

L'INFLUENCE DE LA NATURE DU SABLE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DU BETON SOUMIS A HAUTE TEMPERATURE

S. HACHEMI, A. OUNIS

Laboratoire LARGHYDE, Département de génie civil et hydraulique, Université de Biskra, Algérie
samia_hachemi4@yahoo.fr, safidin@yahoo.fr

RESUME

Un nombre considérable d'études ont été menées sur les propriétés physiques et mécaniques du béton à base de sable calcaire concassé à température ambiante. Cependant, aucune attention n'a été portée sur l'étude des performances du béton fabriqué avec du sable calcaire concassé à température élevée. L'objectif de ce travail est d'étudier les effets des températures élevées sur les propriétés mécaniques et physiques résiduelles des bétons composés de deux types de sable (siliceux et calcaire). Pour chaque type de sable, trois rapports eau/ciment ($E/C = 0,6, 0,42$ et $0,27$) ont été testés. Un total de 108 cubes de béton ($100 \times 100 \times 100$ mm) ont été coulés et chauffés sous six températures différentes: 20°C (température ambiante), 150°C , 250°C , 400°C , 600°C et 900°C . Après refroidissement à température ambiante, on a déterminé la résistance à la compression, la vitesse des ondes soniques, la perte de masse, la porosité à l'eau, la densité et le volume des échantillons. Les résultats obtenus montrent qu'il n'existe pas de différences significatives dans les propriétés physiques du béton réalisé avec du sable calcaire par rapport au béton réalisé avec du sable siliceux. L'évolution de la résistance à la compression résiduelle avec la température dépend de la nature du sable et du rapport E/C.

MOTS CLES: Sable, béton, haute température, propriétés physiques, résistance à la compression.

ABSTRACT

A considerable number of investigations have been conducted on the physical and mechanical properties of concrete made with crushed calcareous sand at room temperature. However, no attention has been directed at studying the performance of concrete made with crushed calcareous sand at elevated temperature. This study investigates the effects of elevated temperatures on the residual mechanical and physical properties of concretes made of two types of sand (siliceous and calcareous). For each sand type, three water/cement ratios ($w/c = 0.6, 0.42$ and 0.27) were tested. A total of 108 concrete cubes ($100 \times 100 \times 100$ mm) were cast and heated under six different temperatures: 20°C (ambient temperature), 150°C , 250°C , 400°C , 600°C and 900°C . After cooling down to ambient temperature, the compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), mass loss, water porosity, density and specimens' volume were determined. Results obtained show that there are no significant differences in the physical properties of concrete made with calcareous sand when compared to concrete made with siliceous sand. The evolution of the residual compressive strength with temperature depends on the nature of sand and the w/c ratio.

KEYWORDS: Sand, concrete, high temperature, physical properties, compressive strength.

ملخص

تم إجراء عدد كبير من الدراسات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة التي تحتوي على الرمال الجيرية المكسر في درجة حرارة عادية. لكن لا توجد أي دراسة اهتمت بأداء الخرسانة المصنوعة من هذا النوع من الرمال بعد تعرضها لدرجة حرارة عالية. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير ارتفاع درجات الحرارة على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية المتبقية للخرسانات المصنوعة من كلا النوعين من الرمال (الكوارتز والجيري). لكل نوع من الرمال، قمنا بتحضير خرسانة بثلاث نسب ماء/أسمنت ($0.6, 0.42$ و 0.27) لاختبارها. لهذا الغرض حضرنا 108 مكعبات من الخرسانة ($100 \times 100 \times 100$ مم) ثم قمنا بتعرضها لستة درجات حرارة مختلفة: 20°C (درجة حرارة الغرفة)، 150°C ، 250°C ، 400°C ، 600°C و 900°C . بعد التبريد لدرجة حرارة الغرفة، تم قياس مقاومة الضغط، سرعة الموجات الصوتية، ضياع الكتلة، المسامية، الكثافة وحجم العينات. تظهر النتائج المتحصل عليها أنه لا توجد فروق ذات أهمية في الخصائص الفيزيائية للخرسانة المصنوعة من الرمال الجيري مقارنة بالخرسانة المصنوعة من رمل السيليكيا. تغير مقاومة الضغط بتغير درجات الحرارة تعتمد على طبيعة الرمال ونسبة ماء/أسمنت.

كلمات مفتاحية: الرمل، الخرسانة، درجة الحرارة العالية، الخصائص الفيزيائية، مقاومة الضغط.

1 INTRODUCTION

Les granulats occupent généralement 60 à 80 pour cent du volume de béton, donc le comportement du béton soumis à haute température est fortement lié à la nature des granulats utilisés parce que le comportement des différents granulats varie lorsqu'ils sont soumis à températures élevées.

Peu d'études ont été publiées et ont montrées que la nature des granulats affecte le comportement du béton sous haute température [Xing et al., 2011], [Mindeguia et al., 2012], [Xing et al., 2014], [Hager et al., 2015], [Xing et al., 2015]. Selon leur nature minéralogique, des granulats sont classés en deux groupes: Siliceux et Calcaire. Ces granulats subissent des réactions différentes lorsqu'ils sont exposés à une température élevée. Les granulats siliceux contenant du quartz (comme le sable de la rivière siliceuse) peuvent provoquer la fissuration de l'interface pâte-granulats à environ 575°C, en raison de la transformation du quartz α en quartz β qui est associé à une expansion du volume de l'ordre de 1 - 5,7% [Bazant et Kaplan, 1996], [Khoury et al., 2007]. Une détresse similaire peut commencer au-dessus de 700°C dans le cas des granulats de carbonate, où le carbonate de calcium (CaCO_3) commence à se décomposer en chaux libre (CaO) et en dioxyde de carbone (CO_2). Pendant le processus de refroidissement, la chaux libre (CaO) peut réagir avec l'humidité ambiante et être transformée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 100% [Rayssac et al., 2009].

Comme mentionné précédemment, peu d'études ont comparé l'évolution des propriétés thermiques, physiques et mécaniques du béton avec la température pour différents types de granulats.

Une analyse comparative des propriétés mécaniques et physiques des bétons composés de trois types de granulats: silico-calcaire, calcaire et siliceux, a été présentée par Xing [Xing et al., 2011]. Le béton de granulats silico-calcaire présente une fissuration sévère et une perte importante de résistance mécanique entre 300°C et 600°C. L'auteur a conclu que l'influence des granulats dépend de la composition de la pâte de ciment. Avec une matrice cimentaire ordinaire, le béton de granulats calcaires a une meilleure résistance à la compression résiduelle, tandis que, avec une matrice cimentaire de haute résistance, le béton de granulats siliceux se comporte mieux.

L'étude de l'influence de la composition chimique et minéralogique de ces trois granulats présentés par les mêmes auteurs [Xing et al., 2014] a montré que la surface des granulats calcaires subisse des endommagements autour de 700°C liés à la décarbonatation. La dégradation de ces granulats augmente avec le temps après le refroidissement en raison de la réhydratation progressive de la chaux avec l'humidité ambiante.

En outre, Xing [Xing et al., 2015] a signalé que, au-delà 300°C, la dégradation des bétons fabriqués avec les trois types de granulats dépend de la nature des granulats. L'auteur [Xing et al., 2015] a observé que les bétons contenant des granulats silico-calcaire montrent un réseau de fracture avec des fissures plus longues et plus grandes alors

que les bétons de granulats calcaires ont des fissures plus courtes et plus fines et les bétons de granulats siliceux sont particulièrement endommagés à la périphérie. Xing [Xing et al., 2015] indique en outre qu'entre 450°C et 600°C, la porosité des bétons de granulats calcaires montrent une augmentation plus significative que ceux des bétons de granulats siliceux et silico-calcaire, ce qui a été expliqué par le début de la décarbonatation des granulats calcaires.

De plus, la nature des granulats a une grande influence sur la réponse thermique du béton. Mindeguia [Mindeguia et al., 2012] a comparé le risque d'instabilité thermique de deux bétons formulés à partir de deux types des granulats, le premier contenant uniquement des granulats calcaires tandis que le second contient un mélange de granulats calcaires et siliceux, il a montré que la nature des granulats affecte le comportement du béton à haute température. Par exemple, le béton qui contient un mélange de granulats siliceux et calcaire a montré un risque plus faible d'instabilité thermique. Cependant, après refroidissement, Mindeguia [Mindeguia et al., 2012] note que les propriétés mécaniques de ce type de béton sont considérablement dégradées et les déformations résiduelles sont beaucoup plus élevées.

Divers auteurs ont étudié les propriétés du béton préparé avec du sable calcaire [Barkat et Mezghiche, 2012], [Khouadja et al., 2015]. Cependant, l'incorporation de sable calcaire entraîne une perte importante de fluidité du mélange due au coefficient d'absorption d'eau élevé du sable calcaire. Ce coefficient diminue les propriétés mécaniques du béton contenant le sable calcaire lorsqu'elles sont comparées avec celles des bétons formulés avec du sable siliceux.

A ce jour, aucune étude n'a été trouvée sur le comportement thermique du béton réalisé avec du sable calcaire en termes de propriétés physiques et mécaniques. En outre, aucune étude à haute température n'a été trouvée sur du béton à hautes performances formulé par un sable calcaire. Ces informations montrent que les études antérieures doivent être complétées par des données expérimentales sur le comportement des bétons préparés avec du sable calcaire après avoir été soumis à des températures élevées afin de mieux comprendre l'influence du sable calcaire sur l'évolution des propriétés mécaniques et physiques des bétons avec la température.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la nature du sable (siliceux et calcaire) sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à des températures différentes (150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C). Dans cette étude, on utilise deux types de sable: siliceux et calcaire. Pour chacun de ces sables, trois types de bétons sont étudiés avec trois rapports eau/ciment différents ($E/C = 0.6, 0.42$ et 0.27). Pour faire une comparaison, tous les bétons de l'étude sont composés du même ciment et des gros granulats. Nous avons réalisé des essais mécaniques pour évaluer la résistance à la compression. Des essais complémentaires de perte de masse, porosité à l'eau, densité, volume et vitesse des ondes sismiques ont été conduits.

2 DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX

2.1 Matériaux

2.1.1 Ciment

Dans cette étude, on a utilisé du ciment Portland (CPJ CEM

II / A 42.5) d'une densité de 3090 kg.m^{-3} et une surface spécifique de Blaine de $4152 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ pour tous les bétons étudiés. La résistance mécanique après 28 jours est de 44,15 MPa. Le tableau 1 montre la composition chimique de ce ciment, telle que fournie par le fabricant [Fiche de qualité, 2013].

Tableau 01 : Composition chimique du ciment (% de la masse)

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	SO ₃
60,41	5,19	21,91	2,94	1,60	0,16	0,54	0,02	2,19

2.1.2 Granulats

Deux types de sable ont été utilisés : un sable siliceux arrondi lisse extrait de la rivière (classe granulaire 0/5 mm) et un sable calcaire concassé (classe granulaire 0/5 mm). Les densités de ces deux types de sable mesurées en laboratoire selon la norme NF P 18-554 sont respectivement de 2600 et 2200 kg/m^3 .

Les gros granulats utilisés étaient une pierre concassée naturelle (calcaire). Leur granularité et leur densité sont de 5/15 mm, 2650 kg/m^3 et 15/25, 2610 kg/m^3 .

Le tableau 2 montre les propriétés physiques et la figure 1 montre la distribution granulométrique des gros granulats et du sable siliceux et calcaire utilisés dans cette étude.

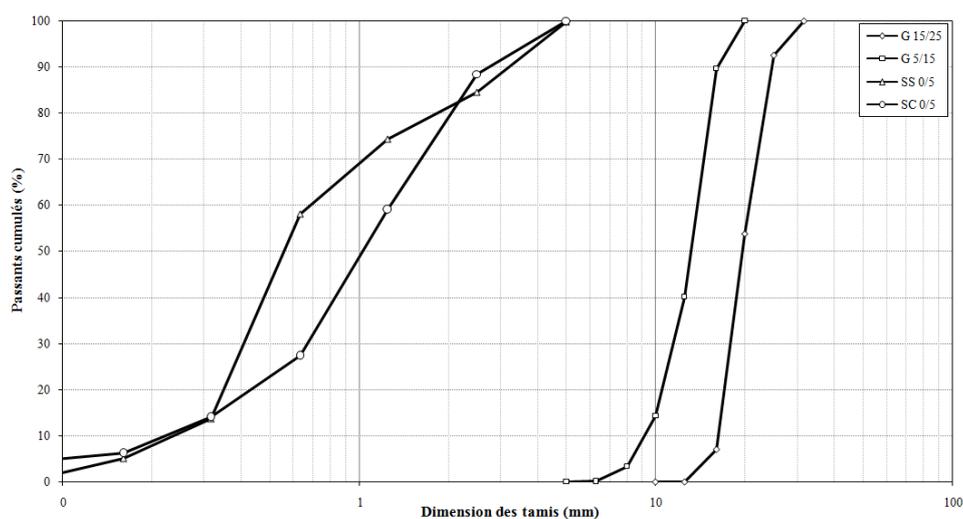


Figure 01: Courbes granulométriques des gros et fins granulats

Tableau 02 : Propriétés physiques des gros granulats et du sable siliceux et calcaire

Propriétés	Sable siliceux	Sable calcaire	G 5/15	G 15/25
Coefficient de Los Angeles (%)	-	-	21.98	21.98
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.70	1.64	1.27	1.28
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.60	2.20	2.61	2.65
Equivalent de sable (%)	85.0	54.0	-	-
Module de finesse	2.65	2.63	-	-
Teneur en eau (%)	0.35	0.20	0.14	0.14
Absorption d'eau (%)	1.03	3.92	0.57	0.57
Porosité (%)	-	-	1.53	1.53

2.1.3 Plastifiant

Afin d'obtenir la même maniabilité sans augmenter la

teneur en eau, un plastifiant (Sikaplast® BV +40) a été utilisé lors du mélange de bétons hautes performances (E/C

= 0,27). Le plastifiant a les propriétés suivantes: densité $1,04 \pm 0,015$ et valeur $\text{ph } 4,71 \pm 1$.

2.2 Compositions des différents bétons

Les principaux paramètres de cette étude expérimentale ont été d'analyser l'influence de la nature du sable et de la classe de béton (résistance normale, haute résistance et haute performance) sur le comportement du béton soumis à haute température.

Tableau 03: Composition des bétons étudiés (kg/m^3)

Notation	E/C	Ciment	Eau	Sable siliceux	Sable calcaire	Granulats		Plastifiant (%)
						25 mm	15 mm	
SS-B1	0.60	329	199	715	-	646	390	-
SS-B2	0.42	475	199	715	-	646	390	-
SS-B3	0.27	610	168	715	-	646	390	1.50
SC-B1	0.60	329	199	-	715	646	390	-
SC-B2	0.42	475	199	-	715	646	390	-
SC-B3	0.27	610	168	-	715	646	390	1.50

Les compositions SS-B1 et SC-B1 ont été déterminées selon la méthode de Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1998], cette méthode a été utilisée pour optimiser l'arrangement des granulats. La fraction volumétrique totale des granulats était constante pour tous les mélanges. Pour obtenir les autres compositions (SS-B2, SS-B3, SC-B2 et SC-B3), la teneur en ciment a été augmentée et la quantité d'eau a été réduite.

Pour chaque mélange de béton, 18 cubes de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ont été préparés. Toutes les éprouvettes ont été recouvertes d'une feuille mince de plastique et laissés à température ambiante dans le laboratoire pendant 24 h. Ensuite, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température moyenne de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. À l'âge de 28 jours, les éprouvettes ont été retirées de l'eau et séchées pendant 2 jours à température ambiante à l'air libre. Il est nécessaire de minimiser le risque d'écaillage des éprouvettes de béton lorsqu'elles sont soumises à une température élevée dans le four. La teneur en humidité initiale dans les éprouvettes n'a pas été mesurée.

2.3 Méthodes d'essai

2.3.1 Procédure de chauffage

Les éprouvettes ont été soumises à cinq cycles de chauffage-refroidissement indépendants avec des températures maximales fixées à 150°C , 250°C , 400°C , 600°C et 900°C . Chaque cycle se compose de trois phases: une élévation de température, une stabilisation à température constante et enfin un refroidissement jusqu'à température ambiante. La vitesse de chauffage est de $3^\circ\text{C}/\text{min}$, cette vitesse est choisie suivant les recommandations de la norme ISO/TR 15655: 2003

Deux types de sable ont été utilisés: l'un était du sable siliceux naturel, utilisé comme référence, tandis que le second était du sable calcaire concassé.

Pour chacun des deux types de sable, trois formulations de béton ont été étudiés: un béton de résistance normale avec E/C de 0.6, un béton à haute résistance avec E/C de 0.42 et un béton à haute performance avec E/C de 0.27. Les formulations de tous les bétons sont données dans le tableau 3.

[ISO/TR 15655, 2003]. La figure 2 montre l'évolution théorique de la température en fonction du temps pour les cinq cycles de chauffage-refroidissement. Ces cycles ont été réalisés dans un four programmable de $250 \text{ mm} \times 255 \text{ mm} \times 355 \text{ mm}$. Ce four permet de chauffer de petits échantillons jusqu'à 1200°C et la montée en température est contrôlée par un régulateur relié à un thermocouple dans le four.

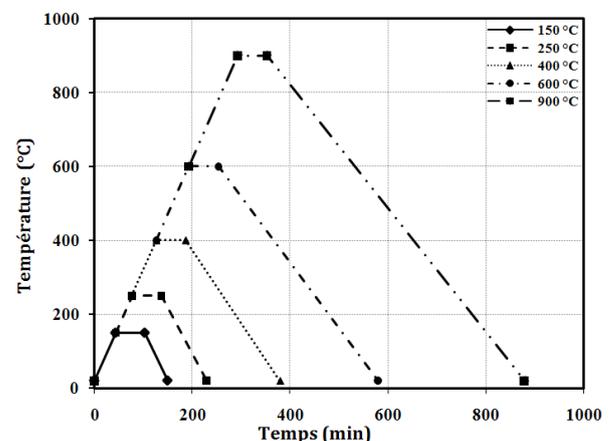


Figure 02: Cycles de chauffage/refroidissement

2.3.2 Perte de masse du béton

Les éprouvettes ont été pesées avant et après exposition à la température en utilisant une balance numérique électronique avec une précision de $\pm 0,01 \text{ g}$. Par conséquent, la différence entre la masse initiale et la masse de béton après chaque température de chauffage représente la perte de masse. La perte de masse du béton a été calculée selon l'équation (1), où M_{initiale} est la masse initiale (avant chauffage) et $M_{\text{chauffée}}$ est la masse chauffée pesée dans l'air.

$$M_{\text{perdue}} = (M_{\text{initiale}} - M_{\text{chauffée}}) / M_{\text{initiale}} \quad (01)$$

2.3.3 Porosité à l'eau et densité

La porosité à l'eau et la densité des différents bétons ont été mesurées selon la norme européenne NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2001]. Deux éprouvettes ont été testées pour chaque béton et chaque cycle de température. La masse des éprouvettes a été mesurée avant l'essai de chauffage, puis, les éprouvettes ont été immergés dans l'eau et pesées régulièrement jusqu'à saturation complète. Les éprouvettes ont été essuyées afin d'éliminer l'excès d'eau sur la surface et la masse immergée a été déterminée avec une balance hydrostatique. Enfin, la masse saturée a été mesurée.

La porosité est déterminée selon l'équation suivante:

$$P = (M_{\text{sat}} - M_{\text{chauffée}}) / (M_{\text{sat}} - M_{\text{(sat + imm)}}) \quad (02)$$

Où M_{sat} et $M_{\text{sat+imm}}$ sont la masse saturée mesurée dans l'air et dans l'eau, respectivement.

La densité D des différentes éprouvettes pour chaque mélange et chaque température a été déterminée selon l'équation suivante:

$$D = M_{\text{chauffée}} / (M_{\text{sat}} - M_{\text{(sat + imm)}}) \quad (03)$$

2.3.4 Dimensions des spécimens

Les dimensions des éprouvettes ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse, qui est capable de mesurer 300 mm de long avec une résolution de 0,01 mm. Les dimensions de la largeur, de la longueur et de la hauteur de chaque éprouvette ont été mesurées avant et après chauffage à différentes températures pour calculer la variation du volume. Pour chaque dimension, 3 valeurs ont été prises et les valeurs moyennes ont été enregistrées. La variation du volume de l'éprouvette, V_v , est exprimée par l'équation 4 comme suit:

$$V_v = V_t / V_{20} \quad (04)$$

Où V_t est le volume de l'éprouvette après le chauffage et V_{20} le volume de l'échantillon avant le chauffage.

2.3.5 Vitesse des ondes soniques

La méthode de la vitesse des ondes soniques a été largement utilisée pour l'examen de la qualité du béton. La vitesse des ondes soniques du béton est influencée par des proportions de béton et affectée par des changements dans le béton.

La valeur de la vitesse des ondes soniques a été déterminée pour la vérification rapide de l'uniformité du béton à température ambiante et après chaque cycle de chauffage-

refroidissement. Les valeurs moyennes de la vitesse des ondes soniques ont été prises à partir de trois cubes de chaque mélange à l'aide de l'ultrason portable. La graisse a été utilisée comme agent d'interface entre la surface du cube et l'émetteur et le récepteur. L'essai de la vitesse des ondes soniques a été réalisé conformément à la norme AFNOR P 18-418 [AFNOR P 18-418, 1989]. La vitesse des ondes soniques longitudinale, v , est ainsi déduite par l'équation suivante:

$$N = L / s \quad (05)$$

Où v est la vitesse d'impulsion, L est la longueur de l'échantillon, et s est le temps.

2.3.6 Résistance à la compression

Des essais de compression uniaxiale ont été effectués sur trois échantillons de chaque type de béton pour chaque température en utilisant une presse hydraulique CONTROLES 3000 KN selon la norme NF EN 12390-3 [NF EN 12390-3, 2003]. Chaque éprouvette a subi une charge de compression uniaxiale avec un taux de contrainte imposé à 0,5 MPa/s selon la norme NF EN 12390-4 [NF EN 12390-4, 2000]. Trois éprouvettes non chauffées ont été testées afin de déterminer les valeurs de la résistance en compression de référence. Les valeurs relatives de la résistance à la compression ont été exprimées en tant que rapport entre la résistance à la température $T(^{\circ}\text{C})$ et la résistance du béton non chauffé.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Perte de masse du béton

La performance du béton exposé à une température élevée est étroitement liée à la quantité et à la distribution de l'eau dans le béton [Noumowé et al., 1996]. L'exposition du béton à des températures élevées entraîne une évaporation de l'eau libre présente dans ses pores, en plus de la perte d'eau liée chimiquement en raison de la réaction de transformation qui se produit dans la microstructure du béton conduisant à une perte de masse [Khaliq et Anis Khan, 2015].

Le poids de chaque éprouvette avant et après exposition à hautes températures a été mesuré pour évaluer le pourcentage de perte de masse dans tous les bétons. La valeur de perte de masse est une moyenne des mesures effectuées sur 3 éprouvettes pour chaque type de béton. La valeur moyenne de la perte de masse pour les bétons SS et les bétons SC est présentée sur la figure 3.

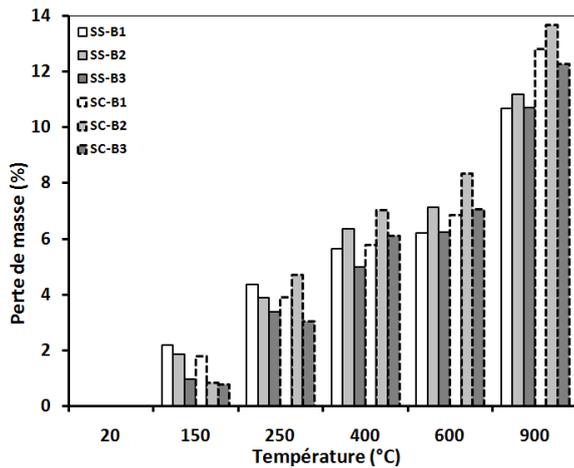


Figure 03 : Evolution de la perte de masse des bétons avec la température

Pour une matrice donnée (résistance normale, haute résistance ou haute performance), le volume de la pâte de ciment est constant pour les deux natures de sable (siliceux et calcaire). Ainsi, la différence de perte de masse entre les bétons n'est liée qu'à la nature du sable. La figure 3 montre que le pourcentage de perte de poids augmente avec l'augmentation de la température pour tous les bétons. Entre la température ambiante et 150°C, la variation de masse est faible. La perte de masse dans ce domaine correspond au départ de l'eau libre contenue dans les pores capillaires. Pour un rapport E/C = 0,6, l'eau échappée du béton est plus importante que pour E/C de 0,42 ou 0,27. Lorsque la température augmente de 150°C à 400°C, la perte de masse augmente. Une augmentation progressive de la perte de masse correspondant à 4,9% - 6,3% a été observée pour le béton SS et de 5,8% - 7% pour le béton SC. La perte de masse observée dans ce domaine est principalement due à la déshydratation des principaux hydrates (CSH) contenus dans le béton durci [Noumowé et al., 1996]. Entre 400°C et 600°C, la perte de masse est relativement moins importante. Cette perte est due principalement à la décomposition de la portlandite. Au-delà de 600°C, le taux de perte de masse augmente de nouveau. Une perte de masse supérieure de 12,2% - 13,7% est observée à 900°C dans le cas du béton à base de sable calcaire (SC). Cependant, les bétons à sable siliceux (SS) ont la plus faible perte de masse (environ 10,6% - 11,2%).

La plus grande perte de masse du béton avec du sable calcaire s'explique par la décomposition de la calcite CaCO_3 en calcaire CaO selon la réaction chimique $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Le dégagement de CO_2 à partir de carbonates de calcium de sable calcaire explique la perte de masse après 600°C pour les bétons à sable calcaire [Xing et al., 2011], [Xing et al., 2015].

3.2 Porosité de l'eau

Des mesures de porosité à l'eau ont été réalisées sur deux échantillons pour chaque type de béton. La figure 4 montre

les valeurs moyennes de la porosité à l'eau absolue et relative obtenues à partir des éprouvettes des bétons avant et après exposition à des températures élevées. La porosité relative est définie comme le rapport entre la mesure à température élevée et la valeur mesurée à température ambiante. On constate que la porosité des bétons augmente avec l'augmentation de la température.

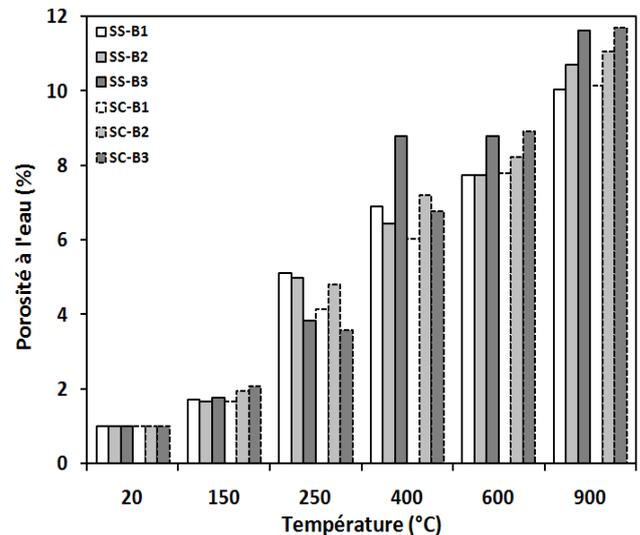


Figure 04 : Evolution de porosité à l'eau avec la température

Entre 20°C et 150°C, la porosité du béton varie très peu, ce qui indique que la structure poreuse de chaque béton n'est pas significativement modifiée. Cette observation est également notée par Noumowé [Noumowé et al., 1996]. La porosité totale des bétons SS chauffés à 150°C est très proche de celle des bétons SC, elle varie de 3,7% à 4,7% pour le béton SS et de 4,5% à 5,3% pour le béton SC. Entre 150°C et 400°C, la porosité de tous les bétons augmente fortement. Selon Hager [Hager et al., 2015], le processus de déshydratation qui se produit dans le gel CSH réduit son volume, ce qui augmente la porosité de la matrice de ciment. Cette transformation crée un espace vide supplémentaire dans les bétons chauffés [Fares et al., 2009]. Entre 400°C et 600°C, la porosité des bétons SC a continué d'augmenter alors que l'augmentation était très modérée pour les bétons SS. L'augmentation de la porosité est plus importante à 900°C, la porosité varie de 24,4% à 29,9% pour le béton SS et de 27,4% à 29,9% pour le béton SC.

La comparaison de l'évolution de la porosité dans différents bétons montre que la porosité des bétons SC est supérieure à celle des bétons SS entre 600°C et 900°C. Ceci est en accord avec l'observation que la perte de masse des bétons SC est relativement plus importante que celle des bétons SS entre 600°C et 900°C, ce qui semble indiquer que la porosité du béton est affectée par la nature du sable utilisé. L'augmentation de la porosité du béton à base de sable calcaire est le résultat du début de la décarbonatation du sable calcaire [Xing et al., 2015].

3.3 Densité

Les densités des bétons testés sont présentées sur la figure 5. Les résultats indiquent que, quel que soit le mélange, la densité diminue entre 150°C et 900°C. La variation de densité entre 20°C et 150°C était faible (entre 0,4% et 1,7% pour les bétons SS et entre 0,8% et 2,2% pour les bétons SC) par rapport à celle du domaine compris entre 150°C et 900°C. Au-delà de 150°C, la densité de tous les bétons continuée à diminuer d'une manière similaire. Pour SS-B1, la diminution globale était d'environ 21%, tandis que pour les autres bétons la diminution de densité était d'environ 17%.

Selon Fares [Fares et al., 2009], la diminution de la densité est due au départ de l'eau pendant le chauffage et à la déshydratation des hydrates (CSH et CH).

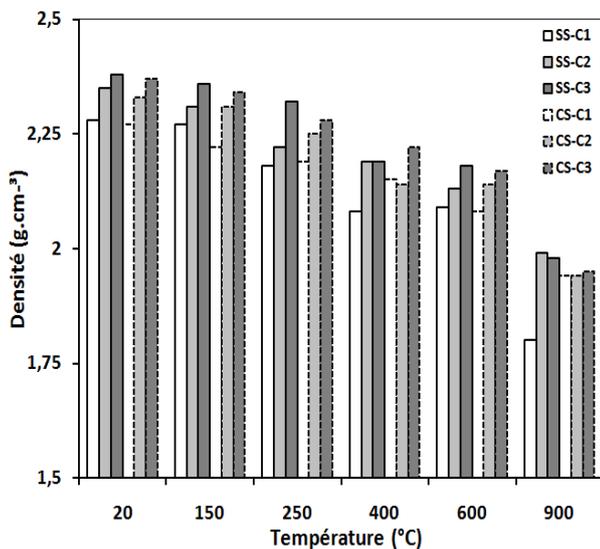


Figure 05 : Evolution de la densité résiduelle avec la température

3.4 Volume des éprouvettes

Les variations relatives du volume des bétons SS et des bétons SC sont présentées sur la figure 6. Les résultats sont la moyenne de trois résultats. On observe une variation du volume des éprouvettes pour tous les types de bétons avec l'augmentation de la température. Cette observation est également notée par Hachemi [Hachemi et Ounis, 2015], [Hachemi et Ounis, 2017] et Miličević [Miličević et al., 2016].

Dans la gamme de 20°C à 400°C, les variations relatives de volume de tous les bétons sont faibles et semblables, ce qui montre qu'une température inférieure à 400°C a un impact négligeable sur le volume de béton. Les amplitudes de variation entre 150°C et 400°C varient de -0,7% à +0,4% pour les bétons SS et de -0,6% à +0,6% pour les bétons SC.

Au-delà de 400°C, le volume de des éprouvettes augmente avec l'augmentation de la température pour tous les types des bétons. Cette augmentation s'explique par l'apparition des fissures dues à la propagation et à l'extension des

microfissures. Ces microfissures peuvent être attribuées à la déshydratation de la pâte de ciment résultant de la perte d'humidité et des dilatations thermiques différentes provoquant l'affaiblissement de la liaison entre les granulats et la pâte de ciment [Khaliq et Anis Khan, 2015].

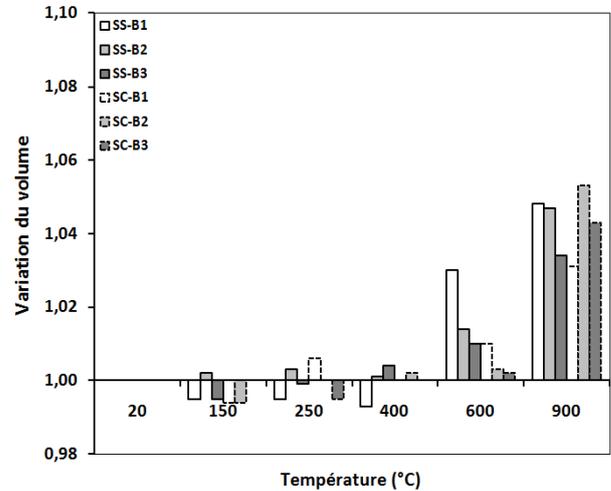


Figure 06 : Variation du volume des éprouvettes avec la température

Après un chauffage à 600°C, les bétons contenant du sable siliceux SS présentent une augmentation de volume supérieure à celle du béton contenant du sable calcaire SC. Ceci s'explique par l'augmentation du volume de sable siliceux dû à la transformation du quartz α au quartz β qui se produit à 573°C [Xing et al., 2015].

A 900°C, on observe une augmentation significative du volume des éprouvettes correspondant à environ 5,3% du volume initial pour les bétons SC, tandis qu'on observe une augmentation du volume d'environ 4,8% pour les bétons SS. Selon Xing [Xing et al., 2015] et Hager [Hager et al., 2015], l'augmentation du volume de béton contenant du sable calcaire SC est expliquée par la réhydratation du CaO formé par la décarbonatation de CaCO_3 . La réhydratation entre le CaO et l'humidité ambiante conduit à la formation de portlandite et à une grande expansion de volume qui provoque un décollement des granulats calcaires avec la pâte et un développement de fissures.

3.5 Résistance à la compression résiduelle

Des mesures de la résistance à la compression ont été effectuées sur trois éprouvettes de chaque béton pour une valeur de température. La résistance à la compression relative a été exprimée sous la forme d'un rapport entre la résistance résiduelle pour chaque température d'exposition et la résistance de la température de référence 20°C. La figure 7 présente la résistance à la compression résiduelle par rapport à la température et la figure 8 montre l'évolution de la résistance à la compression résiduelle relative avec la température.

Les résultats obtenus montrent que, entre 20°C et 250°C, il y a une diminution modérée de la résistance à la compression résiduelle de tous les bétons. Dans ce domaine, la résistance à la compression des bétons SS diminue d'environ 3% à 10% alors que les bétons SC subissent une réduction de la résistance d'environ 7% à 17%. La diminution de la résistance à la compression s'explique par l'évacuation de l'eau libre et une partie d'eau d'hydratation du béton après exposition à une température élevée ce qui entraîne une augmentation de la porosité [Tanyildizi et Sahin, 2015]. Selon Khoury [Khoury, 1992], cette diminution correspond à une réduction de la cohésion des forces de Van der Waal entre les couches CSH. Ceci réduit l'énergie de surface de CSH et conduit à la formation de groupes silanol (Si-OH: OH-Si) qui présente une force de liaison plus faible. De plus, la diminution de la résistance à la compression peut être attribuée à l'apparition de microfissures dans la pâte de ciment après exposition à 150°C et 250°C. Les études de Hachemi [Hachemi, 2015] indiquent, par microscopie électronique à balayage (MEB), l'apparition de microfissures dans la pâte de ciment après chauffage à 150°C et 250°C.

Après chauffage à 400°C, on observe une augmentation modérée de la résistance pour tous les bétons. Le béton SC-C3 montre une augmentation maximale de la résistance (107% de la résistance initiale). Cette augmentation est généralement attribuée à des forces de Van der Waals plus élevées, du fait que les couches de gel de ciment se rapprochent les unes des autres pendant le chauffage [Noumowé et al., 1996].

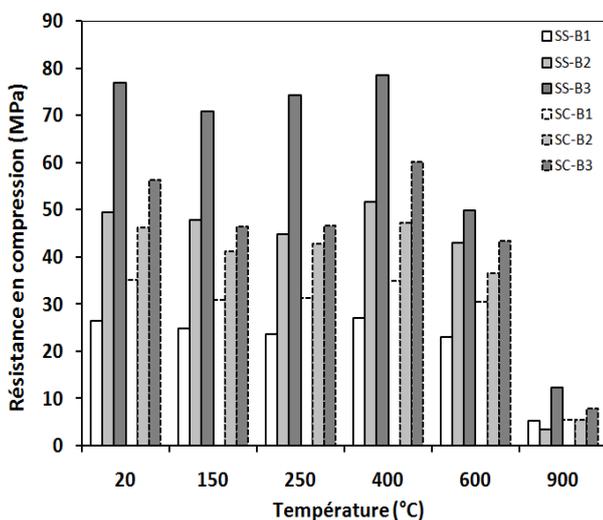


Figure 07 : Evolution de la résistance en compression avec la température

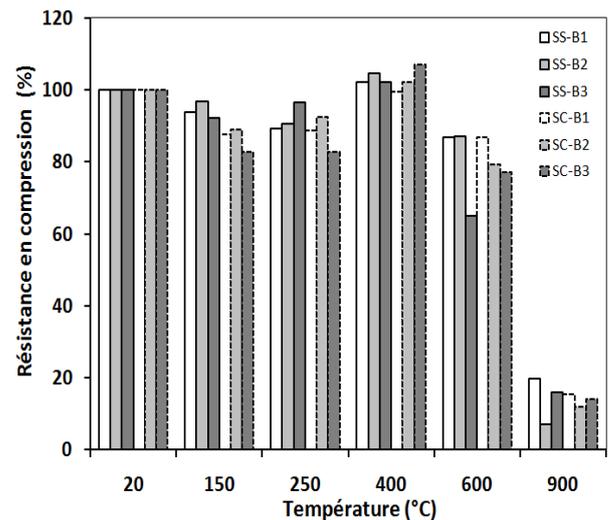


Figure 08 : Evolution de la résistance relative des différents bétons avec la température

Au-delà de 400°C, une diminution importante de la résistance à la compression est observée pour tous les bétons. Ceci pourrait être attribué au grossissement de la structure poreuse et à l'augmentation du diamètre des pores [Poon et al., 2001]. Après avoir été soumis à 600°C et 900°C, tous les bétons ont montrés une détérioration sévère. Ceci pourrait être attribué au développement des fissures qui sont fortement liées aux coefficients de dilatation thermique opposés entre la pâte de ciment et les granulats et à la décomposition du gel de CSH [Noumowé et al., 1996]. Ces fissures représentent les points faibles du béton et peuvent réduire la résistance à la compression résiduelle [Sarhat et Sherwood, 2011]. La résistance à la compression des bétons SS a été réduite d'environ 13% à 35% et d'environ 13% à 22% pour les bétons SC après le chauffage à 600°C. A 900°C, la réduction de la résistance à la compression était d'environ 80% à 92% pour les bétons SS et d'environ 84% à 88% pour les bétons SC. La figure 8 montre que la résistance à la compression résiduelle relative des bétons fabriqués avec du sable calcaire était supérieure à celle des bétons obtenus avec du sable siliceux.

Une influence significative du type de sable sur la résistance à la compression a été observée entre 20°C et 400°C, cette influence dépend du rapport E/C. La figure 7 montre que, pour E/C = 0.6, le béton contenant du sable calcaire présente de meilleurs résultats et montre une résistance à la compression résiduelle plus élevée que celle du béton contenant du sable siliceux. La résistance à la compression résiduelle de SC-B1 est supérieure à celle de SS-B1 d'environ 30%. On peut dire que le sable calcaire utilisé avait une absorption d'eau plus élevée (3,8 fois) que le sable siliceux. L'augmentation de la résistance peut s'expliquer par l'absorption plus élevée d'eau du sable calcaire qui réduit la quantité d'eau de mélange et augmente la résistance à la compression en résultat. Pour E/C = 0.27, le remplacement du sable siliceux par du sable calcaire a entraîné une diminution de la résistance à la compression résiduelle d'environ 30% dans la plage de températures de

20°C à 400°C. Au-dessus de 400°C, il n'y a pas d'influence significative du type de sable sur la résistance à la compression résiduelle des bétons testés.

3.6 Vitesse des ondes soniques

La mesure de la vitesse des ondes soniques a été effectuée sur les éprouvettes avant chauffage et a été utilisée comme référence pour comparer les résultats obtenus après chauffage à différentes températures. Les résultats de la vitesse des ondes soniques des éprouvettes sont présentés sur la figure 9. Il est montré sur cette figure que la vitesse des ondes soniques diminue de façon continue avec l'augmentation de la température, ce qui est en accord avec les résultats de la littérature [Tanyildizi et Sahin, 2015], [Chu et al., 2016]. La vitesse des ondes soniques du béton est affectée par des changements dans le béton, elle est ainsi influencée par des proportions des composants du béton [Tanyildizi et Şahin, 2015].

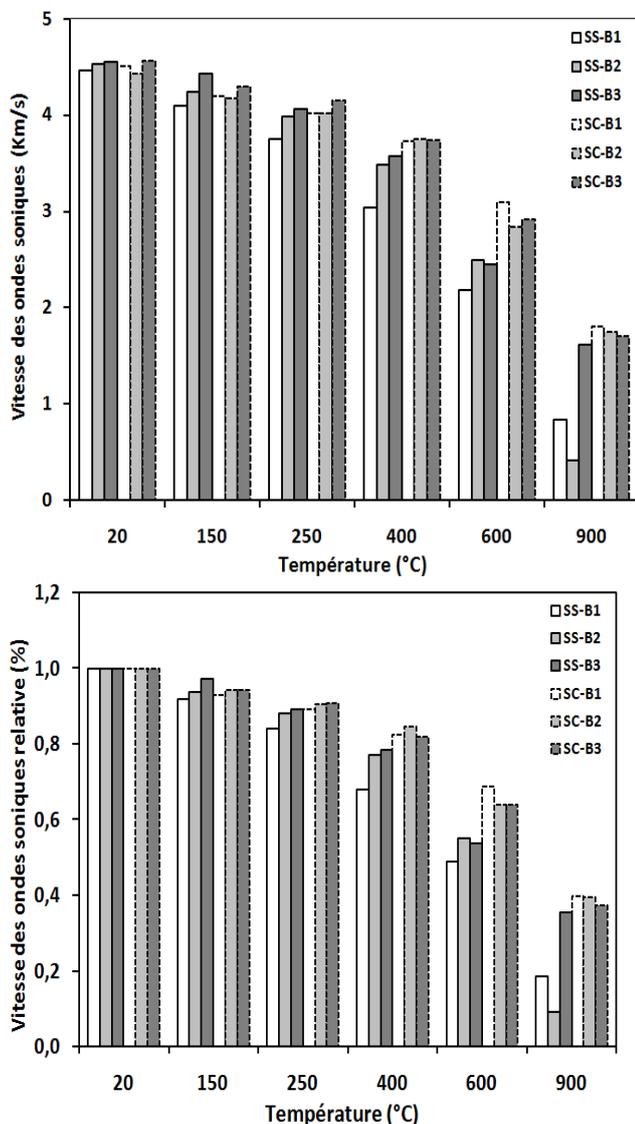


Figure 09: Evolution de la vitesse des ondes soniques en fonction de la température

Toutes les éprouvettes peuvent être classées comme étant en bon état à 20°C et après exposition à 150°C et 250°C; leur vitesse des ondes soniques est supérieure à 3,5 km/s. Au-delà de 250°C, on observe un processus d'accélération dans la diminution de la vitesse des ondes soniques. La diminution de la vitesse des ondes soniques avec l'augmentation de la température est liée à l'augmentation de la porosité (figure 4) et à l'endommagement de la microstructure par l'apparition de nouvelles fissures dans le béton exposé à 400°C, 600°C et 900°C. Les résultats de la vitesse des ondes soniques de toutes les éprouvettes après exposition à 600°C sont inférieurs à 3,5 km/s et la diminution de la vitesse des ondes soniques est très élevée et atteint 47% pour le béton SS et 34% pour le béton SC. Ensuite, à 900°C, la baisse de la vitesse des ondes soniques atteint 79% pour le béton SS et 61% pour le béton SC. Ce niveau élevé d'endommagement est lié aux fissures résultant d'une déformation incompatible entre la pâte de ciment et les granulats.

La vitesse des ondes soniques du béton SC était plus élevée que celle du béton SS dans la gamme de température de 250°C - 900°C. Ceci s'explique par la valeur de l'équivalent de sable du sable calcaire (54%). Le sable calcaire contenait une grande quantité des grains très fin (<0,08 mm), ces petits grains remplis les vides dans le béton et conduits à une microstructure du béton plus dense que le béton contenant du sable siliceux.

4 CONCLUSION

L'étude présentée dans cet article concerne le comportement de deux groupes de béton exposés à haute température, le premier groupe de béton a été réalisé avec du sable siliceux et le second a été réalisé avec du sable calcaire. Trois types de matrice de pâte ont été testés, normal, haute résistance et haute performance. Les propriétés mécaniques et physiques résiduelles de six bétons ont été déterminées à température ambiante et après exposition à différents cycles de chauffage/refroidissement à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C. On a étudié l'effet de la température sur la perte de masse, la porosité à l'eau, la densité, la variation de volume, la résistance à la compression et la vitesse des ondes soniques de ces bétons. Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des résultats présentés dans cette étude:

- Les bétons préparés avec du sable calcaire présentent une plus grande perte de masse que les bétons préparés avec du sable siliceux à partir de 600°C, ce qui s'explique par la décomposition de la calcite CaCO_3 et le départ du CO_2 .
- La porosité des bétons à base de sable calcaire est supérieure à celle des bétons à base du sable siliceux entre 600°C et 900°C. Les carbonates de sable calcaire entraînent un endommagement supplémentaire du béton.
- La densité des bétons ne dépend pas de la nature du sable. L'évolution de la densité des bétons préparés avec du sable calcaire était très proche de

celle des bétons préparés avec du sable siliceux entre 150°C et 900°C.

- Les bétons contenant du sable siliceux présentent une augmentation de volume supérieure à celle du béton contenant du sable calcaire après un chauffage à 600°C. Ceci s'explique par l'augmentation du volume de sable siliceux dû à la transformation du quartz α au quartz β qui se produit à 573°C.
- L'évolution de la résistance à la compression résiduelle des bétons dépend de la nature du sable et du rapport E/C de 20°C à 600°C. Pour un rapport E/C élevé (matrice normale), les bétons SC ont la meilleure résistance à la compression résiduelle, tandis que pour un rapport E/C faible, les bétons SS ont le meilleur comportement.
- La vitesse des ondes soniques de tous les bétons diminue avec l'augmentation de température, et un processus d'accélération dans la diminution de la vitesse des ondes soniques est observé dans la plage de 250-900°C. Dans cette plage de température, la vitesse des ondes soniques des bétons contenant du sable siliceux présente les valeurs les plus faibles que celles des bétons contenant du sable calcaire.
- Les bétons contenant du sable calcaire présentent moins de fissures que les bétons contenant du sable siliceux.
- Le béton contenant du sable calcaire d'un rapport E/C important (matrice normale) pourrait être utilisé dans des applications à température élevée.

REFERENCES

- [1] Association française de normalisation AFNOR P 18-418, Auscultation sonore – mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Tour Europe cedex 7 92080, Paris la défense, Décembre 1989.
- [2] Barkat M., Mezghiche B., Effets des additions minérales et adjuvants fluidifiants sur le comportement rhéologique des mortiers et bétons frais et durcis à base de sables des carrières, Thesis of magister of civil engineering - modeling of Materials and structures, University of Biskra, Algeria, 2012.
- [3] Bazant Z. P., Kaplan M. F., Concrete at high temperature: material properties and mathematical models. Longman Group Limited, London, 1996.
- [4] Beck K., Janvier-Badosa S., Brunetaud X., Török Á., Al-Mukhtar M., Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015.
- [5] Chu H.-Y., Jiang J.-Y., Sun W., Zhang M., Thermal behavior of siliceous and ferro-siliceous sacrificial concrete subjected to elevated temperatures, Materials and Design, Vol. 95, pp. 470-480, 2016.
- [6] Dreux, G., & Festa, J., Nouveau guide du béton et de ses constituants. Edition Eyrolles, 8, pp. 205-284, 1998.
- [7] Fares H., Noumowé A., Remond S., Self-consolidating concrete subjected to high temperature – Mechanical and physicochemical properties, Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 1230-1238, 2009.
- [8] Fiche technique: Caractéristiques physico-mécaniques et composition chimiques, Société des ciments d'Ain Touta, 2013.
- [9] Hachemi S., Etude du Comportement du béton soumis à haute température: Influence du type de béton et de la nature des constituants, Thesis of science Doctorate in civil engineering, University of Biskra-Algeria, 2015.
- [10] Hachemi S., Ounis A., Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 19, No. 7, 805-824, 2015.
- [11] Hachemi S., Ounis A., The influence of sand nature on the residual physical and mechanical properties of concrete after exposure to elevated temperature, European Journal of Environmental and Civil Engineering, doi: 10.1080/19648189.2017.1327893, 2017.
- [12] Hager I., Tracz T., Śliwiński J., Krzemień K., The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature, Fire and Materials, doi: 10.1002/fam.2318, 2015.
- [13] ISO/TR 15655, Fire resistance - Tests for thermo-physical and mechanical properties of structural materials at elevated temperatures for fire engineering design. (Technical report) Geneva, 2003.
- [14] Khaliq W., Anis Khan H., High temperature material properties of calcium aluminate cement, Concrete, Construction and Building Materials, Vol. 94, pp. 475-487, 2015.
- [15] Khoudjia M. L. K., Mezghiche B., Drissi M., Experimental and numerical evaluation of the compressive strength of concretes with crushed sands modified with sand of dune, Courrier du Savoir N°20, University of Biskra, pp.123-128, 2015.
- [16] Khoury G. A., Anderberg Y., Both K., Fellingner J., Hoj N. P., Majorana C., Fire design of concrete structures-materials, structures and modeling. State of art report, FIB Bulletin N° 38, 2007.
- [17] Khoury G.A., Compressive strength of concrete at high temperature: a reassessment, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, pp. 291-309, 1992.
- [18] Miličević I., Štirmer N., Banjad Pečur I., Residual mechanical properties of concrete made with crushed clay bricks and roof tiles aggregate after exposure to high temperatures, Materials, doi: 10.3390/ma9040295, Vol. 9, 295, 2016.
- [19] Mindeguia J-C., Pimienta P., Carré H., La Borderie C., On the influence of aggregate nature on concrete

- behaviour at high temperature, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 16, No. 2, pp. 236-253, 2012.
- [20] Niriy R., Beaucour A-L., Hebert R., Noumowé A., Ledesert B., Xing Z., Bodet R., Influence de la composition chimique et minéralogique des granulats sur leurs comportement à température élevée, Colloque « Performance du béton soumis à haute température », 23 Octobre 2012.
- [21] Normalisation française P 18-554, Granulats – mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et des cailloux, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990.
- [22] Norme Européenne NF EN 12390-3, Essai pour béton durci Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes, ISSN 0335-3931, l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 11 avenue Francis de Pressensé 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, Février 2003.
- [23] Norme Européenne NF EN 12390-4, Essai pour béton durci Partie 4: Caractéristiques des machines d'essai, ISSN 0335-3931, l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 11 avenue Francis de Pressensé 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, Août 2000.
- [24] Norme Européenne NF EN 12390-7, Essai pour béton durci Partie 7: Masse volumique du béton, ISSN 0335-3931, l'Association Française de Normalisation (AFNOR), 11 avenue Francis de Pressensé 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, Septembre 2001.
- [25] Noumowé A.N., Clastres P., Debick G., Costaz J.-L., Transient heating effect on high strength concrete, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 166, pp. 99-108, 1996.
- [26] Poon C.-S., Azhar S., Anson M., Wong Y.-L., Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1291-1300, 2001.
- [27] Rayssac E., Auriol J.C., Deneele D., Larrard F., Ledee V., Platret G., Valorisation de laitiers d'aciérie LD pour les infrastructures routières. *Bull. Laboratoire Ponts Chaussées*, Vol. 275, pp. 27-38, 2009.
- [28] Sarhat S. R., Sherwood E.G., The behaviour of recycled aggregate concrete at elevated temperatures, 2nd International engineering mechanics and materials specialty conference, Ottawa, Ontario, June 14-17, 2011.
- [29] Tanyildizi H., Şahin M., Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature, *Construction and Building Materials*, Vol. 79, pp. 97-103, 2015.
- [30] Xing Z., Hébert R., Beaucour A-L., Ledésert B., Noumowé A., Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behaviour at elevated temperature, *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 47, N° 11, pp. 1921-1940, 2014.
- [31] Xing Z., Beaucour A-L., Hebert R., Noumowé A., Ledesert B., Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature, *Construction and Building Materials*, Vol. 95, pp. 18-28, 2015.
- [32] Xing Z., Beaucour A-L., Hebert R., Noumowé A., Ledesert B., Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 392-402, 2011.