

Heat treatment of concrete and its influence on the mechanical properties

Traitement thermique du béton et son influence sur ses propriétés mécaniques

Sana Elkacemi¹, Latifa Abahlous¹, Said Ait amar², Larbi Boukbir¹ et Noureddine El alem¹

¹Laboratoire Matériaux et Environnement (LME), Université Ibn Zohr, Faculté des Sciences, Département de Chimie, cité ADAKHLA B.P 8106, Agadir, Maroc

²Laboratoire Conseil Ingénierie Sud (LCIS), Tassila – Agadir

Abstract. Concrete is used globally for all types of construction. This is mainly due to a market economy that has grown strongly in recent years and the particularities of its own. Despite its good performance at room temperature, concrete can have a critical behavior at high temperature. Analysis of the effects of high temperatures on the microstructure is necessary to understand the complex macroscopic phenomena step because the concrete undergoes physicochemical changes that strongly influence its thermomechanical behavior. Indeed, the strength of concrete can be greatly reduced by damage due to the rise in temperature as it entails the destruction of the constituent hydrates the cement paste by degradation of its mechanical properties such as stiffness, strength ...
The objective of our work is to study by thermogravimetric and differential thermal analysis (TGA / DTA) and the heated unheated concrete to follow the evolution of solid phases present in the latter when exposed to high temperatures.

Résumé. Le béton est utilisé à l'échelle mondiale pour tous types de construction. Cela est dû notamment à un marché économique qui s'est fortement développé ces dernières années et à des particularités qui lui sont propres.
Malgré ses bonnes performances à température ambiante, le béton peut présenter un comportement critique à haute température. L'analyse des effets des hautes températures sur sa microstructure est une étape nécessaire à la compréhension des phénomènes macroscopiques complexes, car le béton subit des modifications physicochimiques qui influencent fortement son comportement thermomécanique. En effet, la résistance du béton peut être largement diminuée par des dégradations dues à l'élévation de la température puisqu'elle entraîne une destruction des hydrates constitutifs de la pâte de ciment par dégradation de ses propriétés mécaniques : rigidité, résistance...
L'objectif de notre travail est d'étudier par analyses thermogravimétriques et thermo-différentielles (ATG/ATD) le béton chauffé et non chauffé afin de suivre l'évolution des phases solides présentes dans ce dernier lorsqu'il est exposé à des températures élevées.

1 Introduction

Les qualités du béton sont bien connues. C'est un matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il peut répondre à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie. Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque

réalisation, par ses performances et par son aspect. Pour faciliter l'utilisation du béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais et d'autre part, à l'état durci dont ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années. Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores engendrent

des effets importants sur la résistance de béton à haute température [1-4].

2 Techniques et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Le traitement thermique du béton à haute température cause d'importants dommages sur les bétons qui conduisent à une modification de ses propriétés. Les mécanismes de dégradation du béton à haute température ne sont pas encore bien compris. Les modifications subies simultanément par la matrice cimentaire et les granulats engendrent une forte dégradation de la microstructure du béton. Outre les effets directs de modifications de ces deux composants élémentaires, les incompatibilités de comportement de ceux-ci engendrent des dégradations au matériau béton.

2.2 Analyse thermogravimétrique et l'analyse thermique différentielle

Pour le Diagnostic du béton et afin de suivre l'évolution des phases solides caractéristiques du béton au cours de l'échauffement une analyse thermogravimétrique (ATG) et thermo-différentielle (ATD) met en avant les transformations physico-chimiques qui se produisent suite à l'élévation de la température. Ces modifications sont représentées par des pics sur les thermogrammes. Ces essais aident à analyser les différentes étapes et les modifications qui se produisent au sein du béton.

2.2.1 Principe de traitement

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de mesurer en fonction du temps ou de la température, les variations de masse d'un échantillon soumis à un programme de température déterminé. Ces variations peuvent se produire en raison de processus physiques ou chimiques variés comme la déshydratation, la décarbonatation, la décomposition... Ces transformations ont lieu dans des domaines de température spécifiques aux composés analysés [5]. L'analyse thermique différentielle ATD permet de mesurer en fonction du temps ou de la température, la différence de température entre un échantillon et une référence, provoquée par toutes modifications physiques ou chimiques de l'échantillon lorsqu'ils sont soumis à une même loi de variation de température.

2.2.2 Appareillage

Dans le cadre de cette étude, l'appareil utilisé pour les analyses est de type Shimadzu DTG-60, il se compose d'une enceinte étanche qui permet le contrôle de l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de gérer la température, d'un module de pesée

(microbalance), deux thermocouples pour mesurer la température et d'un ordinateur qui contrôle et enregistre l'ensemble des données.

2.3 Matériaux et méthodologies d'essais

Les bétons soumis aux essais dans la présente étude sont des bétons ordinaires. Les constituants de ces bétons sont des produits locaux de la région d'Agadir et de la région de Tiznit. La confection du béton a été réalisée au sein des chantiers étudiés. Les essais de résistance ont été faits suivant la norme marocaine et la norme française.

2.3.1 Programme expérimental

Ce programme correspond aux observations de la microstructure des bétons.

- Une éprouvette est testée pour l'observation de la microstructure par l'ATG/ATD ;
- La même éprouvette est testée pour l'étude de l'effet de la vitesse de chauffage et de la granulométrie sur le comportement thermique du béton ;
- Une éprouvette est testée pour l'observation de la microstructure des échantillons chauffés à 300°C, 600°C et 900°C ;
- Trois éprouvettes de différentes résistances sont testées pour étudier le comportement des bétons de différentes résistances sous l'effet d'un traitement thermique.

2.3.2 Description des matériaux de base

Les granulats utilisés dans cette recherche sont produits localement dans la ville d'Agadir à Oued Souss et dans la ville de Tiznit. Ce sont des matériaux calcaires concassés rugueux et propres dont leurs classes granulaires utilisées pour la confection des bétons sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Les dimensions des granulats utilisés

Granulats	Les classes
Sables	0/5
Gravillons	5/12,5 ou 5/15 ou 5/20 ou mélange de deux classes

Le ciment Portland utilisé est CPJ 45/55 ou CPA 45/55, produit localement par CIMAR à la cimenterie d'Agadir, leur dosage est 300 Kg/m³ ou 350 Kg/m³ selon la classe du béton étudié (B3 ou B2).

2.3.3 Analyse thermique

Les échantillons de béton à analyser sont fragmentés et broyés au mortier de façon à obtenir une granulométrie inférieure à 2 mm. Ils sont ensuite tamisés à 80 µm et 50µm. Enfin, l'échantillon est introduit dans un creuset en aluminium placé sur une canne d'analyse thermodifférentielle reliée à une microbalance. Un autre creuset, également en aluminium mais vide, constitue la référence. La masse des échantillons

analysés s'élève à quelques dizaines de milligrammes, La mesure de flux de chaleur entrant et sortant de l'échantillon permet de déterminer les plages de températures où ont lieu les changements de phases [6].

3 Résultats et discussions

3. 1 Les résultats de traitement thermique du béton

3. 1. 1 Analyse thermique d'un béton non chauffé

Le béton, soumis au traitement thermique, subit des modifications de ses propriétés physico-chimiques, la figure 1 montre la courbe des signaux ATD du béton, sur laquelle, on remarque quatre pics endothermiques qui sont traduits par l'ATG par la présence de quatre phénomènes.

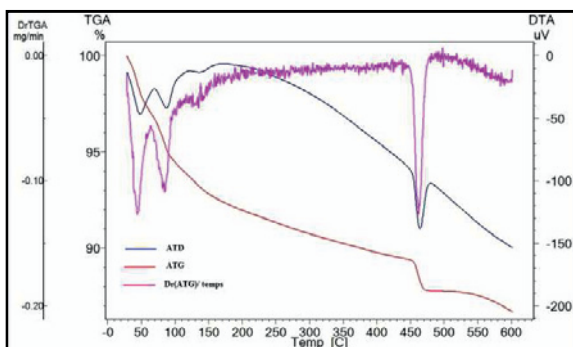
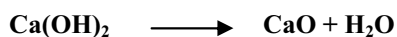


Fig. 1. Traitement thermique du béton de l'ambiante à 600 °C sous air à 10°C/mn d'un béton non chauffé

Les pics de flux thermique sont essentiellement liés aux températures de changement de phase des différents hydrates de la pâte de ciment puisque la majorité des granulats calcaires est généralement stable jusqu'à 700°C. Les deux premiers pics observés sur la courbe se coïncident les températures de 30°C et 70°C. Ces pics endothermiques indiquent principalement le départ de l'eau de constituants de certains hydrates les CSH et l'ettringite [7]. Alors la dégradation de l'ettringite et de gel CSH est associée à ces deux pics car l'eau chimiquement liée commence à s'évaporer du béton dans cette gamme de température. La déshydratation de l'ettringite est confirmée avant 90°C par Castellotea et al. [3]. Juxtaposé, un petit pic endothermique est observé. Ce pic à la température de 125°C indique la déshydratation des monocarboaluminate de calcium hydraté $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ [8]. Un pic endothermique important apparaît à la température de 455°C, il indique la décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction [6,9].



Notons ici, que la portlandite est un composé important dans une pâte du ciment. Elle est issue de

l'hydratation des minéraux principaux dans le ciment : C2S et C3S. Plusieurs chercheurs comme Noumowé [2], etc., ont fixé un intervalle de la température de la dégradation de la portlandite entre 450°C et 550°C. La décomposition de CSH et de la portlandite traduit, donc, la dégradation de la résistance à la compression du béton lorsqu'il est exposé à une température qui dépasse les 400°C. On conclut donc que la perte de masse est essentiellement due à la déshydratation des hydrates de la pâte de ciment, les CSH, l'ettringite, monocarboaluminate de calcium hydraté et la portlandite. Cette perte présente environ 12% de la masse initiale de l'échantillon. Plusieurs auteurs, parmi eux H. Fares [6], A. Noumowé [2] et T. Belkacem [10] ont montré l'effet de températures supérieures à 600°C sur le comportement du béton. Ils ont montré que à une température comprise entre 600-700°C, les CSH se décomposent et se transforment en une nouvelle forme de silicates bicalciques ($\beta-C_2S$) et entre les températures 700-900°C, il ya la décomposition des granulats et des fillers calcaires. Celle-ci est accompagnée d'une libération de CO_2 .

3. 1. 2 Effet de la vitesse de chauffage et de la granulométrie sur le comportement du béton

Les figures 2 et 3 présentent les courbes ATD et ATG des bétons à deux vitesses et à deux granulométries différentes, elles montrent la présence des mêmes pics endothermiques.

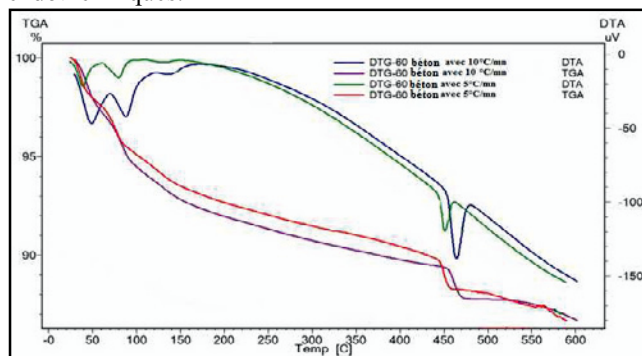


Fig. 2. Traitement thermique du béton de l'ambiante à 600°C sous air à deux vitesses différentes 10 et 5°C/mn

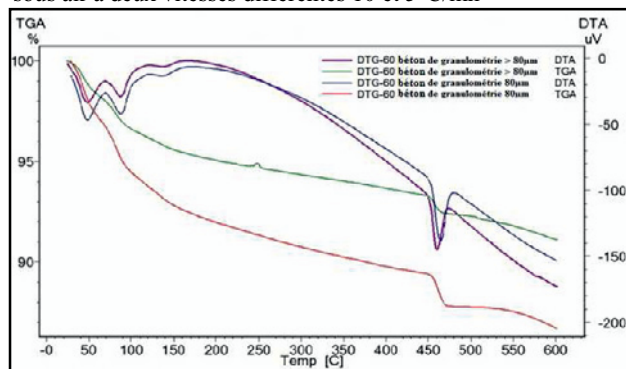


Fig. 3. Traitement thermique du béton de l'ambiante à 600°C avec 10°C/mn à deux granulométries différentes (80 µm et >80µm)

Dans la figure 2 et avec l'existence des mêmes phénomènes on constate qu'avec la baisse de la vitesse les températures des phénomènes tendent vers de faibles températures. Ainsi, les pertes de masse totale sont approximativement 12% pour les deux vitesses, donc une vitesse lente permet aux transformations chimiques (notamment la déshydratation) de se poursuivre. Khoury [11] a étudié l'effet de vitesse de montée en température, il a montré que la vitesse de montée est un paramètre influent. En effet, La vapeur de l'eau libre et capillaire n'arrive pas à s'échapper lorsque cette vitesse est élevée. La figure 3 montre une différence entre les pertes de masse de deux échantillons 12% pour l'échantillon de granulométrie de 80 μm (existence des grains très fines) et 8% pour l'échantillon de granulométrie supérieur à 80 μm (existence des gros grains). La courbe ATD de diverses poudres montre une légère tendance à la diminution de la température avec l'augmentation de la taille des grains. Donc on constate que la granulométrie a un effet remarquable sur la perte de masse des échantillons traités thermiquement.

3. 1. 3 Etude comparative du comportement thermique du béton traité à différentes températures

Les figures 4 et 5 présentent les courbes ATD et ATG du béton ayant subi des traitements thermiques.

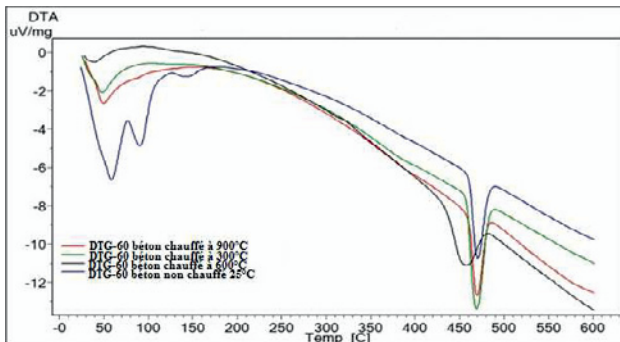


Fig. 4. Analyse thermodifférentielle du béton non chauffé et du béton chauffé à 300°C, 600°C et 900°C

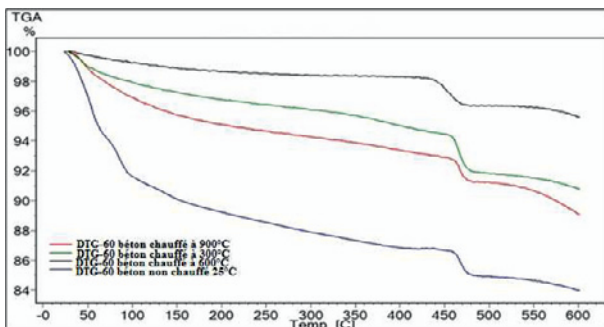


Fig. 5. Analyse thermogravimétrique du béton non chauffé et du béton chauffé à 300°C, 600°C et 900°C

De manière générale et comparativement avec la courbe en bleu qui correspond au béton non chauffé, les pics sont d'intensité réduite voire absents, ce qui correspond à la disparition partielle ou totale de certaines phases au cours des différents traitements thermiques. Les pertes de masses sont variées entre les différentes températures. Dans la figure 4 et après un traitement à 300°C pendant une heure, le pic à 30°C a diminué et le pic à 80°C est presque absent à cause du départ de l'eau libre au début de la première phase de déshydratation des CSH et de l'ettringite. Le pic à 130°C est aussi presque absent dans cette courbe, pour le pic qui correspond la décomposition de portlandite on observe une augmentation de l'intensité du pic. Pour l'échantillon chauffé à la température 600°C, les pics relatifs au départ de l'eau libre, de l'eau liée de l'ettringite et de monocarboaluminate de calcium hydraté ont été éliminés, le pic qui correspond à la déshydratation des CSH est d'une intensité très faible et le pic de déshydroxylation de la portlandite a diminué significativement et se situe à une température à 430°C. Pour l'échantillon chauffé à la température 900°C, le pic de déshydratation des CSH et le pic de décomposition de portlandite augmentent par rapport aux pics observés pour les températures 300°C et 600°C qui peuvent être expliqués par la réaction de CaO libre, présent dans le béton chauffé puis refroidi, avec l'humidité pour donner $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et par une réhumidification provoquant la réhydratation du gel CSH [12]. On peut conclure finalement que l'eau du béton (eau libre et eau liée) est éliminée progressivement en fonction de son énergie de liaison. De même, les hydrates subissent des transformations en fonction de la nature des minéraux constitutifs, ces transformations physico-chimiques, en particulier le départ de l'eau chimiquement liée, se traduisent par une augmentation de la porosité du béton qui est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure des hydrates du ciment lors du processus de déshydratation [21], ce qui entraîne alors un changement des propriétés mécaniques du béton. La figure 5 présente la variation de la masse des échantillons chauffés de 300°C jusqu'à 900°C en les comparant avec un échantillon non chauffé. On constate que les pertes de masse n'évoluent pas en fonction de la température de chauffage de manière successive, puisque la courbe relative au béton chauffé à 900°C se situe entre la courbe de 300°C et 25°C. Ceci est sans doute dû au fait que les hydrates qui ont été partiellement ou totalement déshydratés au cours du chauffage réagissent avec l'humidité présente dans l'air. F. Fares et C. Alonso [4,6] montre la diminution de la perte de masse d'un échantillon chauffé de 20°C jusqu'à 600°C de manière successive. Les pertes de masses relatives aux échantillons chauffés entre 25 et 600°C diminuent : elles passent de 15% pour un béton non chauffé à 3,5% pour un béton ayant subi un traitement thermique à 600°C. Donc on constate que plus la température du chauffage des échantillons est

élevée plus la perte de masse est faible. L'eau échappée des échantillons chauffés est considérée comme faiblement liée, ce qui entraîne un retrait du matériau. En effet les premières fissures apparaissent dans le béton et par la suite la dégradation de ses propriétés telle que la résistance mécanique.

3.2 Etude comparative du comportement thermique des bétons ayant des résistances différentes

Afin de déterminer le comportement des bétons ayant différentes résistances en fonction de la température, l'analyse thermogravimétrique et thermodifférentielle a été effectuée dans les mêmes conditions, une prise d'essai est analysée suivant un chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à 600°C.

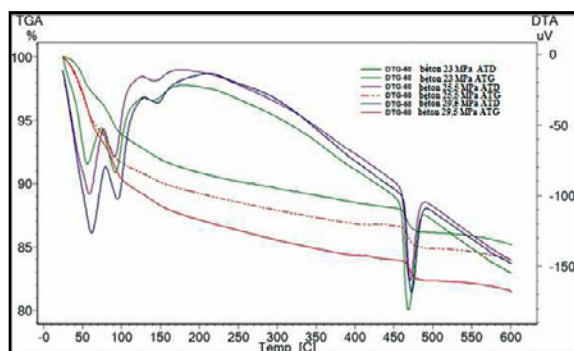


Fig. 6 Analyse thermogravimétrique et thermodifférentielle du béton non chauffé de résistances 23 MPa, 25,5 MPa et 29,5 MPa

La figure 6 montre la présence des mêmes pics endothermiques dans la courbe de l'ATD situés aux mêmes températures. On constate pour la courbe de l'ATG que plus la résistance du béton augmente plus la perte de masse est grande, elle passe de 14% pour un béton ayant une résistance 23 MPa à 17,5% pour un béton ayant une résistance 29,5 MPa.

4 Conclusion

Les résultats obtenus et les constatations observées nous conduisent à tirer les conclusions suivantes :

- Lors de l'élévation de la température, les constituants du béton subissent diverses transformations modifiant sa microstructure et ses propriétés mécaniques. L'eau, présente sous diverses formes (eau liée, eau libre, eau adsorbée), s'échappe du béton. L'ettringite disparaît avant la température de 100°C et la portlandite se décompose en formant de la chaux CaO.

- Les transformations physico-chimiques, en particulier le départ de l'eau chimiquement liée, se traduisent par une augmentation considérable de la porosité du béton qui entraîne alors un changement des propriétés mécaniques du matériau.

Références

1. L. Alarcon-Ruiz, G. Platret, E. Massieu, A. Ehrlicher « the use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste », cement and concrete research vol. 35, p. 609-613, 2005.
2. Noumowé N.A. « effet de hautes températures sur le béton, cas particulier du béton à hautes performances » thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
3. M. Castellotea, C. Alonsoa, C. Andradea, X. Turrillasa, J. Campoc « composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction » cement and concrete research, 34, p. 1633-1644. 2004.
4. C. Alonso, L. Fernandez « deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments » journal of materials sciences, vol. 39, p.3015-3024. 2004.
5. G. Schwedt « Analytische chemie : Grundlagen, Methoden und Praxis. Thiemeverlag, Stuttgart » p. 161-177 et 293-345, 1995.
6. H. Fares « propriétés mécaniques et physico-chimiques de béton autoplaçants exposés à une température élevée » thèse de doctorat, université de Gergy-Pontoise, p.156, 2009
7. J.P. Persy et F.X. Deloye « Investigations sur un ouvrage incendié-bulletin des laboratoires des ponts et chaussées » vol.145 : 108-114, 1986.
8. E. Nonnet, N. Lequeux et P. Boch « Elastic properties of high alumina cement castables from room temperature to 1600°C » journal of the european ceramic society, vol.19 : 1575-1583, 1999.
9. A. Noumowe « Température distribution and mechanical properties of high-strength silica fume concrete at temperature up to 200°C » ACI materials journal, vol.100, n°4 : 326-330, 2003.
10. T. Belkacem « étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton » thèse de doctorat, université Mentouri Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur, p.120.
11. G.A. Khoury « Transient thermal creep of nuclear reactors pressure vessel type concretes » tesis submitted to the university of london for the degree of phd. vol. 1: p.1126. 1983.
12. I. Gaweska « comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques » thèse de l'école nationale des ponts et chaussées et de l'école polytechnique de Cracovie, 2004.