

Etude expérimentale des instabilités thermiques dans un béton à ultra hautes performances

E. OUEDRAOGO ^a, S. DJAKNOUN ^b, R. BOUCHENDOUKA ^b, A. AHMED-BENYAHIA ^b

^a Laboratoire 3SR, Grenoble-INP, UGA, Domaine Universitaire, BP 53 38041 Grenoble.
Evariste.Ouedraogo@3sr-grenoble.fr

^b Laboratoire de Mécanique Avancée (LMA), USTHB d'Alger. Samidjak@yahoo.fr

Résumé :

L'étude proposée porte sur la mise en évidence des instabilités thermiques lors de la chauffe d'une paroi de Béton à Ultra Hautes Performances (BUHP) formulé à partir de sable normalisé. Des éprouvettes constituées de dalles de forme carrée de 25 cm de côté et de 10 cm d'épaisseur sont chauffées sur l'une de leurs grandes faces en suivant un cycle thermique proche de la courbe standard ISO R834 de l'Eurocode 2. Au cours de l'essai des instabilités thermiques se sont produites. Des thermocouples disposés à différentes distances de la face chauffée ont été noyés dans le béton. L'évolution des températures mesurées par les thermocouples traduit la manifestation des instabilités thermiques pendant les essais et a été corrélée aux observations sonores et visuelles in situ et post-mortem. L'analyse de cette évolution a aussi permis de cerner les niveaux de température auxquels les instabilités thermiques se produisent dans le matériau.

Abstract:

The proposed study focuses on highlighting thermal instabilities during the heating of an Ultra High Performance Concrete (UHPC) wall formulated from standardized sand. Specimens consisting of 25 cm square and 10 cm thick square slabs are heated on one of their large faces following a thermal cycle close to the ISO R834 standard curve of Eurocode 2. During the spalling test, the thermal instability has occurred. Thermocouples placed at different distances from the heated face were embedded in the concrete. The evolution of the temperatures measured by the thermocouples reflects the manifestation of thermal instabilities during the tests and has been correlated with the in situ and post-mortem sound and visual observations. The analysis of this evolution also made it possible to identify the temperature levels at which thermal instabilities occur in the material.

Mots clefs : Béton à ultra hautes performances, courbe standard ISO 834, écaillage thermique, température, pression de vapeur.

1 Introduction

L'instabilité thermique du béton est un phénomène redoutable puisqu'elle conduit à une perte de matière qui peut être conséquente au point de mettre à nu les armatures contenues dans le béton et poser ainsi des problèmes d'intégrité physique de la structure et de durabilité à long terme. Ces instabilités sont observées dans les bétons ordinaires mais elles se manifestent davantage et avec plus de violence dans les bétons dits à haut ou ultra hautes performances du fait essentiellement de leur faible porosité. De nombreuses études expérimentales et théoriques ont été menées qui ont permis de circonscrire les causes potentielles de ce phénomène : l'effet du gradient thermique et celui de la pression de vapeur dans les pores [1, 2, 3, 4]. La manifestation de ces instabilités dépend de causes multiples dont certaines sont liées au matériau (porosité, état hydrique, nature des granulats,...) et d'autres à l'environnement (conditions de cure, vitesse de chauffage, ...). La diversité des bétons étudiés, leur caractère hétérogène et le caractère multi-échelles du phénomène d'instabilité rend la comparaison des résultats des études difficile en général. L'idée que nous tentons de promouvoir depuis quelques années est de proposer un matériau standard de référence sur lequel différentes équipes de recherche pourraient travailler afin que leurs résultats soient justement comparables.

Dans la présente étude un banc d'écaillage thermique a été développé pour étudier les instabilités thermiques d'un béton de référence formulé à partir de sable normalisé afin que le matériau de l'étude soit reproductible. Par des essais systématiques et une instrumentation poussée des éprouvettes d'essai, nous espérons produire des résultats suffisants et précis qui permettent d'avancer dans la compréhension du phénomène et aussi dans sa modélisation. Nous présentons à la suite les premiers résultats obtenus sur le banc d'essais avec la première version complète du four sur une éprouvette-dalle instrumentée de thermocouples. Nous analysons les observations diverses faites en cours et en fin d'essai et les corrélons aux évolutions des températures des thermocouples noyés dans le béton.

2 Etude expérimentale

2.1 Matériau et modalités

Le matériau de l'étude est un béton à très hautes performances est à base de sable normalisé et qui a vocation à devenir un béton de référence. Plus précisément, il est constitué d'un mélange de sable normalisé 0-2 mm de la Société Nouvelle du Littoral, de ciment Vicat CEM 1 52,5, de fumée de silice Condensil S95, de super-plastifiant SIKA Viscocrete Tempo 10 et d'eau. Le rapport Eau sur Ciment E/C est de 0,22 et la teneur en fumée de silice de 10%. Les quantités des différents constituants pour 1 m³ de béton sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Formulation utilisée pour 1 m³ de béton de l'étude.

Constituant	Ciment (S)	Sable (S)	Eau (E)	Super-plastifiant	Fumée de silice	E/C
Quantité (kg)	875	1350	200	35	87,5	0,22

A partir de cette formulation de béton, des éprouvettes pour différents type d'essais ont été fabriquées : d'abord des dalles carrées de 25 cm de côté et 10 cm d'épaisseur pour les essais d'écaillage ; puis des éprouvettes cubiques de 4 cm de côté pour la caractérisation du matériau en compression uniaxiale à chaud ; et enfin des éprouvettes 4x4x16 (cm) pour la caractérisation du matériau en flexion 3 points. Chaque gâchée permet de produire 3 éprouvettes-dalle, 6 éprouvettes cubiques de 4 cm et 3 éprouvettes de flexion 4x4x16 (cm). Les éprouvettes dalles sont munies de thermocouples mis en place après la phase de vibration et d'arasage de la face supérieure de

l'éprouvette. Un dispositif spécial permet de définir précisément la position du thermocouple dans un des demi-plans de symétrie par rapport à l'axe de la plaque et sa distance à la face destinée à être chauffée. Ainsi pour les éprouvettes utilisées dans cette étude, trois thermocouples ont été placés dans chacune des éprouvettes : le premier dans l'axe de l'éprouvette au niveau de la face chauffée (cote 0, dénommée Th_S-0), le deuxième à une distance de 20 mm de l'axe à la cote 10 mm (Th_S-10) et enfin un troisième a été placé à 60 mm du centre à la cote 20 mm (Th_S-20). Sur les graphiques (Fig. 1) les mesures de ces différents thermocouples sont référencées respectivement par les désignations Th_S-0, Th_S-10 et Th_S-20.

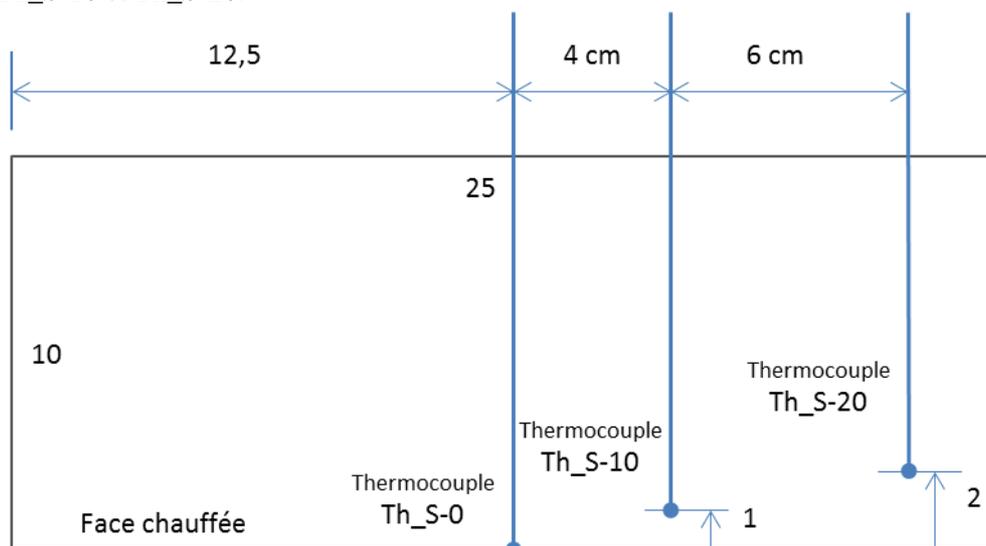


Fig. 1. Plan d'implantation des thermocouples dans un plan de symétrie de la dalle.

Les éprouvettes de type dalle obtenues sont désignées par la lettre E et deux groupes de chiffres, le premier groupe désignant le numéro du moule et le deuxième la date de confection des éprouvettes (Tableau 2). Elles sont relativement calibrées en dimensions et en masse. La réalisation des moules des éprouvettes destinées aux essais d'écaillage ayant été particulièrement soignée, les dimensions des éprouvettes sont quasi identiques : 250 ± 1 mm pour les largeurs et $100 \pm 0,5$ mm pour la hauteur. Pour une même gâchée on obtient par exemple pour les trois éprouvettes les masses suivantes : 14,692 ; 14,839 et 14,644 kg (Tableau 2). Soit une différence maximale de la masse des éprouvettes de l'ordre de 1%.

Après confection des éprouvettes et démoulage le lendemain, les éprouvettes cubiques de compression et celles prismatiques (4x4x16) de flexion ont été plongées dans l'eau. Les éprouvettes-dalles destinées aux essais d'écaillage ont été laissées à l'air libre dans le laboratoire où la température est d'environ 20°C. A la date des essais d'écaillage, le béton était alors âgé de 76 jours, soient 2 mois et demi.

Tableau 2. Evolution de la masse des éprouvettes-dalle dans le temps et suivant leur histoire.

Eprouvettes	E1_100117	E21_100117	E22_100117
Masse initiale (kg)	14.692	14.839	14.644
Masse après 76 jours de cure (kg)	14.648	14.795	14.602
Variation de la masse suite à la cure (kg)	0.044	0.044	0.042
Masse après l'essai d'écaillage (kg)	--	--	13.162
Variation de masse suite à l'essai (kg)	--	--	1.44

2.2 Définitions des essais et description rapide des dispositifs d'essai

Les essais d'écaillage ont été réalisés sur le banc d'essais du Laboratoire 3SR en cours de développement. Celui-ci est constitué d'un brûleur, d'un four qui coiffe le brûleur et d'une armoire d'alimentation, de programmation et de régulation du brûleur. Le brûleur est un bloc constitué de 16 ouvertures afin de répartir uniformément la flamme sur la face chauffée de l'éprouvette et délivrant une puissance maximale de 32 KW. Il est alimenté en gaz propane. Le brûleur est posé sur un socle métallique qui lui permet de chauffer l'éprouvette en position verticale ou horizontale. Différentes études effectuées dans ces deux positions ont conduit à préférer la position horizontale. C'est cette configuration qui a été mise en œuvre dans la présente étude. Plusieurs prototypes de four ont fait l'objet d'essais. Le four est constitué de quatre parois verticales fermées en matériau céramique formant une boîte posée au-dessus du brûleur et fermée sur la partie supérieure par un couvercle monobloc en céramique muni d'un trou central de 245x245 (mm) et de 2 trous périphériques de 245x75 (mm) servant d'évents d'évacuation des produits de combustion. L'éprouvette de section latérale 250x250 mm est chauffée sur sa face inférieure par le brûleur à travers le trou central. Sur une des faces latérales du four est installé un hublot à travers lequel une caméra peut filmer la face chauffée de l'éprouvette pendant l'essai. L'armoire d'alimentation et de pilotage du brûleur comporte un pupitre de commande qui permet de programmer en manuel ou en automatique les cycles thermiques souhaités. Deux thermocouples de type tige, l'un de régulation et l'autre de sécurité et reliés à l'armoire de commande, sont disposés dans le four. Il est possible d'imposer un cycle thermique de montée, maintien et de descente de la température. Dans ce cas la programmation est automatique et la régulation de la température est assurée en faisant varier la puissance du four. En programmation manuelle, c'est la puissance du four exprimée en % que l'on fait varier. C'est cette configuration qui a été utilisée dans la présente étude.

Ce sous-chapitre décrit la phase d'allumage du brûleur et de mise en place de l'éprouvette.

Le brûleur est alimenté en air et en propane et son allumage suit un protocole bien défini. A la mise en route, une séquence de nettoyage des conduits d'alimentation du brûleur par du gaz propane est d'abord assurée, suit une séquence d'alimentation en air dans les proportions d'optimum de combustion qui se termine par la séquence d'allumage assurée par une bougie. Après la mise en feu du brûleur, celui-ci fonctionne à un niveau élevé de puissance pendant environ 2 mn avant un retour progressif à sa puissance minimale correspondant au niveau 0% de puissance manuelle. Autrement dit, à 0% de puissance le brûleur dégage une puissance non nulle. On peut voir par exemple sur la Fig. 3 que le thermocouple qui mesure la température du four (Th_Furnace) indique une température de 200°C au départ de l'essai lorsque la puissance est théoriquement nulle. C'est après le retour à la puissance minimale que l'éprouvette peut être installée sur le four afin de démarrer l'essai dès cet instant. Pendant l'essai d'écaillage l'éprouvette est soumise aux contraintes thermiques engendrées par le chauffage et par son poids propre.

2.3 Déroulement d'un essai d'écaillage

Après avoir placé l'éprouvette sur le banc et après quelque temps d'attente on augmente régulièrement la puissance du four manuellement en surveillant la température du four de façon à suivre la courbe de température voulue. Une régulation automatique est possible mais ne répond pas pour l'instant aux besoins actuels. Il peut se produire des instabilités thermiques ou pas suivant le matériau utilisé. On arrête l'essai lorsque le temps écoulé est jugé suffisant ou lorsque l'écaillage thermique est violent et/ou a provoqué des macro-fissures déstabilisant l'éprouvette. En temps normal,

l'arrêt se fait progressivement en réduisant régulièrement la puissance du four jusqu'à la puissance nulle ; puis on coupe l'alimentation du brûleur.

Pendant les essais on effectue pour l'instant essentiellement des mesures de température. La température du four est mesurée par les deux thermocouples de régulation et de sécurité fournis par le fabricant et transmise à l'armoire de commande. Un thermocouple souple de type K a été placé dans le four à côté du thermocouple de régulation et désigné par Th_Furnace pour mesurer la température du four. La mesure de ce thermocouple ainsi que celles des trois autres thermocouples noyés dans l'éprouvette font l'objet d'une acquisition automatique de données à l'aide du logiciel Labview pendant l'essai. La fréquence d'acquisition est en général de 1 s. On prévoit pour de futurs essais la présence de capteurs de pression jumelés aux thermocouples afin de mesurer la pression aux différentes distances de la face chauffée.

3 Résultats et discussion

3.1 Comparaison du cycle thermique avec celui de l'Eurocode 2

La Figure 3 présente les courbes de températures relevées pendant toute la durée de l'essai comprenant la phase de chauffage et la phase de refroidissement. L'intérêt de la présente étude portant sur la phase de chauffage, une restriction des courbes sur cette phase est présentée à la Figure 4. Sur la Figure 4, la courbe désignée par Th_Furnace représente la courbe d'évolution de la température dans le four pendant l'essai. Pour bien la comprendre, il convient de bien décrire le protocole d'essai. Au début de l'essai la puissance du four est minimale et correspond à une puissance théorique de 0%. On peut constater qu'au départ de l'essai ($t=0$) la température mesurée par le thermocouple placé dans le four est déjà de 200°C. Puis on augmente successivement la puissance à 10% au temps t_1 (81 s) et à 20% au temps t_2 (312 s); puis la puissance est maintenue constante jusqu'au temps t_4 (960 s). On peut voir sur la Figure 3 qu'à chaque augmentation de puissance il se produit un saut dans la courbe de température. La température du thermocouple logé dans le four croît jusqu'à 867°C au temps t_3 (484 s) avant de baisser brutalement de 130 °C (867 de à 737 °C). Nous interpréterons cette baisse brutale ultérieurement. La courbe standard d'incendie ISO 834 de l'Eurocode 2 atteint 600°C °C au bout de 330 s. Pour le même temps on peut voir sur la Fig. 4 que la température du four est de l'ordre de 730 °C. Autrement dit le cycle thermique imposé à l'éprouvette dans cette étude était très pénalisant.

3.2 Les observations sonores et visuelles in situ et post-mortem

Au début l'essai s'est déroulé sans bruit, sans production sonore particulière. Le changement de puissance à 10% puis à 20% se sont faits sans manifestation particulière. Puis il s'est produit une déflagration brutale correspondant au temps t_3 (484 s) de la Figure 4. Il s'en est suivi des crépitements et des manifestations sonores diverses et plutôt continues. Une autre déflagration moins violente que la première a aussi eu lieu que nous situons au temps t_3 (626 s). Cela a correspondu à l'apparition des macro-fissures que l'on pouvait voir sur les surfaces extérieures de l'éprouvette.

Comme l'éprouvette devenait instable et pour ne pas prendre le risque d'une explosion émettant l'éprouvette, le brûleur a été arrêté brutalement. Suite à cet arrêt brutal des nouvelles productions sonores intensives se sont produites lors du refroidissement brutal de l'éprouvette au cours duquel le gradient thermique dans l'éprouvette s'est alors inversé.

La Figure 2 montre l'état du brûleur et de l'éprouvette à la fin de l'essai. Nous pouvons constater que l'écaillage s'est bien produit et de manière assez homogène comme le témoigne la régularité de la taille des éclats tombés sur le brûleur. L'écaillage s'est produit sur toute la surface de l'éprouvette et de façon quasi-homogène comme on peut le voir sur les photos de l'éprouvette en Fig. 2-B-C-D. On peut voir sur les photos la présence de macro-fissures qui suivent globalement les deux plans

principaux de symétrie de l'éprouvette. On peut en conclure que le banc d'essais a parfaitement fonctionné et que l'essai est réussi. Ces observations in situ et post-mortem vont permettre d'interpréter les courbes d'évolution des mesures de thermocouples.



Fig. 2. Conséquences des instabilités thermiques suite à un essai d'écaillage sur une éprouvette dalle: A- débris des éclats recueillis, B- vue de face de l'éprouvette montrant que l'instabilité thermique s'est produite sur toute la face de l'éprouvette et la présence de macro-fissures verticales et horizontales, C et D- vues de haut de l'éprouvette montrant que la perte de matière était quasi uniforme. On peut voir en C le bout du thermocouple central qui a été mis à nu.

Pour terminer, on a mesuré la masse des éprouvettes juste avant l'essai puis celle de l'éprouvette d'essai après essai, ce qui permet de connaître la quantité de matière perdue pendant l'essai. Ces données apparaissent au Tableau 2. La masse totale perdue est de 1,44 kg. Si l'on suppose que cette masse a été perdue de façon homogène, on peut calculer l'épaisseur moyenne de matière perdue en effectuant une règle de trois : $e_i \times (m_e/m_i)$ où m_i est la masse initiale, m_e la masse éjectée au cours de l'essai et e_i l'épaisseur initiale de l'éprouvette. Le rapport m_e/m_i étant de 9,8%, on obtient alors une épaisseur moyenne de matière éjectée de 9,8mm, ce qui est considérable.

3.3 Analyse de la réponse des thermocouples.

3.3.1 Thermocouple situé dans le four (Th_Furnace)

Dans le protocole expérimental la puissance appliquée au four est de 10% à partir de t_1 (80 s) et de 20% à partir de t_2 (200 s) jusqu'au refroidissement. On peut voir sur la Fig. 4 qu'à chaque

augmentation de puissance la courbe de température croît en changeant brutalement de pente. On aurait pu s'attendre, après l'augmentation de puissance à 20%, à ce que la température croisse puis tende vers une valeur limite comme cela s'est produit pour la puissance de 10%. Or, que constate-t-on ? La température baisse brutalement au temps t_3 (484 s) de 131°C (de 867 à 736 °C). Que s'est-il donc passé ? Les observations sonores montrent que t_3 est le temps où la première déflagration sonore a été entendue traduisant un écaillage intense. Pourquoi la température du thermocouple situé dans le four a-t-elle brutalement baissé ? On peut penser que la déflagration a produit des éclats visibles à la Fig. 2 dont certains se sont logés dans les ouvreaux ce qui a perturbé la combustion complète du mélange propane-air et conduit à réduire drastiquement la puissance effective fournie par le brûleur bien que le réglage de puissance soit resté sur 20%. Après cette baisse brutale, la température $Th_Furnace$ se stabilise pendant un certain temps puis subit de nouveau une baisse de au temps $t=646$ s de sorte qu'à partir du temps $t= 652$ s, la température du thermocouple central noyé dans le béton passe au-dessus de celle du thermocouple four. De notre point de vue toutes les variations significatives de la température du thermocouple situé dans le four correspondent à des salves de production d'éclats ($t=670, 714, 743, 771, 792$ s). Il apparaît très clairement que les courbes de température permettent de suivre les manifestations du phénomène d'écaillage. On peut s'étonner qu'à un moment donné ($t=652$ s) la température du thermocouple central qui est noyé dans le béton soit supérieure à celle du thermocouple situé dans le four. On verra par la suite pourquoi.

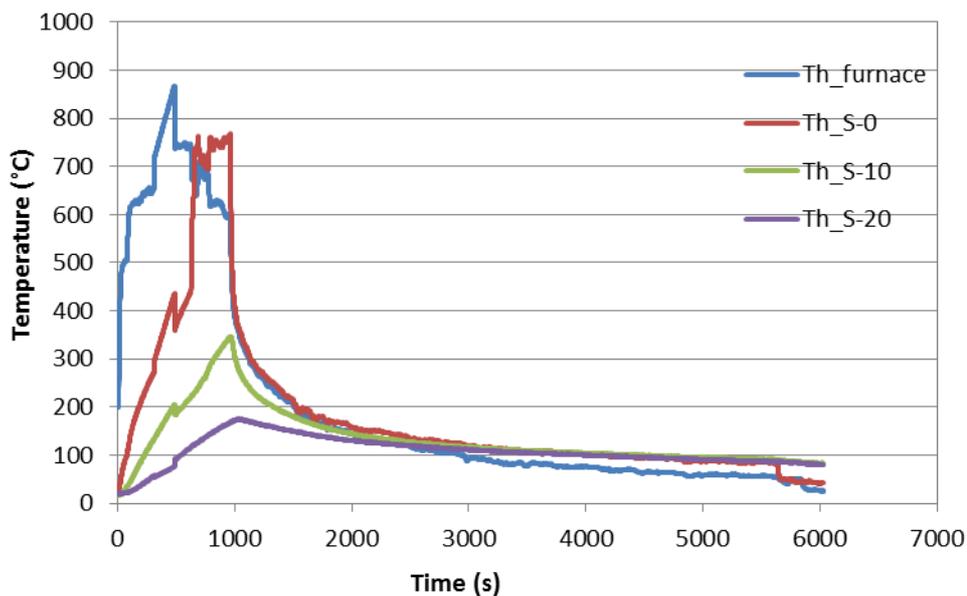


Fig. 3. Courbes des températures mesurées par les thermocouples de l'essai pendant les phases de chauffage et de refroidissement de l'essai. $Th_Furnace$ désigne le thermocouple situé dans le four et Th_S-0 , Th_S-10 et Th_S-20 les thermocouples noyés dans le béton et situés respectivement à 0, 10 et 20 mm de distance de la face brûlée.

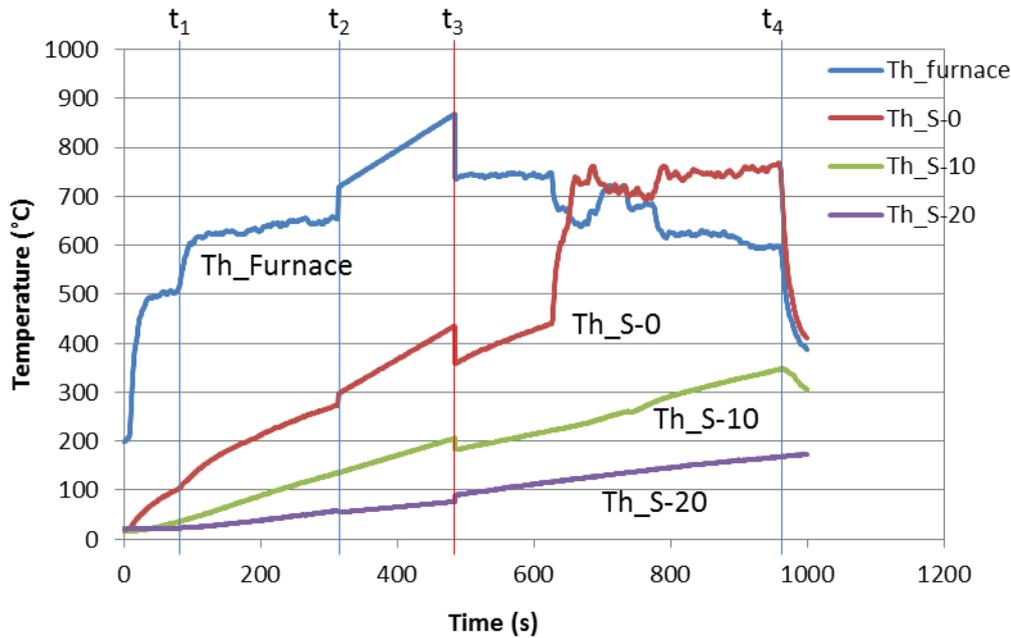


Fig. 4. Zoom sur les 1000 premières secondes de la figure précédente relative à la phase de chauffage de l'essai.

3.3.2 Thermocouples noyés dans l'éprouvette

Rappelons que l'extrémité du thermocouple central Th_S_0 est située dans le plan de la surface chauffée donc à la cote 0. Les extrémités des thermocouples Th_S-10 et Th_S-20 sont situées respectivement aux cotes 10 et 20 par rapport à la face chauffée. La première observation générale qui s'impose est que les évolutions des thermocouples noyés dans le béton sont beaucoup plus lentes que celle du thermocouple situé dans le four, y compris celle du thermocouple dont l'extrémité affleure la surface chauffée (Th_S-0). Cela est sans doute lié à la conductivité relativement faible du béton en général qui retarde la propagation de la chaleur en son sein. Le thermocouple situé à 20 mm de la face chauffée (Th_S-20) indique une évolution quasi-linéaire de la température peu sensible aux perturbations de puissance du fait de l'éloignement. En revanche à la première déflagration sonore d'écaillage sa mesure présente un petit saut positif de température de +24°C (de 76 à 90°C) contrairement aux deux autres thermocouples dont le saut est négatif. Pour expliquer ce saut positif on peut penser que la déflagration a provoqué une fissure entre l'extrémité du thermocouple et la face chauffée et qui a facilité la transmission de chaleur. Cette augmentation a été instantanée puisque après ce saut l'évolution se poursuit avec la pente initiale. Le thermocouple Th_S-10 situé à 10 mm de la face chauffée se comporte comme celui dont on vient de parler avec une pente d'évolution légèrement plus importante. La différence notable est que lorsque la déflagration s'est produite le saut de température observé pour ce thermocouple est négatif alors qu'il était positif pour le précédent. La baisse brutale de la puissance au temps t_3 que nous expliquions plus haut s'est traduite pour ce thermocouple par une baisse de température de 24°C (de 206 à 182°C). Cela est mis en évidence par une légère baisse mais visible de la pente d'évolution de la température. Au temps $t=780$ s, la pente d'évolution augmente de nouveau. Nous pensons que cela est dû d'une part à l'effet de réduction de l'épaisseur liée à la perte de matière et d'autre part, à l'effet de la fissuration provoquée par les salves d'éclats et qui facilite alors la transmission de la chaleur. Nous terminerons l'analyse par le thermocouple central (Th_S-0) dont l'extrémité est située dans le plan de la face chauffée. Comme le thermocouple situé dans le four, ce thermocouple est sensible à toutes les perturbations. D'abord aux changements de puissance du four pour lesquels on observe de forts changements de pente aux temps t_1 et t_2 . Ensuite au temps t_3 (484 s) lors de la première déflagration, sa température chute brutalement

d'environ 77 °C (de 435 à 358°C) à comparer aux 133°C de chute de la température du thermocouple logé dans le four. Puis la courbe de température reprend une évolution linéaire jusqu'au temps 626 s à partir duquel un accroissement brutal de la température est encore observé. La température passe de 440°C à 740°C au temps 660s, soit un accroissement de 300°C en 20 s. C'est au cours de cette évolution que la courbe de température de ce thermocouple croise au temps 652 s puis dépasse celle du thermocouple du four. Nous pensons que la partie centrale de la face chauffée, épargnée jusqu'à présent, subit à son tour un épisode d'éclatement. La matière autour du thermocouple central noyé dans le béton part en éclats en mettant à nu l'extrémité du thermocouple. Celui-ci n'est plus protégé par le béton et est exposé désormais comme l'a toujours été le thermocouple du four. Pour s'en convaincre il suffit d'observer la courbe d'évolution du thermocouple à partir du temps 660 s qui se met à osciller comme celle du thermocouple du four. Ces oscillations sont sans doute dues à leur exposition directe à la flamme et à ses effets convectifs. On observe un pic de température au temps 687 à 761°C suivi par une séquence de baisse à 703°C au temps 768 s et de nouveau un accroissement pour atteindre 761 °C au temps 789 s. Après ce temps, la température du thermocouple reste quasi constante autour de 762 °C. Pour cette même période la température du thermocouple four est aussi quasi-constante mais à 620°C, soit une différence de 142°C. Nous pensons que cette différence est due au fait que la chaleur fournie par le brûleur n'est plus du tout uniforme du fait que les différents ouvreaux ont été pollués par des débris divers et de façon aléatoire.

Les résultats obtenus à partir des mesures des thermocouples installés dans le système sont très intéressants. Ils permettent d'abord de connaître l'évolution de la température en certains points du béton, information capitale lorsqu'on souhaite mener une modélisation numérique de l'essai. Ils permettent ensuite de suivre les manifestations des instabilités thermiques au cours de l'essai d'écaillage. En effet ces instabilités engendrent des variations thermiques que les thermocouples se révèlent capables de détecter. Enfin les thermocouples ont fait preuve de leur robustesse car malgré les éclats qui sont des ruptures brutales du béton les environnant et qui auraient pu les endommager, on constate qu'ils ont continué à indiquer fidèlement la température au-delà des épisodes d'instabilité thermique.

3.3.3 Analyse globale

Au temps t_3 quand la première instabilité thermique audible se produit la face de l'éprouvette est à 435°C et les températures à 10 mm et 20 mm de profondeur respectivement de 206 et 76 °C. Comme on sait qu'à la profondeur de 10 mm la température a continué de croître de manière monotone sans à-coups par la suite, on peut alors penser que la zone où se situe le front d'instabilité thermique est située à une profondeur inférieure à 10 mm et sa température est comprise entre 435 et 206 °C. Il faudrait dans un prochain essai placer au moins un thermocouple à 5 mm de profondeur pour pouvoir éventuellement accéder à cette information. La fourchette donnée par ces essais est pour l'instant très large mais on peut constater qu'elle est cohérente avec les résultats de la bibliographie où généralement il est dit que les instabilités sont susceptibles de se produire au-delà de 180 à 200°C. En faisant l'hypothèse que la perte de matière est uniforme dans l'éprouvette on trouve qu'une épaisseur de 9,8 mm de matière a été perdue en fin d'essai. Or à la fin de la phase de chauffage la température à la profondeur initialement de 10 mm (Th_S-10 en Fig. 4) est de 346 °C avec une évolution quasi-monotone. Il apparaît donc que ce thermocouple est toujours environné de matière et que son point de mesure n'est toujours pas affecté par l'instabilité thermique.

Du fait que l'instabilité thermique s'est produite sur toute la face de l'éprouvette et donc que la perte de matière a été quasi-uniforme, le plan moyen de la face chauffée se déplace en profondeur ce qui accélère le transfert de chaleur dans l'épaisseur de la dalle. Mais ce phénomène est contrarié par la perte de puissance du brûleur engendrée par la chute des éclats dans les ouvreaux. On peut dire alors que la configuration du banc qui a été utilisée permet d'étudier proprement la phase d'amorce des

instabilités thermiques ainsi que le début de la phase de stabilisation puisque par la suite la puissance du four n'est plus maîtrisée.

4 Conclusion

Cette étude a été menée sur un béton à hautes performances formulé à partir de sable normalisé. Elle a consisté à exposer une face d'une éprouvette-dalle au feu d'un brûleur au propane. Elle a permis de mettre en évidence l'instabilité thermique qui se traduit par l'écaillage du béton. L'écaillage s'est produit sur toute la face chauffée de l'éprouvette et de façon quasi-uniforme ce qui prouve que la flamme du brûleur chauffe l'éprouvette quasi-uniformément. Les mesures de thermocouples situés dans le four ou noyés dans le béton ont permis de suivre l'occurrence des instabilités thermiques qui se traduisent aussi par des variations thermiques. On a pu ainsi mettre en évidence que la température des zones où se sont manifestées les premières instabilités était comprise entre 435 et 206 °C. Les différentes observations visuelles, sonores et diverses en cours d'essai ou en fin d'essai ont permis d'expliquer les évolutions des courbes de température des thermocouples.

Cette étude a permis d'avancer dans le développement du banc d'écaillage qui, en configuration finale, doit permettre de filmer en caméra rapide la face chauffée de l'éprouvette et d'effectuer des mesures de pression dans le béton, ce qui apporterait des informations précieuses complémentaires pour la compréhension et dans une perspective de la modélisation du phénomène d'écaillage.

Références

- [1] W.Z. Zheng, X.M. Hou, D.S. Shi, M.X. Xu. 2010. Experimental study on concrete spalling in prestressed slabs subjected to fire. *Fire Safety Journal* 45 (2010) 283-297.
- [2] K.D. Hertz, L.S. Sorensen. 2005. Test method for spalling of fire exposed concrete. *Fire Safety Journal* 40 (2005) 466-476.
- [3] Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle. 2001. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1487-1499.
- [4] Taillefer Nicolas, Pierre Pimienta, Dhima Dhionis. 2013. Spalling of concrete : A synthesis of experimental tests on slabs. *MATEC Web of Conferences*, Vol 6, p01008 (2013).