Nouvelle technique de mesure des déformations radiales du béton à hautes températures

Jean-Christophe Mindeguia*, — Hélène Carré* — Pierre Pimienta** — Christian Laborderie***

** LaSAGeC² (Laboratoire des Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier)*
Université de Pau et des Pays de l'Adour
Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet

*** CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)*
84, Avenue Jean Jaurès, Champs sur Marne, 77447 Marne la Vallée Cedex 2

RÉSUMÉ. *Le comportement du béton est fortement modifié par l'élévation de la température. L'évolution des propriétés mécaniques du matériau avec la température doit alors être connue pour se placer dans un cadre de conception sécuritaire des structures vis-à-vis des risques d'incendie. Un dispositif expérimental a été développé au CSTB afin de mesurer les déformations radiales d'une éprouvette cylindrique de béton lors d'essais à chaud. Nous présentons les principes de ce nouveau système et les différents essais ayant permis de le valider. Une simulation thermomécanique nous a permis de définir les limites du système de mesure. Enfin, une première campagne expérimentale d'essais de compression à chaud a été menée sur un béton ordinaire. Nous présentons les courbes contrainte/déformation obtenues.*

ABSTRACT. *Exposure to high temperatures strongly modifies the behaviour of concrete. To increase the level of safety for concrete structures in the event of fire, design calculations have to take into account the dependence of the thermo-mechanical properties with temperature. A device has been developed at the CSTB in order to measure transversal strains of a concrete sample under hot mechanical tests. We present the principles of this new tool and the validation tests. A thermomechanical calculation allowed us to show the limits of the device. At last, we present the results of hot compression tests made on an ordinary concrete. Stress-strain curves are given at different temperatures.*

MOTS-CLÉS : *béton, température, expérimentation, mesures, déformations radiales, coefficient de Poisson.*

KEYWORDS: *concrete, temperature, experimentation, measurement, transversal strain, Poisson ratio.*

1. Introduction

L'élévation de température produite par un incendie peut fortement modifier le comportement du béton et mettre en péril la stabilité des structures. De nombreux phénomènes physico-chimiques se développant à l'échelle microscopique se traduisent, à l'échelle macroscopique, par un endommagement progressif du matériau et un risque d'instabilité thermique important (Schrefler *et al.*, 2002, Khoury 2003).

Dans ce contexte, un dispositif expérimental a été développé au CSTB, permettant de réaliser des essais de caractérisation mécanique des bétons à hautes températures (Gaweska, 2000, Hager *et al.*, 2005) : essais thermomécaniques sur éprouvettes cylindriques (compression) avec mesure des déformations longitudinales. Les différentes campagnes expérimentales réalisées jusqu'alors ont permis de mieux comprendre le comportement du matériau avec la température et d'étudier l'influence de plusieurs paramètres (Gaweska Hager, 2004, Hager *et al.*, 2005).

Dans cet article, nous présentons la mise au point d'une nouvelle technique permettant de mesurer les déformations radiales d'éprouvettes cylindriques durant les différents essais mécaniques à hautes températures. Cette technique peut être utilisée aussi bien lors d'essais à chaud stationnaires (fluage et compression à chaud) que lors d'essais à chaud non stationnaires (dilatation thermique libre ou sous charge mécanique). La connaissance des déformations radiales permet d'affiner notre compréhension du comportement du béton à hautes températures et fournit des données très utiles en vue de simulations numériques traitant les problèmes multidimensionnels.

Une campagne de validation du système de mesure a été menée à partir d'une éprouvette d'alliage aluminium-magnésium. Nous présentons les résultats d'essais de compression uniaxiale cyclique ainsi qu'un essai de dilatation thermique libre jusqu'à la température de 250°C. Une simulation thermomécanique complète les travaux de validation. Nous avons également pu établir les limites du système en ce qui concerne les essais transitoires. Enfin, nous présentons quelques résultats d'essais de compression à chaud réalisés sur un béton ordinaire.

2. Mise au point de la technique de mesure

2.1. *Matériel utilisé*

L'équipement existant est constitué d'un four régulé, permettant de chauffer des éprouvettes cylindriques (104 x 300 mm) jusqu'à 600°C avec une vitesse de montée en température programmable et d'un extensomètre. Le four est chauffé au moyen de 3 anneaux rayonnants pilotés indépendamment par 3 thermocouples de type K afin de limiter les gradients thermiques à l'intérieur du four le long de l'axe longitudinal (figure I).

Les mesures de déformations longitudinales sont réalisées avec un extensomètre muni de 3 capteurs de déplacements de type LVDT positionnés à 120° les uns des autres. Celui-ci est placé à l'extérieur du four pour éviter toute élévation trop importante de température au niveau des capteurs. Chaque anneau de l'extensomètre est solidaire de l'éprouvette grâce à 3 pointeaux traversant le four placés à 120° les uns des autres dans le même plan horizontal.

L'ensemble peut être placé entre les plateaux d'une presse afin de pouvoir charger les éprouvettes au cours de leur échauffement (régime transitoire) ou après une période de stabilisation de la température (régime stationnaire).

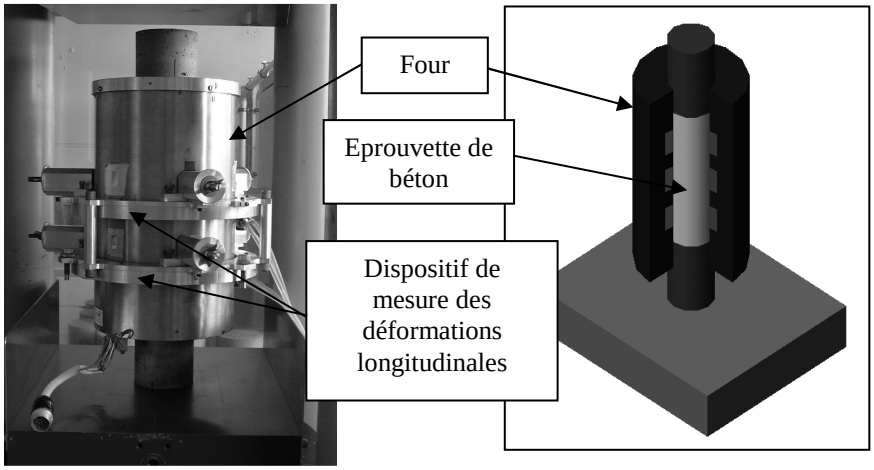

Figure I. *Dispositif d'essai existant.*

2.2. *Mesure des déformations radiales*

Le principe de cette nouvelle technique consiste à compléter le dispositif en reportant le déplacement transversal de la surface de l'éprouvette à l'extérieur du four. Ceci est réalisé par l'intermédiaire de trois tiges disposées suivant trois rayons de l'éprouvette. Ces tiges sont placées à 120° les unes des autres sur un même plan horizontal (plan des pointeaux des anneaux de l'extensomètre).

Les tiges traversent le four par des réservations oblongues pratiquées dans la paroi de ce dernier (figure II). Trois paliers à billes assurent les liaisons pivot glissant entre les tiges et l'anneau de l'extensomètre. Trois capteurs de déplacement permettent de mesurer le déplacement d'une plaque de verre collée perpendiculairement à la tige. Un élastique est placé entre chaque plaque de verre et chaque palier à billes pour garantir un bon contact de la tige avec l'éprouvette notamment lors d'essais cycliques. Les tiges sont en INVAR®, alliage constitué

principalement de fer et de nickel, et possédant un faible coefficient de dilatation thermique.

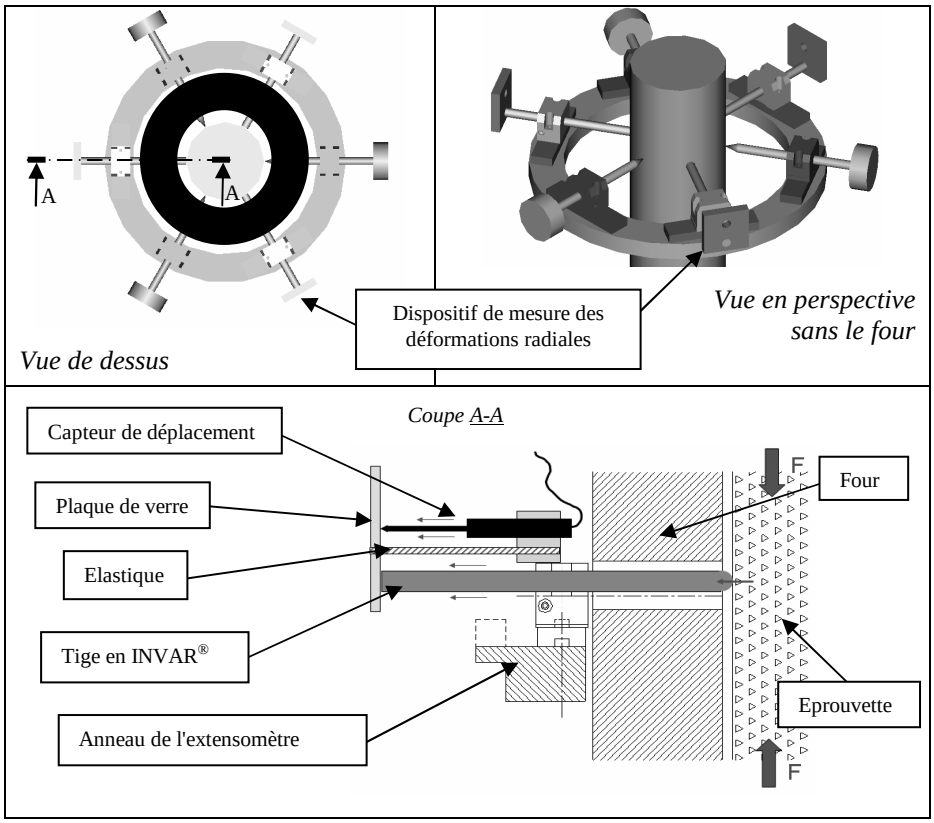

Figure II. *Principe de la technique de mesure des déformations radiales.*

3. Validation de la technique de mesure

Pour valider la technique de mesure des déformations radiales, nous avons utilisé une éprouvette d'alliage aluminium-magnésium (appellation industrielle : aluminium 5083). Les propriétés de ce matériau sont constantes de 20°C à 250°C. Le module d'élasticité est de 71 GPa, le coefficient de Poisson est de 0,33 et le coefficient de dilatation thermique est de $23{,}9.10^{-6}\ K^{-1}$.

3.1. *Essais de compression uniaxiale*

Dans un premier temps, nous avons réalisé 4 essais de compression uniaxiale à 20°C. Nous avons appliqué 3 cycles de chargement déchargement monotone à 5kN/s jusqu'à 500 kN avec 10 s de palier. Une des courbes contrainte/déformation obtenue est portée sur la figure III. Les trois autres essais ont montré des résultats similaires.

Nous observons une bonne correspondance entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques (moins de 3% d'écart sur l'ensemble des valeurs). Une fois complété, le système de mesure, déjà reconnu pour la validité des mesures des déformations longitudinales, s'avère également valide pour les déformations radiales. De plus, les mesures ne présentent pratiquement pas d'effet hystérétique lors des trajets de déchargement, ce qui démontre la validité du dispositif pour des essais cycliques. Enfin, nous avons pu constater que les essais étaient parfaitement reproductibles.

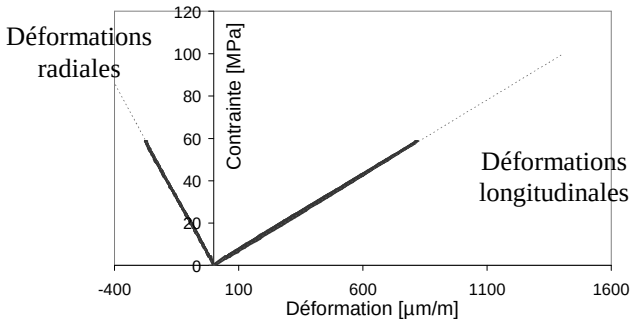

Figure III. *Essai de compression cyclique. En gras, valeurs mesurées (moyenne des trois capteurs); en pointillés, valeurs théoriques*

3.2. *Essai de dilatation thermique libre*

Dans un second temps, nous avons soumis l'éprouvette d'alliage à une élévation de température jusqu'à 250°C à la vitesse de 1°C/min. Après un palier de stabilisation de 1h, nous avons laissé l'éprouvette se refroidir. Durant ce cycle de chauffage-refroidissement, nous avons mesuré les déformations thermiques longitudinale et radiale de l'éprouvette. Nous portons sur la figure IV les résultats obtenus. Nous faisons l'hypothèse que la dilatation thermique de l'éprouvette d'alliage est parfaitement isotrope et réversible.

Nous observons une bonne correspondance entre les valeurs que nous mesurons et les valeurs de déformations théoriques. Ceci est vérifié jusqu'à une température de 250°C. La phase de refroidissement a pu être enregistrée et présente relativement peu de déformations résiduelles (ce qui est attendu, le matériau ne présentant pas de transformation jusqu'à 250°C).

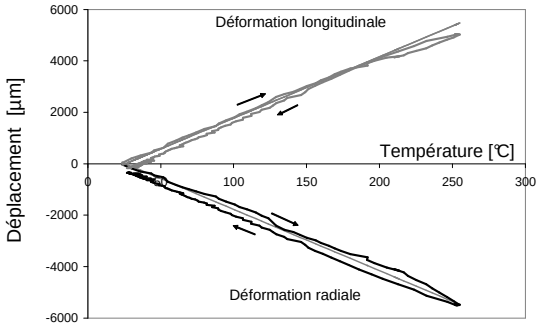

Figure IV. *Essai de dilatation thermique. En gras, valeurs mesurées (moyenne des trois capteurs); en trait fin, valeurs théoriques.*

3.3. *Simulation de la dilatation de la tige INVAR® au-delà de 250°C*

Nous avons vu dans le paragraphe précèdent que les mesures de déformations thermiques radiales restaient fidèles aux déformations théoriques jusqu'à la température de 250°C pour l'éprouvette d'alliage. Ceci est principalement dû à la faible dilatation de la tige INVAR®. Cependant, avec des températures supérieures, le coefficient de dilatation de ce matériau augmente fortement et la dilatation de la tige à des températures élevées devient du même ordre de grandeur que les déformations attendues des éprouvettes en béton lors des essais transitoires. En revanche, lors des essais stationnaires, la tige a déjà subi l'élévation de température et ne présente donc aucune dilatation "parasite" au moment de l'essai mécanique.

Nous avons évalué, à l'aide d'une simulation thermomécanique simple, l'amplitude de la dilatation des tiges INVAR®. Les calculs ont été menés sur le code de calcul par éléments finis CAST3M, avec prise en compte de la variation des propriétés thermomécaniques de la tige avec la température. Nous avons imposé un chargement thermique transitoire à l'une des extrémités d'une tige représentant les conditions réelles d'un essai (1°C/min jusqu'à 600°C puis palier de stabilisation d'une heure).

Les résultats obtenus nous montrent que le déplacement de la tige INVAR, du fait de sa dilatation, atteint une amplitude d'une centaine de microns dans la direction radiale à 600°C. Pour les essais transitoires au-delà de 250°C, nous devrons donc tenir compte de la dilatation des tiges. Cette dernière sera déterminée à partir d'un essai de dilatation thermique jusqu'à 600°C d'un matériau aux propriétés connues jusqu'à cette température.

4. Essais stationnaires à chaud sur un béton ordinaire

Le système étant validé pour les essais stationnaires, nous avons réalisé des essais de compression à chaud, dont nous présentons ci-après les premiers résultats.

Les essais ont été réalisés sur un béton ordinaire (résistance moyenne à la compression de 30 MPa à 28 jours). Les éprouvettes ont été portées aux différentes températures d'essai (120, 250 et 400°C) à la vitesse de 1°C/min puis écrasées en compression après un palier de stabilisation de la température (2h pour l'essai à 120°C, 1h pour les autres températures). Nous portons sur la figure V les courbes de contrainte/déformation obtenues aux différentes températures.

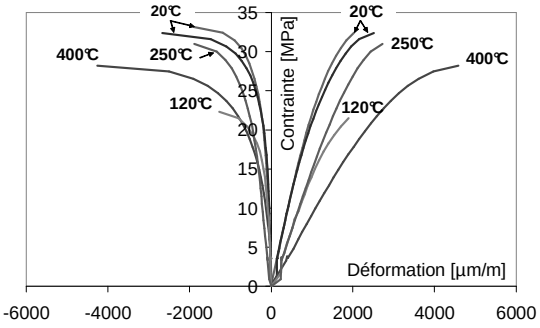

Figure V. *Courbes contrainte/déformation obtenues sur un béton ordinaire à différentes températures. Les déformations radiales sont négatives.*

Le comportement mécanique du béton avec l'élévation de la température n'étant pas élastique linéaire du fait de l'endommagement thermique, le rapport entre la déformation radiale et la déformation longitudinale ne peut pas s'apparenter à un vrai coefficient de Poisson. Nous proposons plutôt de l'appeler coefficient de Poisson apparent υ'. Notons que la variation de ce coefficient avec la température n'est pas clairement quantifiée dans la littérature et une seule référence est souvent utilisée par les auteurs : Maréchal, 1970.

A partir des courbes de la figure V, nous avons calculé ce rapport à un niveau de contrainte correspondant à 30% de la résistance en compression du matériau à la température considérée. A 20°C, le coefficient apparent de Poisson est de 0,14. Les valeurs relatives de ce coefficient apparent ($\upsilon'_T/\upsilon'_{20°C}$) sont respectivement de 69%, 238% et 76 % aux températures de 120°C, 250°C et 400°C. Ces premiers résultats nous ont donné des valeurs très différentes de celles obtenues par Maréchal. Ce dernier a en effet obtenu une diminution linéaire du coefficient apparent relatif avec la température. Il conviendra de réaliser d'autres essais pour confirmer et compléter ces premiers résultats

5. Conclusions

Le dispositif expérimental mis au point permet de mesurer les déformations radiales d'une éprouvette de béton lors d'essais thermomécaniques.

Le système a été validé par des essais de compression cycliques à 20°C et présente une bonne concordance avec les valeurs théoriques de l'éprouvette de référence aussi bien lors du chargement que du déchargement.

Le système permet de mesurer les déformations radiales à hautes températures lors d'essais stationnaires. Les premiers résultats obtenus sont présentés. L'évolution du coefficient de Poisson apparent relatif avec la température n'est pas comparable avec les valeurs rencontrées dans la littérature.

Le système est validé pour les essais transitoires jusqu'à la température de 250°C. Au-delà, une calibration au moyen d'une autre éprouvette de référence aux propriétés connues jusqu'à 600°C est nécessaire.

5. Bibliographie

Gaweska I., Déformation thermique transitoire, Rapport de stage de Mastère spécialisé, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2000.

Gaweska Hager I., Comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.

Hager I., Pimienta P., « Déformation thermique transitoire des bétons à haute performance », *Revue Européenne du Génie Civil*, volume 9, n°3, Avril 2005, p. 373-383.

Hager I., Pimienta P., « Transient thermal strains of High Performance Concretes », *Key note for Concreep7, International conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures*, Nantes, France, 12-14 Septembre 2005.

Khoury G.A., « Spalling », *Course on Effect of Heat on Concrete*, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 Juin 2003.

Maréchal J.C., « Contribution à l'étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température », *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 274, Octobre 1970, p. 122-147.

Schrefler B.A., Khoury G.A., Gawin D., Majorana C.E., « Thermo-hydro-mechanical modelling of high performance concrete at high temperatures », *Engineering Computations*, vol. 19, n° 7-8, 2002, p. 787-819.