
Contraintes développées dans un élément en béton soumis à une température élevée

Prosper Pliya — Marcus Vinicius G. de Morais — Albert Noumowé — Anne-Lise Beaucour — Sophie Ortola

Université de Cergy-Pontoise – L2MGC
5 mail Gay-Lussac Neuville sur Oise
95031 Cergy-Pontoise Cedex
Albert.Noumowe@u-cergy.fr

RÉSUMÉ. Cette étude porte sur le comportement du béton soumis à une température élevée. Elle vise à expliquer les phénomènes d'écaillage et d'éclatement observés sur certaines éprouvettes de béton lors des études expérimentales. Les contraintes mécaniques susceptibles de se développer lors du chauffage d'un élément en béton sont étudiées numériquement à l'aide du code de calcul Cast3M développé au CEA. Les contraintes dues au gradient thermique et à la pression de vapeur d'eau sont issues des calculs thermo-hydriques effectués pour des éprouvettes cylindriques. Les contraintes mécaniques engendrées sont calculées initialement suivant l'hypothèse de l'élasticité linéaire, puis le comportement inélastique est simulé suivant le modèle de plasticité de Drucker-Prager. Ces simulations montrent que, lors du chauffage, le centre de l'éprouvette est sollicité en traction et la surface en compression. Les contraintes engendrées atteignent leur valeur maximale à une température de surface avoisinant 300°C. Les valeurs des contraintes de traction obtenues dépassent alors la résistance à la traction du béton.

ABSTRACT. We study the behaviour of concrete subjected to high temperature. It aims to explain the spalling phenomenon observed when some concrete elements are subjected to high temperature. Mechanical calculations were carried out with the aid of Cast3M developed at the French Atomic Energy Agency, CEA, starting from results obtained by a coupled thermo-hydrous model. Elastic model and plastic Drucker-Prager model were used. The stresses due to heat gradient and water vapour pressure inside the specimens were calculated. Tension stresses in the central part and compression stresses at the surface of the specimen during the heating were observed. The maximum stresses appeared when the temperature at the surface of the specimen was about 300 °C. The numerical tension stresses in the specimen exceeded the concrete tensile strength.

MOTS-CLÉS: béton, température, gradient thermique, calcul thermohydrique, calcul mécanique, contrainte thermique.

KEYWORDS: concrete, temperature, thermal gradient, thermohydric calculation, mechanical calculation, thermal stresses.

1. Introduction

De nos jours, l'utilisation des bétons (bétons ordinaires, bétons à hautes performances, bétons autoplaçants) dans les constructions s'étend. Afin d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité du béton, la tendance est de diminuer sa porosité et sa perméabilité. Dans certaines conditions, on constate un écaillage ou éclatement du béton porté à une température élevée [Noumowé (1995), Anderberg (1997), Bazant (1997)]. A la suite d'autres recherches [Ulm *et al.* (1999), Pesavento (2000), Dal Pont (2003)], ce travail vise à simuler ce comportement à haute température afin de tenter d'en expliquer les mécanismes. Afin d'expliquer l'origine de l'écaillage et de l'éclatement observés sur certaines éprouvettes de béton, nous déterminons les différentes contraintes thermiques susceptibles de se développer au sein d'une éprouvette. Les éprouvettes utilisées, de 16x32 cm, sont soumises à un cycle de chauffage de 1°C/mn de la température ambiante (20°C) jusqu'à 600°C. L'approche consiste à faire un calcul thermo-hydrique puis, à partir des résultats obtenus, de déterminer les contraintes mécaniques. Deux modèles de calculs sont utilisés : l'élasticité linéaire et la plasticité en utilisant le modèle de Drucker-Prager.

2. Description du problème

Au cours d'une exposition à une température élevée, certains éléments en béton éclatent. La compacité des bétons gêne la migration de la vapeur d'eau et de l'humidité. Deux explications sont rapportées de la bibliographie par Msaad (2005) pour expliquer le phénomène d'éclatement :

□ L'écaillage hydraulique par Pression (Hypothèse I) : L'hypothèse I repose sur la présence d'une zone de forte saturation liquide. Le « bouchon hydraulique » provoque l'augmentation des pressions de gaz du côté chaud du front de saturation. Ceci suppose l'existence d'une zone complètement sèche, une zone en phase de séchage, une zone quasi-saturée appelée « bouchon hydraulique » et une zone froide gardant les caractéristiques initiales.

□ L'écaillage par Dilatation Thermique Empêchée (Hypothèse II) : La dilatation thermique causée par le chauffage, lorsqu'elle est empêchée, entraîne des contraintes de compression parallèles à la surface du béton soumise au feu. La déshydratation du béton chauffé engendre une baisse du module d'Young (adoucissement) et une chute de la résistance mécanique (décohésion) en traction et en compression. Ces contraintes peuvent engendrer la rupture par écaillage ou éclatement du béton chauffé.

La démarche que nous adoptons ici combine ces hypothèses I et II.

3. Modèle thermo-hydrique

Le modèle thermo-hydrique est basé sur le couplage des transferts de chaleur et de masse implémenté dans Cast3M par Sercombe et al. (2003). L'évolution de la température T et de la saturation S_l est calculée pour un milieu poreux dont on connaît la géométrie, l'état initial et l'environnement thermo-hydrique extérieur. Le modèle repose sur la théorie des milieux poreux non saturés. En associant, d'une part, l'équation de conservation de l'entropie pour un milieu poreux (rigide) constitué de trois phases (solide, eau liquide et vapeur) en équilibre thermodynamique local aux équations de conservation des masses d'eau liquide et d'eau vapeur, une première équation traduisant la conservation de la chaleur est obtenue. D'autre part, en combinant les équations de conservation de la masse pour l'eau liquide et la vapeur d'eau, l'expression du flux donnée par la loi de Darcy et l'équation de Kelvin, une seconde équation de conservation globale est obtenue. Les propriétés thermodynamiques de l'eau liquide et de la vapeur utilisées dans les simulations thermo-hydriques sont mentionnées dans Morais et al. (2006).

4. Modèle mécanique

4.1. Comportement élastique non linéaire

Considérons un volume élémentaire Ω de milieu poreux dont on notera Ω_s la région occupée par le solide, Ω_l le sous-domaine saturé par un liquide à la pression p_l et Ω_g le sous-domaine saturé par la vapeur d'eau à la pression p_v .

La moyenne \bar{p} des pressions de liquide et de gaz pondérées par les fractions volumiques des phases dans l'espace poreux est :

$$\bar{p} = (1-S)p_v + Sp_l \quad [1]$$

où S est le degré de saturation. Le comportement du milieu poreux (matériau béton) est thermo-poro-élastique isotrope non linéaire.

Une formulation du type Bishop (Coussy,1995) conduit à la loi de comportement macroscopique $\sigma_{ij} = C_{o,ij} : \varepsilon_{ij} - b\bar{p} \delta_{ij} - 3\alpha_o k_o T \delta_{ij}$, où $C_{o,ij}$ est le tenseur de rigidité isotherme drainé, ε_{ij} le tenseur des déformations, b le coefficient de Biot, k_o le module de compressibilité drainé et α_o le coefficient de dilatation thermique. Pour la phase solide, l'équation constitutive s'écrit :

$$\sigma_{s,ij} = C_{s,ij} : \varepsilon_{s,ij} - 3\alpha_s k_s T \delta_{ij} \quad [2]$$

où les mêmes notations ci-dessus ont été adoptées, l'indice s désignant la phase solide. La contrainte moyenne macroscopique s'obtient par un processus d'homogénéisation élémentaire :

$$\sigma_{ij} = (1-\phi)\sigma_{s,ij} - \phi b\bar{p} \delta_{ij} \quad [3]$$

où ϕ est la porosité.

4.2. Modèle thermoplastique Drucker-Prager à deux surfaces

Les principaux aspects que nous souhaitons modéliser pour le comportement des bétons soumis à des hautes températures sont : **(a)** la microfissuration sous compression/traction des zones chaudes, **(b)** la diminution du module d'Young avec la température (endommagement thermique), **(c)** la baisse de la résistance en compression/traction avec la température (décohésion thermique).

Nous avons ainsi choisi de décrire le comportement du béton par un modèle élastoplastique à deux surfaces (critères spécifiques pour la compression, de limite élastique σ_Y , et la traction, de limite élastique σ_T) dont les paramètres varient avec la température.

Le critère en compression est un critère de type Drucker-Prager. Le comportement est élasto-plastique écrouissable jusqu'à ce que la résistance en compression simple soit atteinte. Le critère retenu en traction est un critère de type élasto-plastique parfait. Ce modèle de comportement mécanique à deux surfaces fait donc intervenir cinq paramètres à identifier : f_t , f_c , E_b , σ_y et ϵ_m sont la résistance en traction simple, la résistance en compression simple, le module d'élasticité, la limite d'élasticité et la déformation au pic en compression simple, respectivement.

5. Caractéristiques du béton

Pour modéliser le comportement du béton étudié, nous avons choisi un comportement élastoplastique parfait (pas d'écrouissage) avec $\omega = 1$. L'évolution de la résistance à la compression biaxiale en fonction de la température est supposée suivre : $f_b(T) = 1.6 f_c(T)$ de sorte que nous avons uniquement besoin de déterminer les évolutions $f_t(T)$ et $f_c(T)$.

Résistances caractéristiques					
	20°C	150°C	300°C	450°C	600°C
f_c (MPa)	52.8	48.1	54.3	22.5	7.3
f_t (MPa)	3.9	3.7	3.4	1.3	0.6
E(GPa)	40	35	25	4	0.45

Tableau 1. – Evolution des résistances résiduelles du béton en fonction de la température

Le béton utilisé comporte pour 1 m³, 400 kg de ciment CEM I 52,5, 960 kg de gravier, 89 kg de gravillon, 740 kg de sable, 177 kg d'eau et 1,04 kg de super-plastifiant. Les valeurs de $f_t(T)$, $f_c(T)$ et du module d'Young E obtenues expérimentalement [Kanema et al. (2007)] sont présentées dans le tableau 1.

6. Résultats numériques

6.1. Comportement thermo-hydrrique

Grâce aux propriétés de symétrie de révolution du problème posé dans l'éprouvette, seul un quart de celle-ci (rectangle 8x16 cm) est maillé à l'aide d'éléments finis quadrangulaires axisymétriques (figure 1a).

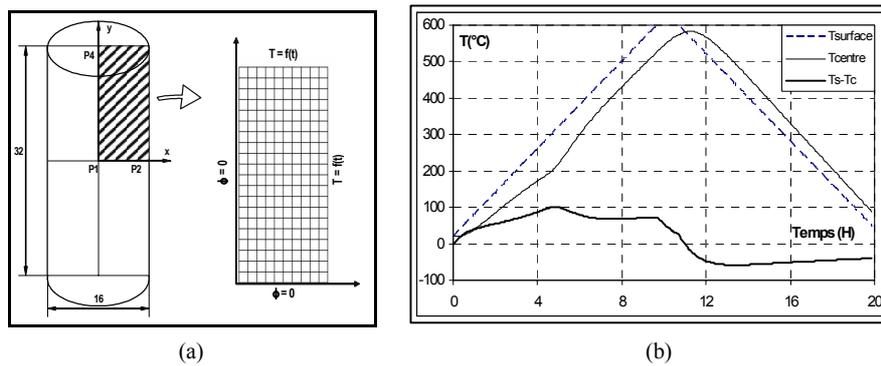


Figure 1. – Maillage de l'éprouvette (a) et évolution des différentes températures en fonction du temps (b)

La figure (1b) montre l'évolution des températures de surface et au centre de l'éprouvette. Le gradient thermique augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale (101°C) à une température de surface voisine de 310°C.

Lors du chauffage, d'importantes pressions de vapeur et de liquide apparaissent dans l'éprouvette. Le pic de pression de vapeur se déplace de la surface jusqu'au centre de l'éprouvette. Ce pic est très élevé autour de 250°C. La chaleur se transmet de la surface jusqu'au centre. L'eau vaporisée migre de la surface au centre de l'éprouvette, où la température est encore faible, et se condense. Elle forme ainsi une zone quasi saturée où la pression devient maximale. L'existence de ces différentes pressions et du gradient thermique peuvent engendrer des contraintes qui peuvent expliquer les éclatements observés sur les éprouvettes.

6.2. Comportement mécanique

Le gradient thermique mis en évidence précédemment induit de fortes contraintes thermiques dans l'éprouvette qui se superposent aux pressions. Ces contraintes, calculées en élasticité non linéaire et en plasticité, sont présentées sur les figures 2a et 2b. Les contraintes axiale (σ_z), radiale (σ_r) et circonférentielle (σ_θ) ont été déterminées lors du chauffage et du refroidissement (les contraintes radiales et circonférentielles sont identiques).

Dans le domaine élastique, ces 3 composantes atteignent au même moment leurs valeurs maximales pour une température voisine de 300°C, température à laquelle le

gradient thermique et les pressions sont maximales. La contrainte axiale est la plus importante, ce qui explique le mode de rupture observé sur les éprouvettes.

Le modèle plastique indique des contraintes pratiquement constantes entre 50 et 300 °C. La contrainte radiale est maximale au centre de l'éprouvette et s'annule en surface. La figure 3 montre l'évolution des contraintes sur un rayon de l'éprouvette à une température de surface de 300°C. On observe un état triaxial de traction au centre et des contraintes de compression en surface de l'éprouvette au cours de la montée en température.

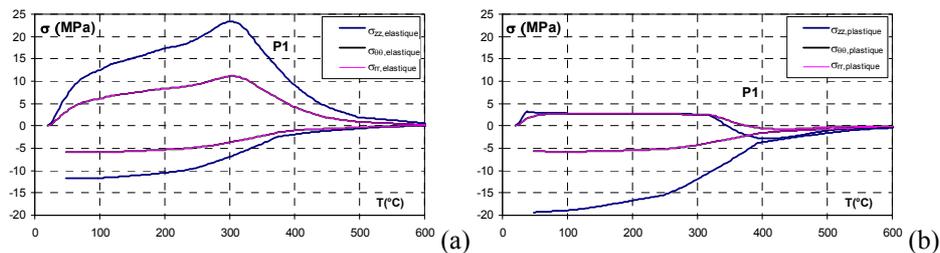


Figure 2. Evolution des contraintes élastiques (a) et plastiques (b)

Une analyse comparative des courbes (élastique et plastique) montre que les valeurs des différentes contraintes obtenues par le modèle élastique sont plus élevées que celles du modèle plastique. De plus, les contraintes élastiques diminuent du centre vers la surface tandis que les contraintes plastiques sont quasiment constantes jusqu'à environ trois centimètres de la surface.

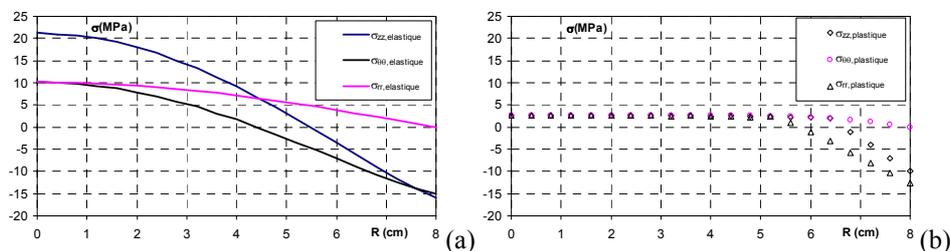


Figure 3. Evolution des contraintes élastiques (a) et plastiques (b) à 300°C

Les valeurs de contraintes de traction obtenues dépassent la résistance à la traction du béton étudié. La figure 4 montre les isovaleurs de contraintes dans le cas d'un calcul plastique.

On observe que la surface de l'éprouvette est comprimée pour un chauffage de 20 à 300 °C, puis se dilate jusqu'à 600 °C. Au moment où la surface est chauffée, elle perd son eau et se contracte. Lors du chauffage, la chaleur se transmet de la surface vers le centre de l'éprouvette. Une partie de l'eau migre vers le centre qui se dilate. Au cours du refroidissement, on observe une augmentation considérable de la déformation de traction à la surface de l'éprouvette tandis que le centre passe en compression. Cette traction en surface explique en partie les microfissures observées sur les éprouvettes refroidies. Les valeurs maximales atteintes par les déformations

(figure 5) indiquent que la résistance du béton peut-être dépassée provoquant la rupture de l'éprouvette.

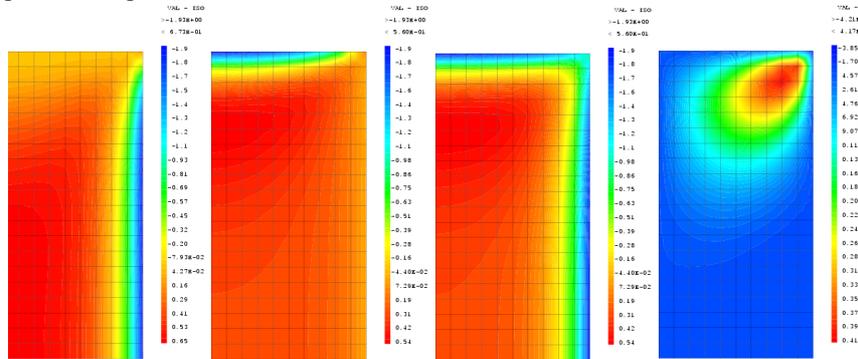


Figure 4. Champs de contraintes (σ_{ZZ} , σ_{RR} , $\sigma_{\theta\theta}$ et τ_{RZ})

Les calculs montrent que lors du chauffage, lorsque la température atteint et dépasse 300°C, une forte pression de vapeur d'eau se développe au centre de l'éprouvette tandis que les contraintes thermiques atteignent aussi des valeurs élevées (figure 3). Cela amène à dire que la conjonction de pression de vapeur d'eau et de contraintes thermiques élevées est à l'origine de l'éclatement de certaines éprouvettes de béton au cours de l'étude expérimentale.

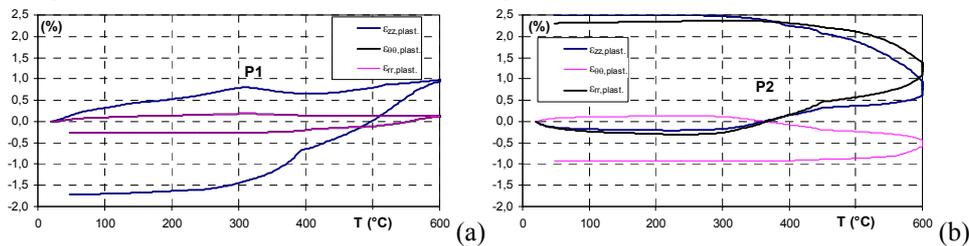


Figure 5. Evolution des déformations au centre (a) et à la surface (b) obtenues avec le modèle plastique

7. Conclusion

La présente étude permet d'approfondir les connaissances sur le comportement du béton soumis à une température élevée. Elle a consisté en l'étude numérique d'éprouvettes soumises à des cycles de chauffage – refroidissement de 1°C/mn de la température ambiante jusqu'à la température de 600°C. Les résultats thermo-hydrauliques ont montré que, lors du chauffage, la pression de vapeur augmente au centre de l'éprouvette. Une partie de l'eau migre de la surface vers le centre en créant un bouchon d'humidité. Les calculs indiquent que la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette engendre de fortes contraintes thermiques qui peuvent atteindre et dépasser la résistance à la traction du

béton. Les contraintes de traction maximales obtenues par calcul apparaissent au centre de l'éprouvette, confirmant ainsi le mode de rupture observé expérimentalement.

8. Bibliographie

- ANDERBERG Y. (1997) Spalling phenomena of HPC and OC, Proc. Int. Workshop on Fire Performance of High-Strength-Concrete, NIST Spec. Publ. 919, L.T. Phan, N.J. Carino, D. Duthinh, and E. Garboczi, eds., National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 69-73.
- BAZANT Z.P. (1997) Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete, Int Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Proc., ed. par L.T. Phan, N.J. Carino, D. Duthin et E. Garboczi, NIST Special publication 919, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- COUSSY (1995) Mechanics of Porous Continua. Wiley, New York
- DAL PONT S. (2003) Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne La Vallée, France
- GAWIN D., PESAVENTO F., SCHREFLER B.A. (2003) Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 192, 1731-1771.
- KANEMA M., MORAIS M.V.G. de, NOUMOWE A., GALLIAS J.L., CABRILLAC R. (2007) Experimental and numerical studies on thermo-hydrous in concrete exposed to high temperature, Heat and Mass Transfers, Ed. Springer.
- NOUMOWE A. (1998) Effet de hautes températures sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de doctorat INSA Lyon.
- RANC G., SERCOMBE J., RODRIGUES S., Comportement à haute température du béton de structure – Impact de la fissuration sur les transferts hydriques, Revue française de génie civil, vol. 7(4), pp.397-424, 2003.
- SERCOMBE J., GALLE C., RANC G., Modélisation du comportement du béton à haute température: Transferts des fluides et de chaleur et déformations pendant les transitoires thermiques, Note Technique SCCME, n°81, CEA Saclay, France, 2001. Cited in the reference Ranc G. et al. (2003).
- MORAIS M. V. G., NOUMOWE A., KANEMA M., GALLIAS J.L., CABRILLAC R., Transferts thermo-hydriques dans un élément en béton exposé à une température élevée: Approches numérique et expérimentale. AUGC, La Grande Motte, Juin 2006.
- ULM F.J., ACKER P., LEVY M. Chunnel fire. II: Analysis of concrete damage, Journal of Engineering Mechanics, 125(3) :283-289, 1999.