398	813	673	1180

### 3.1 Exploitation des résultats du plan d'expériences

L'analyse de la variance permet de voir qu'elle est la contribution des facteurs à la variabilité de la réponse. La majorité des modèles adaptés ont présenté des coefficients de corrélation relativement élevés. Ceci montre une bonne corrélation entre les réponses obtenues par les simulations et les valeurs prédites par le modèle ainsi trouvé ( $R^2 = 0,96$ ). Ainsi, on peut s'attendre à ce que les modèles établis soient suffisamment précis pour prévoir le retrait des bétons de sable étudiés. Les modèles adoptés nous permettent de tracer les courbes iso-réponses en fonction différents facteurs d'étude.

### 3.2 Retrait libre

Le retrait de séchage est principalement dû au mécanisme de variation de la dépression capillaire et de la tension superficielle (Slowik *et al.*, 2008). Ce retrait étant identifié comme l'un des paramètres les plus préjudiciables pour les bétons de sable, il est nécessaire d'effectuer une caractérisation de ce comportement.

Les valeurs du retrait libre à 28 et 120 jours pour les 17 bétons de sable de dune optimisés sont données dans le tableau 4. Nous cherchons à estimer l'effet du rapport E/C, de l'addition des fillers calcaire et du volume de fibres métalliques sur le retrait libre des bétons de sable testés.

Le modèle mathématique identifié par la régression multilinéaire est le suivant :

A 28 jours :

$$RT/L(28j) = 1316,7 - 0,20041 * (F) - 302,83 * (Vf) - 1737,3 * (E/C) - 0,0044178 * (F)^2 + 0,2775 * (F) * (Vf) + 33,998(Vf)^2 + 2,65(F) * (E/C) + 149,85 * (Vf) * (E/C) + 1372,7 * (E/C)^2$$

A 120 jours :

$$RT/L(120j) = 386,43 - 0,235352 * (F) - 437,4 * (Vf) - 5061,8 * (E/C) - 0,004985 * (F)^2 + 0,79365 * (F) * (Vf) + 7,389(Vf)^2 + 1,025(F) * (E/C) + 238,65 * (Vf) * (E/C) + 3783,2 * (E/C)^2$$

Les courbes iso-réponses du retrait libre à 28 jours et à 120 jours dans le cas d'une teneur en fillers calcaires de  $100 \text{ kg/m}^3$  et de  $300 \text{ kg/m}^3$  sont présentées sur la figure 2

On remarque qu'à 28 jours pour une teneur en fillers calcaires faible ( $100 \text{ kg/m}^3$ ), le retrait libre est peu influencé par le rapport E/C (lignes presque parallèles à l'axe E/C), par ailleurs les fibres métalliques ont permis une réduction significative du retrait (de  $900 \mu\text{m}$  à  $680 \mu\text{m}$ ). Lorsqu'on augmente la teneur en fillers calcaire à  $300 \text{ kg/m}^3$ , l'effet du rapport E/C est plus flagrant (augmentation de la compacité et par conséquent une baisse des transferts d'humidité).

A 120 jours, les deux facteurs (E/C et Vf) ont une influence notable sur le retrait libre (de  $1340$  à  $940 \mu\text{m}$ ) pour une faible teneur en fillers ( $100 \text{ kg/m}^3$ ) alors que

l'effet du volume de fibres est moins évident dans le cas d'un dosage élevé de fillers calcaire de 300 kg/m<sup>3</sup>. Dans cette configuration le retrait libre varie entre 870 µm/m et 1070 µm/m.

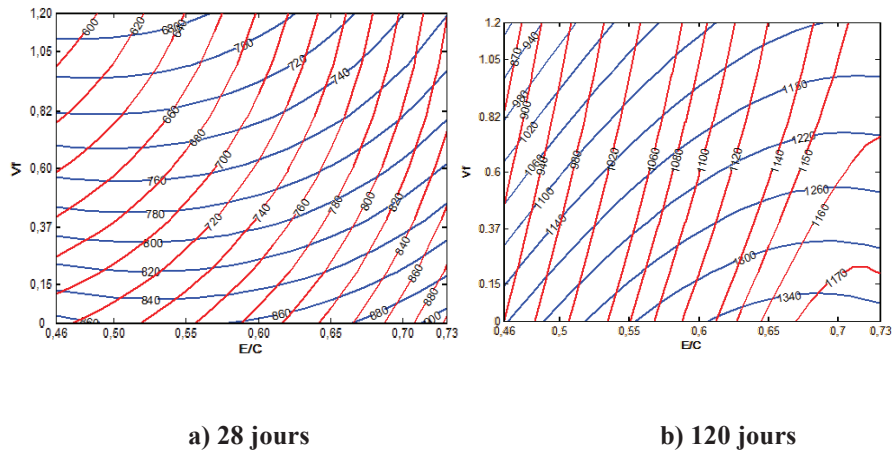


Figure 2. Courbes iso-retrait libre pour  $F=100 \text{ kg/m}^3$  ---- et  $F=300 \text{ kg/m}^3$  ----

### 3.3 Retrait Endogène

Le retrait endogène est lié au phénomène de la contraction Le Chatelier et de la consommation de l'eau par les réactions d'hydratation qui provoque une désaturation du réseau poreux indépendamment de la perte d'eau extérieure et de la variation de la température.

Le modèle mathématique identifié par la régression multilinéaire est le suivant :

A 28 jours :

$$RT/E (28j) = -958,73 + 2,1223 * (F) - 239,93 * (Vf) + 4465,9 * (E/C) - 0,0066106 * (F)^2 + 0,666 * (F) * (Vf) - 17,536 (Vf)^2 - 11,1(Vf) * (E/C) - 3824,6 * (E/C)^2$$

A 120 jours :

$$RT/E (120j) = -1075,5 + 3,1969 * (F) - 502,26 * (Vf) + 5926 * (E/C) - 0,010565 * (F)^2 + 1,418 * (F) * (Vf) + 11,052 (Vf)^2 - 0,2375(F) * (E/C) - 2,775(Vf) * (E/C) - 5047,2 * (E/C)^2$$

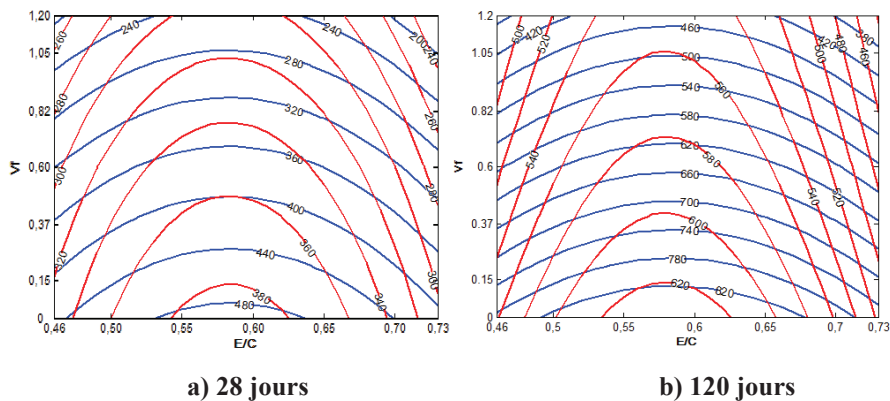
Les courbes iso-réponses du retrait endogène à 28 jours et à 120 jours dans le cas d'une teneur en fillers calcaires de 100 kg/m<sup>3</sup> et de 300 kg/m<sup>3</sup> sont présentées sur la figure 3.

On constate que le retrait endogène à 28 jours et 120 jours varie respectivement entre 200 µm et 480 µm/m et entre 380 µm/m et 620 µm pour une teneur en fillers



calcaire faible ( $100 \text{ kg/m}^3$ ) et entre  $240 \mu\text{m}$  et  $380 \mu\text{m}$  et entre  $440 \mu\text{m}$  et  $620 \mu\text{m}$  dans le cas d'une teneur en fillers calcaire plus importante ( $300 \text{ kg/m}^3$ ).

L'effet bénéfique du volume des fibres sur la diminution du retrait endogène a été constaté pour les deux dosages en fillers calcaires. On note par ailleurs que le rapport E/C n'a pas une influence significative sur le retrait endogène pour un dosage en fillers calcaires de  $100 \text{ kg/m}^3$ . Pour un dosage de  $300 \text{ kg/m}^3$ , il existe une interaction entre le rapport E/C et le volume de fibres sur le retrait endogène. Ainsi, comme on peut le voir sur les courbes de la figure 3, plus on ajoute des fibres, plus grande est la fourchette du rapport E/C qui sera concernée par la réduction du retrait endogène.



**Figure 3.** Courbes iso-retrait endogène pour  $F= 100 \text{ kg/m}^3$  ---- et  $F= 300 \text{ kg/m}^3$  ----

#### 4. Conclusion

Au terme de cette étude, on retient que le béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques, participe à l'enrichissement de la monoculture des matériaux de constructions et à la promotion d'un procédé non valorisé voir non utilisé jusqu'à présent. En effet sa généralisation permettra une exploitation rationnelle des matières premières disponibles localement et partiellement.

Les résultats de cette recherche expérimentale font ressortir les points suivants :

- l'utilisation de la théorie des plans d'expérience a permis d'optimiser de manière rationnelle les paramètres liés à la formulation des BSDFM.
- le sable de dune est un sable fin. Sa courbe granulométrique n'entre dans aucun des fuseaux de spécification des sables à béton. Son utilisation dans la confection des bétons de sable de dune demande un surdosage en ciment ; ce qui engendre un retrait important. Le rapport E/C, le dosage en fillers et le volume de fibres sont bien les facteurs les plus influents dans les phénomènes de retrait.

XXIX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

- L'optimisation du volume de fibre, du dosage en eau et du volume de fibres à travers cette étude de plans d'expériences va permettre de limiter l'importance du retrait et par conséquent éviter tout risque de fissuration.

## REFERENCES

- Bederina M., Khenfer M.M., Dheillic R.M., Quéneudeccm M., «Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes, *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, p 1172-1179
- Benaïssa A et al « Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable » *Annales de l'ITBTP* No 504, 1992.
- BétonlabPro2, « Une nouvelle approche de la formulation des bétons », logiciel de formulation », LCPC, 2000.
- Breysse D., Alain D., Attar A., Chauvin J.J., « Contribution des granulats au comportement mécanique des bétons de sable chargés », *Revue française de génie civil*. Vol.1, pp 89-114, 1997.
- Breysse, D., Attar, A., Soulier, B., Mesureur, B. « Modeling of steel fiber reinforced concrete response in tension », *Materials and Structures*, Vol. 30, June, p 259-268, 1997.
- Chanvillard G., « Precast Wall Elements In Stainless Amorphous Metallic Fiber Concrete » (FRC) - BEFIB' 2000 5<sup>th</sup> International RILEM Symposium, Lyon, 13/15 September 2000.
- De Larrard F, « Structures granulaires et formulations des bétons. », *Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 414 p, 2000.
- Goupy, J. « La méthode des plans d'expériences », *Dunod*, Paris, 1988.
- Goupy J. « Pratiquer les plans d'expériences », *Dunod*, Paris, 2005.
- Hdjoudja M., « Contribution à l'étude physico-mécanique du béton de sable de dunes », mémoire de Magister, Université Atledji de Laghouat, Algérie, Octobre 2001, 168.
- Mangat P.S., Azari M. « Shrinkage of steel fiber reinforced cement composite », *Matériaux et Structures*, vol. 21, 1988.
- Sablocrete, « Béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation, Synthèse du Projet National de Recherche et Développement SABLOCRETE », vol. 237, 1994. *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, ISBN: 2-85978-221-4, 1994, 195 pages.
- Slowik V., Schmidt M., Fritsch R., « Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of air entry value », *Cement and Concrete Composites*, 2008.
- Swamy R.N. and Al-Taan S.A., Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fibre concrete. » In: , *ACI JI, Proc.* 78, 1981, pp. 395–405.