

CONTRIBUTION EXPÉIMENTALE À LA COMPRÉHENSION DES RISQUES D'INSTABILITÉ THERMIQUE DES BÉTONS

Jean-Christophe MINDEGUIA, Prix spécial du jury

1. INTRODUCTION

Tunnels sous la Manche (1996 et 2008), du Mont Blanc (1999) et du Fréjus (2005) en France, Tunnels du Storebealit (1994) au Danemark, du Tauern (1999) en Autriche ou bien encore Tunnel du Gothard (2001) en Suisse, tous ces tunnels ont en commun d'avoir subi des incendies ancrés dans la mémoire collective pour leur violence thermique et le nombre de victimes humaines provoquées (Haack, 2003). Les inspections après incendie ont tous fait état de structures en béton fortement endommagées avec, dans les endroits les plus violemment exposés au feu, des zones de béton clairement détachées. Ce départ du béton durant l'incendie est provoqué par une instabilité

thermique du matériau, un phénomène couramment appelé éclatement ou écaillage (suivant le forme qu'il prend). Dans certains cas particuliers (comme dans le cas du premier incendie dans le tunnel sous la Manche, Figure 1), certains voussoirs ont même connu une éjection totale de leur épaisseur de béton (Ulm et al., 1999). Dès lors, nous comprenons bien le danger que peut représenter un tel phénomène pour la bonne tenue de la structure durant et après un incendie : en enlevant du béton on compromet fortement la capacité portante des structures et leur fonction d'isolation thermique est réduite. Par ailleurs, les coûts de réparation et d'immobilisation de structures endommagées par une instabilité thermique du béton peuvent atteindre plusieurs millions d'Euros.



Figure 1 : photos des voussoirs du tunnel sous la Manche prises après l'incendie de 1996. Par endroits, l'épaisseur de béton des voussoirs a totalement été expulsée.

Dans les laboratoires, le risque d'instabilité thermique des bétons est principalement étudié depuis une dizaine d'années, et quelques résultats importants ont été observés : le risque élevé d'instabilité des bétons à hautes performances a été mis en évidence et le rôle favorable des fibres polypropylène sur le comportement au feu des bétons a été découvert. En effet, l'ajout de quelques kilogrammes de fibres dans le béton frais permet de réduire voire de supprimer le risque d'instabilité thermique des structures (Kalifa et al., 2001).

De nos jours, la prise en compte réglementaire des risques d'instabilité thermique des bétons, et la répercussion que cela peut avoir sur la stabilité d'une structure durant un incendie, repose essentiellement sur des approches expérimentales. En effet, aucun calcul prédictif du risque d'instabilité thermique ne peut être encore réalisé (Féron et al., 2006). Ce manque de prévision est dû à la méconnaissance, malgré de nombreuses études expérimentales et numériques, des phénomènes physiques qui sont à l'origine de l'instabilité thermique des bétons. Parmi les hypothèses couramment avancées dans la littérature, l'instabilité thermique des bétons reposeraient sur un processus thermomécanique où l'éjection de matière est provoquée par des contraintes de compression élevées en partie exposée au feu. Ce mécanisme est intimement lié au gradient thermique au sein du matériau et aux dilatations thermiques empêchées de la structure (Bazant, 1997). L'autre cause possible d'instabilité thermique repose sur un processus thermo-hydraulique : à partir de mécanismes complexes de mouvement de fluide au sein du béton, l'instabilité thermique serait liée à une génération de pression de vapeur d'eau trop élevée par rapport à la résistance en traction du matériau (Harmathy, 1965). Cette hypothèse est restée pendant longtemps la plus généralement admise par la communauté scientifique. C'est en particulier celle qui est avancée pour expliquer le rôle positif des fibres polypropylène lors d'un incendie : en fondant (vers 170°C), les fibres créent au sein de la matrice du béton des chemins de passage préférentiels pour les fluides, réduisant ainsi les pressions de vapeur d'eau.

La méconnaissance des origines physiques de l'instabilité thermique, qui empêche tout calcul prédictif et ralentit le développement des solutions technologiques, nous a emmené à entreprendre une importante étude expérimental-

tale dont le but est de contribuer à l'étude des risques d'instabilité thermique des bétons.

Nous présentons dans ce papier les principaux résultats expérimentaux de cette étude. Plusieurs échelles d'observation du comportement à haute température d'un béton ordinaire (résistance à la compression de 40 MPa) et d'un béton à hautes performances (résistance à la compression de 60 MPa) ont été adoptées. A l'échelle du matériau, la détermination de l'évolution avec la température de données telles que la perméabilité, la porosité, les propriétés thermiques et les propriétés mécaniques nous permettent de mieux comprendre le comportement du béton à haute température. Ces essais sont complétés par des mesures de pression et de température sur des éprouvettes à taille réduite. Enfin, des essais au feu sur dallettes (feu ISO et feu HCM – Hydro Carbure Majoré) ont été réalisés afin de caractériser l'instabilité thermique des bétons.

La confrontation des résultats des essais à différentes échelles nous permet de discuter des paramètres qui semblent être les plus propices à l'instabilité thermique et proposons de nouvelles pistes d'investigation.

2. DÉTAILS EXPÉRIMENTAUX

2.1. Formulation des matériaux testés

Nous avons voulu limiter nos travaux à l'étude de bétons de formulations relativement simples (en terme de composants utilisés) et suffisamment représentatives de celles qui sont courantes sur chantier. Le béton de base de notre étude est donc un béton ordinaire (rapport eau / ciment = 0.54). Sa résistance en compression à 28 jours atteignant environ 40 MPa, ce béton de base prend le nom de B40 dans le reste du document. Sa formule est donnée dans le Tableau 1.

Deux classes granulaires de gravillons sont utilisées dans le B40 : 8/12.5 et 12.5/20. Ce sont des gravillons concassés dont la nature pétrographique est calcaire (composés à plus de 99 % de CaCO₃).

B40		
Composant	Dosage (kg) *	Dosage corrigé (kg.m ⁻³)
Ciment CEM II/A-LL 42.5 R PM-CP2	350	347
Gravillon 8/12.5 calcaire	330	327
Gravillon 12.5/20 calcaire	720	714
Sable 0/2	845	838
Eau	188	186
Adjuvant	1 % (par masse de ciment)	1 % (par masse de ciment)
Rapport E/C	0.54	0.54

* dosage théorique, ne prenant pas en compte la masse volumique réelle du béton frais.

Tableau 1 : composition du béton de référence B40.

A partir de la formule de base du B40, et toujours dans l'optique de contribuer à l'étude des mécanismes pouvant être à la base des instabilités thermiques, nous avons testé le comportement à haute température de formules complémentaires de béton. Ces différentes déclinaisons de la formulation de base doivent nous permettre d'étudier l'influence de certains paramètres sur les risques d'instabilité thermique mais aussi de pouvoir induire dans le matériau certains phénomènes particuliers (fissuration complémentaire ou augmentation de la dilatation thermique par exemple).

La première formule déclinée, dénommée B40SC, consiste à remplacer les granulats calcaires du B40 par des granulats silico-calcaires. Ces derniers sont des gravillons alluvionnaires semi-concassés dont l'une des particularités est de contenir beaucoup de silex, minéral réputé pour fortement modifier les propriétés du béton à haute température (Bazant *et al.*, 1996).

Un autre paramètre important dans l'étude des risques d'instabilité thermique est la compacité des bétons. En effet, une forte compacité augmente le risque d'instabilité thermique du béton. C'est notamment le cas des bétons à hautes performances (BHP), des bétons autoplaçants (BAP) et des bétons fibrés à ultra hautes performances (BEFUP). En réduisant le rapport E/C initial de la formule du B40, nous avons donc fabriqué un béton dont la résistance atteint 60 MPa ; ce béton est appelé B60 dans la suite du document.

Enfin, il est maintenant largement admis que l'ajout de fibres de polypropylène à la composition des bétons réduit voire annule le risque d'instabilité thermique du matériau (Kalifa *et al.* 2001). Ce bénéfice est couramment expliqué par un processus thermo-hydrique de relaxation des pressions de vapeur d'eau engendrées lors d'un chauffage. Nous avons donc voulu confirmer le rôle bénéfique des fibres de polypropylène sur les bétons de notre étude ainsi qu'étudier l'influence qu'elles peuvent avoir sur les différentes propriétés du matériau à haute température. Les fibres utilisées sont des fibres monofilament, dont le point de fusion se situe aux alentours de 170 °C. Nous avons choisi d'ajouter 2 kg/m³ de fibres pp aux compositions B40, B40SC et B60, créant ainsi les compositions B40F2, B40SC_F2 et B60F2.

Le Tableau 2 présente les formulations des différents bétons de l'étude. Par rapport à la formule de base du B40, seul le dosage en granulat reste constant, les autres quantités de matières sont modifiées.

2.2. Programme expérimental

La première partie de notre étude expérimentale a consisté à déterminer différentes propriétés des bétons de l'étude et leur évolution avec la température : propriétés thermiques (conductivité et diffusivité thermique), courbes de perte de masse, porosité à l'eau, perméabilité à l'azote, courbes de dilatation thermique, flUAGE, courbes de dilatation thermique transitoire (DTT), résistance à la compression, module d'élasticité et coefficient de Poisson. Le but de cette partie est en premier lieu de fournir des données d'entrée aux modèles numériques. D'autre part, l'analyse de certains résultats permet de mieux comprendre le déroulement des deux processus cités précédemment, qui semblent être à la base de l'instabilité thermique des bétons. Enfin, un effort de recherche a été réalisé sur la compréhension d'un phénomène particulier au béton : la déformation thermique transitoire. Nous présentons dans ce papier uniquement certains résultats concernant l'évolution de la perméabilité au gaz et des propriétés mécaniques des bétons avec l'élévation de température. Les données relatives aux autres types d'essai sont librement consultables dans le mémoire de thèse (Mindegua, 2009), téléchargeable sur internet.

La seconde partie de l'étude s'est plus focalisée sur l'étude des risques d'instabilité thermique des bétons. A partir de résultats de mesure de pression de gaz, de température et de perte de masse (réalisés sur un banc expérimental spécialement conçu au CSTB), nous pouvons analyser en détail le processus thermo-hydrique prenant place au sein du béton. Différentes sollicitations thermiques ont été choisies pour nous permettre de «jouer» sur le processus thermomécanique : d'un chauffage très lent (1°C/min), en passant par la courbe ISO (800°C en 20 minutes) jusqu'à la courbe Hydrocarbure Majorée (1300 °C en 20 minutes). L'observation de l'instabilité thermique et sa caractérisation (profondeur d'éclatement, taille des écailles, volume

Dosage (kg)	B40	B40F2	B40SC	B40SC_F2	B60	B60F2
Ciment CEM II/A-LL 42.5 R PM-CP2	350	350	350	350	550	550
Gravillon 8/12.5 calcaire	330	330			330	330
Gravillon 12.5/20 calcaire	720	720			720	720
Gravillon 4/20 silico-calcaire			1050	1050		
Sable 0/2	845	845	845	845	845	845
Eau	188	188	188	188	165	165
Adjuvant (% par masse de ciment)	1	1.37	1.5	2	3	2
Fibres de polypropylène monofilament		2		2		2
Rapport E/C	0.54	0.54	0.54	0.54	0.30	0.30

Tableau 2 : récapitulatif des compositions des bétons de l'étude.

éjecté...) nous permet d'analyser l'influence de toute une palette de paramètres (nature des granulats, dosage en fibres, compacité des bétons, état hydrique initial) sur le risque d'instabilité thermique du matériau.

Les modes opératoires des différents essais entrepris sont synthétisés dans les paragraphes suivants. Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à consulter (Mindegua, 2009).

2.2.1. Mesure de la perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz des bétons a été mesurée par l'intermédiaire d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU. Le mode opératoire s'inspire des recommandations de l'AFREM (AFREM, 1997) et consiste à mesurer le débit de gaz (di-azote) percolant au travers d'un disque de béton de diamètre 150 mm et d'épaisseur 50 mm. Pour chaque mesure, deux niveaux de pression de gaz sont appliqués afin de pouvoir déterminer la perméabilité intrinsèque du matériau selon l'approche de Klinkenberg (Klinkenberg, 1941).

L'évolution de la perméabilité au gaz des bétons avec la température est estimée après application des mêmes cycles thermiques que lors des essais de porosité à l'eau. Un cycle thermique à 600 °C est également appliqué lors des essais de perméabilité (durée du palier de stabilisation : 6 heures).

2.2.2. Mesure des propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques à haute température ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques (diamètre 104 mm, hauteur 300 mm) placées dans l'enceinte d'un four électrique cylindrique. Un système innovant de mesure des déformations dans les deux directions de l'éprouvette (longitudinale et transversale) équipe le four. L'ensemble du dispositif peut être placé entre les plateaux d'une presse hydraulique, ce qui permet d'effectuer les mesures à haute température. Plus de détails sur le dispositif expérimental sont présentés dans (Hager, 2004) et (Mindegua *et al.*, 2007).

Un tel dispositif nous a permis de mesurer les courbes de dilatation thermique des deux bétons ainsi que leurs courbes de contrainte / déformation sous compression uniaxiale à température ambiante et à 600 °C. Ces dernières courbes (non présentées dans ce papier) nous permettent de déterminer la résistance en compression et le module d'élasticité du matériau. Des essais de compression après refroidissement ont également été réalisés, nous permettant de juger des performances mécaniques résiduelles des bétons testés.

2.2.3. Caractérisation thermo-hydraulique à petite échelle

Nous avons utilisé un dispositif expérimental développé au CSTB (Kalifa *et al.*, 2001), dont le but est de caractériser le champ de température et de pressions de gaz dans une éprouvette de béton lors d'un chauffage transitoire. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques (300 × 300 × 120 mm³) sollicitées en température sur une face. Lors du coulage, les éprouvettes sont équipées de 5 sondes permettant de mesurer les pressions et les températures simultanément et au même endroit. Les sondes sont placées à 2, 10, 20, 30, 40, et 50 mm de la surface chauffée (la sonde placée à 2 mm permet uniquement de mesurer la

température proche de la surface exposée). La sollicitation thermique est assurée par un élément radiant en céramique couvrant toute la surface de l'éprouvette et situé à 3 cm au-dessus de celle-ci. Les 4 faces latérales de l'éprouvette en béton sont isolées thermiquement par des blocs en céramique poreuse, le flux de chaleur peut donc être considéré comme unidimensionnel. L'éprouvette repose sur un trépied, qui lui-même repose sur une balance, ce qui permet d'enregistrer sa perte de masse pendant l'essai et donc la quantité d'eau perdue durant le chauffage. Un bac de rétention est placé entre la balance et l'éprouvette pour éviter toutes perturbations de la mesure par des retombées d'eau ou de matière. Pour nos essais, le panneau radiant est commandé jusqu'à ce que la température mesurée à sa proximité atteigne 600°C. Au bout de 3 min de chauffage, le thermocouple dans le panneau atteint la température de 560 °C. La puissance du panneau est ensuite maintenue constante pendant 6 heures de façon à conserver cette température de 600 °C. Après ce palier de stabilisation de la température, l'alimentation du panneau est coupée, laissant l'éprouvette se refroidir naturellement. La figure 1 présente l'évolution de la température à proximité du panneau radiant et à 2 mm de la surface exposée dans l'éprouvette de béton. Comparativement à la sollicitation thermique créée dans le béton par un feu ISO (voir plus loin au § 2.2.4), le chauffage réalisé lors des essais à petite échelle peut être considéré comme relativement lent pour le béton (voir Figure 2).

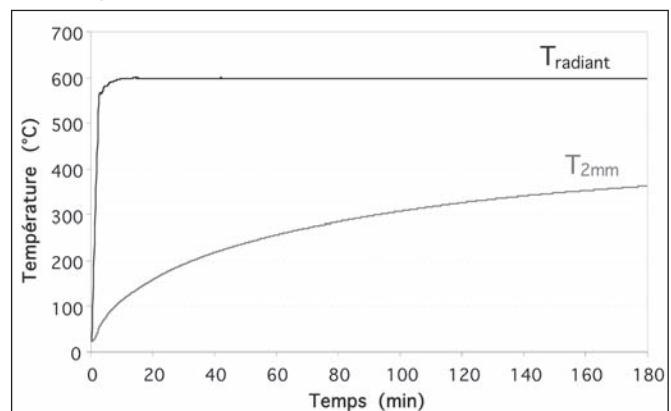


Figure 2 : Evolution de la température mesurée dans le panneau radiant et à 2 mm de la surface exposée dans le béton lors d'un essai à petite échelle.

2.2.4. Comportement sous feu ISO

Des dallettes de béton (dimensions L 700 x 1 600 x ep 150 mm³) ont été placés sur un four horizontal à brûleurs (gaz d'alimentation : propane). La surface exposée au feu des dallettes est de 600 x 420 mm². Les dallettes sont simplement posées sur deux de leurs côtés, les deux autres côtés restant libres. Les faces latérales de la dallette sont isolées par de la laine de roche afin d'obtenir un chauffage le plus unidimensionnel possible. Les dallettes sont équipées avant coulage de sondes de mesure de pression et de température identiques à celles utilisées lors des essais à petite échelle (voir § 2.2.3).

Le scénario thermique retenu est celui de la courbe ISO834, définie par l'expression [1] :

$$T_{ISO} = 345 \cdot \log(8t + 1) + T_0 \quad [1]$$

Avec T_{ISO} la température des gaz dans le four en ($^{\circ}\text{C}$), T_0 la température initiale dans le four en ($^{\circ}\text{C}$) et t le temps en (min). La Figure 3 présente l'évolution de la température mesurée dans l'enceinte du four lors des essais ISO ainsi que la température mesurée à 10 mm de la surface exposée dans la dallette de béton. A titre de comparaison, nous représentons également la température mesurée à 10 mm dans le béton lors de l'essai à petite échelle (§ 2.2.3).

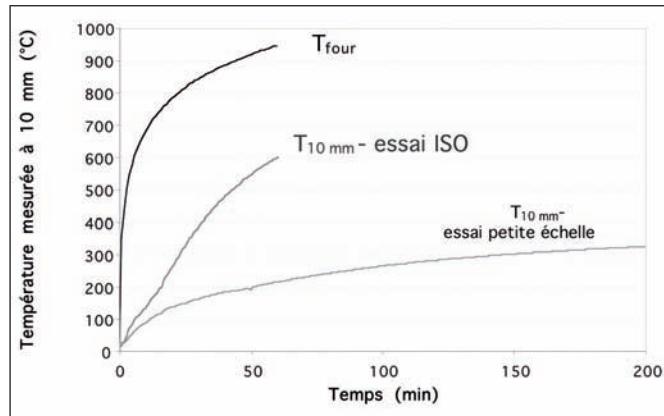


Figure 3 : Evolution de la température mesurée dans le four et à 10 mm de la surface exposée dans le béton lors d'un essai ISO. Comparaison avec la température mesurée à 10 mm dans le béton lors d'un essai à petite échelle.

3. RÉSULTATS

3.1. Perméabilité au gaz

La Figure 4 présente l'évolution de la perméabilité au gaz relative des bétons en fonction de la température. Cette dernière est définie comme étant le rapport entre la perméabilité déterminée à haute température par rapport à celle déterminée à l'état de référence (80 $^{\circ}\text{C}$).

Pour tous les bétons, nous observons une augmentation plus ou moins importante de la perméabilité intrinsèque avec l'élévation de la température. Dans un premier temps, nous pouvons voir que la perméabilité des bétons est peu affectée par le chauffage jusqu'à la température de 120 $^{\circ}\text{C}$, elle augmente essentiellement à partir de 250 $^{\circ}\text{C}$.

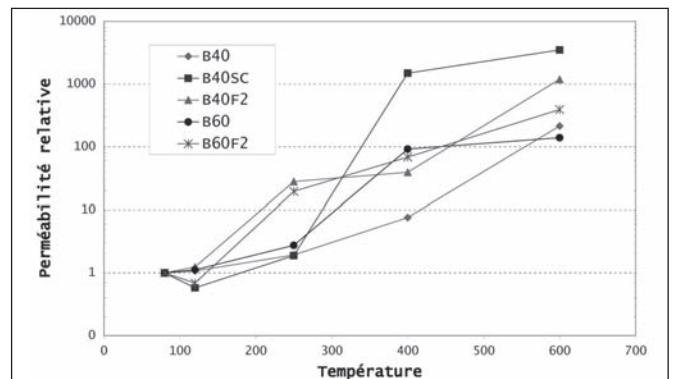


Figure 4 : évolution de la perméabilité intrinsèque relative des bétons en fonction de la température.

L'examen de la Figure 4 nous conduit aux observations suivantes :

- la perméabilité intrinsèque du B40 et du B60 sont affectées de la même façon par la température exceptée à la température de 250 $^{\circ}\text{C}$ où l'augmentation de la perméabilité est plus notable dans le cas du B60 (l'augmentation est environ dix fois plus importante que celle du B40). Nous attribuons ce phénomène à une plus forte dégradation de la microstructure du béton le plus dense du fait du chauffage,
- l'effet de la température sur la perméabilité intrinsèque du B40 et du B40SC est identique jusqu'à la température de 250 $^{\circ}\text{C}$. Au-delà, l'effet de la température n'est plus du tout le même pour les deux bétons : à 400 $^{\circ}\text{C}$, la perméabilité intrinsèque du B40SC est environ 1500 fois plus élevée que celle déterminée à l'état initial alors que celle du B40 est seulement 8 fois plus élevée qu'à l'état initial. Nous expliquons cette différence de comportement par la nature des granulats utilisés dans la confection du béton.

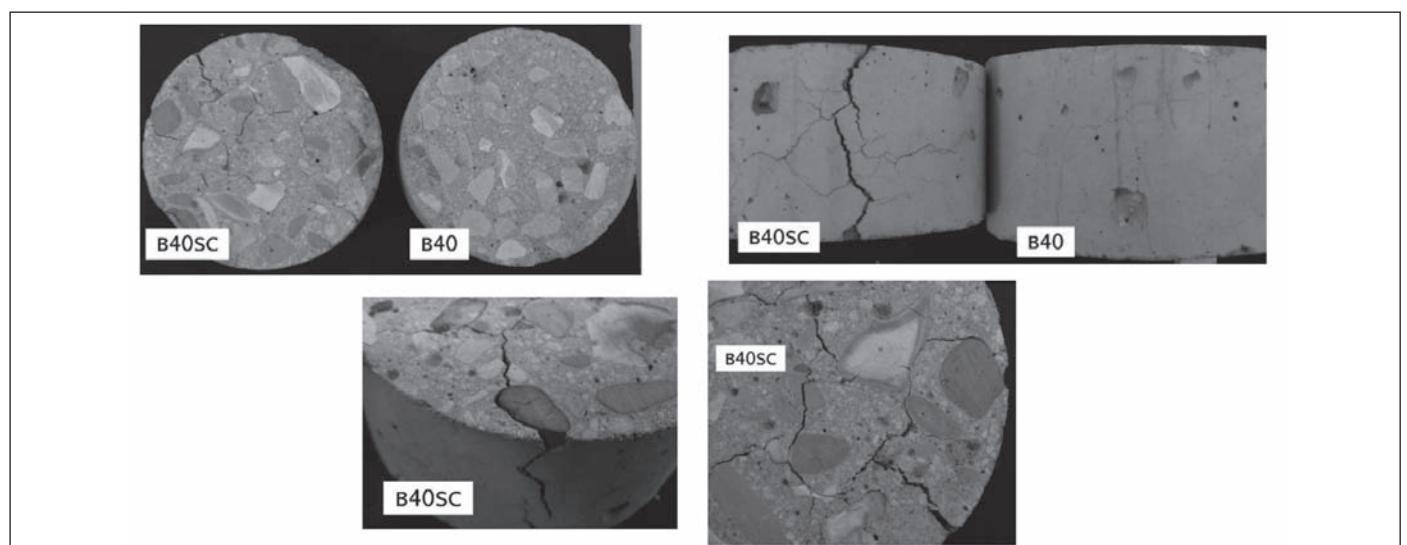


Figure 5 : observations visuelles des éprouvettes de mesure de perméabilité après traitement thermique à 400 $^{\circ}\text{C}$, mise en évidence de l'influence de la nature des granulats sur la fissuration du matériau : en haut comparaison entre le B40SC et le B40. En bas, détails sur l'éprouvette de B40SC, forte localisation de fissures autour des silex.

En effet, nous observons dans le cas du B40SC la création d'importantes fissures sous l'effet du chauffage, plus particulièrement autour des granulats siliceux (silex). Les fissures observées dans le B40SC (voir Figure 5) sont autant de chemins de percolation aisés pour le gaz, ce qui explique les valeurs élevées de perméabilités intrinsèque déterminées,

— la perméabilité intrinsèque des deux bétons fibrés (B40F2 et B60F2) est affectée de façon quasiment identique avec la température. L'effet des fibres de polypropylène est particulièrement visible à partir de 250 °C, c'est-à-dire après leur fusion (estimée aux alentours de 170 °C). L'ajout de fibres (en l'occurrence 2 kg par m³ de béton) augmente la perméabilité intrinsèque du béton une fois la fusion des fibres effectuée. Pour les deux bétons, l'effet de l'ajout de fibres est identique : il permet d'augmenter d'un rapport estimé à 7 la perméabilité intrinsèque des bétons. Ce phénomène est attribué d'une part à l'augmentation de la porosité des bétons due à la fusion des fibres et d'autre part par la création possible de fissures autour des fibres, permettant de créer un réseau connecté.

3.2. Propriétés mécaniques – Dilatation thermique

La Figure 6 présente les courbes de dilatation thermique des bétons de l'étude dans la direction longitudinale de l'éprouvette.

Tous les bétons de l'étude ont un comportement dilatant avec l'élévation de la température. Cela semble souligner le rôle prépondérant des granulats dans la dilatation thermique des bétons (au détriment de la pâte de ciment durcie qui, quant à elle, se rétracte à partir de 150 °C, voir Hager 2004). Excepté le B40SC, tous les bétons présentent une dilatation thermique quasi linéaire jusqu'à 570 °C (pente, ou coefficient de dilata-

tion thermique, comprise entre 1 10⁻⁵ et 1.5 10⁻⁵ K⁻¹). A partir de cette température, la dilatation thermique des bétons présente une accélération pouvant correspondre à la transformation du quartz (qui s'accompagne d'un fort gonflement du minéral) potentiellement présent dans le sable. Le B40SC présente le même comportement que les autres bétons jusqu'à environ 370 °C, température à partir de laquelle ce béton présente une très forte accélération de sa dilatation thermique. À 600 °C, la dilatation thermique du B40SC est deux fois plus élevée que celle des autres bétons. Ce comportement est attribué à la présence des granulats siliceux dans la composition du B40SC, et plus particulièrement aux silex, ces derniers ayant un coefficient de dilatation thermique élevée (Bazant and Kaplan 1996). Une autre conséquence de la dilatation thermique élevée du B40SC est le fait d'obtenir, après refroidissement, des déformations résiduelles environ trois fois plus élevées que pour les autres bétons. Visuellement, ce comportement se manifeste par une fissuration très importante de l'éprouvette de B40SC à la suite du cycle de chauffage, comme nous pouvons le voir sur la Figure 7 (l'éprouvette de B40 présente très peu de fissures visibles à l'œil nu après un tel essai). Ces observations sont à mettre en parallèle avec les résultats présentés au § 3.1 qui montrent une forte augmentation de la perméabilité du B40SC entre 300 et 400 °C.

3.3. Caractérisation thermo-hydrique à petite échelle

L'influence de différents paramètres sur les transferts thermo-hydriques au sein du béton, et en particulier la génération de pression de vapeur dans les pores du matériau, est analysée dans ce paragraphe.

La Figure 8 présente l'allure des pressions de gaz générées dans les différents bétons pour un type de chauffage identique (cf § 2.2.3).

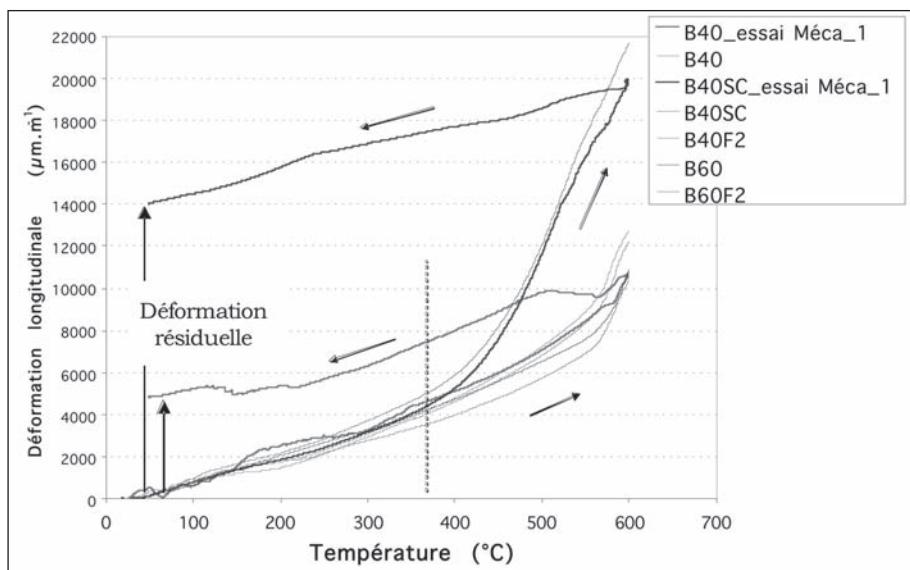


Figure 6 : courbes de déformation thermique libre dans la direction longitudinale des bétons de l'étude. La phase de refroidissement a été enregistrée pour le B40 et le B40SC.



Figure 7 : cliché d'une éprouvette de B40SC à la suite d'un cycle de chauffage / refroidissement.

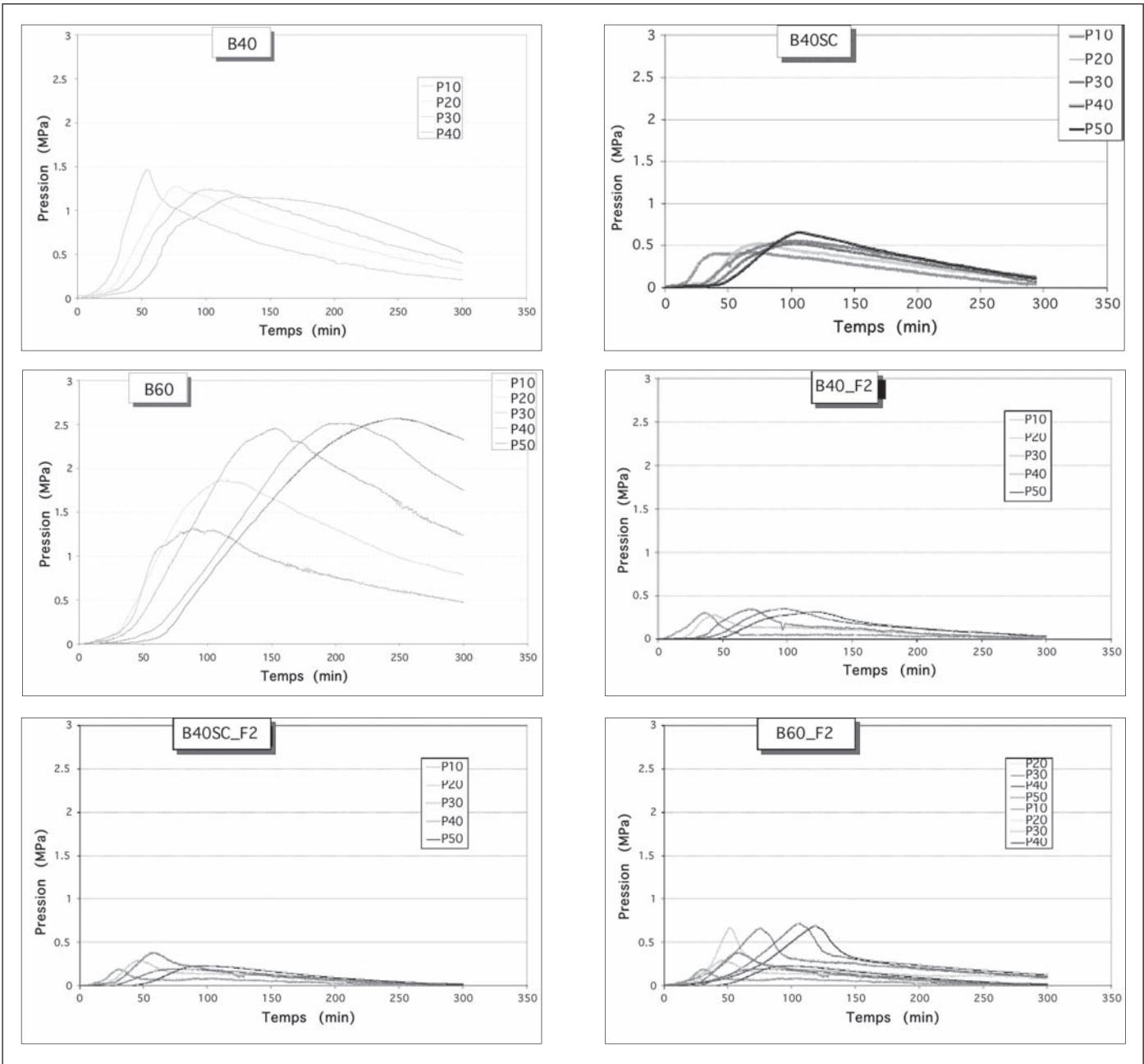


Figure 8 : évolution temporelle des pressions de vapeur d'eau au sein de différents bétons au cours d'un même type de chauffage.

La Figure 9 présente l'allure des pressions de gaz générées dans le B40 et le B60 en fonction du type de chauffage employé : un essai standard est réalisé avec une vitesse de chauffage relativement lente (courbe de la figure 1) et un second essai est réalisé avec une vitesse de chauffage plus élevée, plus proche des conditions réelles d'un incendie.

Les principales observations sont les suivantes :

- Les pressions de vapeur sont plus élevées dans les bétons les plus compacts (perméabilité et porosité plus faibles et saturation plus importante) : il s'agit ici d'un résultat classique auquel l'on pouvait s'attendre.
- L'augmentation de la sévérité de la sollicitation thermique, en termes de vitesse de chauffage et de température atteinte, permet de réduire fortement les pressions de

vapeur. En effet, Dans le cas du chauffage rapide, nous observons après essai un réseau de fissures sur la face exposée de l'éprouvette ainsi que de larges fissures verticales (ouverture de l'ordre de 1 mm) sur les faces latérales (Figure 10). D'importantes traces d'humidité sont également observées autour des fissures, témoignant de la création de chemins de passage privilégiés aux fluides lors du chauffage (il est important de noter qu'après les essais sous chauffage relativement lent, aucune fissure de ce type n'est observée sur l'éprouvette). Autrement dit, sous l'effet du chauffage rapide, la perméabilité de l'éprouvette aux fluides est fortement augmentée, réduisant ainsi les pressions générées et facilitant le transport des fluides. L'augmentation de la perméabilité du matériau est attribuée à un endommagement important de l'éprouvette lorsque celle-ci est soumise à un chauffage rapide.

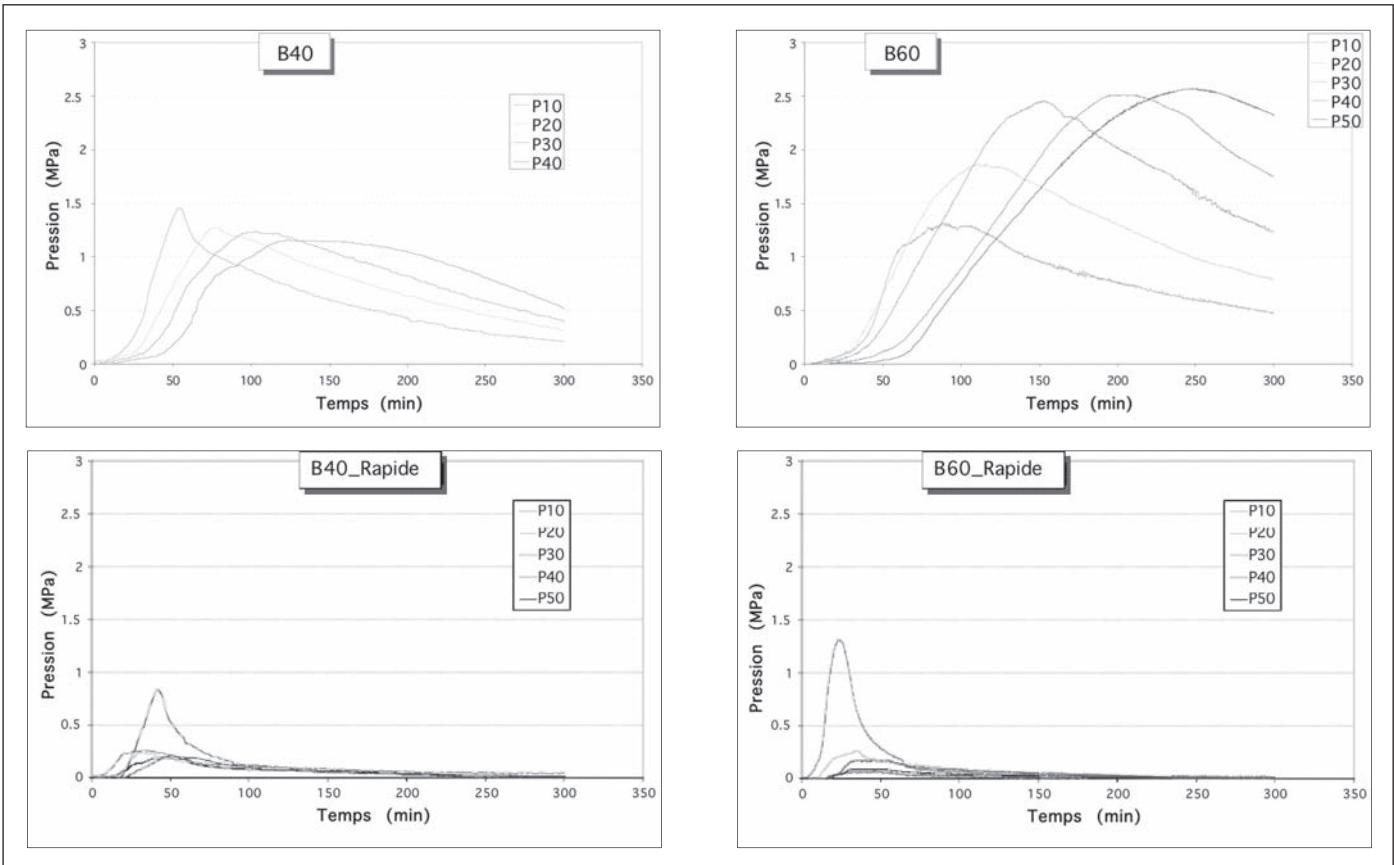


Figure 9 : évolution temporelle des pressions de vapeur d'eau au sein du B40 et du B60 en fonction de la sévérité de la sollicitation thermique. En haut : chauffage relativement lent ; en bas : chauffage plus rapide.

- À l'échelle mesoscopique, la présence de granulats siliceux (et surtout de silex) permet de réduire fortement les pressions de vapeur (fortes incompatibilités de déforma-

tion entre la pâte et les granulats) : malgré des propriétés très proches à température ambiante (propriétés mécaniques, porosité et perméabilité), les pressions générées

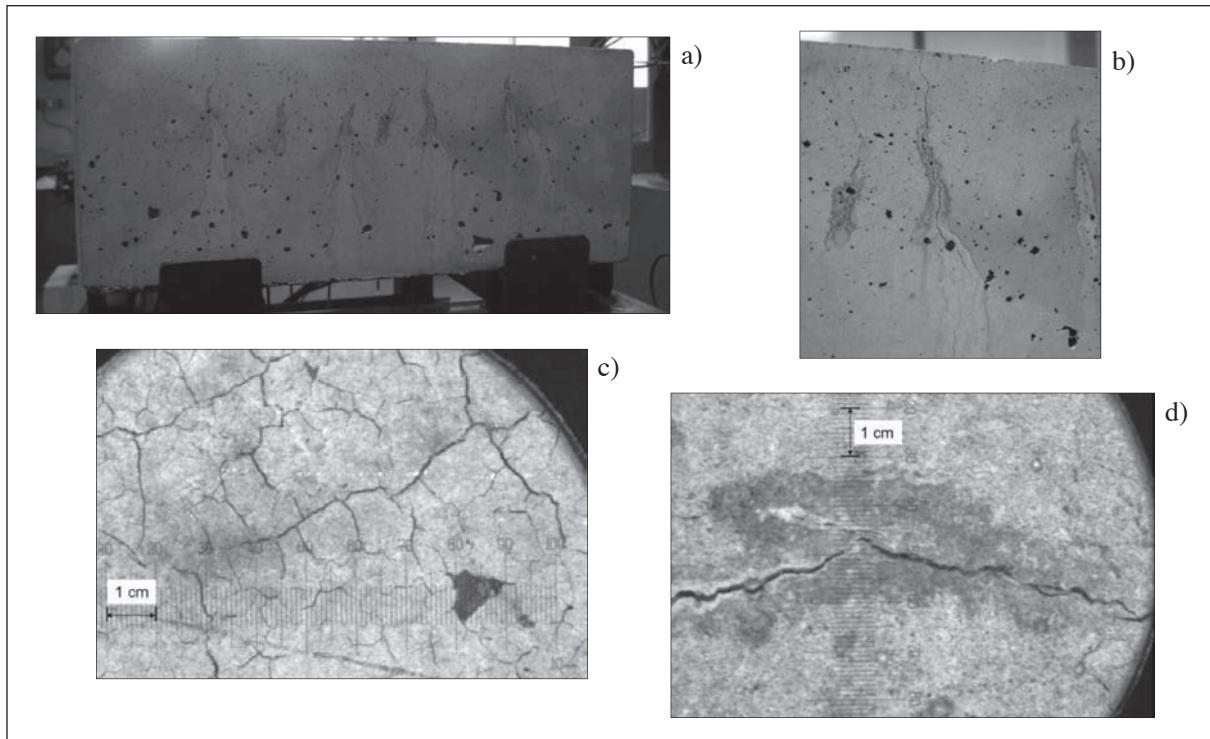


Figure 10 : clichés de l'éprouvette de B40 après le chauffage rapide. a) et b) : vue des faces latérales avec mise en évidence des fissures et des traces d'humidité. Clichés au microscope optique : c) de la face exposée et d) d'une fissure sur l'une des faces latérales.

dans le B40SC sont de 2 à 3 fois plus faibles que celles générées dans le B40. De la même façon que pour expliquer l'influence de la sollicitation thermique, nous attribuons cette différence de comportement à l'endommagement important de l'éprouvette de B40SC par rapport à celle du B40. En effet, après l'essai sous chauffage modéré, l'éprouvette de B40SC présente un type de fissuration similaire aux éprouvettes exposées au chauffage rapide (Figure 10) : de nombreuses fissures apparaissent en surface exposée ainsi que des fissures verticales sur les faces latérales de l'éprouvette. Des traces d'humidité sont également observées autour des fissures. Nous pouvons donc penser que les fissures créées constituent un passage privilégié pour le transport des fluides vers l'extérieur de l'éprouvette, ce qui peut avoir pour conséquence d'empêcher la génération de fortes pressions de vapeur. De plus, les mesures de perméabilité au gaz sur disques chauffés (§ 3.1) nous montrent que le B40SC a une perméabilité beaucoup plus élevée que celle du B40, et ceci dès 250 °C. Ceci permet d'expliquer l'écart important entre les pressions générées dans les deux bétons.

- La présence de fibres de polypropylène permet de réduire fortement les pressions de vapeur (augmentation de la perméabilité), excepté pour le béton de granulats silico-calcaires. Concernant le B40 et le B60, l'ajout de 2 kg.m⁻³ de fibres de polypropylène permet de diviser par plus de trois

les pressions de vapeur. Cela est possible grâce à l'augmentation de la perméabilité des bétons fibrés au delà de 170 °C, température de fusion des fibres (pour rappel, à 250 °C, la perméabilité au gaz des bétons fibrés est 7 fois plus élevée que celle mesurée sur bétons non fibrés, voir § 3.1). L'effet des fibres est moins évident pour le B40SC. En effet, les pressions de vapeur du béton non fibré sont déjà très faibles du fait de sa très grande perméabilité.

3.4. Comportement sous feu ISO

L'analyse du comportement des bétons sous feu ISO consiste dans un premier temps à caractériser le risque d'instabilité thermique du matériau. Dans un second temps, le comportement thermo-hydrique du béton sous feu ISO est étudié.

3.4.1. Caractéristiques de l'instabilité thermique

La Figure 11 présente les cartographies d'écaillage des surfaces exposées au feu ISO des dalles des différents bétons de l'étude. Nous portons également sur cette figure, le volume moyen d'écailles éjectées lors de l'exposition au feu des corps d'épreuve (2 essais ont été réalisés par type de béton). A noter que certaines dalles ont fait l'objet d'un pré-séchage en étuve à 80 °C. Ces éprouvettes sont ainsi supposées ne plus contenir d'eau libre.

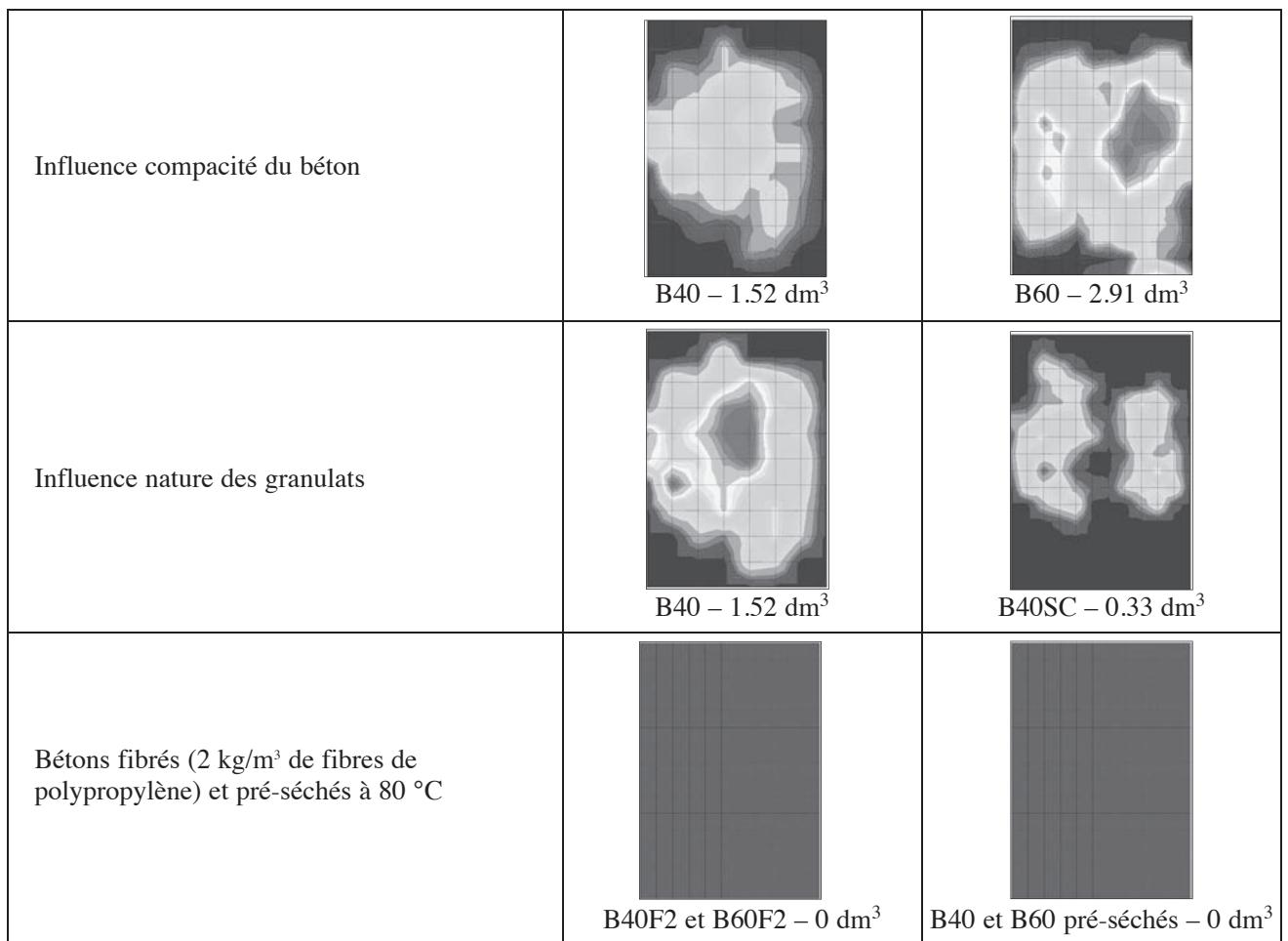


Figure 11 : cartographies d'écaillage des surfaces exposées au feu des dalles et volume d'écailles éjectées.

Les principales observations des essais au feu ISO sont les suivantes :

- Les dommages causés par l'instabilité thermique du béton sont d'autant plus importants que le matériau est compact.
- Les bétons composés de granulats silico-calcaires avec silex présentent un risque d'instabilité thermique moins élevé que les bétons composés de granulats uniquement calcaires.
- L'efficacité des fibres de polypropylène est vérifiée sous feu ISO, quel que soit le type de béton.
- Le pré-séchage du matériau à 80 °C annule totalement les risques d'instabilité thermique, mettant en évidence le rôle décisif de l'eau libre dans le phénomène.

L'information primordiale de ces essais est que le risque d'instabilité thermique du béton est intimement lié à ses propriétés de transfert thermo-hydrique : une forte augmentation de la perméabilité du matériau avec la température réduit le risque d'instabilité thermique ; il en est de même avec la teneur en eau libre du matériau.

3.4.2. Pressions de gaz sous feu ISO

La Figure 12 présente le profil des pressions de vapeur d'eau maximales mesurées dans le béton durant tous les essais au feu ISO réalisés sur dallettes.

Pour tous les essais soumis au feu ISO, les pressions mesurées ne dépassent pas 0.50 MPa dans les trois premiers centimètres de la dallette, zone directement concernée par l'instabilité thermique du béton. Ces pressions sont relativement faibles par rapport aux résultats obtenus lors des essais à petite échelle et sous feu relativement lent (§ 3.3). Nous pouvons expliquer cet important écart de pression

par la sévérité de la sollicitation thermique qu'engendre un feu ISO dans le béton. Pour les mêmes raisons évoquées au § 3.3 pour expliquer l'influence de la sollicitation thermique sur le comportement thermo-hydrique du béton, nous pouvons penser que plus le chauffage est sévère et plus le béton est endommagé. Par conséquent, la perméabilité du matériau est fortement augmentée, facilitant ainsi le transport des fluides et ne conduisant donc pas à la génération d'importantes pressions de vapeur.

Le fait que l'instabilité thermique du béton s'observe malgré des pressions de vapeur relativement faibles constitue une limite à l'explication des instabilités par l'approche thermo-hydrique.

De plus, les observations suivantes ont pu également être faites (plus de détails dans (Mindegua, 2009)) :

- Aucune dépendance n'est clairement observée entre l'amplitude des pressions de vapeur et la profondeur de béton éjecté.
- Les pressions mesurées dans les bétons compacts, pour lesquels l'instabilité thermique est plus prononcée, sont plus faibles que dans les bétons moins endommagés par l'instabilité thermique.
- Sous feu ISO, les pressions de vapeur mesurées dans le béton ne semblent pas dépendre de la nature des granulats. La manifestation de l'instabilité thermique est quant à elle dépendante de la nature des granulats.
- L'effet de réduction des pressions de vapeur par la présence de fibres de polypropylène n'est pas visible sous feu ISO.

Autrement dit, aucun lien direct n'est clairement mis en évidence entre le risque d'instabilité thermique des bétons et la génération des pressions de vapeur d'eau.

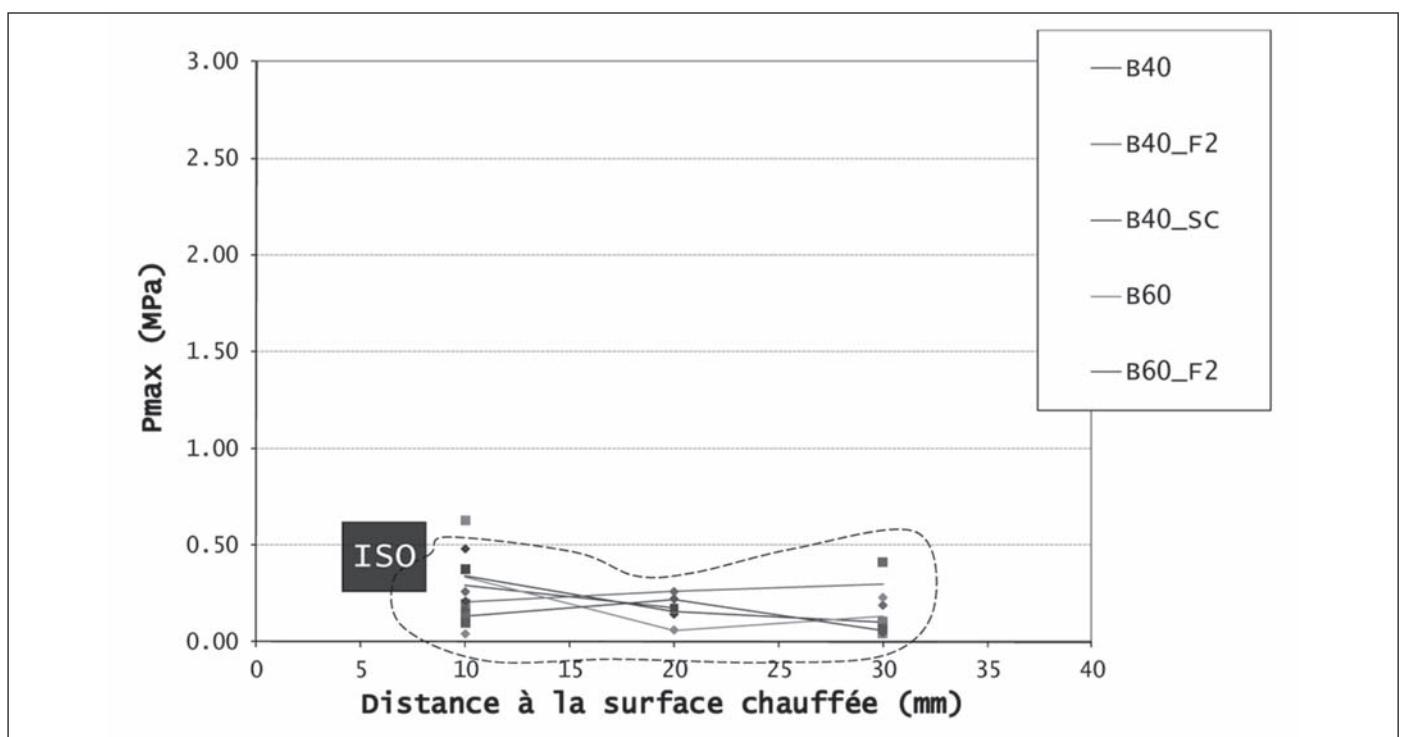


Figure 12 : profils des pressions de vapeur d'eau mesurées dans les bétons lors des essais au feu ISO.

4. DISCUSSION ET NOUVELLES VOIES DE RÉFLEXION

4.1. Critique à l'égard des mécanismes d'explication courants à l'instabilité thermique des bétons

La Figure 13 présente l'ensemble des mesures de pressions de vapeur de l'étude avec une mise en évidence des essais pour lesquels l'instabilité thermique du béton est constatée.

Les différents essais ont permis de montrer que les pressions générées dans des configurations présentant des risques d'instabilité thermique sont relativement faibles (essais ISO). A l'inverse, des pressions de vapeur importantes ont été mesurées pour certaines configurations d'essai pour lesquelles l'instabilité thermique n'est pas constatée (certains essais ISO et l'ensemble des essais réalisés à petite échelle et sous chauffage relativement lent). Par ailleurs, nous avons clairement mis en évidence un manque de corrélation entre la sévérité de l'instabilité thermique et le niveau de pressions de vapeur mesurées.

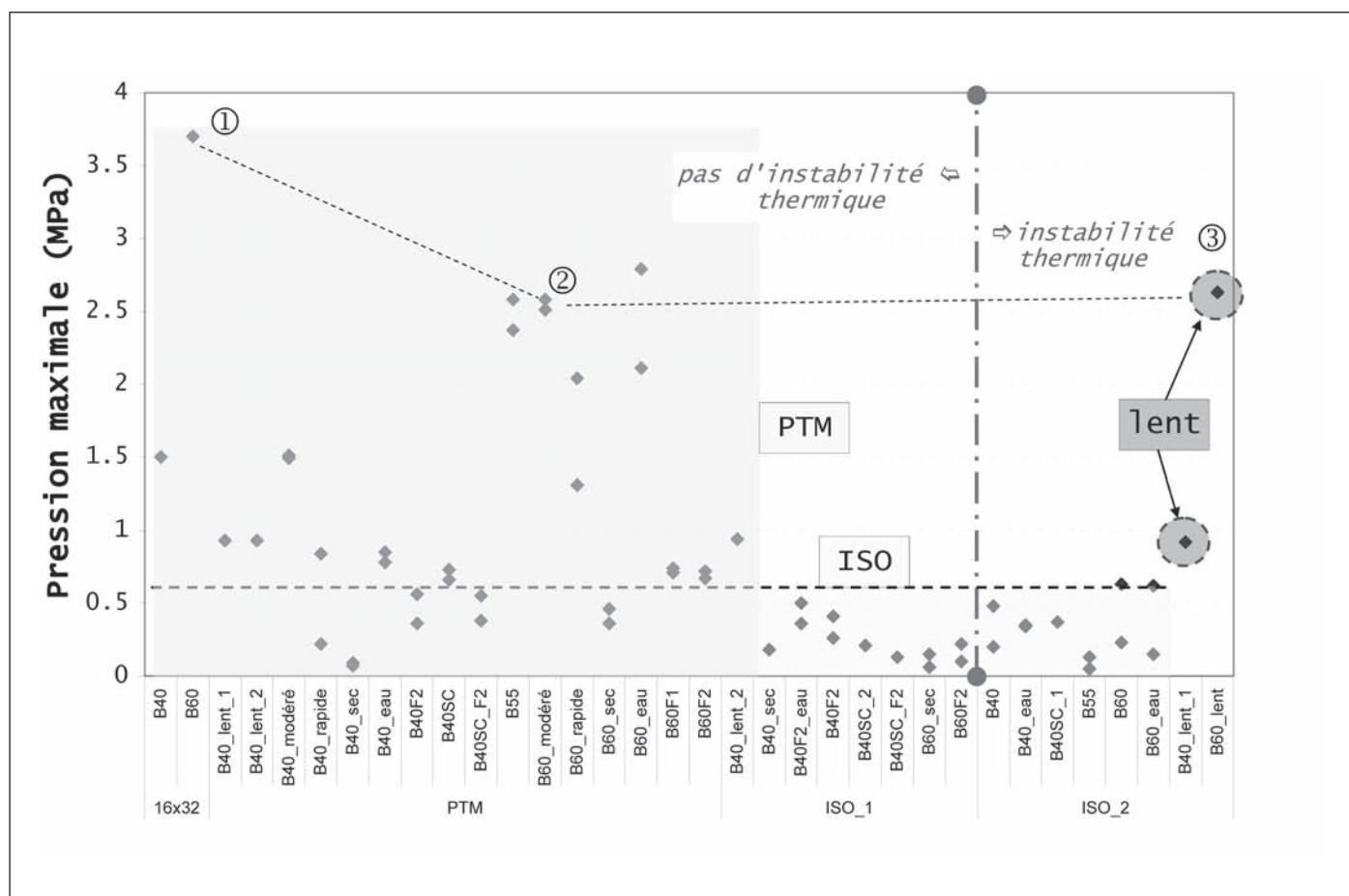
Pour toutes ces raisons, il apparaît que les pressions de vapeur ne semblent pas être la cause unique de l'instabilité thermique des bétons.

D'autre part, le processus thermomécanique ne permet pas de prendre en compte l'influence de l'état hydrique du béton sur son risque d'instabilité thermique. Or il a clairement été montré que le fait de pré-sécher le matériau à 80 °C, autrement dit le fait d'ôter toute l'eau libre du réseau poreux, annule totalement le risque d'instabilité thermique. A gradient thermique constant, l'état hydrique du matériau est donc décisif dans le risque d'instabilité thermique. Le processus thermomécanique ne permet pas non plus d'expliquer l'efficacité des fibres de polypropylène.

Pour toutes ces raisons, il apparaît que les contraintes de compression en surface chauffée générées par le processus thermomécanique ne semblent pas être non plus la cause unique de l'instabilité thermique des bétons.

4.2. Théorie de la « zone critique »

Nous venons de montrer que ni les pressions de vapeur, ni les contraintes de compression semblaient à même d'expliquer à elles seules les risques d'instabilité thermique des bétons. Par ailleurs, l'un des principaux résultats de nos travaux est que l'état hydrique du matériau est décisif dans l'apparition de l'instabilité ; nous devons donc proposer de nouvelles voies d'investigation en accord avec ce résultat primordial.



La voie d'investigation proposée par (Jansson 2007) nous semble être une base pertinente pour l'analyse des instabilités thermiques du béton. D'après cet auteur, l'instabilité thermique d'un élément de béton repose sur l'existence d'une zone critique. La zone critique est une zone de béton à teneur en eau liquide élevée, voire une zone saturée d'eau, qui se situerait à quelques centimètres de la surface exposée au feu du béton, soit la zone couramment concernée par le risque d'instabilité thermique. Toujours selon cet auteur, l'instabilité thermique du béton situé à proximité de cette zone critique n'est pas due à la génération des pressions de vapeur d'eau (contrairement à l'idée initiale d'Harmathy) mais pourrait être provoquée par :

- La forte dégradation des propriétés mécaniques du béton saturé en eau (Lankard, Birkimer et al. 1971).
- La dilatation thermique élevée de l'eau liquide qui engendre, du fait de son caractère quasi-incompressible, de fortes contraintes de traction dans le matériau.
- Le ralentissement de la diffusion de la chaleur due à la consommation importante d'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. Ce ralentissement de température peut localement perturber le champ de contraintes à proximité de la zone de critique par augmentation du gradient thermique.

D'un point de vue expérimental, nous rappelons que la per-

tinence de ces hypothèses n'est toujours pas vérifiée. En particulier, les techniques de mesure de teneur en eau à haute température ne permettent toujours pas d'observer avec précision la création d'une éventuelle zone saturée dans le béton.

La théorie de zone critique permettrait en particulier d'expliquer l'absence de risque d'instabilité thermique pour les configurations d'essai suivantes :

- Bétons avec fibres de polypropylène,
- Bétons avec granulats silico-calcaires (et l'endommagement thermo-mécanique important qu'ils induisent avec l'élévation de température),
- Bétons pré-séchés (ne contenant pas d'eau libre).

Pour ces différentes configurations d'essai, les conditions nécessaires à la création d'une zone critique à forte teneur en eau ne sont pas réunies. Dans le cas des bétons pré-séchés, il semble évident que la teneur en eau initiale des pores ne permet pas de saturer le matériau (sous réserve que l'eau provenant de la déshydratation des CSH ne permet pas non plus d'obtenir cette saturation). Dans le cas des bétons contenant des fibres de polypropylène et des granulats silico-calcaires (silex), c'est la forte augmentation de la perméabilité qui ne permet pas de constituer une zone critique. Ces hypothèses sont schématisées sur la Figure 14.

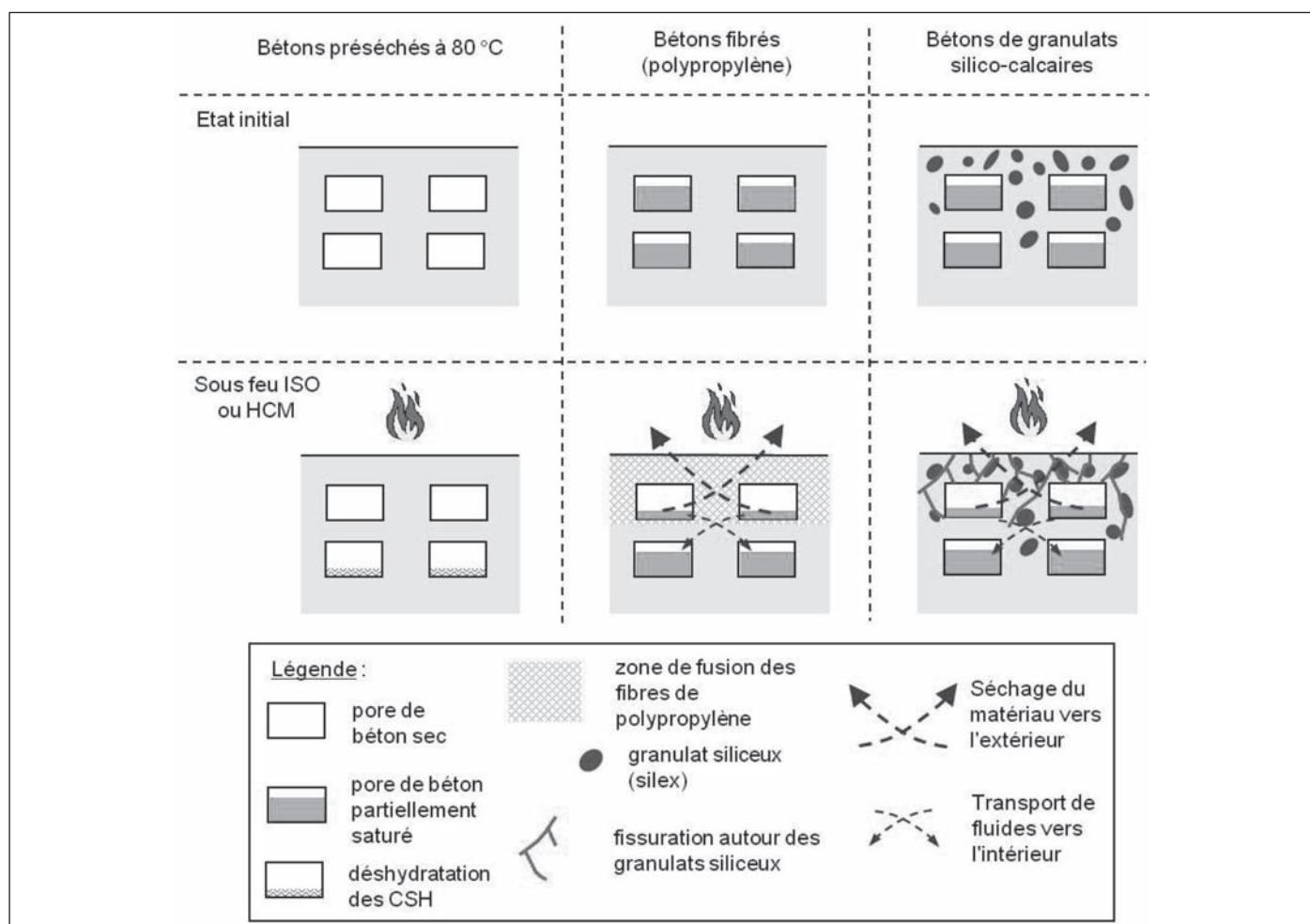


Figure 14 : représentation schématique de l'absence de création de zone critique dans les bétons pré-séchés à 80 °C, les bétons contenant des fibres de polypropylène et les bétons contenant des granulats silico-calcaires.

4.3. Proposition d'une nouvelle solution technologique

Il semble que les solutions vouées à annuler le risque d'instabilité thermique consistent à éviter de constituer les conditions nécessaires à la création d'une zone critique à forte teneur en eau (exemple du béton pré-séché) ou à évacuer l'eau liquide du matériau par une forte augmentation de la perméabilité (exemple des bétons contenant des fibres de polypropylène et des granulats silico-calcaires). Le premier but de l'essai présenté dans ce paragraphe est de créer une configuration pour laquelle l'eau liquide est évacuée des premiers centimètres du béton lors d'un chauffage sous feu ISO. Ceci doit nous permettre de juger de la pertinence de l'hypothèse de création d'une zone critique. De plus, une telle configuration d'essai peut constituer une voie de recherche vers des nouvelles solutions technologiques anti-instabilité thermique.

Notre proposition d'essai consiste ainsi à perforen plusieurs endroits la surface exposée d'un élément de béton. Les trous ainsi pratiqués dans l'élément de béton fonctionnent comme des drains, évacuant l'eau des pores proches de la surface exposée vers l'extérieur. Ce mécanisme est schématisé sur la Figure 15.

Un essai sur dallette perforée de B60 a été réalisé sous feu ISO. La surface de la dallette est divisée en trois zones :

- une zone de béton vierge (non perforée) repérée ② sur la Figure 16,
 - une zone de béton trouée (\varnothing 8 mm, profondeur 40 mm) sans isolant repérée ① sur la Figure 16,
 - une zone de béton trouée (\varnothing 8 mm, profondeur 40 mm) dont les trous sont garnis d'isolant performant à haute température (fibres de silice) repérée ③ sur la Figure 16.
- Le fait de garnir les trous d'isolant permet de ne pas engendrer de températures trop importantes en fond de cavité (sans toutefois gêner l'évacuation de l'eau).

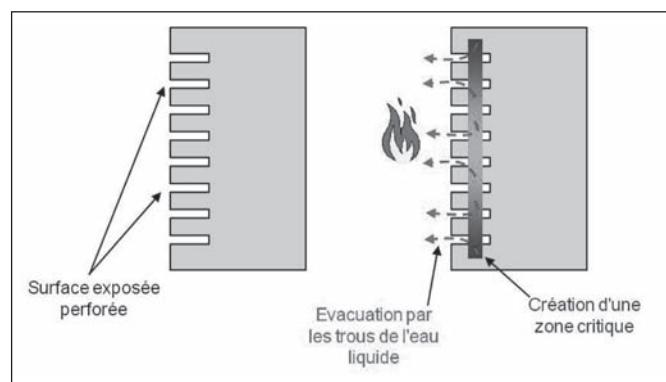


Figure 15 : représentation schématique du mécanisme proposé de la solution technologique proposée : évacuation par les trous en surface exposée de l'eau liquide responsable de la création d'une zone critique.

Nous présentons sur la Figure 17 la cartographie de béton éjecté durant l'essai réalisé sur la dallette perforée ainsi qu'un cliché de la face exposée. Nous n'observons pas d'instabilité thermique dans la zone correspondant aux trous garnis d'isolant, c'est-à-dire dans la zone où nous pouvons supposer que l'eau liquide est évacuée du béton lors du chauffage. Cette observation est en accord avec le mécanisme basé sur notre proposition de zone critique. Ce premier essai constitue également la base de nouvelles réflexions sur la recherche de solutions technologiques efficaces vis-à-vis des risques d'instabilité thermique des bétons.

Dans les 2 autres zones de la dallette (zone trouée sans isolant et zone de béton vierge), l'instabilité thermique se manifeste de la même façon que lors des essais réalisés sur dallettes non trouées. Nous pouvons penser que la zone trouée sans isolant induit un chauffage trop important du béton situé en fond de trou.

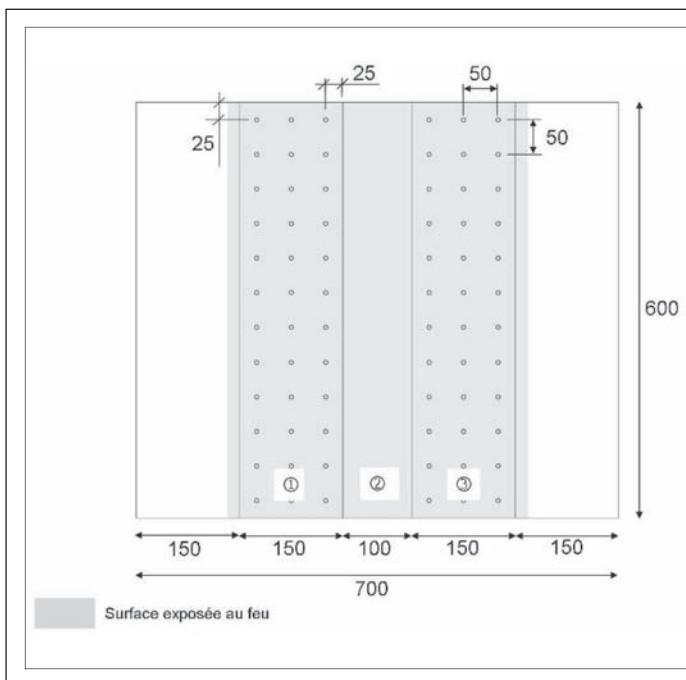
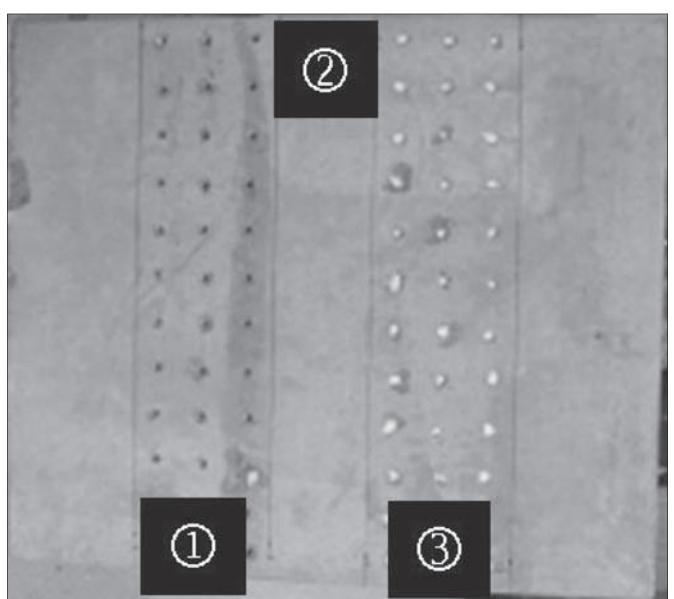


Figure 16 : schéma et cliché de la face exposée d'un dallette de B60. Zone ① : trous sans isolant, zone ② : béton vierge, zone ③ : trous garnis d'isolant.



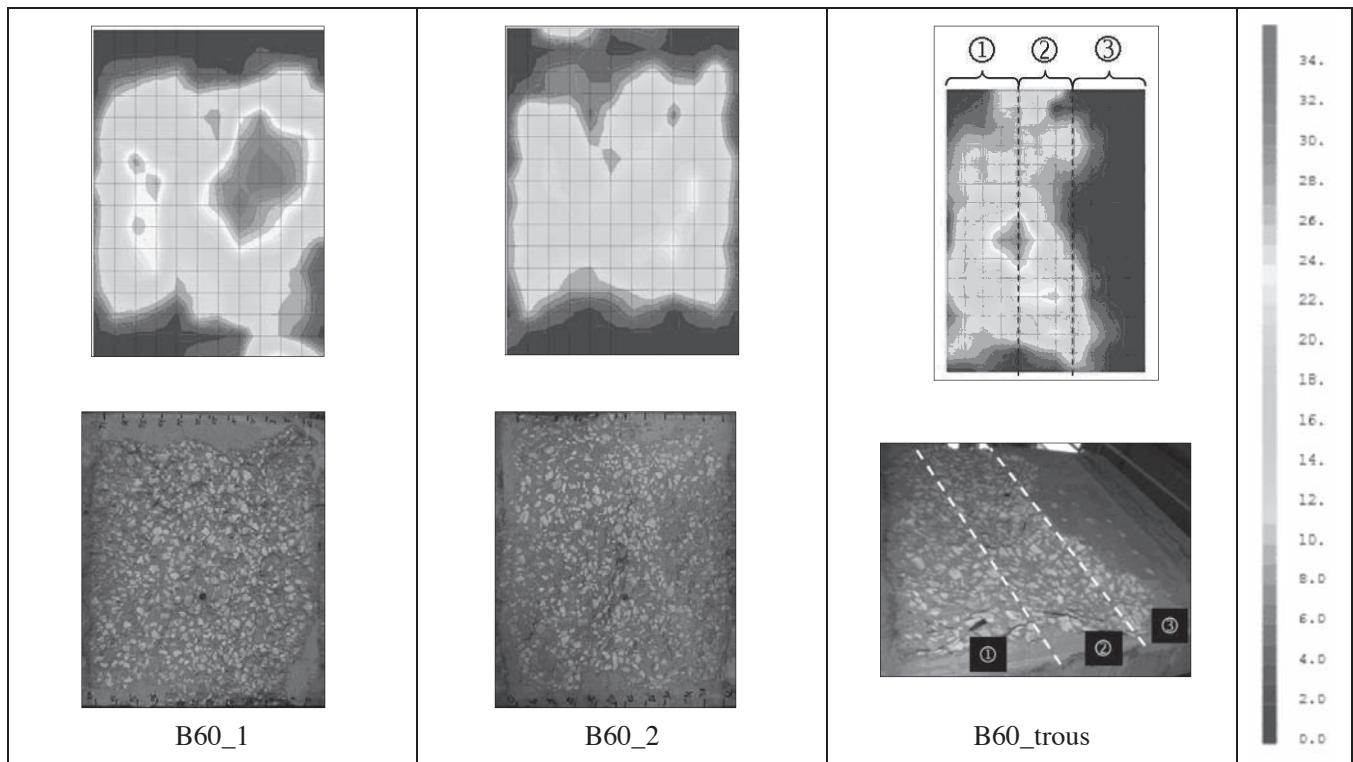


Figure 17 : clichés des faces exposées de dallettes de B60 et cartographies de béton éjecté après un essai sous feu ISO. À gauche et au milieu, dallettes normales. A droite, dallette perforée (Figure 16).

5. CONCLUSIONS

L'analyse des essais sous feu ISO, appuyée par la connaissance de l'évolution de certains paramètres du matériau avec la température, nous permet de contribuer à l'explication physique des risques d'instabilité thermique. Notons que certaines conclusions vont à l'encontre d'hypothèses généralement admises :

- Les pressions de vapeur d'eau ne permettent pas à elles seules d'expliquer les risques d'instabilité thermique. Ceci est clairement démontré par le fait que les vapeurs d'eau sont plus faibles à mesure que l'on augmente la sévérité de la sollicitation thermique. Ainsi, durant les essais sous courbe ISO, certaines dallettes ont éclaté malgré des pressions de vapeur d'eau très faibles. Tandis que des essais à chauffage beaucoup plus lent ont engendré des pressions de vapeur d'eau élevées sans toutefois provoquer une quelconque instabilité thermique.
- Le processus thermomécanique ne suffit pas non plus à expliquer seul l'instabilité thermique des bétons. Il a été en particulier observé un risque d'instabilité thermique moins important sous feu HCM que sous feu ISO. Par ailleurs, les instabilités thermiques les plus importantes ont été observées pour des vitesses de chauffage lentes.
- L'état hydrique du matériau joue un rôle primordial pour le risque d'instabilité thermique : un béton pré-séché à 80 °C (départ de l'eau libre) ne présente aucun risque d'instabilité thermique, quelque soit la sollicitation thermique subie.

- Si les pressions de vapeur d'eau ne semblent pas être la cause directe de l'instabilité thermique mais que l'état hydrique du matériau garde un rôle décisif, la teneur en eau du matériau lors du chauffage et les mouvements de cette eau semblent être à même d'expliquer les risques d'instabilité thermique. Nous avons ainsi l'intuition d'une zone critique, où une concentration trop importante d'eau liquide durant le chauffage peut être préjudiciable vis-à-vis de l'instabilité thermique du béton. Ceci peut être dû à une pression d'eau liquide trop importante sur les pores du béton, une chute des propriétés mécaniques dans cette zone ou bien encore l'augmentation des gradients thermiques. Aucun dispositif expérimental ne permet de nos jours de confirmer la présence de cette zone saturée en eau à quelques centimètres de la surface chauffée et les efforts de recherche futurs seront en grande partie axés sur ce point.

Enfin, en accord avec l'hypothèse du dernier point, si l'on permet à l'eau de s'évacuer rapidement du sein de la matrice, le risque d'instabilité thermique est fortement réduit. Les fibres de polypropylène, en augmentant fortement la perméabilité du matériau après leur fusion, peuvent donc trouver là l'explication de leur efficacité. Une idée de nouvelle solution technologique a été testée : la perforation de la partie exposée d'une dalle en béton, en permettant le départ plus rapide de l'eau, a permis de réduire le risque d'instabilité thermique du béton sous feu ISO.

6. BIBLIOGRAPHIE

- AFREM, *Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM – Durabilité des bétons.* Laboratoire Matériaux de Durabilité des Constructions, INSA Toulouse, Décembre 1997.
- Bazant Z. P., «Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete». *International workshop on fire performance of high-strength concrete.* Gaithersburg, USA, 1997.
- Bazant Z. P., Kaplan M.F., *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*, Pearson Education, 1996.
- Féron C., Autuori. P., «Vers des moyens de prévenir l'écaillage du béton en tunnel». *Tunnels et ouvrages souterrains* n°196: pp. 228-235, 2006.
- Haack A., «Catastrophic Tunnel Fires - What have we learnt?» *International symposium on catastrophic tunnel fires (CTF).* Boras, Sweden, Haukur Ingason, 2003.
- Hager I., Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat de l'ENPC, 2004.
- Harmathy T. Z., Effect of moisture on the fire endurance of building elements. Research paper 270. Ottawa, Division of Building Research, 1965.
- Jansson R. et Bostrom L. (2007). Fire spalling: theories and experiments. 5th International RILEM symposium on Self-Compacting Concrete. Ghent, Belgium.
- Kalifa P., Chéné G., «High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure.» *Cement and Concrete Research* n°31(10): 1487-1499, 2001.
- Klinkenberg L.J., «The permeability of porous media to liquid and gases.» *Drilling and Production Practice*, 200-231, 1941.
- Lankard, D. R., D. L. Birkimer, Fondriest F.F. et Snyder M.J. (1971). Effects of moisture content on the structural properties of Portland cement concrete exposed to temperatures up to 500 F. 21st ACI Fall Meeting. Memphis, Tennessee.
- Mindegua J.C., Carré H., Pimienta P., La Borderie C., «A new experimental device for assessing the radial strains of concrete at high temperatures». *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* n°11/9 – 10 p. 1187 – 1198, December 2007.
- Mindegua J.C., Pimienta P., La Borderie C., Carré H., «Experimental study of fire behaviour of different concretes – Thermo-hydral and spalling analysis». *Fib Workshop «Fire design of concrete structures – from materials modelling to structural performance,* Coimbra, Portugal, 8-9 November 2007, pp. 225-236.
- Mindegua J.C., Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Juillet 2009 (téléchargeable à l'URL suivante : http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?view_this_doc=tel-00418218&extended_view=1&version=1&halsid=tvvc23h65d5flskihlsn1da49).
- Ulm F.-J., Acker P., Levy M., «The Chunnel' Fire. II: Analysis of Concrete Damage.» *Journal of Engineering Mechanics* n°125(3): 283-289, 1999.