
Modélisation numérique de l'écaillage du béton au cours d'un incendie

Hatem Kallel¹, Hélène Carré¹, Md Jihad Miah^{1,2}, Christian La Borderie¹ et Pierre Pimienta²

¹Université de Pau & des Pays de l'Adour, SIAME - IPRA, EA4581, 64600, Anglet, France

²Université Paris Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 77447 Marne-la-Vallée cedex 2, France

Email : hatem.kallel@univ-pau.fr

RÉSUMÉ. L'écaillage des bétons est un phénomène brutal pouvant être préjudiciable pour la stabilité d'une structure pendant et après un incendie. Ce phénomène dépend de la composition du matériau, du chargement thermique mais aussi du changement mécanique appliqué.

Ces dernières années, des études théoriques et expérimentales ont tenté d'examiner les causes possibles de l'écaillage des bétons. En particulier, de nombreuses discussions autour de l'importance relative des mécanismes thermomécaniques et thermohydrauliques ont été menées.

Afin de mieux comprendre l'effet du chargement mécanique sur l'écaillage des essais feu ISO ont été conduits sur des dalles sollicitées en compression biaxiale. Des calculs thermomécaniques (TM), reproduisant le déroulement des essais, ont été effectués avec le code aux éléments finis CAST3M. Le travail réalisé a permis de bien prédire à la fois l'évolution des températures mais aussi des déplacements dans les dalles.

ABSTRACT. Concrete spalling is a sudden phenomenon that can be detrimental to the stability of a structure during and after a fire. This phenomenon depends on the composition of the material, the thermal loading but also the mechanical loading.

In recent years, theoretical and experimental studies have been carried out to examine the possible causes of concrete spalling. In particular, there has been much discussion about the relative importance of thermomechanical and thermohydraulic mechanisms.

In order to better understand the effect of mechanical loading on spalling, ISO fire tests were carried out on slabs subjected to biaxial compression. Thermomechanical (TM) computations, reproducing the test sequence, were performed with the CAST3M finite element code. The work carried out made it possible to predict both the evolution of temperatures and the displacements of the slabs.

MOTS-CLÉS : béton, feu, écaillage, haute température, chargement biaxial, éléments finis, calculs thermo-mécaniques

KEY WORDS: concrete, fire, spalling, high temperature, biaxial loading, finite elements, thermos-mechanical computations

1. Introduction

L'incendie l'une des charges accidentelles les plus sévères qui peut agir sur les structures en béton. Il peut provoquer des endommagements sévères (fissures, écaillage, etc.) ou même mener à la ruine de la structure. L'écaillage est une instabilité se caractérisant par une expulsion brutale des couches superficielles du béton exposé au feu. Il induit une réduction de la section résistante et peut conduire à l'exposition directe des barres d'armature aux flammes avec une réduction accrue de la capacité portante (Khoury et Anderberg [Khou 00] et Kalifa et al. [Kal 00]).

Les résultats de la littérature montrent que l'écaillage est dû d'une part à des phénomènes thermo-hydriques conduisant au développement des pressions de pores [Ham 65] et d'autre part au développement des contraintes thermo-mécaniques dues aux gradients thermiques et aux déformations empêchées [Baz 97]. En fait, à ce jour, le mécanisme d'écaillage est bien compris mais très difficile à prédire. Les différents paramètres influençant l'écaillage sont bien connus. Le chargement mécanique appliqué pendant le chauffage est bien connu et particulièrement important. Son effet est particulièrement important et les contraintes de compression en face chauffée aggravent singulièrement l'écaillage [Mia17].

Afin d'évaluer l'effet de l'écaillage au cours du chauffage de dallages soumises à un feu ISO, des simulations éléments finis ont été menées à l'aide du logiciel CAST3M. Les calculs thermomécaniques ont été effectués pour un béton ordinaire, B40-II. Les résultats sont comparés aux données expérimentales [Mia 17] : profils de température et déplacements.

2. Modélisation numérique

2.1. Maillage et conditions aux limites

Un quart de l'éprouvette a été modélisé soit une dalle de $400 \times 400 \times 100 \text{ mm}^3$ ainsi que les plaques d'acier de $300 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ permettant d'appliquer le chargement. Deux plans de symétrie sont représentés grâce à un déplacement nul sur deux bords du quart de dalle (cf. Figure 1). Un maillage tridimensionnel avec éléments cubiques à 8 nœuds a été réalisé. Le maillage a été raffiné à proximité de la surface chauffée (mailles de 2 mm) en raison des très forts gradients thermiques alors que les mailles à l'opposé de la surface chauffée ont une épaisseur de 10 mm. Cela permet de bien représenter les phénomènes en jeu en optimisant le temps de calcul.

Les conditions aux limites et l'application du chargement sont identiques à celles utilisées lors des expérimentations [Mia 17]. Une charge de compression biaxiale a été appliquée avant le chauffage, puis la charge a été maintenue constante pendant toute la durée de l'essai au feu. Trois niveaux différents de contrainte de compression biaxiale (0, 5 et 10 MPa) ont été étudiés. Le chargement thermique est du type feu ISO 834-1. Un coefficient d'échange égale à 70 a été choisi pour la surface exposée avec la température mesurée dans le four pendant l'essai. Au cours de l'essai, la géométrie de la dalle a été modifiée afin de prendre en compte l'effet de la charge de compression biaxiale sur l'écaillage du béton (figure 1). Une évolution linéaire de la profondeur d'écaillage a été choisie entre le début de l'écaillage (après 4 minutes d'essai pour un chargement de 10 MPa) et la fin de l'essai, après 30 minutes de chauffage.

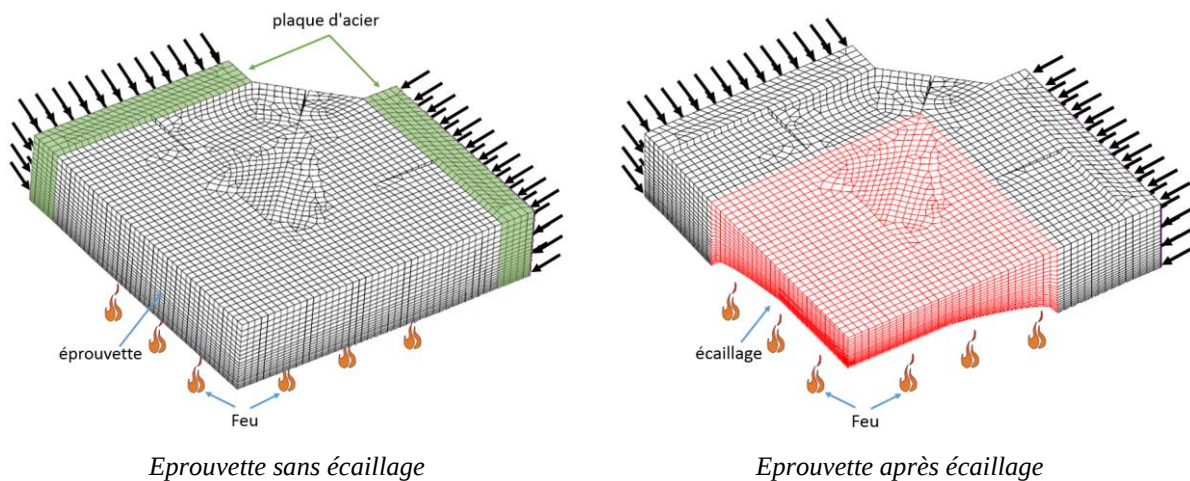


Figure 1. Maillage et condition aux limites de l'éprouvette sans et avec écaillage.

2.2. Propriétés thermique et mécaniques

L'évolution des propriétés thermiques et mécaniques du béton testé (B40-II) avec la température correspond aux mesures réalisées par Mindeguia [Min 09], à celles de l'Eurocode 2 [Eur 05] ou aux mesures réalisées dans le cadre de cette étude (f_t , G_f).

Afin d'obtenir la forme possible de la courbe de déplacement mesurée lors de l'essai expérimental, le coefficient de dilatation thermique (α) a été ajusté avec l'essai au feu expérimental sans charge.

Les variations des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température sont présentées dans les tableaux. 1 et 2.

Tableau 1. Évolution des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température.

$T [^{\circ}\text{C}]$	20	120	250	400	600
$E [\text{GPa}]$	24.1	14.2	12.7	8.4	2.9
$f_t [\text{MPa}]$	2.5	2	2.4	2.1	1.5
$G_f [\text{J/m}^2]$	150	177	260	265	456
$\rho [\text{kg/m}^3]$	2300	2297	2236	2185	2145
$\lambda [\text{W/mK}]$	1.69	146	1.09	0.8	0.58
$C_p [\text{J/Kg K}]$	993	2162	1213	1213	1213

Tableau 2. Évolution du coefficient de dilatation thermique (α) du béton avec températures

$T [^{\circ}\text{C}]$	20	120	250	360	430	510	600
$\alpha [\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}]$	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$

Le coefficient de dilatation thermique a été ajusté grâce aux résultats d'essai sur la dalle non chargée.

3. Résultats

3.1. Evolution de la température en fonction du temps et l'épaisseur de l'éprouvette

Les températures calculées numériquement et mesurées expérimentalement à différentes profondeurs de la surface exposée des dalles sont comparées dans la Figure 2. On peut constater que les températures prévues sont généralement en accord avec les températures mesurées expérimentalement pendant toute la durée d'exposition au feu. Pour l'éprouvette non chargée il n'y a pas d'écaillage par contre pour l'éprouvette chargée à 10 MPa l'écaillage commence après 4 min.

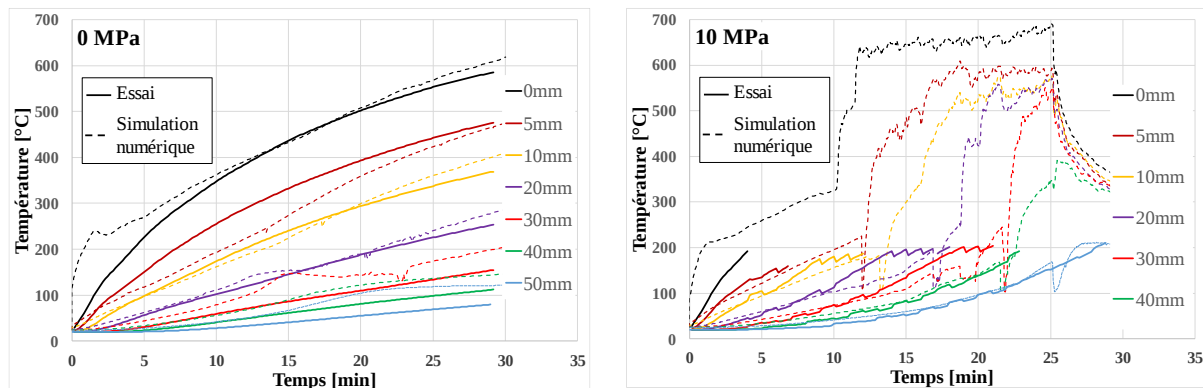


Figure 2. Évolution de la température calculée numériquement et mesurée expérimentalement de l'éprouvette non chargée et chargée à 10 MPa en fonction du temps.

3.2. Evolution du déplacement de la dalle en fonction du temps

La figure 3 présente la comparaison entre le déplacement de la partie froide mesuré au centre de la dalle lors des essais et les résultats des simulations numériques. La figure 3 montre qu'il existe un bon accord entre le

déplacement mesuré expérimentalement et le déplacement calculé numériquement des dalles chargées à 5 et 10 MPa durant toute la durée d'exposition au feu.

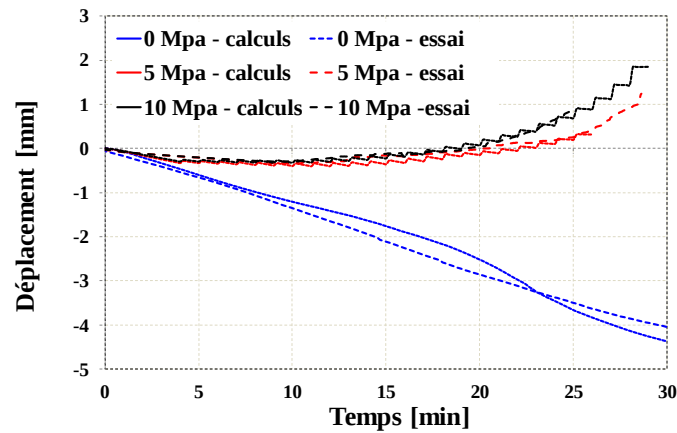


Figure 3. Évolution du déplacement calculé numériquement et mesuré expérimentalement de l'éprouvette non chargée et chargée à 5 et 10 MPa en fonction du temps.

4. Conclusion

La méthode de calcul développée permet de bien simuler l'effet de l'écaillage du béton au cours du chauffage. Les calculs thermo-mécaniques permettent de bien évaluer l'évolution des températures, des déplacements et de connaître l'état d'endommagement du béton, les contraintes et les déformations.

5. Bibliographie

- [Baz 97] Bazant, Z.P. (1997). "Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete", in: Proceedings, International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, February 13-14, 1997, pp. 155-164
- [Eur 05] Eurocode 2, 1992-1-2. (2005). "Design of concrete structures. Part 1-2: General rules –structural fire design", Brussels, Belgium.
- [Ham 65] Harmathy, T. Z. (1965). "Effect of moisture on the fire endurance of building elements", ASTM Special Technical Publication, No. 385, pp. 74-95, 1965.
- [Kal 00] Kalifa, P., Menneteau, FD. and Quenard, D. (2000). "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", Cement and Concrete Research (2000), Vol. 30, pp. 1915-1927.
- [Kho 00] Khoury G. A. and Anderberg Y. (2000). "Concrete spalling review", Fire safety design, report submitted to the Swedish National Road Administration, Sweden.
- [Mia 17] Md Jihad Miah, Francesco Lo Monte, Roberto Felicetti, Pierre Pimienta, Hélène Carré & Christian la Borderie, "Experimental Investigation on Fire Spalling Behaviour of Concrete: Effect of Biaxial Compressive Loading and Cement Type", 5th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Borås, Sweden, 12-13 October 2017
- [Min 09] Mindeguia JC. (2009). "Contribution Expérimental a la Compréhension des risqué d'Instabilité Thermiques des Béton", PhD Thesis (French), Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau (France).