

L'effet de l'étuvage par énergie solaire sur la résistance mécanique des bétons et durabilité de la préfabrication

BEN AMMAR Ben Khadda¹ and MEZGHICHE Bouzidi²

¹Département de génie civil, Université Mohamed Kheider, Biskra, Algérie, babkdeba_fr@yahoo.fr

²Département de génie civil, Université Mohamed Kheider, Biskra, Algérie, mezghichebm@yahoo.fr

RESUMÉ. *L'étude se base sur l'influence de durcissement à la vapeur atmosphérique par énergie solaire sur la résistance mécanique des bétons pour les éléments préfabriqués, le test de la carbonatation et la durabilité à été envisagé. Un programme expérimental a été réalisé pour étudier en parallèle l'effet du rapport eau/ciment (0.4, 0.5 et 0.6), l'influence de ciment type et l'influence des méthodes d'étuvage (le durcissement à l'eau, à l'air et le durcissement par étuvage à 29°C et 45°C). Six formulations de maniabilité similaire à base de deux types de ciment (CEMI 42.5) et (CEM II/B 42.5), trois de chaque type sont étudiées. Les résultats nous permettent de mettre en évidence l'effet bénéfique de la procédure de durcissement pour obtenir une maximale résistance mécanique, surtout à jeune âge et les résultats obtenus montrent que la carbonatation est bénéfique pour le béton seul à condition de réduire sa porosité et de montrer les effets du rapport eau/ciment sur la porosité ouverte.*

Mots clés : *Énergie solaire, Étuvage, Béton préfabriqué, Résistances mécaniques, Durabilité.*

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la sensibilité du public et politique aux questions d'environnement et de sécurité énergétique ont conduit à la promotion des sources d'énergie renouvelables (comme l'énergie solaire) [1].

L'étuvage par la vapeur atmosphérique des bétons dans les enceintes se poursuit jusqu'à ce que soit atteinte le minimum de résistance jugée indispensable pour la bonne tenue de l'élément après décoffrage [6], ce minimum paraît difficile à déterminer a priori, car il est fonction de la forme plus ou moins massive des pièces, et dépend de la nature des sollicitations auxquelles elles seront soumises après démoulage. Pour fixer les idées, on peut toutefois admettre qu'en l'absence de toute charge extérieure, la résistance minimale à la compression doit se situer aux environs de 50 à 60 % de la résistance demandée (28 jours dans les conditions naturelles) soit 10 MPa [7], ce qui permet de transporter et stocker les pièces de béton dans des chambres pour un durcissement naturel à l'air ambiant dans les entreprises de réalisation sans cassures. Le durcissement à la vapeur à la pression atmosphérique est une technique importante pour l'obtention de valeurs élevées de résistance au début de la production de béton préfabriqué. Le type de ciment, ainsi que les durées de durcissement et la température d'étuvage, sont des paramètres importants dans ce processus de durcissement [8].

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

On présente les matériaux utilisés, les études de la température dans l'enceinte d'étuvage et à l'air ambiant, les méthodes d'essais, les compositions des bétons, la préparation des échantillons et les tests effectués.

2.1 Matériaux

Deux ciments du même clinker sont utilisés: un ciment portland (CEM I) classe 42.5 MPa et un ciment portland composé (CEM II/B) classe 42.5 MPa avec 35% de fillers calcaires. Le clinker est de l'usine de ciment de M'sila.

L'eau utilisé est l'eau potable, qui ne contient que peu de sulfate, et ayant une température de $20 \pm 2^\circ$. Sa qualité et ses caractéristiques sont conformes aux exigences de la norme NFP 18-404.

Le sable utilisé (0/5 mm) est de la région de Biskra (rivière Oued-Djedi). Densité apparente = 1697 kg/m^3 , densité spécifique = 2600 kg/m^3 , module de finesse = 2.82, son équivalent de sable (visible) = 80.10.

Les pierres concassée (3/8, 8/15 et 15/25 mm) de la carrière d'Ain-Touta. La densité apparente = 1340 kg/m^3 , densité spécifique = 2610 kg/m^3 et le coefficient de LA = 20% (roche dur). Les courbes de graviers sont présentées dans la [fig. 1](#).

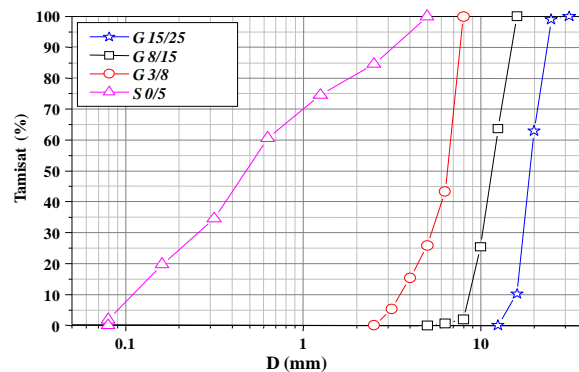


Figure 1 : Courbe granulométrie du sable.

2.2. Étude de la température dans l'enceinte d'étuvage et à l'air ambiant

Notre étude consiste à enregistrer d'abord les températures à l'air libre à l'aide d'un thermomètre et dans l'enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires ([fig. 2](#)) pendant 12 mois de l'année, la moyenne de ces enregistrements mensuels sont illustrés dans la [fig 3](#).



Figure 2 : Enceinte d'étuvage exposée aux rayons solaires

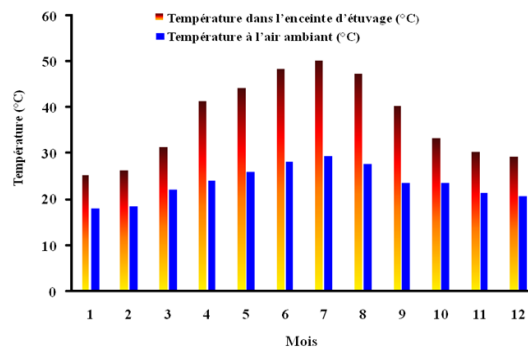


Figure 3 : Variation de la température dans l'enceinte d'étuvage et à l'air ambiant durant le temps

2.3. Méthodes d'essais et compositions des bétons

On a étudié en parallèle l'effet du rapport eau/ciment (0.4, 0.5 et 0.6), l'influence du type de ciment et de l'influence des méthodes d'étuvage (durcissement à l'eau, le durcissement à l'air, l'étuvage à 29°C et à 45°C sur la résistance à la compression. Des échantillons de béton ont été fabriqués à partir de six mélanges de la même maniabilité à base de ciment portland ordinaire (CEM I 42.5) et composé (CEM II/B 42.5).

L'optimisation de la formulation du béton basé sur plusieurs critères qui sont souvent un compromis entre: la maniabilité, la résistance, la durabilité et l'économie. La multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer les compositions des bétons a été utilisée qui donne des résultats précis et semble être la moins connue. C'est la méthode de *B. Scramtaiv* qui repose sur le fait que la somme des volumes absolus de matériau d'origine dans un mètre cube est égal au volume de la composition de béton damé [10]. Dont la maniabilité est telle que l'affaissement au cône est de 7 cm. Dans tous les essais, le rapport $E/C \geq 0.4$, $A = 0.6$ et $D_{\max} = 25$ mm. Les compositions de bétons sont présentées dans le [tableau 1](#). A partir de la variation de la températures dans le temps des 12 mois de l'année, nous pouvons dire que pendant six mois d'octobre à mars le coefficient de température moyenne est $K_1 = 1.4$, et d'avril à septembre le coefficient de température moyenne est de $K_2 = 1.7$.

$$T^{\circ}_{\text{enceinte d'étuvage}} = K_i \times T^{\circ}_{\text{Température à l'air libre}} \quad (1)$$

Avec : T° : température (°C) et K_i : Coefficient de la température moyenne.

Sur la base des résultats déduits de la variation de température en fonction du temps à l'intérieur de l'enceinte ([fig. 3](#)), nous sélectionnons les six mois qui correspond aux saisons (printemps et été). On choisit le 1^{er} cycle d'étuvage : (3×8×3) avec un palier de température maximale (45°C). Nous faisons le même pour les six autres mois qui représente (automne et hiver). On choisit pour le 2^{ème} cycle d'étuvage: (3×7×3) avec un palier de température maximale (29°C). ([fig. 4](#))

Tableau 1 . composition des bétons testés (kg/m³)

Tableau 1 : Composition des seconds tests (kg/m³)						
E/C	E (l)	C (Kg)	S 0/5	G 3/8	G 8/15	G 15/25
B1 : de CEM I 42.5						
0.4	190	475.00	533	143	126	909
0.5	190	380.00	613			
0.6	190	316.66	666			
B2 : de CEM II B/42.5						

0.4	200	500.00	490	143	126	909
0.5	200	400.00	575			
0.6	200	333.33	640			

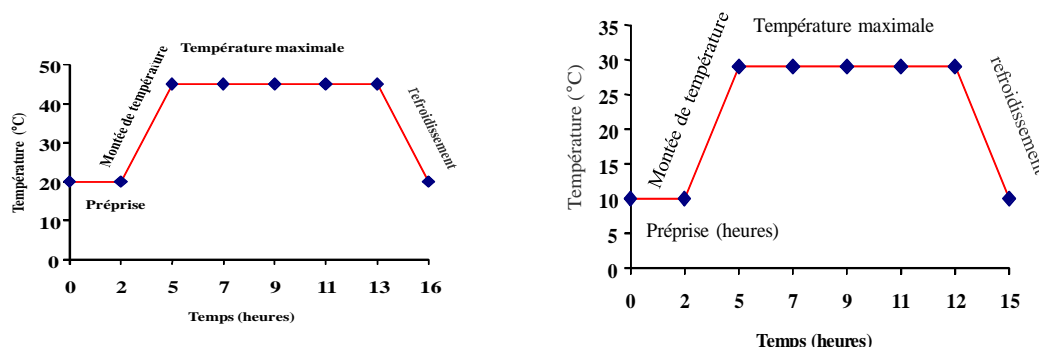


Figure 4 : Cycles du traitement thermique

2.4 Préparation des échantillons et les tests effectués

Des éprouvettes de formes cubiques (100×100×100) mm³. Les bétons étudiés: un béton témoin conservé dans l'eau à une température ambiante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, béton durci à l'air libre, et bétons traités à deux cycles d'étuvage. Par exemple, pour le cycle 1 (3×8×3), après malaxage et moulage du béton, les éprouvettes sont laissées dans le laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ couverts du plastique pour éviter l'évaporation de l'eau pendant 15 heures. Après démoulage, les échantillons ont été introduits dans l'enceinte d'étuvage à l'air libre sous rayons solaires à 7 h du matin, muni d'un thermomètre pour surveiller la température, dès que la température atteint 45°C à 10 h pendant 8 heures à une vitesse de montée de température de $8.33^\circ\text{C}/\text{heure}$, ce qui est souhaitable. À 18 h, nous laissons l'enceinte exposée à l'énergie solaire pour refroidir pendant 3 heures. Le choix de la température de 45°C équivaut à la moyenne des températures de six mois (d'avril à septembre) est généralisé pour la période correspondant aux saisons (printemps et été). Pour 29°C la période froide (six mois d'octobre à mars) est généralisée pour la période correspondant aux saisons (automne et hiver).

3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Maniabilité

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et de durcissement. Parmi ces propriétés, la maniabilité peut être définie comme la facilité de mise en œuvre du béton. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams NF P 18-451 est utilisable dans le monde entier, il fournit des mesures fiables. La classe de consistance des bétons est plastique (variable de 6 à 8 cm).

3.2. Résistance à la compression

Les résistances à la compression sont estimées à 1,2, 3, 7 et 28 jours pour les 04 méthodes de durcissement utilisés : Les résultats des développements de la résistance à la compression des éprouvettes sont donnés sur les [fig. 4 et 5](#).

3.2.1. Influence des méthodes de durcissement

La figure [5-a](#) montre l'effet bénéfique du durcissement à l'eau, ceci favorise l'hydratation qui provoque le colmatage des pores et renforce les liens inter-granulaires quel que soit le rapport E/C et le type de ciment. Ceci est en accord avec [\[11\]](#). Un effet négatif de durcissement à l'air sur le développement de la résistance à la compression des échantillons a été remarqué sur la [fig. 5-b](#). Ce type de durcissement a été choisi dans la pratique actuelle dans l'industrie de la

construction. Il a été remarqué que la tendance générale de la résistance à la compression des échantillons durcis à l'air libre est similaire à celle des échantillons durcis à l'eau. Cependant, les échantillons durcis à l'air présentent des résistances à la compression inférieures à ceux durcis dans l'eau. Ceci peut être attribué par un manque de l'humidité pour l'hydratation du ciment, qui finalement provoque la structure poreuse introduit par retrait de séchage [12].

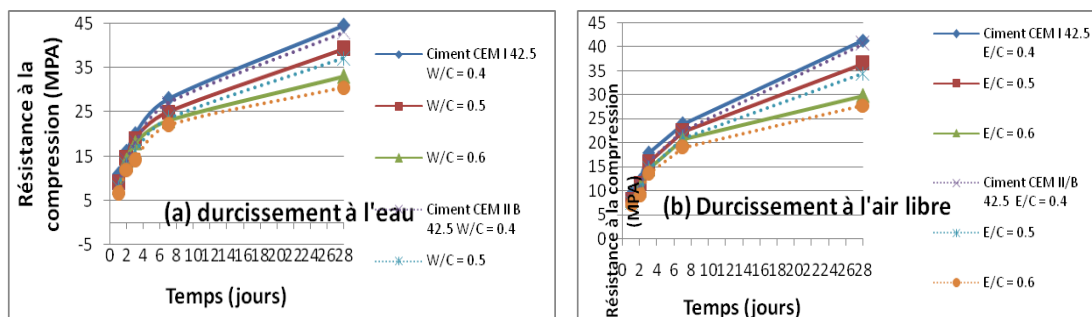
Les résultats présentés sur la fig. 5-c et d, montre que l'utilisation de l'étuvage améliore la résistance à la compression des échantillons par rapport au durcissement à l'eau et à l'air, en particulier dans les premiers stades de durcissement. Cela est dû à la condensation de la vapeur d'eau saturée d'air qui favorise l'humidification initiale et l'hydratation.

Par exemple, les résultats indiqués à la fig. 5-c montrent que la résistance à la compression du béton à base de CEM I 42.5 et ($E/C = 0.4$) est d'environ 32,20 MPa après un étuvage d'un jour à 45 °C, une augmentation d'environ 9.32 % (2 jours d'étuvage) et de l'ordre de 5.11 % (3 jours d'étuvage) et de l'ordre de 4.10 % (7 jours d'étuvage). Pour les bétons à base de CEM II/B 42.5 avec $E/C = 0.4$ est de l'ordre de 30.70 MPa pour un étuvage d'un jour, une augmentation d'environ 9.80% (étuvage de deux jours) et environ 5.30% (3 jours d'étuvage) et d'environ 4.20 % (7 jours d'étuvage).

Les résultats illustrés sur la fig. 5-d indiquent que la résistance à la compression du béton à base de CEM I 42.5 et $E/C = 0,4$ est d'environ 25.10 MPa pour un étuvage d'un jour à 29 °C, soit une augmentation d'environ 11.16% (2 jours d'étuvage) et de l'ordre de 13.98% (3 jours d'étuvage) et de l'ordre de 9.12% (7 jours d'étuvage). Pour les bétons à base de CEM II/B 42,5 et $E/C = 0,4$ est de l'ordre de 23.60 MPa pour un étuvage d'un jour, une augmentation d'environ 11.86% (étuvage de deux jours) et environ 14.77% (3 jours d'étuvage) et d'environ 9.57% (étuvage de 7 jours). Pour le durcissement dans l'enceinte à 45°C de 8 h de traitement thermique, les résistances à la compression atteignent près de 77% et 75% pour les bétons à base de CEM I 42.5 et CEM II/B 42.5, respectivement, par rapport à la résistance du béton à 28 jours de durcissement à normale à l'air libre pour un rapport eau/ciment = 0.4.

Bien qu'une augmentation de la température augmente le développement de la résistance au début de l'âge, mais un impact négatif sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation ont une structure physique moins compact, probablement plus poreux, de sorte l'apparition d'un certain pourcentage de pores, ce qui conduira à une résistance plus faible par rapport au béton moins poreux. Ces résultats sont en accord avec ceux des auteurs de [13, 14]. Le fait que la porosité augmente proportionnellement avec la température, ce qui est remarqué avec le développement de la microstructure, les hydrates (notamment le C-S-H) sont plus dense et sont distribué d'une façon non homogène dans la matrice de ciment ce qui résulte plus de pores provoquant la perte de la résistance [15].

Les résultats des tests ont indiqué que l'étuvage a contribué au développement de la résistance à la compression des échantillons dans les premiers âges. Toutefois, une réduction a été observée à 28 jours. En outre, le durcissement à l'air a potentiellement un effet négatif sur les propriétés mécaniques des éprouvettes dû à un manque de la disponibilité en eau pour l'hydratation. Ainsi, il est possible de conclure que l'utilisation de l'étuvage par énergie solaire est très bénéfique pour la production d'éléments préfabriqués en béton.



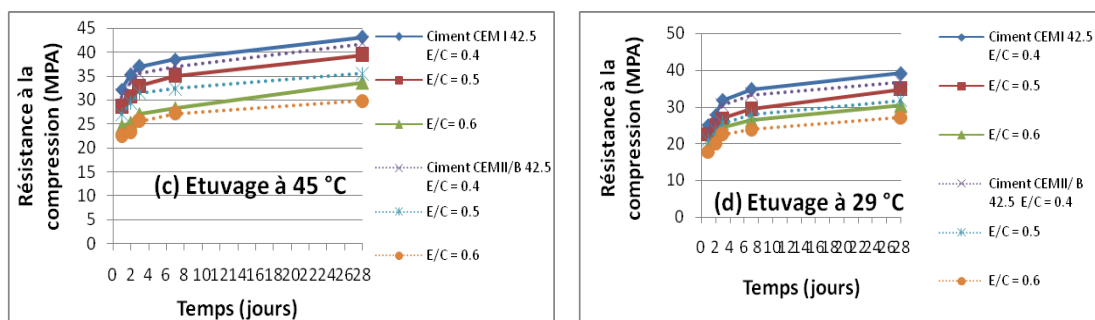


Figure 5 Effets des méthodes de durcissement, type de ciment et le rapport E/C sur le développement de la Rc des éprouvettes.

3.2.2 Influence du rapport eau/ciment et du type du ciment

En ce qui concerne l'influence de rapport eau/ciment, nous voyons clairement que la résistance à la compression de tous les bétons durcis à n'importe quel âge, diminue avec l'augmentation d'E/C. Le rapport E/C influe sur la porosité des bétons (plus E/C est réduit plus le béton est moins poreux). C'est pourquoi les bétons avec un E/C faible : développe très rapidement leur résistance à la compression par une forte concentration en C-S-H [16].

En outre, nous notons que la résistance à la compression des bétons à base de ciment (CEM I 42.5) nettement supérieure aux bétons à base de ciment (CEM II/B 42.5), cela signifie que l'utilisation du ciment Portland ordinaire peut modifier la structure des pores, de diminuer le nombre de grands pores et augmenter les petits pores. Ce changement est fonction de la finesse, plus les particules sont plus fines, leur rôle est efficace. En raison de leur finesse supérieure au ciment (CEM II/B 42.5). Les résistances à la compression augmente lorsque vous utilisez un (CEM I 42.5) reflétant une compacité améliorée par un procédé physique qui dépend de la finesse du ciment, ce qui provoque l'activation chimique d'hydratation et agit sur l'évolution des résistances à la compression. Ce résultat peut s'expliquer également par la proportion de clinker dans les ciments.

3.2.3 Influence du prolongement de durcissement à l'air libre

Les résultats montrent que pour un étuvage d'un jour à 45°C prolongé d'un durcissement à l'air libre de 03 jours, les résistances à la compression des bétons à base de CEM I 42.5 pour différents E/C (0.4, 0.5 et 0.6) dépassent de l'ordre de (1.4%, 5.5% et 4.0%), les résistances des bétons durcis à l'air libre à 28 jours, respectivement. Pour les bétons à base de CEM II/B 42.5 et pour les mêmes E/C elles dépassent de l'ordre de (0.0%, 2.9% et 1.0%) les résistances des bétons durcis à l'air libre à 28 jours, respectivement. Cela nous donne un gain de temps et plus courts délais de fabrication pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'air libre après un étuvage d'un jour à 45°C et 03 jours à l'air libre.

Les résultats montrent aussi que pour un étuvage d'un jour à 29°C prolongé d'un durcissement à l'air libre de 3 jours, les résistances de compression des bétons sont presque comparables à celle des bétons durcis à l'air libre à 28 jours, pour les 02 types de ciments et les différents E/C.

4. INTERPRETATION DES RESULTATS ET CONCLUSION

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Le durcissement à l'eau favorise l'hydratation qui provoque le colmatage des pores capillaires et renforce les liens inter granulaire quel que soit le rapport E/C et le type de ciment. Le durcissement à l'air a potentiellement un effet négatif sur les propriétés

mécaniques des échantillons du fait de l'indisponibilité d'eau pour l'hydratation et le phénomène d'évaporation d'eau du béton.

✚ L'Algérie est un pays riche en matière du rayonnement solaire, l'utilisation de cette technique de traitement thermique des pièces de béton armé et précontraint dans les zones à forte radiation solaire concentrée et de longues périodes, ce qui réduit le coût des pièces de béton et conduit à une économie remarquable pour les entreprises de production, ainsi que l'amélioration de la productivité de l'industrie du béton.

✚ La technique d'étuvage par énergie solaire est une technique efficace pour le durcissement accéléré des bétons, pour une bonne résistance et une grande économie d'énergie électrique pour produire les éléments préfabriqués.

✚ Enfin, un gain de temps et plus courts délais de fabrication pour atteindre la résistance à la compression à 28 jours à l'air libre après un étuvage d'un jour et trois jours de durcissement à l'air libre pour les deux types de ciments et les différents E/C.

REFERENCES

1. Bhutto Abdul Waheed, Bazmi Aqeel Ahmed, Zahedi Gholamreza. Greener energy: issues and challenges for Pakistan—solar energy prospective. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16(5):2762–80
2. Mekhilef S, Saidur R, Safari A. A review on solar energy use in industries. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(4):1777–90
3. Mezghiche B, Zeghichi L, Chebili R, Mellas M. Curing methods of precast concrete elements. *Asian J Civil Eng (Build Housing)* 2006;7(6):581–9
4. Erdem TK, Turanli L, Erdogan TY. Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. *Cem Concr Res* 2003;33(5):741–5
5. DWS, Chua CW, Tam CT. Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures. *Cem Concr Res* 2003;33(4):595–601
6. Michel Vénuat (1989). *La pratique des ciments mortier et bétons* tome 1, caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers 2^e édition p 215-217.
7. ACI Committee 517. *Accelerated curing of concrete at atmospheric pressure*, ACI 517. 2R 87, revised 1992, American Concrete Institute, Farmington Hills Michigan, 17 p, 1992.
8. Turkel S, Alabas V. The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. *Cem Concr Res* 2005;35(2):405–11
9. Bogue RH. The chemistry of Portland cement. 2d ed. New York: Reinhold Publishing Corp.; 1955
10. Mezghiche B. Laboratory testing of construction materials. Algérie: Publication Universitaire Biskra; 2005. p. 120
11. Rabehi M, Mezghiche B, Guettala S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. *Constr Build Mater* 2013;45(8):123–9
12. Ramezaniapour AA, Malhotra VM. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. *Cem Concr Compos* 1995;17(2):125–33
13. Neville AM. Properties of concretes. Springer; 2000. p. 345–350.
14. Kim J-K, Han SH, Song YC. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. *Cem Concr Res* 2002;32(7):1087–94
15. Gallucci E, Xinyu Zhang, Scrivener K. Influence of temperature on the microstructural development of concretes. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF) 2B. Toulouse, France, 19–20 juin 2006.

16. Guettala S, Mezghiche B. Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Constr Build Mater* 2011; 25(3):1263–9.