



EFFETS DE L'ELEVATION DE LA TEMPERATURE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DU BETON

Fatiha Benslafa-Kazi Aoual¹, Abdelaziz Semcha¹, Zine El Adine Kamechel¹.

¹ Laboratoire <<LABMAT>>, Département Génie Civil, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET Oran), B.P. 1523 Oran El M'Naouer 31000, Algérie

fkaziaoual@yahoo.fr

Reçu le : 13/07/09

Accepté le : 02/11/09

Résumé :

Le béton est largement utilisé comme matériau de structure dans les ouvrages de génie civil 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 subi un choc thermique dans l'eau qu'à l'air.

Mots clés : Béton, Feu, Hautes températures, Résistance en compression, Résistance résiduelle.

Abstract:

The use of concrete material in structures of buildings like tunnels is large. These structures can be exposed to high temperatures, it is necessary to evaluate fire safety of them. This work is an experimental research and presents the effects of temperature on the mechanical proprieties of concrete. This concrete is produced from local materials of west Algeria and is classed C55/67. Test samples were subjected to elevated temperatures ranging 200 to 1000°C. After heating some of specimens were tested and then compressive strength was determined, some of them were left in open air and some of them were put in water and residual compressive strength were determined. The results revealed that the compressive strength of concrete decreased as the exposure temperature increased and was more pronounced at 400°C. The effects of high temperature on the residual strength were more pronounced for concrete cooled in water.

Keywords: Concrete, Fire, Elevated temperatures, Compressive strength, Residual compressive strength.

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...) soulignent les risques sérieux

d'endommagement des structures exposées aux hautes températures et la mise en péril de leur stabilité. Les 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 Euro



codes 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 la sévérité de la dégradation du béton, de la reprise de façades jusqu'à la démolition et le remplacement de l'ouvrage. 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 subi 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. CARACTERISATION DES MATERIAUX ENTRANT DANS LA COMPOSITION DU BETON :

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.

2.1. Le ciment:

Le ciment utilisé pour la confection de nos bétons est un CPJ CEM II/A 42,5MPa 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 I.

Tableau 1: Composition minéralogique du ciment selon Bogue.

Phase	Minéraux	Teneur (%)
	C ₃ S	59
	C ₂ S	15
	C ₃ A	9,76
	C ₄ AF	11
	CaO libre	0,5
Régulateur de prise	gypse	5

2.2. Les granulats :

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 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 II.

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

2.3. L'eau et l'adjuvant :

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 (0,12mg/l) et un taux en sulfates faible (115mg/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 ± 0,02 et l'extrait sec 36,4 ± 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 figure1. De cette analyse granulométrique nous tirons les dosages des granulats entrant dans la composition du béton, celle-ci est indiquée au tableau IV.



Tableau II : caractéristiques physiques du sable de carrière de KRISTEL

Paramètres physiques		valeurs
Masse volumique absolue (g/cm^3)		2.64
Masse volumique apparente (g/cm^3)		1.65
Coefficient d'uniformité C_u		10.62
Coefficient de courbure C_c		1.8
Equivalent de sable	Visuel (%)	79
	Piston (%)	70
Module de finesse		2.25
Valeur du bleu méthylène « VB »		1.28
nature		Silico-calcaire

Tableau III : caractéristiques physiques des graviers de carrière de Kristel.

Caractéristiques Physiques	Gravier 3/8	Gravier 8/16
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,7	2,7
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,58	1,62
Absorption (%)	0,89	0,9
Coefficient de Los Angeles (%)	22	24
Coefficient Micro Deval (%)	16	16
Nature	Calcaire	Calcaire

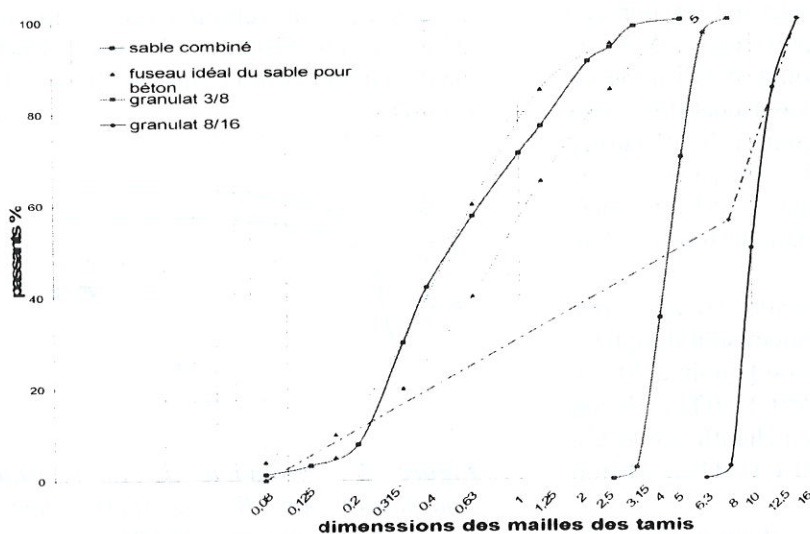


Figure 1 : Courbes granulométriques des granulats

Tableau IV : Formulation du béton

Matériaux de composition du béton	Quantités
Ciment CPJ 42.5 (Kg)	475
Sable Fin (0/1) (Kg)	338
Sable concassé (0/4) (Kg)	225
Gravier (3/8) (Kg)	382
Gravier (8/16) (Kg)	792
Eau (V_{Total} en L)	185
Adjuvant Plastifiant (L)	3
Rapport E/C	0.4

Commentaires :

Le premier commentaire concerne le ciment : le ciment utilisé dans notre étude a un taux assez bon en C_3S et un pourcentage en C_3A acceptable.

Or on sait que ces deux composants influencent favorablement le comportement du béton aux jeunes âges. le C_3S agit principalement sur les résistances aux jeunes âges alors que le C_3A est la phase qui contribue favorablement à la prise de la pâte de ciment. Quant au C_2S , il contribue à développer les résistances à long terme. le ciment utilisé présente un taux assez bon dans cette phase.

Le second commentaire concerne les autres composants du béton à savoir les granulats (graviers et sable corrigé), l'eau de gâchage ainsi que l'adjuvant qui présentent des caractéristiques conformes aux normes pour la confection d'un

béton de bonne qualité.

3. PROTOCOL EXPERIMENTAL :

Deux types d'éprouvettes ont été réalisés selon la norme EN 206-1, des éprouvettes cubiques (100x100x100) mm³ et des éprouvettes cylindriques d'élancement 2 (110mm/220mm) 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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$. 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 leurs masses. 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 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 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 relation suivante : $\frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$. Avec M₁, M₂ les masses des éprouvettes avant et après chauffage respectivement. Cinq séries d'éprouvettes cubiques BC_{tair200}, BC_{tair400}, BC_{tair600}, BC_{tair800} et BC_{tair1000} sont refroidies à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasées (âge 28j). Cinq séries d'éprouvettes cubiques BC_{teau200}, BC_{teau400}, BC_{teau600}, BC_{teau800} et BC_{teau1000} sont immergées dans l'eau (10s) à la sortie du four et

ont subi un refroidissement à l'air pendant 24 heures puis écrasées (âge 28j).

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS :

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.

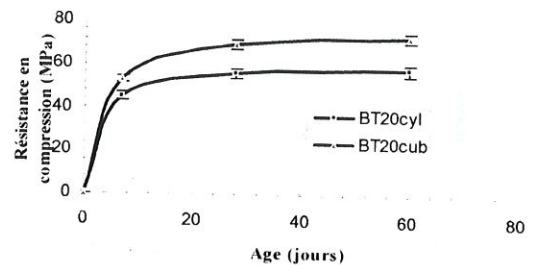


Figure 2 : Evolution de la résistance en compression du BT_{20cub} (béton témoin sur éprouvettes cubiques) et du BT_{20cyl} (béton témoin sur éprouvettes cylindriques)

L'évolution de la résistance à la compression du béton chauffé est représentée en figure 3.

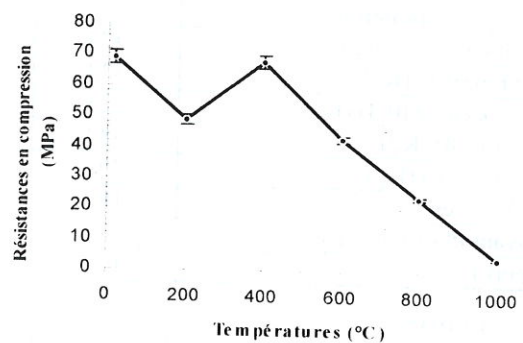


Figure 3 : Résistance à la compression à chaud du béton à 28j en fonction de la température.

On enregistre une diminution de 30% de la résistance à la compression du béton BT_{200} par rapport au béton BT_{20} . Ensuite on observe une augmentation de la résistance à la compression à 400°C du béton BT_{400} avec un pic de contrainte qui avoisine celle du béton BT_{20} . Au-delà du pic de résistance à 400°C, on note une diminution quasi linéairement de la résistance à la compression pour les bétons BT_{600} et BT_{800} jusqu'à une résistance à la compression presque nulle pour le béton BT_{1000} .

Les résistances résiduelles en compression du béton La figure 4 représente chauffé à différentes températures et ayant subi des chocs thermiques à l'air et dans l'eau. Pour le béton BCt_{air} , on observe qu'à 200°C la résistance du béton BCt_{air200} représente 67% de la résistance en compression du béton BT_{20} . 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 BT_{20} .

Pour le béton BCt_{eau} , on enregistre une très faible diminution de la résistance 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 BT_{20} .

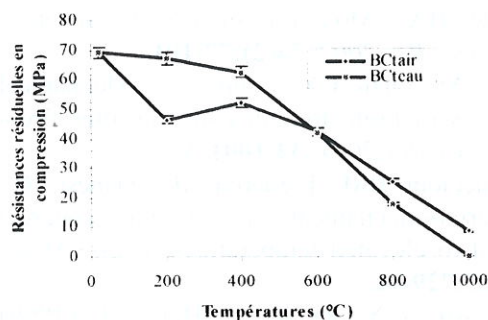


Figure 4 : Résistances résiduelles en compression du béton à 28j en fonction de la température.

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 BT_{20} 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 d'histogramme.

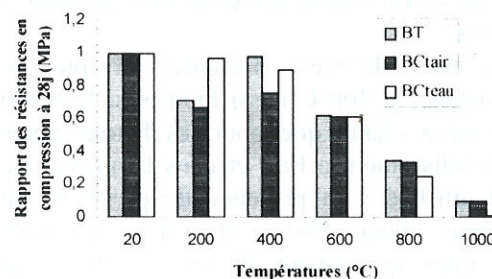


Figure 5 : Evolution des résistances à la compression à 28j des trois bétons en fonction de la température

On remarque qu'à 200°C les résistances du béton BT_{200} 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 inférieure 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 la résistance sont observés pour les trois bétons, le pic de résistance pour le béton BCt_{eau400} avoisine celui du béton BT_{400} alors que celui du béton BCt_{air400} reste largement inférieur à celui du béton BT_{400} . 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 très importante de la résistance à la compression avec une pente plus accentuée pour le béton BCt_{eau} . Les éprouvettes de béton BT_{600} , BCt_{air600} et BCt_{eau600} chauffées à 600°C sont toutes au même niveau de résistance.



- 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.
 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 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'échappent 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 est totale à 1000°C après refroidissement on compte 72h à l'air et instantanément dans l'eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [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] AïtCin, 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. » Mémoire de Magister de l'ENSE T 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.

Ceci rejoint l'observation de différents chercheurs que probablement à 600°C toute l'eau du béton a disparue et confirmerait le comportement identique des bétons traités différemment. Au delà de 600°C la résistance du béton BC_{eau800} chute plus rapidement que celles du béton BT_{800} et du béton BC_{air800} avec une perte de résistance totale à 1000°.

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

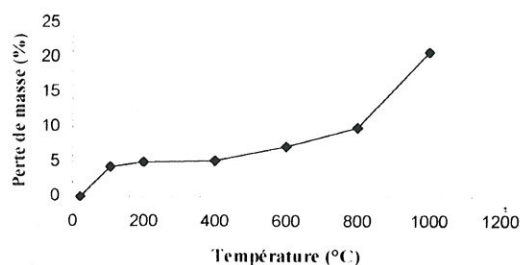


Figure 6: Évolution de la perte de masse du béton (granulats calcaires) en fonction de la température

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, 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, 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. Et 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 et le CO_2 et d'autres gaz qui 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 7 et 8). Les figures 8a, 8b et 8c représentent les surfaces des éprouvettes de béton ayant été chauffées à 1000°C et refroidi 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 instantanément après refroidissement dans l'eau (figure 7b)

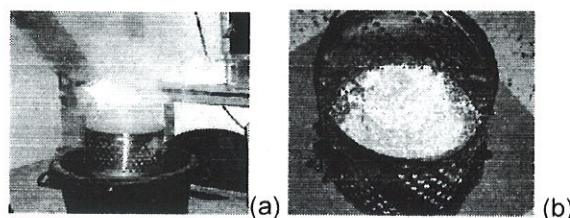


Figure 7: Opération de refroidissement dans l'eau des éprouvettes chauffées (a). Effritement total après le choc thermique dans l'eau de l'éprouvette chauffée à 1000°C (b).

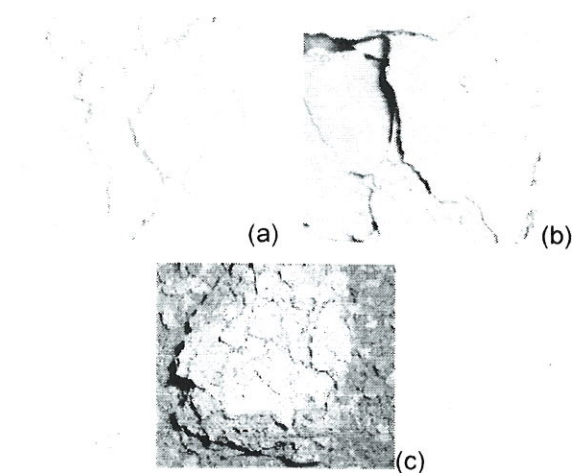


Figure 8: État de surface des éprouvettes chauffées après le choc thermique à l'air, (a) après 24h, (b) après 48h, (c) après 72h.

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