
Comportement résiduel des bétons tunisiens sous l'effet des hautes températures

Maher Chakhari¹, Saber Hassen², Abderrazek Kallel³

1. Département de génie civil, institut supérieur des études technologiques de Nabeul, campus universitaire de Mrezga, 8000, Nabeul, Tunisie
chakkarimaher@gmail.com
2. Département de génie civil, institut supérieur des technologies de l'environnement, de l'urbanisme et des bâtiments, rue de l'Artisanat, 2035, Charguia II, Tunis, Tunisie
hassen.sabeur@univ-mlv.fr
3. Université du Prince Sattam bin Abdulaziz, PSAU, Riadh, Arabie saoudite
abderrazek.kallel@enit.rnu.tn

RÉSUMÉ. La connaissance du comportement du béton « à chaud » et résiduel constitue un enjeu de grand intérêt pour l'évaluation de la sécurité des structures de génie civil. Plusieurs recherches se sont intéressées au comportement du béton à hautes températures mais peu de recherches ont mis l'accent sur le comportement résiduel du béton. Ce dernier a été étudié expérimentalement sur les bétons tunisiens à base de granulats des carrières de Djebel Ressas et de Borj Hfaiedh. Des analyses thermogravimétriques (ATG) et thermique différentielle (ATD) ont permis de déterminer les différents processus physicochimiques se produisant au sein de la pâte de ciment. La vitesse de montée en température est choisie selon les recommandations de la RILEM (0,50°C/min). Cette vitesse a montré la présence d'une cinétique chimique. Quatre paliers de températures (correspondant aux pics de températures obtenus lors des essais ATG/ATD) ont été appliqués, avec trois durées de chauffage différentes (4, 8 et 24 heures), dans le but d'étudier l'effet de ces durées de chauffage sur les propriétés du béton. Ces cycles de chauffage-refroidissement ont servi à l'étude des propriétés mécaniques (résistance résiduelle à la compression) et physiques (perte de masse résiduelle) sur des éprouvettes cylindriques (100 × 300 mm). Les essais de compression ont montré que les différentes propriétés du béton citées ci-dessus diminuent en fonction de la température.

ABSTRACT. Knowledge of the behavior of concrete at high temperature and its residual performance is of great interest for the safety evaluation of civil engineering structures. Several studies have investigated the behavior of concrete at high temperatures but few researches have focused on the residual behavior of concrete. The latter has been studied experimentally on Tunisian concretes formulated with the aggregates of the quarries of Djebel Ressas and Borj Hfaiedh. Thermogravimetric (TGA) and differential thermal (DTA) analyzes allowed the determination of different physicochemical processes occurring within the cement paste. The rate of rise in temperature is chosen according to the RILEM recommendations (0.50°C/min). This rate showed the presence of chemical kinetics. Four temperature steps (corresponding to the temperature peaks obtained during the ATG/ATD tests) were applied, with three different

durations (4, 8 and 24 hours), to study the effect of duration of heating on the properties of the concrete. These heating-cooling cycles allowed the study of mechanical (residual compressive strength) and physical (loss of residual mass) properties on cylindrical specimens (100 × 300 mm). Compression tests have shown that the various properties of the concrete mentioned above decrease as a function of temperature.

MOTS-CLÉS : comportement résiduel, hautes températures, chauffage-refroidissement, résistance résiduelle à la compression, perte de masse résiduelle.

KEYWORDS: residual behavior, high temperatures, heating-cooling, residual compressive strength, loss of residual mass.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00007 © 2017 Lavoisier

Extended abstract

Knowledge of the behavior of concrete at high temperature and its residual performance is of great interest for the safety evaluation of civil engineering structures. Several studies have investigated the behavior of concrete at high temperatures but few researches have focused on the residual behavior of concrete. The latter has been studied experimentally on Tunisian concretes formulated with the aggregates of the quarries of Djebel Ressay and Borj Hfaiedh.

Thermogravimetric (TGA) and differential thermal (DTA) analyzes allowed the determination of the different physicochemical processes occurring within the cement paste. The rate of rise in temperature is chosen according to the RILEM recommendations (0.50 °C/min). This rate showed the presence of chemical kinetics. Four temperature steps (corresponding to the temperature peaks obtained during the ATG/ATD tests) were applied, with three different durations (4, 8 and 24 hours), to study the effect of duration of heating on the properties of the concrete. These heating-cooling cycles allowed the study of mechanical properties (residual compressive strength) and physical (loss of residual mass) on cylindrical specimens (100 × 300 mm).

The heat treatment is carried out for all temperatures representing changes in the state of the material. The mass measurements as well as the compression tests showed that these properties of the concrete (residual compressive strength, loss of residual mass) decrease as a function of the temperature and as a function of the heating step.

1. Introduction

La connaissance du comportement résiduel du béton soumis à de hautes températures constitue un enjeu de grand intérêt pour les applications du génie nucléaire et pour l'évaluation de la sécurité dans des constructions de génie civil. En effet, la récente catastrophe nucléaire au Japon ainsi que les incendies dans les tunnels européens (sous la Manche, Le Mont-Blanc, Great Belt Link, Tauern), ayant entraîné des dommages aux structures en béton ainsi que des pertes humaines et économiques

très importantes, ont suscité un nouvel intérêt pour l'évaluation de la performance du béton dans les conditions accidentelles (Ehrlacher *et al.*, 2005). En effet, quand le béton est soumis à de hautes températures, le chargement thermique imposé conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton. Plusieurs phénomènes sont à noter suite à ce chargement. Parmi lesquels, on cite la modification de la teneur en eau due à l'évaporation de l'eau libre (jusqu'à 105 °C), la déshydratation chimique de la pâte de ciment due à la perte de l'eau liée (au-delà de 105 °C) (Saber, 2011), la dilatation thermique, la contraction provoquée par le changement de phase, la fissuration thermique, le changement de pression des pores (Luccioni *et al.*, 2002), etc.

Ces mécanismes représentent les causes principales de la fissuration, de l'augmentation de la perméabilité et de l'écaillage du béton soumis à des températures élevées. En effet, de nombreux phénomènes physicochimiques développés à l'échelle microscopique se traduisent, à l'échelle macroscopique, par un endommagement progressif du matériau et un risque d'instabilité thermique important. Par conséquent, il s'avère indispensable d'étudier les comportements instantanés et résiduels (après le chauffage) d'un béton soumis à de hautes températures (Baroghel *et al.*, 2002). De ce fait, et afin de mieux comprendre le comportement du béton à hautes températures, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés dans le monde.

Par contre, le comportement du béton à base des matériaux locaux soumis à des conditions accidentelles en températures est un domaine à explorer vu son importance pour un pays en voie de développement.

Pour ce faire, une étude expérimentale est effectuée afin de connaître le comportement résiduel de deux bétons tunisiens à base de granulats des carrières de Djebel Ressay et de Borj Hfaiedh soumis à de hautes températures.

2. Analyse de la microstructure du béton par ATG/ATD

La dégradation des pâtes de ciment exposées à de hautes températures est étudiée à l'aide de plusieurs techniques de mesure, telles que l'analyse aux rayons X, le microscope électronique à balayage (MEB), les essais ATG/ATD.

Ces analyses sont recommandées par plusieurs auteurs pour mesurer la température à laquelle aurait pu être exposé le béton lors d'un incendie (Harmathy, 1968 ; Raina *et al.*, 1978 ; Handoo *et al.*, 1997). Afin de poursuivre l'étude des effets de la température sur la microstructure du béton, deux analyses (ATG et ATD) ont été effectuées dans les laboratoires de l'IFSTTAR. Ces analyses ont été effectuées sur des échantillons en pâte de ciment Portland de type CEM I 42.5 conforme à la norme NT47.01 avec une vitesse de chauffage égale à 0,50 °C/min. Les résultats de ces analyses sont présentés sur la figure 1.

Les essais d'ATG sont réalisés simultanément que l'essai d'ATD à l'aide d'un appareil NETZSCH STA 409. Les courbes d'ATG/ATD obtenues sont exprimées en fonction de la température. Elles ont permis de repérer les différentes réactions qui sont produites dans la pâte de ciment durant son chauffage.

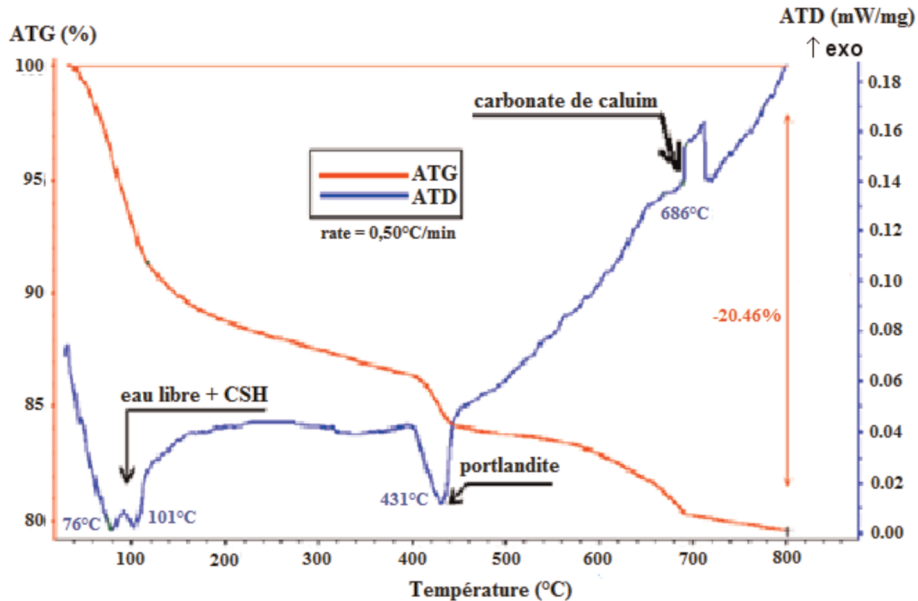


Figure 1. Courbes ATG/ATD de la pâte de ciment chauffée à 0,50 °C/min

L'échantillon a subi, pendant le cycle de traitement thermique, une perte de masse égale à 20,46 % de sa masse totale. La figure 1 permet de tirer les constatations suivantes :

- le départ de l'eau libre et la déshydratation progressive du gel de C-S-H. Ceci est considéré comme une première grande perte de masse produite entre 76 °C et 101 °C. À cette dernière température, l'échantillon perd 7,15 % de sa masse par rapport à une perte totale de 20,46 % ;
- la décomposition de la portlandite est considérée comme une deuxième grande perte de masse. L'eau de la portlandite est évacuée à 431 °C. La perte à cette température est environ 15 % de la masse totale de l'échantillon ;
- la décomposition du carbonate de calcium tout en libérant du gaz carbonique CO₂ et le poursuit de la déshydratation du gel de C-S-H avec une deuxième phase d'évacuation de l'eau chimiquement liée entre 686 °C et 712 °C. La perte de masse à cette phase est de l'ordre de 20,46 % de la masse totale de l'échantillon.

Lorsque l'élévation de la température de chauffage est rapide, l'équilibre chimique de la pâte de ciment ne peut pas s'établir (Baroghel *et al.*, 2002). Ceci est montré par l'analyse effectuée sur le même échantillon avec une vitesse de chauffage égale à 10 °C/min. La figure 2 montre que les pics de température liés à ces phases varient en fonction de la vitesse de montée en température.

La perte de masse totale à cette vitesse est de l'ordre de 21,74 % de la masse totale de l'échantillon. Le décalage créé entre la valeur de la perte de masse à l'équilibre et celle mesurée à une température « T » indique l'existence d'une cinétique chimique.

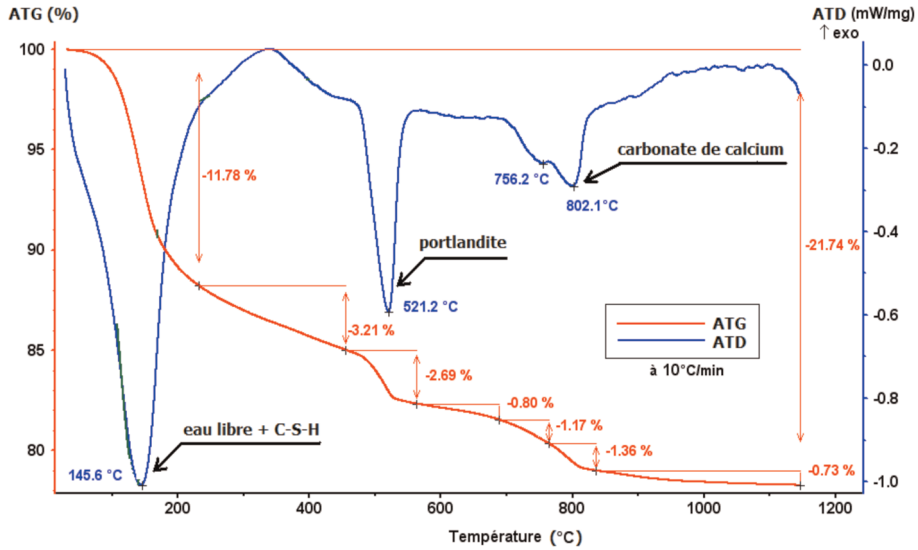


Figure 2. Courbes ATG/ATD de la pâte de ciment chauffée à 10°C/min

3. Étude expérimentale

3.1. Matériaux utilisés : composition et dimensions

Les matériaux étudiés sont des bétons fins à base de ciment Portland de type CEM I 42.50 conforme à la norme NT47.01 et des fractions de sable différentes :

- béton 1 : sable de concassage (0/5) provenant de la carrière de Djebel Ressas ;
- béton 2 : sable siliceux grossier (0/4) provenant de la carrière de Borj Hfaiedh.

La composition des échantillons des deux bétons hydrauliques est récapitulée dans le tableau 1.

Différentes tailles ainsi que différents élancements ont été testés par essai de compression en machine. Les résultats de ces essais ont permis l'utilisation des éprouvettes cylindriques (100 × 300 mm). Les éprouvettes sont conservées dans l'eau du moment de démoulage jusqu'à la date d'essais (90 jours) et conditionnées en laboratoire à une température voisine de 20 °C.

3.2. Traitement thermique

Les éprouvettes sont chauffées dans les étuves et les fours (figure 3) des laboratoires de génie civil (LGC) et de génie mécanique (LGM) de l'École nationale d'ingénieurs de Tunis, ainsi que les fours de l'institut supérieur des beaux-arts de Tunis (ISBAT).

Les échantillons sont traités thermiquement à la vitesse de 0,50 °C/min, recommandée par la RILEM (RILEM TC 129-MHT, 1997, 1998, 2000). Cette vitesse

Tableau 1. Composition des deux bétons

Composants	Dosage (kg/m ³)
<i>Béton 1</i>	
Sable de Djebel Ressas (0/5)	1 790
Ciment CEM I 42,5	450
Eau	225
<i>Béton 2</i>	
Sable de Borj Hfaiedh (0/4)	1 800
Ciment CEM I 42,5	450
Eau	225



Figure 3. Four utilisé pour le chauffage des éprouvettes : chambres de chauffage du four ELTI 1000 °C (à gauche)/tableau de commande du four (à droite)

de chauffage est utilisée pour les différentes températures dont leurs pics sont déterminés à partir des analyses ATD/ATG (tableau 2). Le chauffage est effectué à trois paliers différents (4, 8 et 24 heures) pour chaque température.

Les éprouvettes, après leur chauffage durant un palier défini, sont laissées dans les fours durant 24 heures afin de subir un refroidissement naturel jusqu'à la température ambiante. Après leur refroidissement, les éprouvettes sont emballées, comme montré sur la figure 4, pour éviter leur contact avec l'air humide.

Tableau 2. Pics de températures liés à la vitesse de chauffage 0,50 °C/min

Vitesse de chauffage	0,50 °C/min			
Température (°C)	76	101	431	686



Figure 4. Conservation en laboratoire des éprouvettes thermiquement traitées

4. Résultats et discussions

4.1. Perte de masse résiduelle

De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent différentes manipulations et divers phénomènes qui se produisent lors de la prise et durant le gain de résistance. Pour rendre compte de l'effet de ces différents phénomènes, les éprouvettes sont pesées aux différents moments de la campagne expérimentale : à l'issue du coulage pour calculer la masse volumique réelle, puis au démoulage, avant la réalisation du traitement thermique et, pour finir, après le refroidissement à la sortie du four. Ces mesures ont permis de constater qu'il y a une perte de masse du béton testé. Cela est également mis en corrélation avec les éventuels écaillages et éclatements constatés lors des cycles de chauffage-refroidissement.

La perte de masse dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la vitesse de chauffage du béton et les dimensions des éprouvettes testées. Les résultats des mesures réalisées sur les éprouvettes des deux bétons sont présentés dans le tableau 3.

Le tableau 3 présente les résultats de la perte de masse résiduelle aux différents moments de l'essai sur les éprouvettes des deux matériaux chauffés aux températures indiquées avec la vitesse de 0,50 °C/min. Le chauffage est réalisé durant trois paliers différents (4, 8 et 24 heures). On constate, à partir des résultats, que la perte de masse résiduelle augmente lorsque la température augmente. Ainsi, cette perte devient plus importante lorsque le palier de chauffage augmente pour arriver à 10,70 % (à 686 °C pour le palier de 24 heures) pour le béton 1 (à base de sable de concassage) et à 11,00 % pour le béton 2 (à base de sable siliceux).

Tableau 3. Perte de masse résiduelle aux trois paliers de chauffage pour les deux matériaux

Vitesse	0,50 °C/min			
Température (°C)	76	101	431	686
<i>Béton 1 – Perte de masse résiduelle (%)</i>				
4 heures	2,70	4,00	5,10	5,60
8 heures	3,15	6,10	7,40	8,30
24 heures	4,90	7,80	9,90	10,70
<i>Béton 2 – Perte de masse résiduelle (%)</i>				
4 heures	2,80	4,10	5,40	5,85
8 heures	3,25	6,35	7,70	8,60
24 heures	4,95	8,00	10,15	11,00

En comparant les résultats pour les deux matériaux, on peut voir clairement que la perte de masse résiduelle dans le béton à base de sable siliceux (Borj Hfaiedh) est légèrement supérieure à celle dans le béton à base de sable de concassage (Djebel Rerras) pour tous les paliers de chauffage et toutes les températures. Ceci est en relation avec le taux d'absorption d'eau du sable de la carrière de Borj Hfaiedh qui est supérieur à celui du sable de la carrière de Djebel Rerras.

La perte de masse résiduelle obtenue pour les deux matériaux à 101 °C dépasse la moitié de la perte de masse totale obtenue à 686 °C. Ceci est dû au départ de l'eau libre par évaporation avec la vitesse faible de 0,50 °C/min. La figure 5 montre que la perte de masse résiduelle commence à se stabiliser à partir de 431 °C. Elle est de l'ordre de 9,90 % (béton 1) et de 10,15 % (béton 2). Elle a subi une légère augmentation pour arriver à 10,70 % (béton 1) et à 11,00 % (béton 2) pour la température 686 °C. Cette stabilisation de la perte de masse à partir de 431 °C implique la sortie de toutes sortes d'eau existante dans le béton et le commencement de la décomposition de C-S-H.

4.2. Résistance résiduelle à la compression

Après leur fabrication, stockage dans l'eau et traitement thermique, les échantillons sont utilisés pour étudier la variation de la résistance à la compression du béton en fonction de la température. Cette variation est déterminée à l'aide de l'essai de

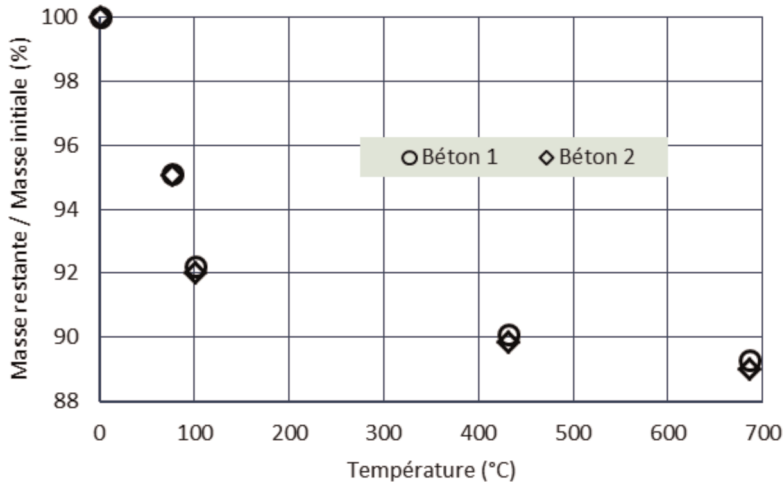


Figure 5. Variation de la perte de masse résiduelle maximale pour les deux bétons

compression à la machine (force-déplacement). Tout d'abord, des échantillons de référence ont été testés à la température ambiante ($\approx 20^\circ\text{C}$) dont la résistance maximale moyenne à la compression est égale à 41,97 MPa pour le béton 1 et à 40,52 MPa pour le béton 2.

La résistance résiduelle à la compression est déterminée pour toutes les températures avec les différents paliers de chauffage à la vitesse $0,50^\circ\text{C}/\text{min}$ comme le montre le tableau 4. Les résultats indiqués sont les moyennes arithmétiques des valeurs de trois éprouvettes testées pour chaque essai.

D'après le tableau 4, cette résistance résiduelle à la compression diminue en fonction de la température pour les deux bétons. La diminution de la résistance résiduelle à la compression pour le béton à base de sable siliceux (béton 2) est supérieure à celle pour le béton à base de sable de concassage (béton 1) pour toutes les températures et tous les paliers de chauffage.

Cette diminution devient importante lorsque la température dépasse 431°C . À cette température, la figure 6 montre que la valeur de la résistance maximale résiduelle à la compression diminue pour atteindre 17,06 MPa (béton 1) et 16,85 MPa (béton 2) après 24 heures de chauffage. Elle est inférieure à la moitié de la résistance de référence pour le béton 1 (41,97 MPa) et pour le béton 2 (40,52 MPa). C'est le résultat de la décomposition de la portlandite à cette température comme il est indiqué sur la figure 1. Ce phénomène est suivi par la décomposition du carbonate de calcium qui affaiblit encore la résistance résiduelle à la compression pour devenir très faible (12,32 MPa pour le béton 1 et 11,95 MPa pour le béton 2) après 24 heures de chauffage à 686°C .

Tableau 4. Résistance résiduelle maximale à la compression aux trois paliers de chauffage pour les deux matériaux

Température (°C)	Résistance résiduelle maximale à la compression (MPa)		
	4 heures	8 heures	24 heures
<i>Béton 1</i>			
76	36,95	33,50	30,57
101	35,64	31,27	26,54
431	26,92	21,98	17,06
686	19,93	16,70	12,32
<i>Béton 2</i>			
76	37,05	34,05	30,90
101	35,70	31,40	26,68
431	26,30	21,43	16,85
686	19,40	16,25	11,95

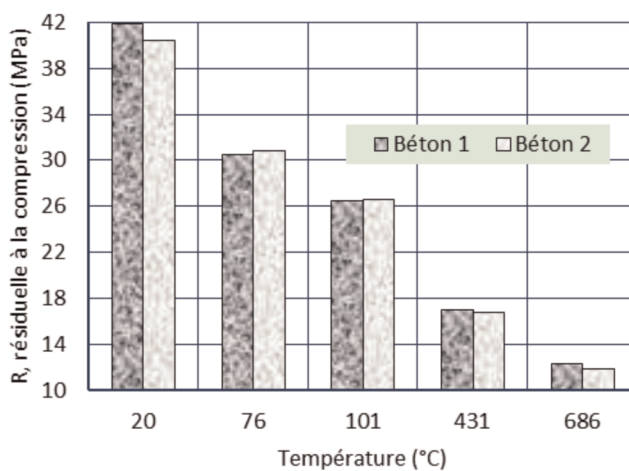


Figure 6. Variation de la résistance résiduelle maximale à la compression pour les deux bétons



Figure 7. Éprouvettes écaillées avant l'essai d'écrasement à la machine

5. Conclusion

Ce travail expérimental a permis l'étude du comportement résiduel des bétons à base des matériaux locaux quand ils sont soumis à de hautes températures. Ceci a confirmé la diminution de la résistance résiduelle à la compression pour deux bétons de formulations différentes. Cette diminution est due :

- dans la partie chauffage : à la déshydratation des C-S-H, à la décomposition de la portlandite et à l'endommagement par la fissuration à cause de la différence de la dilatation thermique entre la pâte de ciment et les granulats (Saber, 2006) ;
- dans la partie refroidissement : à la formation d'une nouvelle portlandite formée à partir de la chaux CaO (un produit de la déshydratation) avec l'eau présente dans l'environnement selon la réaction suivante (Saber *et al.*, 2008 ; Saber, 2011) :



La nouvelle portlandite ainsi formée est accompagnée par une expansion en volume induisant ainsi une fissuration supplémentaire qui entraîne une diminution des valeurs de la résistance en compression. Cet endommagement a continué à se produire durant la phase refroidissement des échantillons. Des macro-fissures sont observées dans les éprouvettes après leur traitement thermique à 686 °C et durant leur conservation dans des sacs en plastique avant l'essai de compression à la machine. La figure 7 montre l'écaillage d'une éprouvette chauffée à 686 °C pour un palier de 4 heures.

L'accent est mis sur ce phénomène par Ehlacher *et al.* (2005). Ils ont démontré que le second pic correspondant à la déshydroxylation de la portlandite ne disparaît pas totalement, ce qui est dû à la cristallisation de la partie amorphe de la portlandite.

Bibliographie

- Baroghel V., *et al.* (2002). From chemical and microstructural evolution of cement pastes to the development of autogenous deformations. *ACI's Fall Convention*, Phoenix Arizona, USA.
- Ehlacher A., Ruiza L.A., Platret G., Massieu E. (2005). The use of thermal analysis assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, p. 609-613.

- Handoo S.K., Agarwal S., Agarwal S.K., Ahluwalia S.C. (1997). Effect of temperature on the physico-chemical characteristics of hardened concrete. In: Justnes H. ed. *10th International Congress of Chemistry of Cement*, Gothenburg, Sweden, June 2-6 4IV 067, 1997, 4.
- Harmathy T.Z. (1968). Determining the temperature history of concrete constructions following fire exposure. *ACI J.*, vol. 65, n° 11, p. 959-964.
- Luccioni B.M., *et al.* (2002). Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Eng. Struct.*, vol. 25, p. 729-742.
- Raina S.J., Vishwanathan V.N., Ghosh S.N. (1978). Instrumental techniques for investigation of damaged concrete. *Indian Concr. J.*, vol. 52, p. 147-149.
- RILEM TC 129-MHT (1997). Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Recommendations: part 6: thermal strain. *Mater. Struct.*, Supplement March, p. 17-21.
- RILEM TC 129-MHT (1998). Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Recommendations: part 7: transient creep for service and accident conditions. *Mater. Struct.*, vol. 31, p. 290-295.
- RILEM TC 129-MHT (2000). Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Recommendations: part 8: steady-state creep and creep recovery. *Mater. Struct.*, vol. 31, n° 225.
- Saber H. (2006). *Nouvelle approche thermo-hygro-mécanique couplée pour la modélisation du fluage thermique transitoire*. Thèse de doctorat, École des Ponts et Chaussées de Paris et à l'Institut francilien des sciences appliquées.
- Saber H., Meftah F., Colina H., Platret G. (2008). Correlation between transient creep of concrete and its dehydration. *Mag. Concr. Res.*, vol. 60, n° 3, p. 157-163.
- Saber H. (2011). On the modeling of the dehydration induced transient creep of concrete at high temperatures. *Mater. Struct.*, vol. 44, p. 1609-1627.