

Contribution à l'étude des risques d'endommagement du revêtement en béton des tunnels soumis aux hautes températures

Contribution to the study of risks of damage to the concrete lining of tunnels subjected to high temperatures

Fatiha Kazi Aoual-Benslafa¹ Djemal Kerdal² Abdelaziz Semcha¹ Zine El Adine Kamechel¹

¹ "LABMAT" laboratory, Civil Engineering Department, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique (ENSET Oran), B.P. 1523 Oran El M'Naouer 31000, Algeria

² Civil Engineering Department, M. Boudiaf University of Science and Technology, Oran, Algeria

Le Béton à Hautes Performances (BHP) est de plus en plus utilisé dans les pays industrialisés mais n'est pas très connu dans notre pays. Les nombreuses recherches ont permis une meilleure connaissance des hautes performances de ce matériau. Celles-ci ont amélioré le comportement mécanique et la durabilité à température ambiante dans les ouvrages très fortement chargés tels que les tunnels. Ces structures peuvent être soumises aux conditions extrêmes de température, il est alors nécessaire d'évaluer la sécurité des ouvrages vis-à-vis des incendies. Le travail présenté est une recherche expérimentale qui présente les effets de la température sur les caractéristiques mécaniques du béton. Celui-ci a été formulé à partir de matériaux locaux de l'ouest Algérien et a été classé dans les BHP C55/67. Les éprouvettes de béton ont été ensuite exposées aux hautes températures allant de 200°C jusqu'à 1000°C. Des essais mécaniques (résistances instantanées et résiduelles à la compression) à chaud et après refroidissement (à l'air et dans l'eau) ont été réalisés. Les résultats montrent que les résistances en compression diminuent avec l'augmentation de la température mais présentent un pic de résistance vers 400°C. Les effets des hautes températures sur les résistances à la compression du béton sont plus prononcés lorsque le béton subit un choc thermique dans l'eau qu'à l'air.

1 - Introduction

Le béton est largement utilisé comme matériau dans les structures de génie civil. Dans les ouvrages souterrains tels que les tunnels, il constitue les structures de soutènement et de revêtement. Les feux récents qui se sont

produits dans les tunnels européens (Mont Blanc, tunnel sous la Manche, etc.) soulignent les risques sérieux d'endommagement des structures exposées aux hautes températures et la mise en péril de leur stabilité. Les

High Performance Concrete (HPC) is increasingly widely used in industrialised countries but is not very well known in our country. Considerable research has allowed better knowledge of the high performances of this material to be obtained. This research has improved mechanical behaviour and durability at ambient temperature in very heavily loaded structures such as tunnels. As these structures can be subjected to extreme temperature conditions, it is necessary to evaluate their safety with respect to fire risks. The work presented is experimental research which presents the effects of temperature on the mechanical characteristics of the concrete. This concrete was formulated from local materials from the west of Algeria and was classified in HPC class C55/67. The concrete test specimens were then exposed to high temperatures ranging from 200°C up to 1000°C. Mechanical tests (instantaneous and residual compressive strengths) when hot and after cooling (in air and in water) were performed. The results show that the compressive strengths diminish with the increase in temperature but present a strength peak at approximately 400°C. The effects of high temperature on the compressive strengths of the concrete are more pronounced when the concrete is subjected to a thermal shock in water than in air.

1 - Introduction

Concrete is widely used as a material in civil engineering structures. In underground works such as tunnels, it constitutes the supporting and lining structures. The recent fires which have occurred in European

tunnels (the Mont Blanc Tunnel, Channel Tunnel, etc.) underline the serious risks of damage to structures exposed to high temperatures and the threat to their stability. High performance concretes (HPC) are

bétons à hautes performances (BHP) sont considérés comme des matériaux nouveaux mais leur comportement n'est pas complètement maîtrisé lorsqu'ils sont exposés aux hautes températures. Des parties des Eurocodes sont consacrées à la sécurité au feu des structures en béton [3, 4, 5] et beaucoup de recherches se développent dans ce domaine. Lors de l'exposition aux hautes températures, des changements s'opèrent dans les caractéristiques mécaniques du béton. La déshydratation des composants de la matrice de 110°C jusqu'à environ 550°C provoque un retrait et donc la fissuration du béton [1, 5, 7, 14]. De même, les granulats subissent des modifications consécutives à une forte élévation de température comme le cas de la décarbonatation des granulats calcaires, vers 800°C-900°C [8, 12, 14]. Vers 1000°C-1150°C c'est la perte au feu totale de l'échantillon de béton [12]. Après un temps plus ou moins long de refroidissement, le feu est généralement éteint par projection d'eau ; cet apport d'eau provoque l'expansion du béton [1, 13, 14] et son endommagement. La réparation des dommages dépend de l'importance et de la sévérité de la dégradation du béton, de la reprise du parement jusqu'à la démolition et reconstruction complète du revêtement. L'objet de cette étude est de fabriquer un béton avec les matériaux locaux de

l'ouest Algérien (granulats calcaires) en vue de faire des essais pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du béton et de le classer dans les BHP. Ce même béton est ensuite exposé aux hautes températures d'une part et subit des chocs thermiques à l'air et dans l'eau d'autre part. Les essais de résistance en compression sont réalisés à chaud et après refroidissement. Les pertes de masse ont été déterminées.

2 - Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 - Les matériaux utilisés

De manière la plus générale, le matériau béton est un composite fabriqué à partir d'un mélange de ciment, granulats et eau auquel on peut ajouter des adjuvants.

Le ciment utilisé pour la confection de nos bétons est un CPJ CEM II/A 42,5 MPa de la cimenterie de Beni Saf (Ouest Algérien). Il a une surface spécifique Blaine de 3585 cm²/g et une densité de 3,1.

Les caractéristiques minéralogiques du ciment utilisé sont données dans le tableau 1.

Le sable utilisé est un sable concassé de nature calcaire, de dimension 0/4mm provenant de la carrière de Kristel (Oran Est). Un sable fin de

seen as new materials but their behaviour when exposed to high temperatures is not completely mastered. Parts of the Eurocodes are devoted to the fire safety of concrete structures [3, 4, 5] and a lot of research is developing in this field. On exposure to high temperatures, changes occur in the mechanical characteristics of concrete. Dehydration of the components of the matrix from 110°C up to approximately 550°C causes shrinkage and therefore cracking of the concrete [1, 5, 7, 14]. Similarly, the aggregates undergo changes following a strong temperature rise such as decarbonation of the calcareous aggregates at approximately 800°C to 900°C [8, 12, 14]. At approximately 1000°C to 1150°C, total ignition loss of the concrete sample occurs [12]. After a cooling period of varying length, the fire is generally put out by spraying with water. This adding of water causes the expansion of the concrete [1, 13, 14] and damages it. The work required to repair the damage depends on the extensiveness and severity of the damage to the lining, ranging from repair of the facing to demolition and complete reconstruction of the lining. The purpose of this study is to manufacture a concrete with local materials from the west of Algeria (calcareous aggregates) with a view

to performing tests to determine the physical and mechanical characteristics of the concrete and classify it in the HPC class. The same concrete is then exposed to high temperatures and subjected to thermal shocks in air and in water. The compressive strength tests are carried out when hot and after cooling. The weight losses were determined.

2 - Matériaux and experimental methods

2.1 - Materials used

In the most general sense, the material concrete is a composite manufactured from a mixture of cement, aggregates and water to which admixtures may be added.

The cement used for making our concrete is a CPJ CEM II/A 42,5 MPa from the Beni Saf cement works in the west of Algeria. It has a Blaine specific surface of 3585 cm²/g and a density of 3.1.

The mineralogical characteristics of the cement used are given in table 1. The sand used is calcareous crushed 0/4 mm sand from the Kristel quarry (East Oran). A siliceous fine sand from Terga (West Oran) was prepared according to standard NF P 18-301. This enabled correction of the particle size of the coarse sand to obtain a grading curve within the standar-

Phase <i>Phase</i>	Minéraux <i>Minerals</i>	Teneur (%) <i>Content (%)</i>
	C ₃ S	59
	C ₂ S	15
	C ₃ A	9,76
	C ₄ AF	11
	CaO libre <i>Free CaO</i>	0,5
Régulateur de prise <i>Setting controller</i>	gypse <i>gypsum</i>	5

Tableau 1 : composition minéralogique du ciment selon Bogue
Table 1: mineralogical composition of cement according to Bogue

Paramètres physiques <i>Physical characteristics</i>	Valeurs <i>Values</i>	
Masse volumique absolue (g/cm ³) / <i>True density (g/cm³)</i>	2,64	
Equivalent de sable / <i>Sand equivalent</i>	Visuel (%) / <i>Visual (%)</i>	79
	Piston (%)	70
Module de finesse / <i>Fineness modulus</i>	2,25	
Valeur du bleu méthylène « VB » / <i>Methylene blue value « VB »</i>	1,28	
Nature	Silico-calcaire <i>Silico-calcareous</i>	

Tableau 2 : caractéristiques physiques du sable de carrière de KRISTEL
Table 2: physical characteristics of Kristel quarry sand

Caractéristiques Physiques / <i>Physical characteristics</i>	Gravier 3/8 / <i>Gravel 3/8</i>	Gravier 8/16 / <i>Gravel 8/16</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³) / <i>True density (g/cm³)</i>	2,7	2,7
Absorption (%)	0,89	0,9
Coefficient de Los Angeles (%) / <i>Los Angeles coefficient (%)</i>	22	24
Coefficient Micro Deval (%) / <i>Micro Deval coefficient (%)</i>	16	16
Nature	Calcaire / <i>Calcareous</i>	Calcaire / <i>Calcareous</i>

Tableau 3 : caractéristiques physiques des graviers de carrière de Kristel / Table 3: physical characteristics of Kristel quarry gravel

nature siliceuse provenant de Terga (Oran Ouest) a été préparé suivant la norme NF P 18-301. Celui-ci a permis de réaliser la correction de la granulométrie du sable grossier afin d'obtenir une courbe granulométrique se situant à l'intérieur du fuseau normalisé. Les caractéristiques physiques du sable de carrière (après correction) sont données au tableau 2.

Les graviers de nature calcaire (carrière de Kristel) ont une dimension maximale de 16 mm. Les caractéristiques physiques sont données au tableau 3.

L'eau selon la norme NF P 18 303 doit être exempte de matières organiques, de sulfates et avoir une acidité supérieure à 4. L'analyse chimique de l'eau utilisée (eau potable distribuée par le réseau du service public) révèle un pH proche de la neutralité (7,11), son taux en matières organiques est très faible (0,12 mg/l) et son taux en sulfates faible (115 mg/l).

L'adjuvant utilisé est un plastifiant non chloré réducteur d'eau Viscocrete 3045 (Sika), il est conforme à la norme NF EN 934-2. Les données techniques sont : son pH égal à 5 ± 1 , sa densité égale à $1,11 \pm 0,02$ et l'extrait sec $36,4 \pm 1,8$ %. Le volume total d'eau de gâchage est le volume d'eau auquel il faut ajouter la quantité d'eau équivalente apportée par le fluidifiant [3].

Les courbes granulométriques des granulats sont données en figure 1.

La formulation du béton a été réalisée suivant les exigences de la norme européenne EN 206-1. Celle-ci définit les classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement dans lequel va être situé l'ouvrage et les risques d'agressions (chimiques, des sulfates...) et d'attaques (carbonatation) auxquels il va être exposé pendant sa durée de service. Les ouvrages souterrains en exploitation peuvent être exposés aux agressions chimiques des sols naturels et des eaux souterraines mais aussi à la carbonatation. Nous avons choisi la classe d'exposition « XA3 » car elle a des exigences plus élevées que celle de la classe « XC4 ».

Pour la première formulation nous avons posé deux hypothèses :

- La première hypothèse est de formuler un béton ayant à l'état frais, les caractéristiques rhéologiques nécessaires

disés range. The physical characteristics of the quarry sand (after correction) are given in table 2.

The calcareous gravel (Kristel quarry) has a maximum dimension of 16 mm. The physical characteristics are given in table 3.

The water according to standard NF P 18 303 must be free of organic matter and sulphates and have an acidity greater than 4. Chemical analysis of the water used (drinking water distributed by the public service network) reveals a pH close to neutrality (7.11), its organic matter content is very low (0.12 mg/l) and it has a low sulphate level (115 mg/l).

The admixture used is a water-reducing non-chlorinated plasticizer Viscocrete 3045 (Sika), complying with standard NF EN 934-2. The technical data are: pH 5 ± 1 , density 1.11 ± 0.02 and dry extract 36.4 ± 1.8 %.

The total volume of mixing water is the volume of water to which the

equivalent quantity of water contributed by the water-reducing plasticizer must be added [3].

The grading curves of the aggregates are given in figure 1.

The concrete was formulated according to the requirements of European standard EN 206-1. This defines the exposure classes in accordance with the actions due to the environment in which the structure will be located and the risks of aggressions (chemical aggression, sulphate aggression, etc.) and attacks (carbonation) to which it will be exposed during its service life. Operational underground structures may be exposed not only to the chemical aggressions of natural soils and ground water but also to carbonation. We have chosen exposure class "XA3" because it has higher requirements than class "XC4". For the first formulation, we adopted two hypotheses:

- The first hypothesis is to formulate

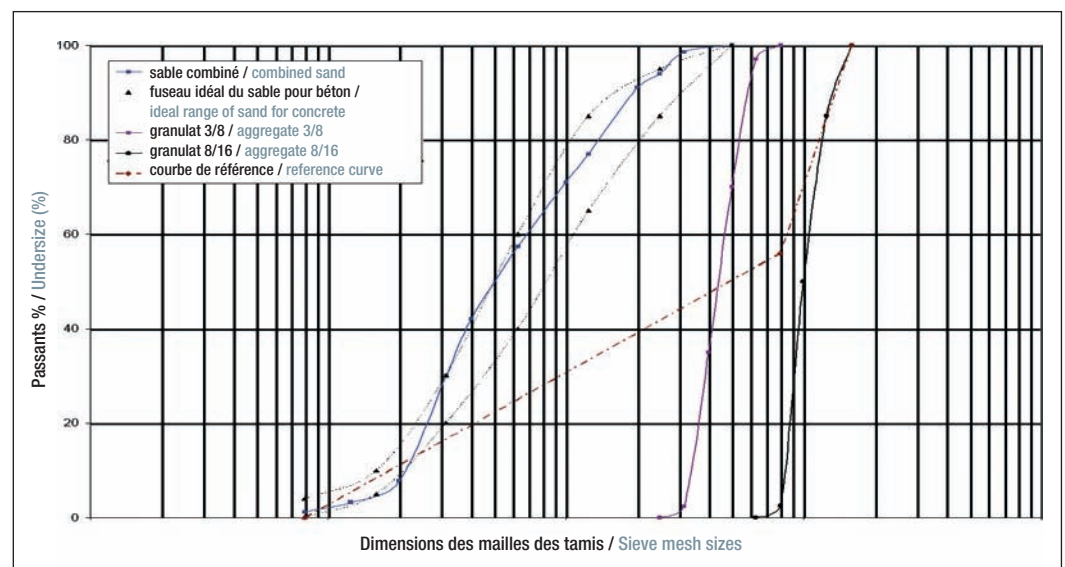


Figure 1 : courbes granulométriques des granulats

Figure 1: aggregate grading curves

Pour la classe d'exposition « XA3 » / For exposure class "XA3"				
Teneur minimale en ciment (kg/m ³) <i>Minimum cement content (kg/m³)</i>	Consistance <i>Consistency</i>	Eau/Ciment <i>Water/Cement</i>	Résistance en compression <i>Compressive strength</i>	Teneur en air minimale <i>Minimum air content</i>
360	S4 ; (16 à 21) cm	0,45	C35/45 40MPa sur cylindre / on cylinder 50MPa sur cube / on cube	Aucune exigence <i>No requirement</i>

Tableau 4(a) : données de formulation
Table 4(a): formulation data

Tableau 4(b) : composition du béton
Table 4(b): concrete composition

Matériaux de composition du béton / <i>Concrete composition materials</i>	Quantités / <i>Quantities</i>
Ciment CPJ 42.5 (Kg) / <i>Cement CPJ 42.5 (Kg)</i>	475
Sable Fin (0/1) (Kg) / <i>Fine sand (0/1) (Kg)</i>	338
Sable concassé (0/4) (Kg) / <i>Crushed sand (0/4) (Kg)</i>	225
Gravier (3/8) (Kg) / <i>Gravel (3/8) (Kg)</i>	382
Gravier (8/16) (Kg) / <i>Gravel (8/16) (Kg)</i>	792
Eau (V _{Total} en L) / <i>Water (V_{Total} in L)</i>	185
Adjuvant Plastifiant (% en extrait sec) / <i>Plasticizer Admixture (% in dry extract)</i>	0,5
Rapport E/C / <i>W/C ratio</i>	0,4

pour répondre au critère de consistance.

- La deuxième hypothèse est de formuler un béton ayant, à l'état durci, les caractéristiques mécaniques nécessaires pour répondre au critère de résistance.

Le tableau 4(a) résume l'ensemble des données pour la formulation du béton ordinaire et le tableau 4(b) la composition du béton optimisée.

2.2 - Le protocole expérimental

Deux types d'éprouvettes ont été réalisés selon la norme EN 206-1, des éprouvettes cubiques (100x100x100 mm³) et des éprouvettes cylindriques d'élanement 2 (110 mm/220 mm) pour la classification du béton et la caractérisation de sa résistance mécanique et de sa résistance au feu. On opère au coulage du béton et après 24h au démoulage des éprouvettes (douze éprouvettes pour chaque série) ; celles-ci sont mises à la cure sous l'eau pendant 28 jours à une température de 20 ± 2°C. Les éprouvettes sont préalablement préparées pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant

6 jours puis étuvées à 105°C pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leur masse. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle à différentes températures 200°C, 400°C, 600°C, 800°C et 1000°C avec une vitesse de chauffe égale à 10°C/min puis maintenues en température dans le four pendant 1 heure.

Les dix sept séries de béton (seize séries cubiques et une série cylindrique) sont désignées respectivement par BT₂₀ (béton témoin à 20°C), BT₂₀₀ (béton chauffé à 200°C), BT₄₀₀ (béton chauffé à 400°C), BT₆₀₀ (béton chauffé à 600°C), BT₈₀₀ (béton chauffé à 800°C), BT₁₀₀₀ (béton chauffé à 1000°C).

Les deux premières séries d'éprouvettes du béton non chauffé (une cubique BT_{cub20} et une cylindrique BT_{cyl20}) sont écrasées (essai de compression) à différents âges (7, 28 et 60j).

Cinq séries d'éprouvettes cubiques BT₂₀₀, BT₄₀₀, BT₆₀₀, BT₈₀₀ et BT₁₀₀₀ sont écrasées à chaud (âge 28j) ; pour chaque palier de température des mesures de pertes de masse sont effectuées. Le degré de déshydratation [Perte de masse (%)] est évalué par la

a concrete which, in the fresh state, has the necessary rheological characteristics to meet the consistency criterion.

- The second hypothesis is to formulate a concrete which, in the hardened state, has the necessary mechanical characteristics to meet the strength criterion.

Table 4(a) summarises all the data for the formulation of the ordinary concrete and table 4(b) gives the optimised concrete composition.

2.2 - Experimental protocol

Two types of test specimens were produced according to standard EN 206-1, cube-shaped test specimens (100x100x100mm) and cylindrical test specimens of length-to-height ratio 2 (110mm/220mm) for classification of the concrete and characterisation of its mechanical strength and its fire resistance. The concrete is poured and after 24 hours, on removal of the tests specimens from the mould (twelve test specimens for each series), they are cured under water for 28 days at a temperature of 20 ± 2°C. The test specimens are

prepared beforehand for the heat treatment, being exposed to open air in the laboratory for 6 days and then dried in an oven at 105°C for several days until their weight stabilises. They are then heated in a muffle furnace to various temperatures (200°C, 400°C, 600°C, 800°C and 1000°C) with a heating rate of 10°C/min and then kept at the same temperature in the furnace for 1 hour. The seventeen concrete series (sixteen cube-shaped series and one cylindrical series) are designated respectively by BT₂₀ (control concrete at 20°C), BT₂₀₀ (concrete heated to 200°C), BT₄₀₀ (concrete heated to 400°C), BT₆₀₀ (concrete heated to 600°C), BT₈₀₀ (concrete heated to 800°C) and BT₁₀₀₀ (concrete heated to 1000°C).

The first two series of unheated concrete specimens (one cube-shaped BT_{cub20} and one cylindrical BT_{cyl20}) are crushed (compression test) at various ages (7, 28 and 60 days).

Five series of cube-shaped test specimens BT₂₀₀, BT₄₀₀, BT₆₀₀, BT₈₀₀ and BT₁₀₀₀ are crushed when hot (age 28 days), and weight loss measure-

relation suivante : $[(M1-M2)/M1] \times 100$, avec M1, M2 : masses des éprouvettes avant et après chauffage respectivement. Cinq séries d'éprouvettes cubiques BCt_{air200} , BCt_{air400} , BCt_{air600} , BCt_{air800} et $BCt_{air1000}$ sont refroidies à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasées (âge 28j). Cinq séries d'éprouvettes cubiques BCt_{eau200} , BCt_{eau400} , BCt_{eau600} , BCt_{eau800} et $BCt_{eau1000}$ sont immergées dans l'eau (10s) à la sortie du four et subissent un refroidissement à l'air pendant 24 heures puis écrasées (âge 28j).

3 - Résultats et discussion

Le comportement mécanique du béton de référence BT20 est d'abord étudié ; la figure 2 représente l'évolution de la résistance à la compression sur éprouvettes cubiques et cylindriques. Les valeurs moyennes de la résistance en compression à 28 jours du béton de référence à 20°C, sont respectivement de 56MPa sur éprouvettes cylindriques et de 69MPa sur éprouvettes cubiques. Selon la norme européenne EN 206-1 qui définit la classe du béton en fonction des résistances en compression à 28 jours sur éprouvettes cylindriques et cubiques, les résultats obtenus permettent de classer notre béton dans la classe des BHP C55/67.

L'évolution de la résistance à la compression du béton chauffé est représentée en figure 3. On enregistre une diminution de 30 % de la résistance à la compression du béton BT200 par rapport au béton BT₂₀. Ensuite on observe une augmentation de la résistance à la compression à 400°C du béton BT₄₀₀ avec un pic de résistance qui avoisine celle du béton BT₂₀. Au-delà du pic de résistance à 400°C, on note une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression pour les bétons BT₆₀₀ et BT₈₀₀ jusqu'à une résistance à la compression presque nulle pour le béton BT₁₀₀₀.

La figure 4 représente les résistances résiduelles en compression du béton chauffé à différentes températures et ayant subi des chocs thermiques à l'air et dans l'eau. Pour le béton BCtair, on observe qu'à 200°C la résistance du béton BCt_{air200} représente 67 % de la résistance en compression du béton BT₂₀. Après 200°C, on enregistre une petite augmentation de la résistance du béton BCt_{air400} , elle atteint 76 % à 400°C. Au-delà de 400°C, la diminution est quasi linéaire, les résistances atteintes par les bétons BCt_{air600} , BCt_{air800} et $BCt_{air1000}$ sont respectivement 60 %, 30 % et 10 % de la résistance en compression du béton BT₂₀. Pour le béton BCteau, on enregistre une très faible diminution de la résis-

ments are made for each temperature level. The degree of dehydration [Weight loss (%)] is evaluated by the following relationship: $[(M1-M2)/M1] \times 100$, where M1 and M2 are the masses of the test specimens before and after heating respectively. Five series of cube-shaped test specimens BCt_{air200} , BCt_{air400} , BCt_{air600} , BCt_{air800} and $BCt_{air1000}$ are cooled in air (outside the furnace) for 24 hours and then crushed (age 28 days). Five series of cube-shaped test specimens $BCt_{water200}$, $BCt_{water400}$, $BCt_{water600}$, $BCt_{water800}$ and $BCt_{water1000}$ are immersed in water (for 10 seconds) on exit from the furnace and are subjected to air cooling for 24 hours and then crushed (age 28 days).

3 - Results and discussion

The mechanical behaviour of the reference concrete BT₂₀ is studied first of all (figure 2 shows the change in the compressive strength on cube-shaped and cylindrical test specimens). The average compressive strength values after 28 days for the

reference concrete at 20°C are 56MPa on cylindrical test specimens and 69MPa on cube-shaped test specimens respectively. According to European standard EN 206-1 which defines the class of a concrete according to the compressive strength after 28 days on cylindrical and cube-shaped test specimens, the results obtained enable our concrete to be classified in HPC class C55/67.

The change in the compressive strength of the heated concrete is shown in figure 3. A decrease of 30% in the compressive strength of concrete BT200 with respect to concrete BT₂₀ is recorded. We then observe an increase in compressive strength at 400°C for concrete BT₄₀₀ with a strength peak which is close to that of concrete BT₂₀. Beyond the strength peak at 400°C, we note a near-linear decrease in compressive strength for concretes BT₆₀₀ and BT₈₀₀ down to a near-nil compressive strength for concrete BT₁₀₀₀.

Figure 4 shows the residual compressive strengths of the concrete heated to various temperatures and subjected to thermal shocks in air

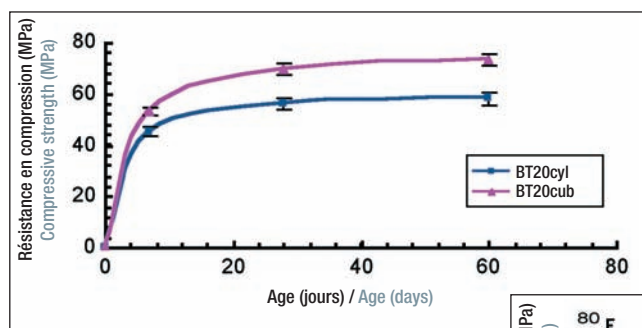


Figure 2 : évolution de la résistance en compression du BT_{20cub} (béton témoin sur éprouvettes cubiques) et du BT_{20cyl} (béton témoin sur éprouvettes cylindriques)

Figure 2: change in compressive strength of BT_{20cub} (control concrete on cube-shaped test specimens) and BT_{20cyl} (control concrete on cylindrical test specimens)

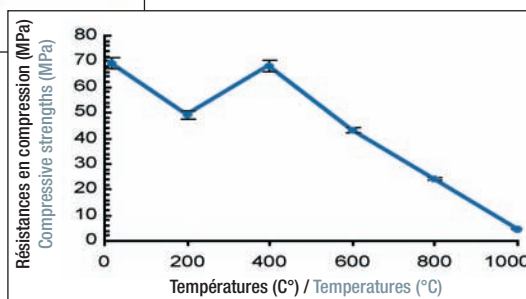


Figure 3 : résistance à la compression à chaud du béton à 28j en fonction de la température

Figure 3: hot compressive strength of concrete after 28 days as a function of temperature

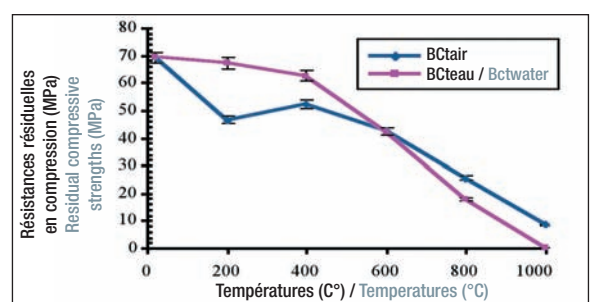


Figure 4 : résistances résiduelles en compression du béton à 28 jours après refroidissement, en fonction de la température

Figure 4: residual compressive strengths of concrete after 28 days after cooling, as a function of temperature

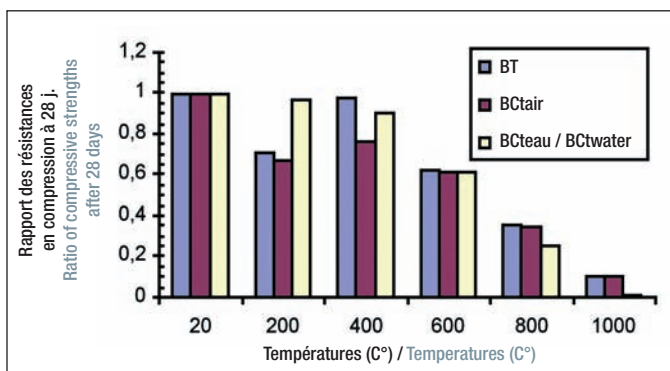


Figure 5 : évolution des résistances à la compression à 28 j. des trois bétons en fonction de la température / Figure 5: change in compressive strengths after 28 days of the three concretes as a function of temperature

tance en compression dans l'intervalle des températures 20°C à 400°C. Les résistances du béton BCt_{eau200} et BCt_{eau400} représentent respectivement 97 % et 90 % de la résistance en compression du béton BT₂₀.

Au-delà de 400°C on enregistre une diminution quasi linéaire, les résistances atteintes par les bétons BCt_{eau600}, BCt_{eau800} et BCt_{eau1000} représentent 60 % à 600°C et 25 % à 800°C de la résistance du béton BT₂₀ et la perte totale de résistance à 1000°C.

Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la compression à chaud et après refroidissement du béton, la figure 5 représente cette l'évolution sous forme comparative.

On remarque qu'à 200°C les résistances du béton BT₂₀₀ et du béton BCt_{air200} diminuent et sont voisines alors que celle du béton BCt_{eau200} est largement supérieure. Ces résultats sont en accord avec les recherches menées ailleurs. Les chercheurs s'accordent à dire que la déshydratation du béton lors de l'échauffement [2, 3, 8, 11, 15] est la cause de la diminution de sa résistance en compression. À des températures inférieures à 200°C l'eau libre s'évapore, le béton chauffé à 200°C et refroidi dans l'eau est réhydraté et une grande partie de l'eau libre évaporée est récupérée. Entre 200°C et 400°C l'eau liée participe à l'établissement des pressions internes jouant le rôle de force de précontrainte d'où le pic de résistance. A 400°C les pics

de résistance sont observés pour les trois bétons, le pic de résistance pour le béton BCt_{eau400} avoisine celui du béton BT₄₀₀ alors que celui du béton BCt_{air400} reste largement inférieur à celui du béton BT₄₀₀. Cette diminution de la valeur du pic dans le béton BCt_{air400} est attribuée à une diminution des pressions internes pendant le refroidissement à l'air grâce au phénomène de transfert d'une partie de la vapeur d'eau des zones chaudes du noyau de l'éprouvette vers les zones externes refroidies. Au-delà de 400°C on note la décroissance quasi linéaire et très importante de la résistance à la compression avec une pente plus accentuée pour le béton BCt_{eau}. Les éprouvettes de béton BT₆₀₀, BCt_{air600} et BCt_{eau600} chauffées à 600°C sont toutes au même niveau de résistance. Ceci rejoint l'observation de différents chercheurs que probablement à 600°C toute l'eau du béton a disparu et confirmerait le comportement identique des bétons traités différemment. Au delà de 600°C la résistance du béton BCt_{eau800} chute plus rapidement que celles du béton BT₈₀₀ et du béton BCt_{air800} avec une perte de résistance totale à 1000°C.

La figure 6 représente l'évolution de la perte de masse en fonction de la température.

On constate une perte de masse permanente durant l'échauffement du béton. Elle a les valeurs 4,4 %, 5 % respectivement à 105°C et à 200°C,

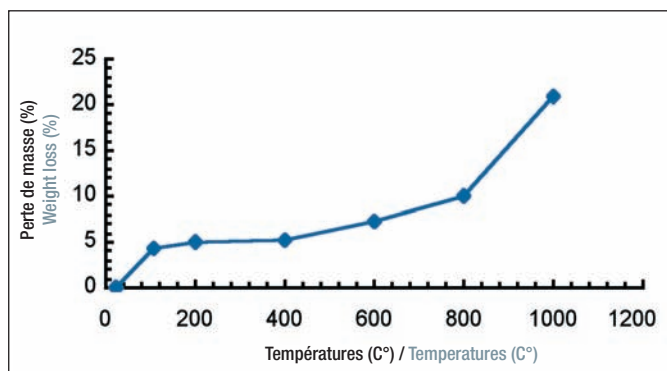


Figure 6 : évolution de la perte de masse du béton (granulats calcaires) en fonction de la température / Figure 6: change in weight loss of concrete (calcareous aggregates) as a function of temperature.

and in water. For concrete BCt_{air}, we observe that at 200°C the strength of concrete BCt_{air200} represents 67% of the compressive strength of concrete BT₂₀. After 200°C, we see a slight increase in the strength of concrete BCt_{air400}, which reaches 76% at 400°C. Beyond 400°C, the decrease is near-linear, and the strengths attained by concretes BCt_{air600}, BCt_{air800} and BCt_{air1000} are 60%, 30% and 10% of the compressive strength of concrete BT₂₀ respectively.

For concrete BCt_{water}, we see a very slight decrease in compressive strength in the 20°C to 400°C temperature interval. The strengths of concrete BCt_{water200} and BCt_{water400} represent respectively 97% and 90% of the compressive strength of concrete BT₂₀. Beyond 400°C we note a near-linear decrease, the strengths attained by concretes BCt_{water600}, BCt_{water800} and BCt_{water1000} representing 60% at 600°C and 25% at 800°C of the strength of concrete BT₂₀ and total loss of strength at 1000°C.

To illustrate more clearly the meaning of the relative change in compressive strength when hot and after cooling of the concrete, figure 5 shows this change in comparative form.

It can be seen that at 200°C the strengths of concrete BT₂₀₀ and BCt_{air200} diminish and are similar whereas that of concrete BCt_{water200} is much higher. These results are in

line with the research conducted elsewhere. Researchers agree that the dehydration of concrete during heating [2, 3, 8, 11, 15] is the cause of the decrease in its compressive strength. At temperatures below 200°C the free water evaporates, the concrete heated to 200°C and cooled in water is rehydrated and a large proportion of the evaporated free water is recovered. Between 200°C and 400°C the bound water contributes to the establishment of the internal pressures acting as a prestress force, hence the strength peak. At 400°C the strength peaks are observed for the three concretes, the strength peak for concrete BCt_{water400} being close to that of concrete BT₄₀₀ whereas that of concrete BCt_{air400} remains well below that of concrete BT₄₀₀. This reduction of the peak value in concrete BCt_{air400} is attributed to a reduction of the internal pressures during cooling in air owing to the phenomenon of transfer of part of the water vapour from the hot areas of the core of the test specimen to the cooled external areas. Beyond 400°C we note a near-linear and very considerable decrease in compressive strength with a more pronounced gradient concrete BCt_{water}. The test specimens of concrete BT₆₀₀, BCt_{air600} and BCt_{water600} heated to 600°C are all at the same level of strength.

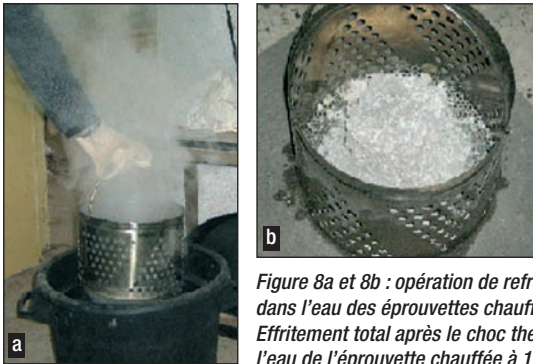


Figure 8a et 8b : opération de refroidissement dans l'eau des éprouvettes chauffées (a). Effritement total après le choc thermique dans l'eau de l'éprouvette chauffée à 1000°C (b).

Figure 8a et 8b : operation of cooling heated test specimens in water (a). Total crumbling after thermal shock in water of test specimen heated to 1000°C (b).

elle atteint les valeurs de 7,3 % à 600°C, 10 % à 800°C et 21 % à 1000°C. Ces pertes de masse sont dues à la déshydratation progressive du béton. Jusqu'à la température de 200°C, l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite s'évapore et les pores capillaires sont asséchés.

Vers 530°C l'eau fortement liée chimiquement contenue dans la portlandite s'évapore et à 600°C il ne reste qu'une toute petite quantité d'eau (0,2 %) dans l'éprouvette de béton et cette eau est absorbée par les granulats. On remarque qu'au-delà de 600°C les pertes en masse augmentent rapidement avec l'augmentation de la température. On observe que les pertes de masse mesurées à 800°C et à 1000°C sont plus grandes que l'eau de gâchage initiale contenue dans le béton qui représente 7,5 % de la masse du béton. Donc il y a d'autres matériaux qui disparaissent du béton

lorsque la température dépasse les 600°C. Nous pensons que cette différence est due à la décarbonatation du béton : le CO₂ et d'autres gaz s'échappent du béton pendant l'échauffement. Les différentes photos réalisées sur les éprouvettes chauffées et ayant subi des chocs thermiques à l'air et dans l'eau permettent d'évaluer l'état de surface (figures 8 et 9). Les figures 9a, 9b et 9c représentent les surfaces des éprouvettes de béton ayant été chauffées à 1000°C et refroidies à l'air après 24h, 48h et 72h. A 1000°C les fissures deviennent très profondes, l'endommagement du béton est total après 72h de refroidissement à l'air et instantané après refroidissement dans l'eau (figure 8b).

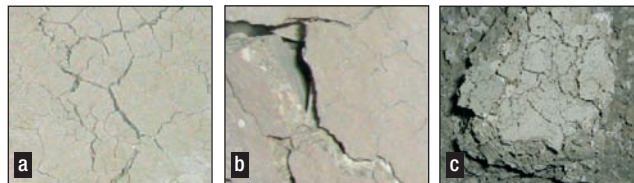


Figure 9 : état de surface des éprouvettes chauffées après le choc thermique à l'air, (a) après 24h, (b) après 48h, (c) après 72h

Figure 9: surface condition of heated test specimens after thermal shock in air, (a) after 24h, (b) after 48h and (c) after 72h

5 - Conclusions

Les résultats obtenus nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- 1 • L'analyse des matériaux locaux montre qu'ils répondent aux normes pour la fabrication d'un béton de qualité. Cette formulation du béton a permis d'obtenir de bonnes résistances en compression et de le classer dans les BHP C55/67
- 2 • Les résistances en compression du BHP C55/67 diminuent avec l'augmentation de la température. Cette diminution est attribuée à la dégradation de la portlandite à 530°C et à la décarbonatation des granulats calcaires à 950°C.

This is in line with the observation of various researchers that probably at 600°C all the water in the concrete has disappeared and would confirm the identical behaviour of concretes subjected to different treatments. Beyond 600°C, the strength of concrete $BCt_{water800}$ decreases more rapidly than those of concrete BT_{800} and concrete BCt_{air800} with total loss of strength at 1000°.

Figure 6 shows the change in weight loss as a function of temperature.

We note a permanent weight loss during heating of the concrete. It has the values 4.4% and 5% respectively at 105°C and 200°C, it reaches the values of 7.3% at 600°C, 10% at 800°C and 21% at 1000°C. These weight losses are due to the progressive dehydration of the concrete. Up to the temperature of 200°C, the free water and part of the weakly chemically bound water of the CSH and ettringite evaporates and the capillary pores are dried.

At around 530°C the strongly chemically bound water contained in the Portlandite evaporates at 600°C. Only a very small quantity of water (0.2 %) remains in the concrete test speci-

men, and this water is absorbed by the aggregates. It can be seen that beyond 600°C the weight losses increase rapidly with the increase in the temperature. We observe that the weight losses measured at 800°C and 1000°C are greater than the weight of the initial mixing water contained in the concrete which represents 7.5% of the weight of the concrete. There are therefore other materials which disappear from the concrete when the temperature exceeds 600°C. We believe that this difference is due to the decarbonation of the concrete: the CO₂ and other gases escape from the concrete during heating.

The various photographs taken of the test specimens heated and subjected to thermal shocks in air and in water allow the surface condition to be evaluated (figures 8 and 9). Figures 9a, 9b and 9c show the surfaces of the concrete test specimens heated to 1000°C and cooled in air after 24h, 48h and 72h. At 1000°C the cracks become deeper and the crumbling of the concrete is total after 72h of cooling in air and instantaneous after cooling in water (figure 8b).

5 - Conclusions

The results obtained have allowed us to reach the following conclusions:

- 1 • Analysis of the local materials shows that they meet the standards for production of a quality concrete. This formulation of the concrete made it possible to obtain good compressive strengths and classify it in HPC class C55/67
- 2 • The compressive strengths of HPC C55/67 decrease when the temperature is increased. This decrease is attributed to the degradation of the Portlandite at 530°C and the decarbonation of the calcareous aggregates at 950°C.

3 • Le BHP C55/67 présente un pic de résistance à 400°C aussi bien pour le béton écrasé à chaud que pour les bétons après refroidissement à l'air et dans l'eau. Ce pic est attribué à la présence de pressions de vapeur d'eau libérée par les différents hydrates qui jouent le rôle de force de précontrainte. Le pic est moins accentué pour le béton ayant subi un choc thermique à l'air, ceci est dû à l'évacuation des pressions de vapeur d'eau du béton devenu plus poreux et donc à la diminution de la force de précontrainte.

4 • La masse de béton BHP C55/67 dans les éprouvettes diminue avec l'augmentation de la température. Cette perte de masse augmente graduellement jusqu'à 800°C. Elle est plus accentuée au-delà de 800°C, elle atteint 10% à cette température et 21% à 1000°C, valeurs supérieures à la quantité d'eau de gâchage du béton (7,5%). Cette différence est due à la décarbonatation du béton, le CO₂ et d'autres gaz s'échappant du béton pendant l'échauffement.

5 • De l'observation visuelle des surfaces des éprouvettes du BHP C55/67 exposées aux hautes températures, à 1000°C on remarque que l'ouverture des fissures augmente avec le refroidissement à l'air ; l'effritement des éprouvettes de BHP C55/67 est constaté.

6 • La dégradation du BHP C55/67 chauffé à 1000°C est totale après 72h de refroidissement à l'air et instantanément après refroidissement dans l'eau. ♦

3 • HPC C55/67 presents a strength peak at 400°C both for concrete crushed when hot and for concretes after cooling in air and in water. This peak is attributed to the presence of pressures exerted by water vapour released by the various hydrates which act as a pre-stress force. The peak is less pronounced for concrete which has been subjected to a thermal shock in air. This is due to the evacuation of the water vapour pressures from the concrete which has become more porous and therefore to the decrease in the pre-stress force.

4 • The mass of HPC C55/67 in the test specimens decreases when the temperature is increased. This weight loss increases gradually up to 800°C. It is more pronounced beyond 800°C, reaching 10% at this temperature and 21% at 1000°C, values higher than the quantity of mixing water in the concrete (7.5%). This difference is due to the decarbonation of the concrete, CO₂ and other gases escaping from the concrete during heating.

5 • From visual observation of the surfaces of the test specimens of HPC C55/67 exposed to high temperatures, it can be seen that at 1000°C the opening of the cracks increases with cooling in air and crumbling of the test specimens of HPC C55/67 is observed.

6 • The degradation of HPC C55/67 heated to 1000°C is total after 72h of cooling in air and instantaneous after cooling in water. ♦

Références bibliographiques / References

- [1] Abramowicz M., Kowalski R. (2005) « The influence of short time water cooling on the mechanical properties of concrete heated up to high temperature. » Journal of civil engineering and management 2005, Vol XI, N°2, 85-90.
- [2] Arioz O. (2007) « Effects of elevated temperatures on properties of concrete. » Fire Safety Journal 2007 ; 42:516-522.
- [3] AitCin P.-C. (1992) « L'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances. » Compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France 1992.
- [4] CEN/TC 250/SC2 N 351 prEN 1992-1-2 (1st draft) October 2000. Eurocode2: Design of concrete structures- Part 1.2: General rules – Structural fire design.
- [5] CEN/TC 250/SC2 N 0466 prEN 1992-1-2 (Draft for stage 49) July 2002. Eurocode2: Design of concrete structures- Part 1.2: General rules – Structural fire design.
- [6] Georgali B, Tsakiridis PE. (2005) « Microstructure of fire-damaged concrete. » Cem Concr Compos 2005; 27:255-9.
- [7] Hager I. (2004) « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. » Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [8] Handoo SK., Agarwal S., Agarwal SK. (2002) « Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. » Cem Concr Res 2002; 32:1009-18.
- [9] Kameche Z.E. (2008) « Effets de la température sur le comportement du béton : cas des revêtements des tunnels routiers. » Thèse de Magister de l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran.
- [10] Khoury GA, Majorana CE, Pesavento F, Schrefler BA. « Modelling of heated concrete » Mag Concr Res 2002; 54(2):77-101.
- [11] Li M., Qian CX., Sun W. « Mechanical properties of high-strength concrete after fire » Cem Concr Res 2004; 34:1001-5.
- [12] Luccioni BM., Figueroa MI., Danesi RF. « Thermo-mechanical model for concrete exposed to elevated temperatures. » Eng Struct 2003; 25:729-42.
- [13] Nassif A. Y., Rigden S., Burley E. (1999) « The effects of rapid cooling by water quenching on the stiffness properties of fire-damaged concrete. » Magazine of Concrete Research, N°4, Aug, p. 255-161.
- [14] Pimienta P., Hager I. « Comportement au feu de BHP additionnés de fibres » Rapport BHP 2000. Mars 2003.