



JNB'2017
Journées nationales du béton de Tunisie

UNE NOUVELLE TECHNIQUE POUR LA DÉTERMINATION DU MODULE D'YOUNG DU BÉTON À HAUTE PERFORMANCE SOUMIS À DES CYCLES DE CHAUFFAGE- REFROIDISSEMENT

A NEW TECHNIQUE FOR THE DETERMINATION OF THE YOUNG'S MODULUS OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE SUBJECTED TO HEATING-COOLING CYCLES

Hassen SABEUR⁽¹⁾, Horacio COLINA⁽²⁾

⁽¹⁾ Maître de conférences à l'Université de Carthage-ISTEUB, Laboratoire de Génie Civil, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunisie. e-mail: sabeur_hassen@yahoo.fr

⁽²⁾ Directeur Pôle recherche chez l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH), 7 place de la Défense, 92974 Paris-La-Défense Cedex, France.
e-mail: h.colina@atilh.fr

1. INTRODUCTION

Le problème des structures en béton soumises à des hautes températures est un sujet primordial pour les applications de l'ingénierie nucléaire et l'évaluation de la sécurité contre les

incendies dans les constructions civiles. La dernière catastrophe à Londres et ses conséquences graves sur la sécurité des personnes est l'exemple le plus récent. Une autre catastrophe spectaculaire est l'ensemble des explosions qui ont eu en Chine engendrant plusieurs feux à Tianjin, à 120 kilomètres à l'est de Pékin,





Tableau 1. Composition du BHP

Constituants	Quantité [Kg/m ³]	Agrégats /ciment	Eau/Ciment	fc [Mpa]
BHP: béton à hautes performance				
Ciment CEM I 52.5	377			
Sable de seine 0/4	432			
Sable du Boulonnais 0/5'	439			
Gravillon de Boulonnais 5/12.5	488	5.1	0.3	100
Gravillon de Boulonnais 12.5/20				
fumée de silice	561			
Superplastifiant Résine GT	37.8			
Retardateur Chrysotard	12.5			
Eau	2.6			
	124			

résultant, à de lourdes pertes humaines et révélant de graves dégâts dans les structures en béton. Par conséquent, la modélisation du comportement du béton sous ces conditions devient un sujet de recherche de challenge international.

Un des éléments clefs de cette modélisation est de connaître les variations de la déformation élastique et du module de Young dans la phase de chauffage et dans la phase de refroidissement. Il est reconnu que l'évolution du module de Young résulte de nombreux facteurs tels que la valeur initiale du module d'élasticité, le taux de chauffage, les températures maximales atteintes, la teneur en eau et la nature des agrégats. En effet, la rupture des liaisons dans la microstructure de la pâte de ciment, causée par l'augmentation de la température, entraîne une diminution du module de Young et cette diminution continue à se produire dans la phase de refroidissement. En outre, l'incompatibilité thermique entre les agrégats et la pâte de ciment dans la phase de chauffage induit une diminution de la valeur du module de Young.

En effet connaître ces variations est d'un grand intérêt lors de la détermination de (a) la dégradation thermique du béton sous n'importe quel type de condition (service et accidentelle) et (b) la performance des structures en béton afin de concevoir une structure en béton durable. Cela nécessite une modélisation robuste de tous les processus impliquant la variation de la déformation élastique et celle du module de Young. Néanmoins, dans la littérature, certains chercheurs se sont intéressés à l'étude de ces variations au cours de la partie de chauffage [1-8] et d'autres se sont intéressés aux variations résiduelles [9-11]. Dans toutes ces recherches, les courbes de contrainte/déformation ont été utilisées pour estimer indirectement la déformation élastique.

On présente ici une nouvelle méthode expérimentale pour déterminer la variation de la déformation élastique et du module de Young du béton à haute performance (BHP) pendant des cycles de chauffage-refroidissement sous (CA) et (CS). Le présent travail analyse les différences entre la valeur de la déformation élastique et le module de Young à différents moments ; au début de l'essai (à température ambiante), à la fin des plateaux de températures : 150°C, 200°C, 300°C et 400°C et à la fin de la partie de refroidissement de chaque cycle.

2. COMPOSITION DES BÉTONS ÉTUDIÉS

Sous conditions accidentelles, trois spécimens de BHP ont été testés. Sous conditions de service, deux spécimens de BHP ont été testés. Sous les deux conditions, cinq cylindres normalisés ont également été coulés pour calculer la résistance à la compression. La composition du BHP est donnée par le *Tableau 1*.

3. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

3.1. Dispositif expérimental

Les échantillons ont été préparés de manière appropriée [12, 13] et ont été placés dans la presse (*Figure 1*).

Les mesures les plus importantes à réaliser dans ce type d'essai sont celles des variations au cours du temps de la longueur de l'éprouvette et des températures à l'intérieur du béton.

Pour les variations de la longueur, nous avons pris comme base de mesure 300 mm, donnée par la distance entre deux sections perpendiculaires à l'axe et situées à 170 mm de chaque extrémité de l'éprouvette (*Figure 1*). Les valeurs des variations de cette distance pendant l'essai sont alors déterminées à l'aide d'un extensomètre, spécialement conçu pour l'essai : les deux anneaux qui supportent les instruments de mesure, se fixent à l'éprouvette par des vis pointeaux selon la direction du rayon, en formant un angle de 120° entre eux, ce qui permet d'utiliser trois capteurs de déplacement de type LVDT sur des axes verticaux séparés du même angle. Ceux-ci sont logés dans des tubes en Invar, de façon à éviter des déformations thermiques du support. On place de l'isolant thermique entre les anneaux et l'éprouvette.

Pour le suivi des températures à l'intérieur du béton, on place des thermocouples de type K, résistant jusqu'à 700°C, dans des cavités verticales spécialement préparées au moment du coulage et scellées avant l'essai avec de la pâte de ciment. La distribution de ceux-ci est numérotée sur la *figure 1* et répond aux dispositions suivantes :



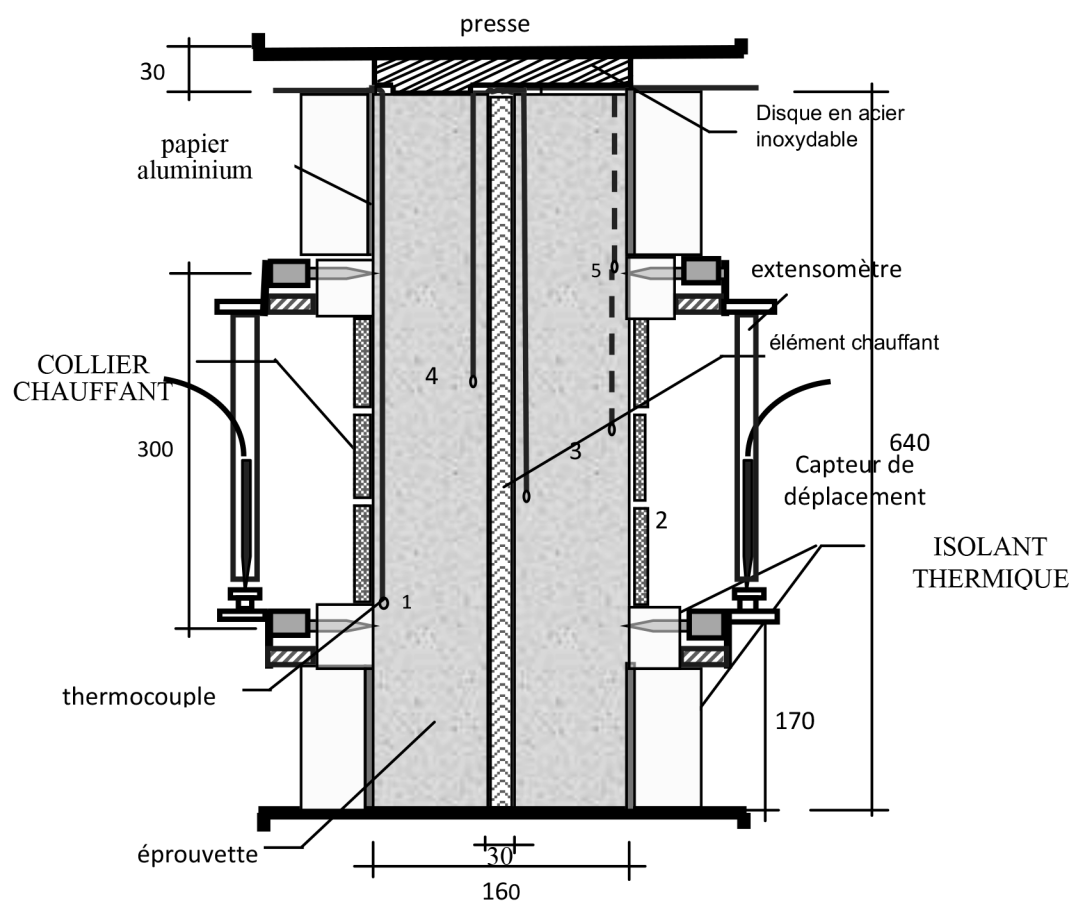


Figure 1. Dispositif expérimental

- deux près de l'axe de l'éprouvette, à une distance de 10 mm de la surface intérieure et situés dans des positions opposées : le numéro 2 à 270 mm et le numéro 4 à 370 mm de la base de l'éprouvette ;
- trois près de la surface extérieure de l'éprouvette, à une distance de 10 mm de celle-ci et situées sur des plans verticaux séparés de 120° l'un par rapport à l'autre : le numéro 1 à 170 mm, le numéro 3 à 320 mm et le numéro 5 à 470 mm de la base de l'éprouvette.

dans un essai sans charge, il est assuré par conduction avec des rubans d'aluminium collés sur la partie supérieure des éprouvettes et sur le plateau supérieur, le tout empêché d'échange thermique avec l'extérieur.

- *Chauffage de la paroi interne de l'éprouvette* : par un tube métallique en contact direct avec le plateau chauffant bas de la presse et fermé dans sa partie supérieure, de façon à avoir une transmission de la chaleur par conduction à l'intérieur de l'éprouvette. Le vide entre ce tube et le béton est rempli de sable, bon conducteur de la chaleur [12-14].

3.2. Dispositif de chauffage

Pour les températures imposées à l'éprouvette, nous pouvons distinguer trois groupes de chauffe :

- *Chauffage des parois latérales* : il est fait par l'intermédiaire de trois colliers chauffants situés dans la partie centrale de 30 cm. Dans les parties supérieure et inférieure, des feuilles d'aluminium, fixées avec du ruban adhésif du même matériau, entourent l'éprouvette et sont en contact avec les parties chauffées par les plateaux de la presse. L'échange thermique avec l'extérieur est empêché par une couche d'isolant.
- *Chauffage de la base et de la partie supérieure de l'éprouvette* : la base de l'éprouvette est en contact avec le plateau chauffant bas de la presse. Le contact de la partie supérieure dépend du type d'essai : dans un essai sous charge, le contact se fait lors de la mise en charge à travers un disque métallique de 30 mm d'épaisseur, qui sert à la fois de lieu de sortie des câbles grâce à ses canaux ;

3.3. Charge mécanique et acquisition

En ce qui concerne la charge transmise à l'éprouvette, la presse utilisée permet d'avoir une charge constante et cela en utilisant le contrôle automatique autour d'une consigne.

La presse est équipée d'un tableur programmable qui, outre le contrôle de la charge, permet la programmation du système de chauffage des plateaux : la vitesse de montée en température (rampe), la valeur de la température à maintenir (palier) et la durée du palier.

Le contrôle de la vitesse de montée en température et le maintien en palier des colliers chauffants, sont faits grâce au système informatisé de contrôle de laboratoire fourni par le logiciel Labview, complété du matériel d'acquisition électronique. Ceci nous permet aussi de réaliser tout le recueil des données concernant les températures et déplacements, pour son traitement postérieur.



3.4. Processus expérimental

Une fois l'éprouvette mise au centre de la presse et les connexions des thermocouples et des résistances avec le matériel d'acquisition effectuées, la charge constante requise (20% de la résistance à la compression) est appliquée et tout de suite les programmes de chauffe des plateaux de la presse et des colliers chauffants sont lancés.

Sous conditions de service, les spécimens ont été chauffés à une vitesse constante de 0,1°C/min pour atteindre les plateaux de températures de 140°C, 190°C et 220°C maintenues pendant plusieurs heures afin d'assurer la stabilisation des températures internes, la perte de masse et autres phénomènes physico-chimiques internes au sein du béton. Sous conditions accidentelles, on procède à quatre paliers de température imposée (155°C, 200°C, 300°C, 400°C). La durée des paliers étant de 24 heures. Une fois que le dernier palier est terminé, on éteint le chauffage tout en continuant l'enregistrement des données, ce qui permet aussi de suivre le comportement du matériau dans la phase de refroidissement.

Dans tous les essais, la déformation élastique est instantanément enregistrée à la température ambiante lors du chargement de l'échantillon. Ensuite, la déformation élastique a également été mesurée « chaud » à la fin de chaque palier de température à l'aide d'un cycle de charge-décharge chargement quasi-instantané (avec une durée de moins de 2 minutes).

La déformation élastique « résiduelle » est obtenue à la fin de l'essai en déchargeant les échantillons à froid. La détermination des déformations élastiques lors de cette campagne expérimentale a permis d'estimer l'évolution du module d'Young avec la température sous les deux conditions. Les détails de nos tests réalisés sous conditions accidentelles et de service sont donnés par le *Tableau 2*.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

On définit d'abord les températures moyennes utilisées pour le suivi de l'évolution de la température à l'intérieur du béton.

Nous avons considéré pour cela les indications données par la RILEM (1998) [15]. En tenant compte que les sous-indices correspondent au thermocouple du même numéro selon la figure 1, ces températures sont :

- La température moyenne près de la surface extérieure de l'éprouvette, donnée par la moyenne pondérée suivante :

$$T_{ms} = (T_1 + 2T_3 + T_5)/4$$

- La température moyenne près de l'axe de l'éprouvette :

$$T_a = (T_2 + T_4)/2$$

La température moyenne de référence de l'éprouvette, donnée par la moyenne pondérée suivante :

$$T_{ref} = T_{ms} \frac{2}{3} (T_{ms} \quad T_a) = (T_{ms} + 2T_a)/3$$

Il est essentiel de noter que la température de 220°C, atteinte sous conditions de service, est la température de référence moyenne maximum Tref atteinte à l'intérieur du béton, correspondant à la capacité de chauffage maximale des colliers de chauffage. Afin d'atteindre une température plus élevée sous des conditions accidentelles, les colliers de chauffage ont été remplacés par d'autres, ce qui a permis d'atteindre la température maximale moyenne de 400°C.

À titre d'illustration, la figure 2 montre les évolutions des températures Tref et Ta et de la déformation totale pour le spécimen BHP-5. Il est important de noter la différence négligeable entre Tref et Ta, montrant que la distribution de la température est presque uniforme, avec une valeur maximale de 19°C pour tous les BHP (différence inférieure à celle considérée par les recommandations RILEM ; pour une température de 400°C et pour les dimensions de nos spécimens). La déformation élastique a été mesurée à différents moments du processus, à la fin du palier de température, où il est représenté par des « pics » de déformation. Ces « pics » ont été déterminés pendant le processus comme suit : avant la fin du plateau de température, on

Spécimen	Mix	Type de conditions	Âge en jours	Perte de masse	Résistance à la compression [MPa]	T _{ref} (°C)
BHP1	BHP	service	103	0.62%	100	140 194 219
BHP2	BHP	service	126	0.64%	100	142 196 219
BHP3	BHP	accidentel	253	0.22%	95	158 203 311 407
BHP4	BHP	accidentel	231	0.22%	107	159 207 318 417
BHP5	BHP	accidentel	334	0.20%	100	160 208 315 400

Tableau 2. Détails des essais réalisés sur les spécimens 16*64 cm² du BHP sous conditions accidentelles et de service

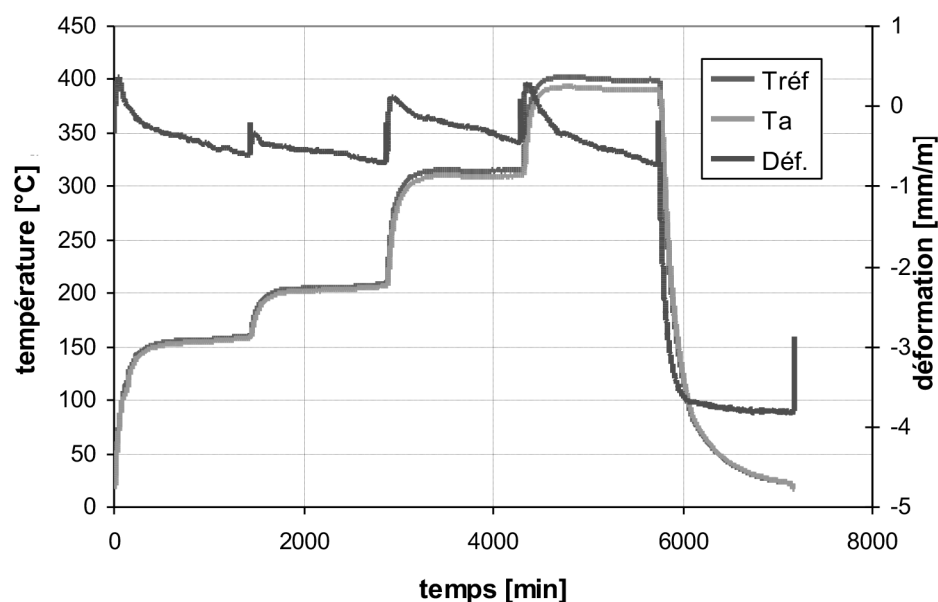


Figure 2. Evolution de la déformation et de la température à l'intérieur du béton; essai sous-charge pour le BHP-5

décharge l'échantillon en éliminant la charge appliquée par la presse puis on charge notre spécimen. Ce cycle de charge-décharge correspond aux pics observés dans la figure 2 et sa durée est d'environ deux minutes. Le concept de la déformation élastique est vérifié par le fait que la déformation mesurée retourne à sa valeur initiale avant le déchargement. Cela prouve que, pour chaque palier de température, la déformation élastique est réversible. Il est à noter ici qu'on mesure « à chaud » la déformation élastique à la fin du palier de température. Cela diffère des méthodes expérimentales utilisées dans la littérature où la déformation élastique est déduite des courbes contrainte-déformation et n'est pas déterminée directement. Cette méthode expérimentale nous permet de déterminer l'évolution de la déformation élastique « à chaud » en fonction de la température.

4.1. Évolution de la déformation élastique

On présente respectivement sur la figure 3 et la figure 4 l'évolution de la déformation élastique pour les trois spécimens BHP 3-5 en fonction de la température sous (CA) et celles du BHP1-2 sous (CS). Ces deux figures montrent une augmentation de la déformation élastique dans la phase chauffage pour les deux types de béton. On peut remarquer la valeur importante de la déformation élastique obtenue lors du déchargement à la fin de la partie de refroidissement montrant bien que la déformation élastique est irréversible. La représentation des spécimens dans un même graphique (Figures 3 et 4) montre la répétitivité de la méthode et la reproductibilité du phénomène. En effet, pour le même degré de chargement et les mêmes paliers de température, nous avons un comportement comparable de nos spécimens avec des valeurs comparables de déformations dans la partie de chauffage et de refroidissement.

A partir de la figure 3, on peut noter que, pour la variation de la déformation élastique en fonction de la température, les

trois spécimens montrent un comportement similaire. Dans la gamme de température [20°C, 300°C], la déformation élastique augmente avec une tendance asymptotique dans l'intervalle [300°C, 400°C]. Cette tendance asymptotique peut être due à la fin du processus de la déshydratation à 400°C. En d'autres termes, nos spécimens ont perdu toute l'eau chimiquement liée et cette perte va induire une consolidation du squelette solide qui devient plus rigide.

Par rapport à leurs valeurs initiales, la déformation élastique à la fin de la phase de refroidissement a presque triplé (sous CA) et a doublé (sous CS). L'absence du fluage thermique transitoire pendant la phase de refroidissement induit plus d'endommagement car les contraintes ne sont pas relaxées par son effet, ce qui induit une valeur importante pour la déformation totale finale et donc de la déformation élastique « résiduelle ».

4.2. Variation du module d'élasticité

La détermination des déformations élastiques lors des cycles de chauffage refroidissement permet d'estimer l'évolution du module d'Young avec la température sous les deux conditions de service et accidentelles. Dans tous ces essais, une charge constante égale à 20% de la résistance à la compression des bétons a été appliquée. Les modules d'Young peuvent être facilement calculés comme suit :

$$E(T) = \frac{\sigma}{\varepsilon^e(T)}$$

La figure 5 et la figure 6 représentent respectivement les évolutions en fonction de la température du module de Young des BHP (3-5) sous (CA) et les BHP (1-2) sous (CS). Cette figure montre une diminution des valeurs de module d'Young pour le BHP sous (CA) et (CS) dans la partie chauffage et dans la phase refroidissement.



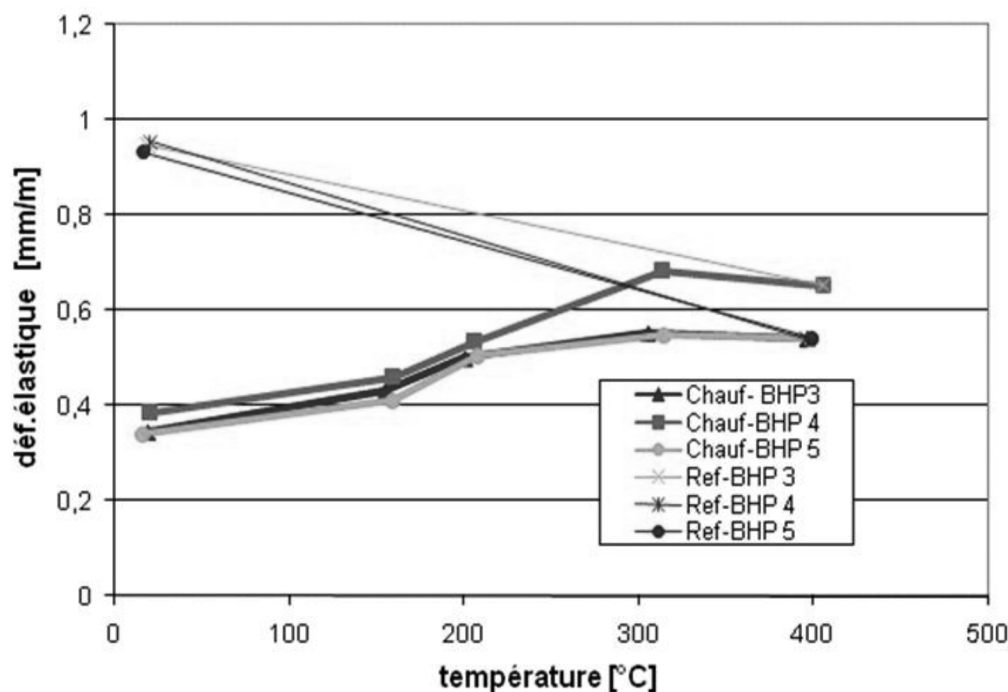


Figure 3. Evolution de la déformation élastique pour BHP (3-5) sous (CA) cycle chauffage-refroidissement

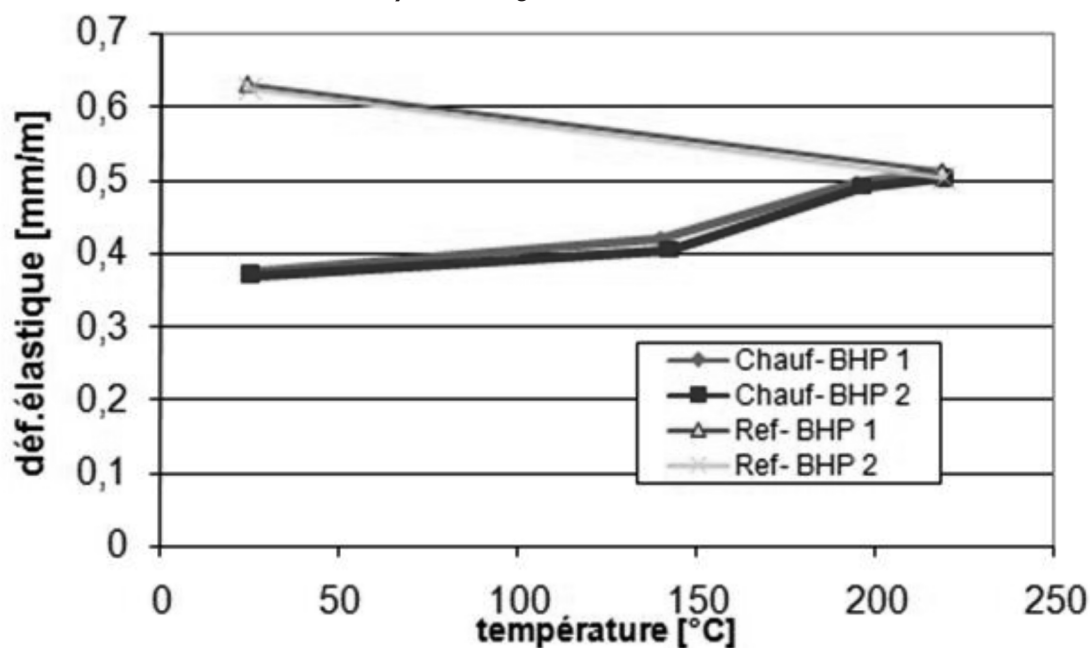


Figure 4. Evolution de la déformation élastique pour BHP (1-2) sous (CS) cycle chauffage-refroidissement

En effet, lorsque le béton est soumis à de hautes températures, deux phénomènes se produisent au sein du béton : l'expansion des agrégats et la contraction de la pâte de ciment. Au cours de la partie chauffage, une des principales raisons de la diminution des valeurs du module d'Young avec l'augmentation de températures est cette incompatibilité thermique entre la pâte de ciment et les granulats.

De plus, à hautes températures, plusieurs transformations physico-chimiques se produisent au sein du béton, ce qui entraîne des changements importants dans la microstructure de la pâte de ciment. La première transformation importante

correspond à la déshydratation du gel CSH. Dans la littérature, on considère que la décomposition des hydrates commence à 105°C. La deuxième transformation importante est la décomposition de la Portlandite, qui se déroule à une température dans l'intervalle [400°C, 500°C]. Il est à noter ici que le taux de chauffage intervient en modifiant les plages de température qui caractérisent le début et la fin de chaque réaction majeure. Dans les travaux antérieurs [14], pour la même pâte de ciment utilisée dans la composition de tous les BHP 1-5 utilisés dans notre procédure expérimentale, les résultats de l'analyse ATD/ATG ont montré que les températures



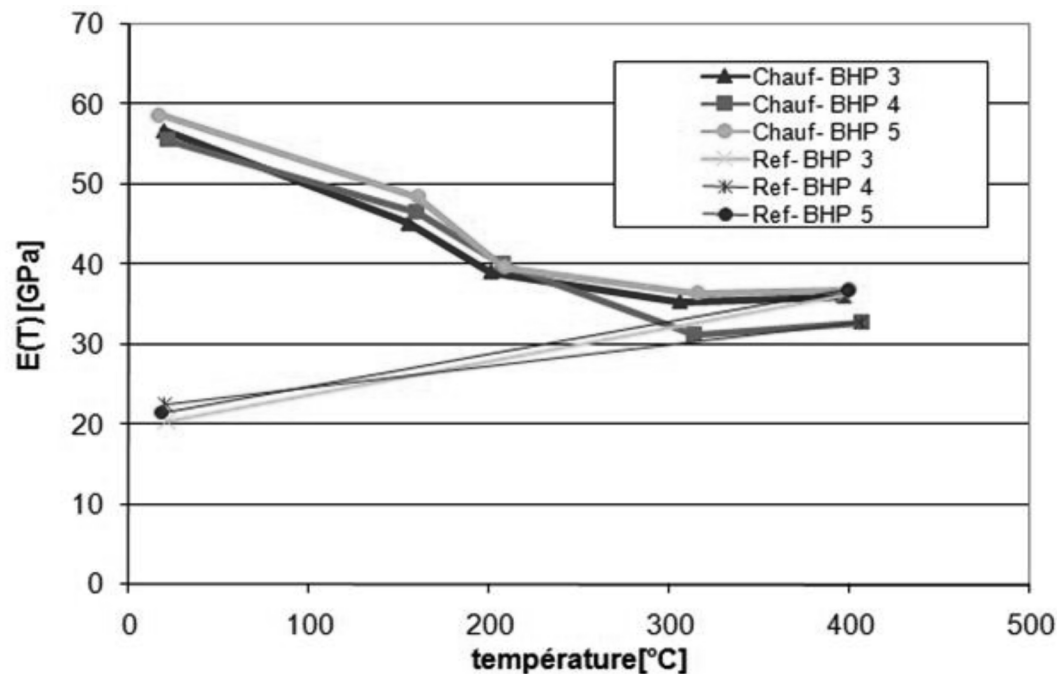


Figure 5. Evolution du Module d'Young pour BHP (3-5) sous (CA) (cycle chauffage-refroidissement)

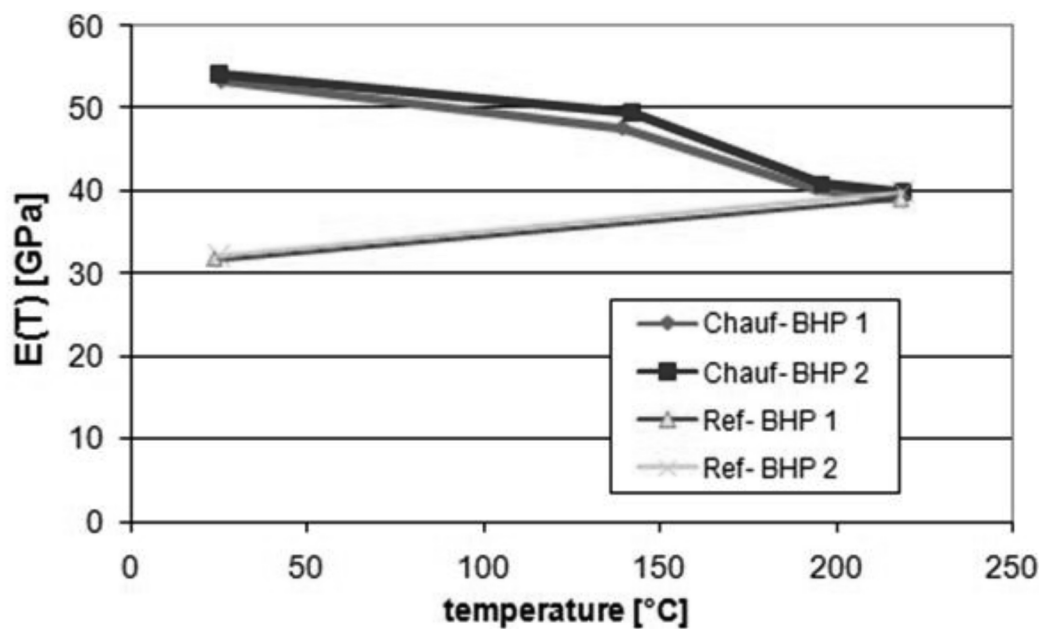


Figure 6. Evolution du Module d'Young pour BHP (1-2) sous (CS) (Cycle chauffage-refroidissement)

de décomposition de la Portlandite se situent entre [360°C, 410°C] et [470°C, 530°C] pour les taux de chauffage respectifs de 0,2°C/min et 10°C/min (Figure 7). Cela confirme la présence de la cinétique chimique et l'existence d'une différence entre la valeur mesurée à l'équilibre et celle de la mesure à la température $T(t)$. La raison de l'application de plusieurs températures des plateaux est destinée à assurer la stabilisation de la température interne et des différents processus physico-chimiques.

Dans nos essais, la décomposition du gel CSH et le début de la décomposition de la Portlandite briseront les liaisons de la microstructure de ciment ce qui induit une diminution importante de la valeur du module de Young.

En ce qui concerne la phase de refroidissement, la diminution de la valeur du module de Young continue à se produire pour deux raisons majeures. La première est l'absence de la déformation thermique transitoire dans la phase de refroidissement. Par conséquent, la relaxation du champ de contrainte est absente dans la phase de refroidissement ce qui provoque l'endommagement du matériau. Cette absence entraînera le développement des micro-fissures dans l'échantillon et on peut observer une séparation entre la pâte de ciment et les agrégats. Ceci a été observé expérimentalement par une diminution des valeurs de module de Young dans notre cas.

En outre, dans la phase de refroidissement, le CaO de chaux (un produit de la décomposition de la portlandite) en contact



avec l'air lors du refroidissement et donc en contact avec des molécules d'eau produira une nouvelle portlandite selon l'équation suivante :



La nouvelle portlandite formée s'accompagne d'une expansion de volume. En effet, le volume de la portlandite formée est supérieur à celui de la chaux CaO. Cette expansion induit donc une fissuration supplémentaire entraînant des valeurs inférieures du module d'élasticité.

La représentation des deux valeurs moyennes de la variation du module de Young pendant le cycle de chauffage-refroidissement pour le BHP sous conditions accidentelles et de service est donnée par la figure 8. Sous conditions de service, le module Young est égal à 31,75 GPa à la fin de la phase de refroidissement. Sous conditions accidentelles, la valeur du module Young est égale à 21,5 GPa. Il s'ensuit qu'une augmentation de température de 200°C a entraîné une diminution du module de Young de 10 GPa. Pour le BHP, par rapport à la valeur initiale, on a une diminution de 40% pour une température de chauffage finale égale à 220°C et 62% pour la température de 400°C. Un parallélisme est également noté pour la variation des deux courbes dans la phase de refroidissement.

Cette figure confirme que le taux de chauffage n'a pas une grande influence sur la variation du module de Young jusqu'à la température de 220°C avec une valeur de module Young égale à 39,2 GPa.

Le fait que le taux de chauffage n'ait pas d'influence sur la variation du module Young pendant la phase de chauffage est prévisible dans nos tests expérimentaux. En fait, un chauffage plus rapide entraînera des contraintes au sein de la pâte de ciment plus élevées causées par : l'incompatibilité thermique entre la pâte de ciment et les agrégats et aussi par la pression de pore développée qui entraîne un plus grand endommagement de la

microstructure [2]. En effet, une cinétique rapide provoque la génération d'un gradient de température entre la zone intérieure, plus froide et la zone périphérique, exposée à la chaleur. Le gradient de température conduit à un transfert d'eau sous forme gazeuse à l'intérieur du tube, provoquant une augmentation de la pression des pores dans la partie centrale.

En outre, pour cette gamme de température [20°C-220°C], la décomposition de gel CSH est la réaction majeure quand le béton est soumis à de hautes températures. Plus la vitesse de chauffage est rapide, plus la température du début de la décomposition est importante. Dans les travaux précédents [14], les pics de température correspondants sont égaux à 85°C et 138°C pour des taux de chauffage de 0,2°C/min et 10°C/min respectivement (Figure 7). C'est cette différence qui a amené les auteurs à penser à appliquer des plateaux de température pendant plusieurs heures pour donner suffisamment de temps pour que toutes les réactions physico-chimiques se produisent. En fait, ces plateaux de température permettent de réduire l'effet de la cinétique mentionnée précédemment. Cette stabilisation minimisera les contraintes provoquées par un chauffage rapide. Sur la base de la conclusion qui consiste en une faible influence de la vitesse de chauffage, on peut supposer que, sous conditions accidentelles, si la température de chauffage finale était égale à 220°C, le BHP sous CA aura une valeur comparable à celle sous CS. De plus, pour le BHP sous conditions accidentelles, la variation au cours de la partie refroidissement pour le palier de 300°C peut être obtenue en traçant la parallèle à la variation linéaire du module d'Young pour le palier de température égale à 400°C.

Cela signifie que jusqu'à la température de 400°C, nous pouvons faire l'hypothèse que la vitesse de chauffage n'a pas une grande influence sur la variation du module d'Young pour le cycle de chauffage-refroidissement. Cette conclusion nécessite plus d'investigations expérimentales.

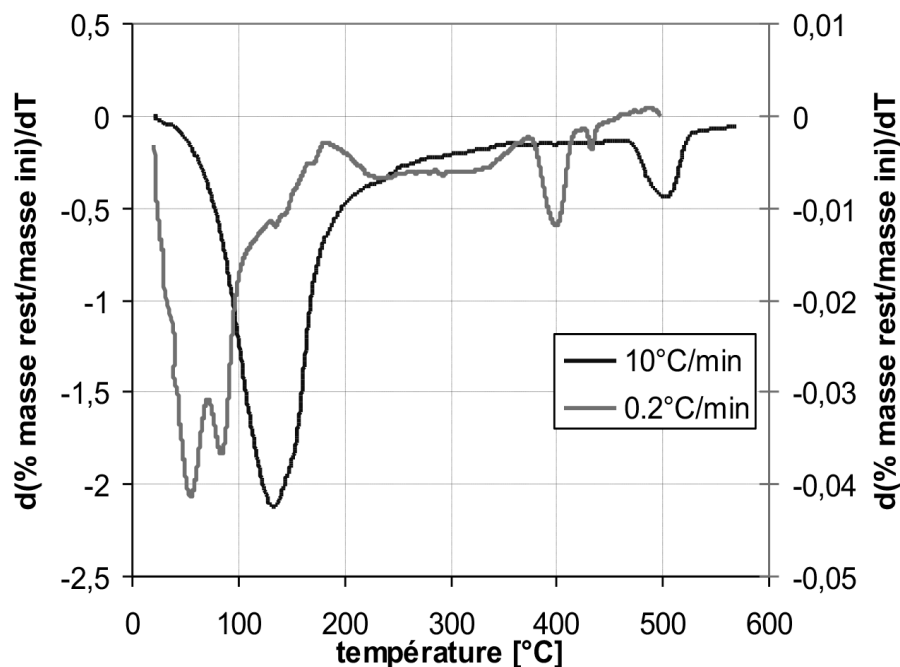


Figure 7. Evolution des courbes DTG des échantillons chauffés à 0.2 et 10°C/min [14]

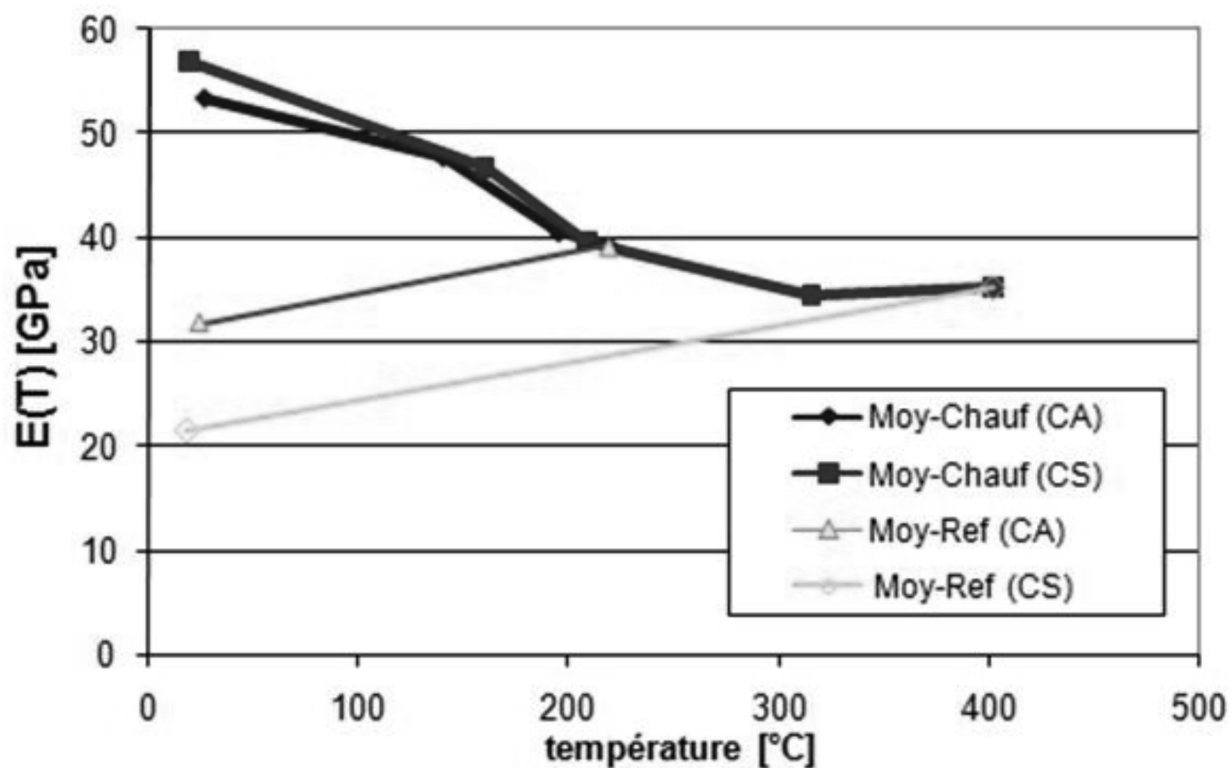


Figure 8. Valeurs moyennes du module d'Young pour le BHP sous conditions accidentelles et sous conditions de service (cycle chauffage-refroidissement)

5. CONCLUSION

Une nouvelle technique expérimentale a été présentée afin de déterminer la variation du module de Young pour le BHP sous (CA) et (CS). Sous ces deux conditions, le comportement expérimental de la déformation élastique en fonction de la température montre que cette déformation est irréversible. Par ailleurs, lors d'un cycle de chauffage refroidissement sous de telles conditions, nous pouvons remarquer une diminution du module d'Young. Ce comportement s'explique par les différents phénomènes qui se produisent dans les phases de chauffage et de refroidissement. En fonction de la température atteinte, cette diminution du module d'Young est due à :

- Dans la phase de chauffage, à la déshydratation de la CSH, la déshydroxylation de Portlandite, les dommages causés par les micro-fissures dues à l'incompatibilité thermique entre les agrégats et la pâte de ciment. Toutes ces réactions provoquent la rupture des liaisons de la microstructure de la pâte de ciment.
- Dans la partie de refroidissement, à l'absence de la déformation de fluage transitoire et la formation d'une nouvelle portlandite.

Concernant les différences dans l'évolution de la déformation élastique et du module d'Young correspondant du BHP sous CA et CS, les conclusions suivantes peuvent être avancées :

- Pour le BHP sous CA, la déformation élastique augmente pour des températures allant jusqu'à 300 °C avec une tendance asymptotique dans la plage de température de 300°C à 400°C. Cela implique une diminution du module de Young, avec un comportement asymptotique dans l'intervalle [300°C-400°C]. Ce comportement peut être expliqué par

la libération de toute l'eau chimiquement liée et cette perte va induire une consolidation du squelette solide qui devient plus rigide.

- Pour des températures inférieures à 220°C, pour le cas du BHP, la vitesse de chauffage de 1,5°C/min n'a pas eu d'influence sur les variations de la déformation élastique et du module d'Young correspondant. Cela diffère de ce que la littérature présente comme résultat : plus la vitesse de chauffage est importante, plus la valeur du module élastique est faible. En effet, une vitesse de chauffage plus rapide entraînera des contraintes plus élevées causées par : la pression dans les pores et l'incompatibilité thermique entre la pâte de ciment et les granulates, ce qui entraînera un endommagement plus important de la structure. En fait, la durée importante des plateaux de température assurent la stabilisation de tous les processus physico-chimiques (décomposition du gel CSH, incompatibilité thermique ciment-agrégats, et de la pression dans les pores) qui réduit considérablement l'endommagement de la structure engendré par un chauffage plus rapide. Cette observation semble donc être validée pour des températures de chauffage inférieures à 400 °C, mais nécessite d'autres recherches expérimentales pour être validée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Wood Labani J. M. and Sullivan P. JM., 1974. The performance of lightweight aggregate concrete at elevated temperature, Imperial College (London): Concrete Structure and Technology, 100 p. Reports CSTR no 7312.





- [2] Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F., 1972, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. In International Seminar on Concrete for Nuclear reactors. ACI Special Publication, 1972, paper SP34, p 377-406
- [3] Franssen J.M., 1987. Etude du comportement au feu des structures mixtes acier-béton. Thèse de Doctorat, Université de liège, Belgique, 276p.
- [4] Schneider U., 1988. Concrete at high temperatures: A general review, Fire safety Journal, vol. 13, pp 55-68.
- [5] Dias W.P.S, Khoury G.A and Sullivane P.J.E., 1990. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C (1292F), ACI Materials Journal, vol 87, n°2, p160-166.
- [6] Gross H., 1973. On high temperature creep of concrete, International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 2nd SMIRT vol. 3, Berlin : Edited by T.A. Jaeger. Paper H6/5.
- [7] Hager I.G., 2004. Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, ENPC, France.
- [8] Xiao J. and Konig G., 2004. Study on concrete at high temperature in China—an overview, Fire Safety Journal, 39, pp. 89–103
- [9] Chang Y.F., Chen Y.H., Sheu M.S., Yao G.C., 2006. Residual stress–strain relationship for concrete after exposure to high temperature. Cement and Concrete Research 36 1999–2005.
- [10] Luigi B., Sara C., Gianpaolo R., 2008. Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. Cement & Concrete Composites, 30, pp. 907–916.
- [11] Ghan Y. N., Peng G. F., Anson M., 1999. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. Cement and Concrete Composites ,21, pp. 23-27
- [12] Sabeur H. & Colina H., 2006. Transient Thermal Creep of Concrete in Accidental Conditions at Temperatures up to 400°C. Magazine of concrete research, 58, No.4, May, pp. 201-208.
- [13] Sabeur H. and Colina H., 2012. Effect of a heating–cooling cycle on elastic strain and Young’s modulus of high performance and ordinary concrete, Materials and Structures, 45, pp. 1861–1875
- [14] Sabeur H., Meftah F., Colina H. & Plateret G., 2008. Correlation between transient creep of concrete and its dehydration, Magazine of concrete research, 60, No.3, April, pp.157-163
- [15] RILEM TC 129-MHT (1998), Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Recommendations: Part 7: Transient Creep for service and accident conditions. Materials and Structures, 31, 290-295.