

Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers âges

P. LAPLANTE, C. BOULAY

Division Bétons et Ciments pour Ouvrages d'Art, Section Comportement Mécanique et Modélisation, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58, bd Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15, France

Dans les premières heures qui suivent sa fabrication et en l'absence de chargement extérieur, le béton subit des variations de volume dues à la formation des hydrates du ciment (ou retrait endogène), à l'exothermie de cette réaction, et au séchage vers le milieu ambiant. Dans un ouvrage, des fissures gênantes peuvent apparaître si des déformations sont empêchées. La détermination expérimentale des déformations endogènes, en l'absence de séchage vers l'extérieur, nécessite, à tout instant de la prise, la connaissance des déformations d'origine thermiques et donc du coefficient de dilatation thermique. Après un examen des publications traitant ce problème, une méthode de détermination, à tout instant, du coefficient de dilatation thermique au jeune âge est proposée. Cette méthode comporte une partie expérimentale et un traitement des mesures basé sur l'hypothèse d'un découplage des déformations endogènes et thermiques. Le résultat du calcul aboutit à l'expression du coefficient de dilatation thermique en fonction de la maturité du béton. Ceci permet, ensuite, de retrancher les déformations d'origine thermique aux déformations totales mesurées afin d'obtenir l'évolution des déformations endogènes en fonction de la maturité. Une application à un béton classique est présentée.

1. INTRODUCTION

L'évaluation des variations de volume du béton au jeune âge constitue une étape très importante dans l'analyse des contraintes engendrées lorsque les déformations sont empêchées ou que des gradients importants de température s'établissent dans certains ouvrages massifs (barrages, ponts, centrales nucléaires, etc.). Ces variations volumiques sont dues à l'hydratation du ciment et aux variations de température induites par l'exothermie de cette réaction. Cette réaction d'hydratation provoque des variations volumiques endogènes de différentes natures: contraction Le Chatelier induisant un retrait d'autodesiccation [1, 2], déformations chimiques (gonflements) dues à des pressions exercées par la croissance de certains cristaux à l'intérieur du squelette poreux de la pâte de ciment [3].

Pour modéliser ces variations volumiques endogènes au jeune âge, il convient donc de pouvoir isoler à partir des déformations totales, à tout moment, la part de déformation due aux variations thermiques. Cela nécessite pour un béton donné, de connaître l'évolution du coefficient de dilatation thermique lors de l'hydratation.

Quelques travaux ont été réalisés en ce sens mais il reste que l'évolution du coefficient de dilatation thermique au très jeune âge suscite encore beaucoup de questions et d'incompréhensions. C'est pourquoi le but de la présente étude est de poser, en des termes clairs, le problème de la détermination du coefficient de dilatation thermique (appelé, dans la suite, coefficient thermique) du béton au très jeune âge et de proposer une procédure d'essai ainsi qu'une méthode d'analyse des mesures

effectuées qui fournissent l'expression du coefficient thermique du béton en fonction de sa maturité. Un tel essai, réalisé sur un béton ordinaire, a permis de valider les hypothèses de travail et la démarche expérimentale, et d'émettre certaines idées sur les mécanismes physiques qui gouvernent l'évolution du coefficient thermique du béton au jeune âge.

2. ANALYSE DES RESULTATS DE LA LITTERATURE

Plusieurs auteurs [4-6] se sont intéressés à l'influence de différents facteurs sur le coefficient thermique du béton. Il semble maintenant admis que ces facteurs sont les suivants:

- L'âge du béton (ou sa maturité)
- La nature des granulats (les coefficients thermiques peuvent varier entre 5 et $12 \cdot 10^{-6}$ par °C)
- Le volume de pâte
- Le rapport eau/ciment de la pâte
- La nature et la finesse du ciment
- L'humidité interne du béton
- Le domaine de température étudié.

L'étude du coefficient thermique du béton nous amène à distinguer le béton ayant atteint sa maturité maximale et le béton en cours de durcissement. En effet, si le coefficient thermique du béton durci est relativement facile à déterminer expérimentalement, il n'en est pas de même pour le béton en cours de prise. C'est pourquoi nous nous limitons, dans ce qui suit, à l'étude de

l'évolution du coefficient thermique du béton au jeune âge protégé de la dessiccation.

Des travaux visant à évaluer l'influence de l'âge du béton sur son coefficient thermique, on peut dégager deux types de procédures pour la mesure des déformations:

Les essais volumétriques qui consistent à immerger une éprouvette de béton dans un liquide contenu dans un récipient surmonté d'un tube capillaire et à mesurer, dans ce tube, les variations de hauteur du liquide induites par les variations de volume de l'éprouvette [7].

Les essais unidirectionnels consistent à mesurer les variations de longueur des éprouvettes par des capteurs externes [8–13], ou par des capteurs inclus dans le béton [14].

Chacune de ces techniques présente des difficultés expérimentales bien identifiées [15, 16]. En effet, l'essai volumétrique est très sensible aux variations de volume de l'éprouvette dans des conditions isothermes mais, dans le cas d'une variation de température, les variations volumiques du liquide et du récipient sont grandes devant celles du béton. Par exemple, l'eau qui est souvent utilisée pour cette application a un coefficient thermique, à 20°C, environ 17 fois plus élevé que celui du béton. Dans le cas unidirectionnel, les mesures de déplacement se font sur des inserts aux extrémités de l'éprouvette et l'initialisation des déformations s'effectue alors que la prise a déjà débuté. Dans le cas d'éprouvettes coulées horizontalement, des frottements importants apparaissent au niveau du fond de moule, qui gênent les déformations libres du béton. Enfin, il peut y avoir des problèmes de confinement du béton à l'intérieur du moule, dans le cas où l'éprouvette n'est pas démoulée durant l'essai.

Malgré des différences importantes au niveau des montages expérimentaux utilisés par les différents auteurs cités précédemment, ceux-ci ont tous déterminé l'évolution du coefficient thermique en imposant, à des instants différents au cours de la prise, des élévations rapides de température au béton par une source externe (étuve, bac d'eau thermorégulée, etc.).

Les principaux résultats obtenus dans ces travaux sont les suivants:

(i) Weigler et Karl [12] ont étudié l'évolution du coefficient thermique d'un béton (rapport e/c de 0,55, teneur en ciment de 350 kg m^{-3}) entre 8 h et 6 jours après sa confection. A partir des coefficients thermiques des constituants, ils ont évalué celui du béton frais à $20 \cdot 10^{-6}$ par °C. De 8 à 24 h le coefficient thermique était de $15 \cdot 10^{-6}$ par °C et de 1 à 6 jours il était de $12 \cdot 10^{-6}$ par °C. Mamillan [10, 11] a aussi mesuré des coefficients thermiques très importants ($30 \cdot 10^{-6}$ par °C) sur des bétons ordinaires chauffés au jeune âge (30 min après la confection). Beaudoin et MacInnis [9] ont trouvé sensiblement les mêmes évolutions sur des mortiers et des pâtes de ciment au jeune âge.

(ii) Lofqvist [8] a observé pour sa part que, au jeune âge, le coefficient thermique du béton était plus grand

lors de la montée en température que lors du refroidissement (12 et $7 \cdot 10^{-6}$ par °C). Des résultats similaires ont été obtenus par Emborg [13].

(iii) Alexanderson [7] a remarqué un couplage entre la température maximale atteinte par le béton et le coefficient thermique de celui-ci au jeune âge lorsque les élévations de température étaient très importantes ($> 50^\circ\text{C}$). Il explique ce phénomène par les contraintes très élevées, engendrées par l'eau et l'air contenus dans le béton soumis à des élévations de température importantes, que le squelette rigide ne pourrait contenir, et qui provoqueraient une microfissuration responsable d'une déformation permanente.

Etant donné la complexité des montages expérimentaux et des procédures d'essai suivies, il nous est difficile de porter un jugement critique sur les résultats obtenus par ces chercheurs. Néanmoins, nous avons constaté que, dans aucune de ces études, les chercheurs n'ont tenu compte du retrait endogène du béton dans leurs analyses. Or, nous savons aujourd'hui que le béton est le siège, dans les premières heures qui suivent sa confection, de plusieurs phénomènes physico-chimiques qui engendrent des déformations endogènes. De plus, les résultats sont toujours présentés en fonction de l'âge du béton qui, d'un béton à l'autre, peut présenter des maturités tout à fait différentes. Pour toutes ces raisons, nous proposons une nouvelle méthode (essai et calculs) pour la détermination du coefficient thermique du béton au jeune âge.

3. ESSAI PROPOSE

3.1 Principe de l'essai

En l'absence d'échange hygrométrique avec le milieu ambiant, le béton subit des déformations endogènes et thermiques au jeune âge (problème traité en introduction) qu'il convient de séparer. La meilleure solution est de connaître à tous moments l'évolution du coefficient thermique. A cet effet, nous partons des hypothèses de base suivantes:

Pour une même formulation du béton, et à maturité égale, les déformations endogènes et les coefficients thermiques sont identiques quels que soient les historiques de température. Autrement dit, il n'existe pas de couplage entre les déformations d'origine(s) thermique et endogène.

A partir de ces hypothèses on réalise le suivi en continu des déformations et des températures de deux éprouvettes (n° 1 et 2) du même béton protégé de la dessiccation, ayant des isolations thermiques différentes, de manière à ce qu'elles subissent des historiques de température différents. Ce suivi est effectué depuis le coulage jusqu'à un âge d'une semaine environ. Les déformations ainsi mesurées cumulent des déformations endogènes et thermiques.

Ces déformations et ces températures sont ensuite exprimées (par un calcul numérique exposé plus loin) en

fonction de la maturité, μ , d'un même béton qui aurait mûri à une température constante (égale pour nous à 20°C). On peut alors exprimer les déformations mesurées sous cette forme:

$$\varepsilon_{m1}(\mu) = \varepsilon_{h1}(\mu) + \varepsilon_{\theta1}(\mu) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{m2}(\mu) = \varepsilon_{h2}(\mu) + \varepsilon_{\theta2}(\mu) \quad (2)$$

où (pour $i = 1$ ou 2):

$\varepsilon_{mi}(\mu)$: déformations mesurées

$\varepsilon_{hi}(\mu)$: déformations endogènes

$\varepsilon_{\theta i}(\mu)$: déformations thermiques

En admettant l'hypothèse de départ, à savoir que, pour une même maturité, les déformations endogènes ($\varepsilon_{hi}(\mu)$) sont égales, on peut écrire:

$$\varepsilon_{m1}(\mu) - \varepsilon_{m2}(\mu) = \varepsilon_{\theta1}(\mu) - \varepsilon_{\theta2}(\mu) \quad (3)$$

Ainsi, en faisant la différence de 1 et 2, on élimine les déformations endogènes. Les déformations résultantes correspondent uniquement à la différence des températures mesurées pour cette maturité.

Pour chaque éprouvette, la déformation d'origine thermique est égale au cumul de toutes les déformations thermiques calculé de la façon suivante:

$$\varepsilon_{\theta i}(\mu) = \int_0^{\mu} \alpha_i(\mu) \frac{d\theta_i(\mu)}{d\mu} d\mu \quad (4)$$

où (pour $i = 1$ ou 2):

$\alpha_i(\mu)$: coefficient thermique du béton

$\theta_i(\mu)$: température

Ou encore, en dérivant cette expression:

$$d\varepsilon_{\theta i}(\mu) = \alpha_i(\mu) d\theta_i(\mu) \quad (5)$$

Après avoir différencié l'équation 3, on y remplace les $d\varepsilon_{\theta i}(\mu)$ pour obtenir l'expression du coefficient de dilatation thermique en fonction de la maturité:

$$\alpha(\mu) = \frac{d(\varepsilon_{m1}(\mu) - \varepsilon_{m2}(\mu))}{d(\theta_1(\mu) - \theta_2(\mu))} \quad (6)$$

Ce calcul tient compte de l'hypothèse que les coefficients thermiques des éprouvettes 1 et 2 sont égaux pour une même maturité. On voit que le coefficient thermique est la pente de la courbe qui représente les écarts de déformation entre les éprouvettes 1 et 2 en fonction des écarts de température correspondants (les températures et les déformations étant exprimées en fonction de la maturité).

3.2 Traitement des données

L'exploitation des mesures de déformation et de température faites sur les éprouvettes d'essai nécessite que ces mesures soient exprimées en fonction de la maturité du béton. Dans ce travail, nous avons défini la maturité du béton par un 'temps équivalent' à l'aide de la loi

d'Arrhenius. Plusieurs chercheurs [17-22] ont montré que la loi d'Arrhenius (loi générale d'accélération des réactions chimiques lorsque la température augmente) pouvait s'appliquer pour l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent lors de l'hydratation du ciment. Cette loi est de la forme:

$$K = A \exp \frac{-E}{RT} \quad (7)$$

où

K : constante de vitesse pour chaque état d'avancement

A : constante

E : énergie d'activation

R : constante des gaz parfaits

T : température absolue

Si, pour un même état d'avancement de la réaction d'hydratation (même degré d'hydratation ou même maturité), nous admettons que la vitesse d'hydratation est uniquement fonction de la température à ce moment, nous pouvons alors, pour deux éprouvettes du même béton conservées à des températures isothermes différentes T_1 et T_2 , écrire le rapport des constantes de vitesse comme suit:

$$\frac{K_2}{K_1} = \exp \frac{E}{R} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = K(T) \quad (8)$$

où T_1 et T_2 sont des températures constantes (isothermes).

Ce rapport K_2/K_1 représente aussi le rapport des temps nécessaires pour obtenir un même degré d'hydratation (même maturité) pour des températures T_1 et T_2 . Ainsi pour un même degré d'hydratation, nous avons donc:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{t_1}{t_2} \quad (9)$$

où t_1 est l'âge du béton mûri à une température T_1 , et t_2 l'âge du béton mûri à une température T_2 .

Ainsi nous pouvons définir, pour un béton ayant subi un historique de température quelconque, T_2 , un temps équivalent, τ , égal à la durée de mûrissement de ce même béton à une température de référence, T_1 , qui permet d'obtenir le même degré d'hydratation et donc les mêmes propriétés physico-mécaniques de ce béton. Le calcul de ce temps équivalent se fait comme suit:

$$\tau = \int_0^t K(T) dt \quad (10)$$

Dans ce travail, la température de référence T_1 a été prise constante et égale à 293 K, ce qui donne:

$$\tau = \int_0^t \exp \frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_2} \right) dt \quad (11)$$

Ainsi la maturité du béton est exprimée en terme de temps équivalent correspondant à un mûrissement isotherme du béton à 293 K. Ceci nécessite bien sûr la connaissance a priori de l'énergie apparente d'activation du béton étudié. Bien que ce ne soit pas l'objet de cet article, on peut évoquer brièvement la méthode utilisée

pour déterminer ce rapport E/R . Pour cela on a réalisé des essais de compression successifs sur des éprouvettes conservées de deux façons différentes: elles sont toutes protégées de la dessiccation, mais un lot ($n^{\circ} 1$) d'éprouvettes est conservé à température ambiante ($20 \pm 1^{\circ}\text{C}$) tandis que l'autre lot ($n^{\circ} 2$) est conservé dans un isolant thermique. Ces deux lots subissent donc des historiques de température différents qui sont, par ailleurs, enregistrés. On se base sur l'hypothèse que, à même maturité, les résistances des éprouvettes du lot $n^{\circ} 1$ sont égales aux résistances des éprouvettes du lot $n^{\circ} 2$. Pour une résistance donnée, on peut trouver une valeur de E/R qui, utilisée dans l'équation 11, permet, après intégration, de calculer deux temps équivalents égaux (τ_1 et τ_2). Les bornes supérieures d'intégration (t_1 et t_2) correspondent aux temps réels mis par les éprouvettes des lots 1 et 2 pour atteindre la même résistance. Cette détermination s'effectue dans un programme utilisant une méthode de dichotomie. Pour le béton étudié, on trouve:

$$E = 4000R$$

L'expression des résultats en fonction de la maturité nécessite d'abord le calcul du temps équivalent à 20°C pour les deux éprouvettes à partir des températures mesurées. Ces valeurs sont stockées dans un tableau qui contient en colonnes les déformations, les températures, le temps réel et les temps équivalents calculés correspondant aux éprouvettes $n^{\circ} 1$ et $n^{\circ} 2$. Les données d'une ligne sont synchrones en temps réel. Ensuite un autre tableau est créé qui regroupe sur chaque ligne des données synchrones en temps équivalent. Pour chaque temps équivalent, dans le deuxième tableau, on garde aussi les temps réels correspondants.

Les valeurs obtenues dans ce deuxième tableau peuvent présenter un bruit numérique provenant de l'acquisition de données. Ce bruit est à l'origine d'un bruit numérique très important lorsqu'est calculé le coefficient thermique puisque celui-ci est obtenu en effectuant le rapport de deux signaux bruités. Pour limiter ces nuisances au maximum, il convient de réduire le bruit au moment des mesures et d'effectuer un lissage approprié des données du deuxième tableau.

Ces précautions étant prises, l'évolution du coefficient thermique peut être calculée sur un intervalle de temps équivalent qui correspond à la zone où les déformations mesurées sont fiables (lorsque le module du béton est supérieur à 1 GPa pour cette étude). Ces valeurs sont stockées dans la dernière colonne du deuxième tableau dont les indices sont proportionnels au temps équivalent.

4. EXPERIMENTATION

4.1 Dispositif expérimental

Les mesures de déformation et de température doivent débiter le plus tôt possible après la confection des deux éprouvettes et se poursuivre sur une durée de l'ordre d'une semaine. Les mesures de température ont été faites avec des thermocouples de type T (cuivre/constantan).

Si les mesures de température ne posent pas de problème particulier, il n'en va pas de même en ce qui concerne celles des déformations.

Les travaux de Boulay et Patiès [16] ont permis de choisir pour les mesures des déformations libres, des capteurs que l'on peut inclure dans le béton lors du coulage et présentant une rigidité suffisamment faible afin de pouvoir commencer les mesures de plus tôt possible. Une simulation numérique de l'interaction capteur-béton, effectuée sur CESAR-LCPC (code de calcul par éléments finis développé au LCPC [23]), a montré que le capteur de déformation choisi, le TML de type KM100B, fournit une information exploitable à partir du moment où le béton atteint un module élastique de 1000 MPa [16]. En deçà de cette valeur de module, les déformations indiquées par le capteur pourraient être corrigées en fonction des résultats du calcul numérique et fournir ainsi des informations pour des modules plus bas (< 30 MPa). Ces capteurs ont une certaine sensibilité thermique, qui peut être corrigée à partir de l'enregistrement des températures (le coefficient de correction est fourni avec chaque capteur).

Par ailleurs, si les déformations mesurées sur le béton sont gênées par des frottements sur les parois du moule ou sont confinées par celui-ci, les mesures effectuées ne sont pas fiables ou doivent être corrigées en faisant des hypothèses sur les frottements [15]. C'est pourquoi nous avons utilisé un moule souple en PVC en forme de soufflet (Fig. 1) que l'on peut, par exemple se procurer chez un fournisseur de matériel photographique (ce type de

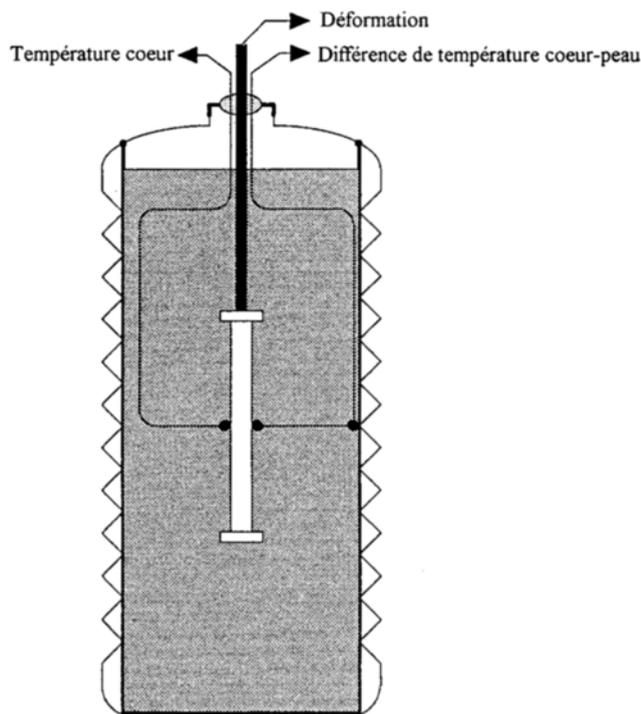


Fig. 1 Instrumentation des éprouvettes dans leur moule. Le béton est coulé dans un moule souple en PVC. Un extensomètre est positionné au centre avec des mesures de température à coeur et en peau.

réceptif permet de conserver les produits de développement à l'abri de l'air en comprimant la bouteille avant de la fermer avec son bouchon à vis). Tout autre système basé sur le même principe est, bien sûr, valable. De plus, on introduit dans ce moule souple une membrane cylindrique de néoprène pour éviter toute ségrégation du béton au droit des spires du soufflet. La hauteur de l'éprouvette est alors de 260 mm pour un diamètre moyen de 120 mm. Ces différentes enveloppes assurent également une protection contre le séchage.

Deux moules sont donc équipés chacun d'un extensomètre (maintenu par des fils de nylon traversant de façon étanche les parois du moule), d'un couple thermoélectrique attaché à l'extensomètre par du ruban adhésif, et de deux couples thermoélectriques montés en série dont une jonction est fixée à l'extensomètre et l'autre sur la paroi interne du moule. Ces deux thermocouples permettent de vérifier que l'écart de température entre le coeur et la peau de l'éprouvette ne dépasse pas des valeurs trop importantes ($< 0,5^{\circ}\text{C}$ environ). En effet, le champ de température dans l'éprouvette doit être le plus homogène possible. Les capteurs, ainsi préparés, sont ensuite reliés au système d'acquisition de données. Après fabrication des éprouvettes, l'une est conservée à température ambiante constante et l'autre est installée dans un réceptif cylindrique de dimensions suffisantes pour assurer la mise en place d'un calorifugeage (billes de polystyrène expansé) d'une épaisseur (environ 12 cm) à peu près constante dans toutes les directions (Fig. 2).

Une précaution supplémentaire consiste à s'assurer que la température du béton frais est égale à la température de la salle de conservation. Ceci évite des variations de température de l'éprouvette non calorifugée pendant la phase dormante du ciment alors que l'éprouvette

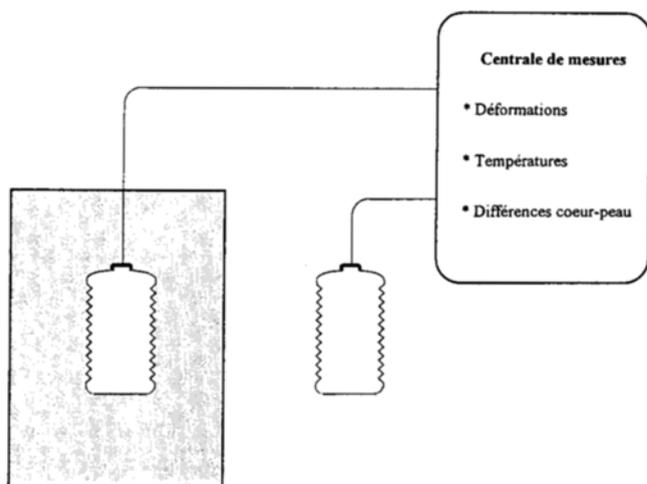


Fig. 2 Schéma de principe de l'essai. Une éprouvette est disposée dans une salle à température constante (20°C), l'autre, dans la même salle, est entourée d'un isolant thermique. Les capteurs sont reliés à une centrale de mesure automatique.

calorifugée, elle, ne subit pas de variation importante de température pendant ce laps de temps.

5. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Un béton ordinaire sans adjuvant a été réalisé afin de valider l'essai proposé précédemment pour la détermination du coefficient thermique.

La composition ainsi que les propriétés du béton frais sont présentées dans le Tableau 1. Les caractéristiques physico-chimiques du ciment et les propriétés des granulats sont données dans les Tableaux 2 et 3.

Le béton a été malaxé à sec pendant 1 min après quoi toute l'eau du mélange a été ajoutée (en moins de 30 s) puis le malaxage s'est poursuivi pendant encore 3 min (pour un temps total de malaxage de 4 min 30 s). Les 2 moules souples servant à la mesure en continu des températures et des déformations ont été remplis et vibrés à la table. Comme décrit au paragraphe 3, un des moules souples a été conservé à $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ alors que l'autre a été calorifugé.

Pour les essais mécaniques, des cylindres d'acier de

Tableau 1 Composition et caractéristiques du béton frais

Gravillon 5/20 mm	1200 kg m ⁻³
Sable 0/5	670 kg m ⁻³
Ciment	342 kg m ⁻³
Eau	171 l m ⁻³
E/C	0,5
Densité	2,36
Air occlus	1,9
Affaissement	60 mm

Tableau 2 Caractéristiques du ciment CPA HP

Silice soluble	22,49	
Silicium		
Alumine	3,6	
Oxyde de titane	0,18	
Oxyde ferrique	4	
Oxyde de calcium	64,25	
Oxyde de magnésium	0,77	
Oxyde de sodium	0,4	
Oxyde de potassium	0,49	
Anhydride sulfurique	2,5	
Chlore des chlorures	0,02	
Soufre des chlorures	0	
Perte au feu	1,48	
Oxyde de manganèse	0,09	
Surface spécifique (cm ² g ⁻¹)	3466	
Densité	3,168	
Teneur en chaux libre	0,73	
Résistance sur mortier (NFP 15-451)	à 2 jours	29 MPa
	à 7 jours	39 MPa
	à 28 jours	64 MPa
Temps de prise (NFP 15-431)	Début	3 h 40 min
	Fin	6 h 20 min

Tableau 3 Caractéristiques des granulats

Provenance Nature		Sable Seine Silico-calcaire	Gravillon Seine Silico-calcaire semi-concassé
Densité		2,65	2,65
Granulométrie	Maille (mm)	Passant (%)	Passant (%)
	25		100
	20		98
	16		80
	10		24
	5	100	2
	2,5	88	
	1,25	80	
	0,63	64	
	0,315	36	
	0,16	6	
0,08	0		

diamètre 16 cm × 32 cm ont été remplis et vibrés à la table selon la norme NF P 18 421 et conservés calorifugés et non calorifugés dans une salle à température contrôlée ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) jusqu'à leur démoulage. Au démoulage (le béton étant âgé d'environ 10 h), toutes les éprouvettes ont été revêtues de deux feuilles d'aluminium adhésives afin d'empêcher tout échange hygrométrique avec le milieu environnant puis conservées calorifugées et non calorifugées dans une salle à température contrôlée ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).

L'évolution du module d'élasticité et de la résistance au jeune âge a été suivie à partir d'essais successifs effectués sur les éprouvettes décrites précédemment en mesurant par ailleurs l'évolution de la température afin d'exprimer ces paramètres en fonction du temps équivalent à 20°C (Tableau 4).

6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.1 Mesure en continu des températures et des déformations

L'acquisition automatique des mesures de température et de déformation du béton (dans les moules souples) a débuté 115 min après l'ajout de l'eau de gâchage dans le mélange sec et s'est arrêtée environ 9 jours plus tard. L'évolution, en temps réel (enregistrements bruts) des températures et des déformations des deux éprouvettes est présentée sur les Figs 3 et 4. On constate que le démarrage des mesures s'est fait durant la période dormante du ciment, ce qui permet une bonne initialisation des mesures.

L'analyse de ces mesures repose, selon la méthode proposée dans cet article (paragraphe 3), sur l'expression des températures et des déformations en fonction de la maturité du béton (temps équivalent à 20°C , τ , paragraphe 3.2) quel que soit l'historique de température subi par le béton. Ainsi, l'application de l'équation 11 aux données

Tableau 4 Caractéristiques mécaniques et coefficients thermiques du béton étudié en fonction du temps équivalent^a

Temps équivalent à 20°C (h)	Résistance (MPa)	Module (GPa)	Coeff. thermique $\mu\text{m m}^{-1} \text{degC}^{-1}$
8,4	0,5 ^b	1 ^b	21,5
9,1	0,9 ^c	3,3 ^c	19,5
11,1	2 ^c	10,2 ^c	15
13,5	3,5 ^c	12,8 ^c	12,6
14,4	3,6 ^c		12,2
16,4	5,8 ^c	16,4 ^c	11,8
17	5,5 ^c		11,8
18,9	8,1 ^c	20,4 ^c	11,8
19,6	8,1 ^c		11,8
21,2	9,4 ^c	22,2 ^c	11,8
24	11,4 ^c		11,8
24,2	11,4 ^c	27,1 ^c	11,8
25,6	11,8 ^c		11,8
26,9	12,8 ^c		11,8
37,7	16,5 ^c		11,8
66,4	22,1 ^c		11,8
72	25,4 ^c	34,1 ^d	11,8
105,3	27,8 ^c		11,8
168	32 ^c	36,4 ^d	11,8
672	43,9 ^e	41,3 ^d	
2184	48,5 ^e	44,1 ^d	

^a Eprouvettes de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm. Conservation sous aluminium adhésif à 20°C . Les résultats des éprouvettes calorifugées et non calorifugées sont regroupés ici.

^b Valeurs extrapolées.

^c Une éprouvette testée et vitesse de déformation imposée à $100 \mu\text{m m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

^d Deux éprouvettes testés et vitesse de montée en charge imposée à $0,5 \text{ MPa s}^{-1}$.

^e Trois éprouvettes testées et vitesse de montée en charge imposée à $0,5 \text{ MPa s}^{-1}$.

enregistrées sur les éprouvettes calorifugées et non calorifugées permet de présenter, sur les Figs 5 et 6, les mesures de température et de déformation du béton en fonction, cette fois, d'un temps équivalent (τ) correspondant à l'âge de ce béton mûri à une température constante et égale à 20°C .

6.2 Evolution du coefficient thermique

Les mesures ayant été recalées en temps équivalent selon les modalités exposées ci-dessus, on reporte sur un graphique les écarts de déformation en fonction des écarts de température correspondants, on obtient la courbe de la Fig. 7 où la pente, en n'importe quel point, représente le coefficient thermique correspondant à la maturité du béton en ce point.

Le trait vertical apparaissant sur les Figs 6 et 7 représente le moment où le béton étudié a un module élastique de 1 GPa, valeur à partir de laquelle les déformations mesurées sont fiables (moins de 5% d'erreur). Les mesures de déformation faites sur le béton

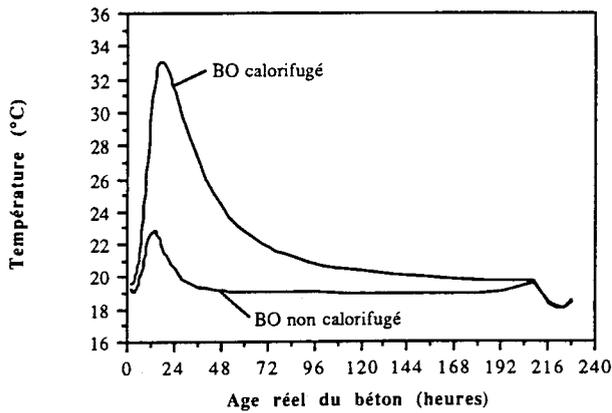


Fig. 3 Evolution des températures mesurées à coeur en fonction de l'âge réel.

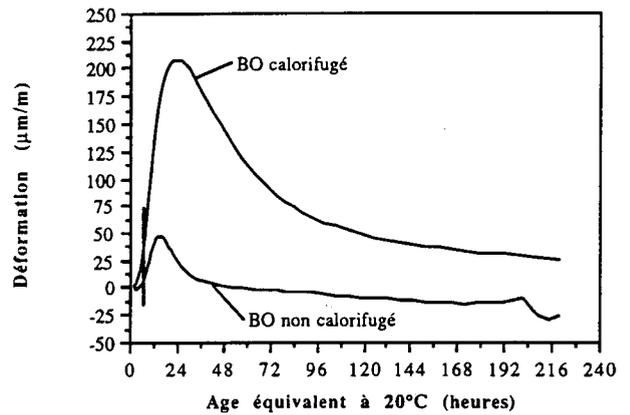


Fig. 6 Evolution des déformations mesurées en fonction de la maturité.

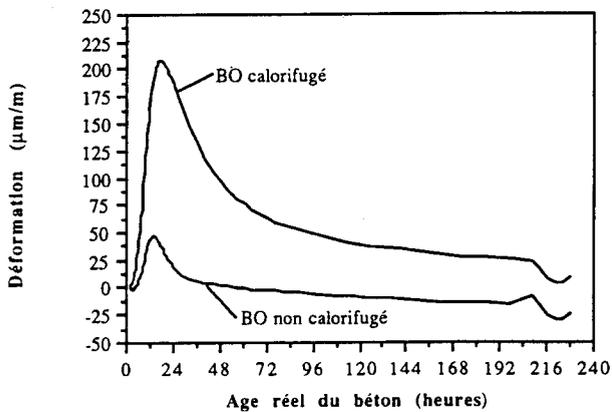


Fig. 4 Evolution des déformations mesurées en fonction de l'âge réel.

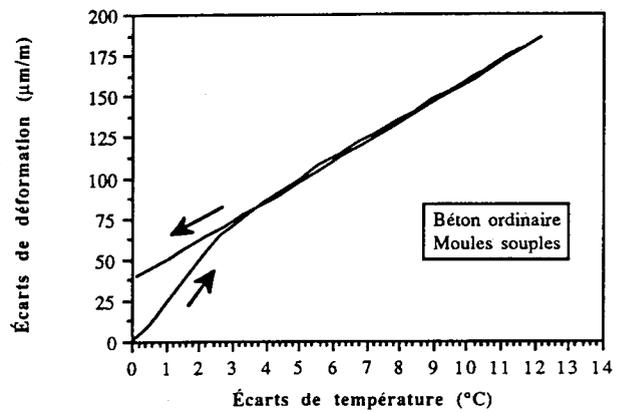


Fig. 7 Evolution de l'écart des déformations entre les deux éprouvettes en fonction des écarts de température correspondants (données exprimées en fonction de la maturité). La pente en tous points de ce diagramme représente le coefficient de dilatation thermique.

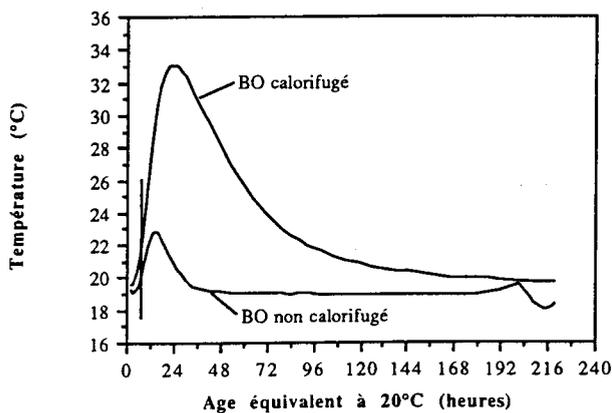


Fig. 5 Evolution des températures mesurées à coeur en fonction de la maturité (i.e. l'âge auquel, à 20°C, il aurait atteint la même résistance).

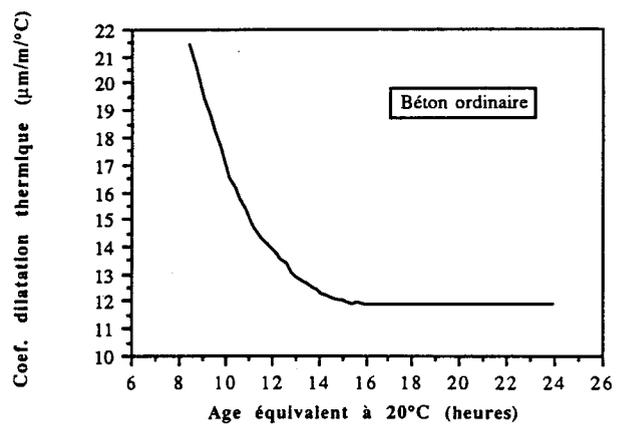


Fig. 8 Evolution du coefficient de dilatation thermique dans les premières heures du durcissement, en fonction de la maturité.

ayant un module inférieur à 1 GPa sont supérieures aux déformations vraies du béton et doivent donc être corrigées avant leur utilisation [16].

L'évaluation numérique du coefficient thermique du béton en fonction de sa maturité (temps équivalent), comme définie au paragraphe 3.2, nous a donné la courbe de la Fig. 8. La première valeur du coefficient thermique présentée sur cette courbe correspond à l'âge

($\tau = 8,4$ h) où le béton a un module de 1 GPa (Tableau 4). Un lissage approprié a été nécessaire pour obtenir cette figure.

Comment peut être évaluée l'erreur commise sur cette détermination? On peut séparer ce problème en trois sous-problèmes:

(i) Si un décalage d'origine affecte les mesures de température et de déformation, la dérivée des écarts n'en sera pas affectée. Les erreurs de décalage ne sont donc pas en cause. Par contre les erreurs sur la sensibilité des capteurs utilisés affectera les variations des grandeurs physiques considérées. Globalement, les incertitudes relatives sur les sensibilités des capteurs de déformation et de température sont largement majorées par une valeur de 1%.

(ii) La mesure de déformation affecte le champ de déformation voisin du capteur inclus dans le béton. Cette perturbation est quantifiée par un calcul aux éléments finis qui permet de déterminer une loi corrective fonction du module d'élasticité (donc de la maturité) du béton. Pour le capteur employé, on peut, par exemple, choisir une fonction (basée sur un modèle de ressorts) de cette forme:

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_v}{1 + \frac{C_1}{1 + C_2 E}}$$

où

ε_c : déformation corrigée

ε_v : déformation donnée par le capteur

$C_1 = 0,936$

$C_2 = 0,0055$

E : module d'élasticité en MPa.

Cette correction assure, d'après la simulation numérique, que les déformations corrigées ne s'écartent pas de plus de 0,7% des déformations imposées à l'éprouvette.

(iii) Une autre incertitude, plus difficile à définir, est due au recalage en temps équivalent des enregistrements bruts. On peut aborder ce problème en effectuant plusieurs recalages en temps équivalent et en faisant varier le rapport E/R pour chaque calcul. Des calculs de ce type réalisés sur les données présentées dans cet article ont montré que le coefficient thermique peut varier d'environ $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$ quand le rapport E/R varie de la moitié au double de sa valeur nominale. De plus, cette variation affecte surtout la valeur du coefficient thermique pour les maturités élevées (partie rectiligne du diagramme de la Fig. 7) sans modifier considérablement son évolution initiale.

On voit donc que l'incertitude sur cette détermination dépend principalement des incertitudes sur la valeur de l'énergie d'activation et de son éventuelle évolution avec la maturité du béton. Cependant, on peut noter que la valeur du coefficient thermique n'est pas trop sensible aux faibles variations du rapport E/R .

6.3 Evolution des déformations thermique et endogène

La connaissance de l'évolution du coefficient thermique nous permet d'abord de calculer les déformations d'origine thermique qui, par la suite, retranchées aux déformations totales mesurées, nous donnent les déformations endogènes. L'évolution des déformations endogènes des bétons calorifugé et non calorifugé est présentée dans la Fig. 9.

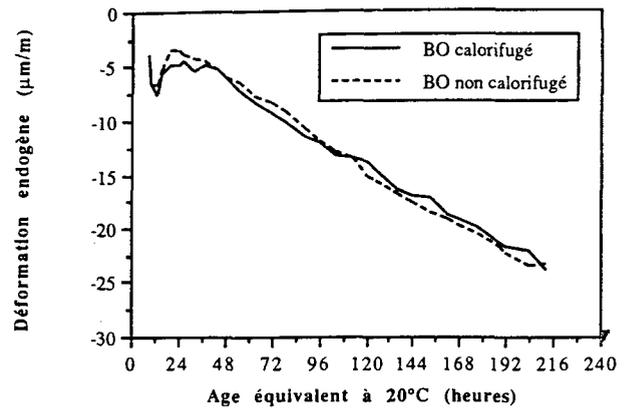


Fig. 9 Déformations endogènes obtenues, pour les deux éprouvettes, en retranchant aux déformations totales les déformations thermiques calculées à partir du diagramme de la Fig. 8.

7. INTERPRETATION ET DISCUSSION

Si l'on définit la prise du béton telle que la présente Acker [2] par la théorie de la percolation, il est alors possible de dire que la prise correspond, du point de vue mécanique, au moment où le béton possède un squelette rigide pouvant résister à une force, si petite soit-elle. La barre verticale de la Fig. 6 correspond à un béton ayant une résistance à la compression de l'ordre de 0,5 MPa et un module élastique d'environ 1 GPa, ce qui signifie qu'à ce moment précis la prise du béton a déjà eu lieu. On constate donc que, pour le béton calorifugé comme pour le béton non calorifugé, la prise apparaît bien avant le pic de température (Fig. 6), ce qui, naturellement, a plusieurs conséquences sur le comportement mécanique du béton soumis à d'importantes élévations de température (dues à l'hydratation) au très jeune âge (barrages, ponts, etc.).

Le coefficient thermique du béton ordinaire étudié passe de $21,5 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$ à $11,8 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$ en très peu de temps, soit environ 7,6 h en temps équivalent, pour ensuite demeurer constant à $11,8 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$ (Figs 7 et 8). Il est cependant intéressant d'observer que, durant cette même période, le module élastique du béton est passé de 1 GPa (valeur estimée) à environ 16 GPa (Tableau 4).

On peut avancer une explication physique à cette observation. Ainsi, juste après sa confection, le béton frais se présente comme une suspension de grains solides dans de l'eau où chaque constituant a son propre coefficient thermique (eau à $20^{\circ}\text{C} = 200 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$, clinker = $30 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$, granulats = 5 à $12 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$) et où la déformation de chacun de ces constituants n'est nullement gênée. Un calcul d'après une loi de mélange sur le béton frais donne un coefficient thermique de $44,5 \cdot 10^{-6}$ par $^{\circ}\text{C}$. Cependant, avec l'hydratation du ciment, naît progressivement au sein du béton une structure rigide (pâte de ciment durcie) qui, selon sa rigidité, gênera plus ou moins les déformations de certains constituants, notamment ceux ayant un fort coefficient de dilatation thermique, comme l'eau et l'air. Ainsi, au

fur et à mesure que l'hydratation du ciment avance, il se produit simultanément une augmentation du module du squelette poreux du béton et une diminution de la quantité d'eau libre, due à la contraction Le Chatelier, ce qui se traduit par une résistance de plus en plus importante de la structure de la pâte de ciment durcie vis à vis des variations de volume (dues à des variations de température) de l'eau et de l'air au sein des pores capillaires et des vides d'air. *Il existe donc, selon nous, un seuil de rigidité (donc, du module) à partir duquel le coefficient thermique de la pâte de ciment n'est pratiquement plus influencé par les variations de volume de l'eau libre, mais où il ne dépend principalement que des caractéristiques de son réseau poreux.*

De plus, la Fig. 7 montre clairement que le coefficient thermique de ce béton n'est pas plus élevé lors de la montée en température (à partir du moment où il devient constant) que lors du refroidissement comme l'ont trouvé certains chercheurs [8, 13]. Ceci met en évidence l'importance de bien séparer, dans l'approche expérimentale, les différentes composantes des déformations au jeune âge. La technique d'essai ainsi que le traitement des données proposé atteint bien cet objectif.

Finalement, la Fig. 9 qui présente les évolutions comparées des déformations d'autodessiccation des éprouvettes calorifugée et non calorifugée, montre à l'évidence que, pour ce béton et pour le domaine des températures atteintes, notre hypothèse de départ est vérifiée, c'est à dire qu'aucun couplage n'existe entre les déformations thermiques et les déformations endogènes. On peut aussi remarquer que le retrait endogène de ce béton ne débute qu'à un âge de 48 h, ce qui peut faire penser que les effets mécaniques de l'autodessiccation sont assez tardifs sur ce béton.

8. CONCLUSIONS

La méthode présentée permet une détermination en continu du coefficient de dilatation thermique du béton au jeune âge. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les déformations endogènes du béton (en l'absence de séchage) sont découplées des déformations d'origine thermique.

Cette procédure consiste à suivre l'évolution des températures et des déformations de deux éprouvettes du même béton subissant deux historiques de température différents, à synchroniser en temps équivalent les mesures effectuées, à retrancher (à même temps équivalent) les déformations d'une éprouvette aux déformations de l'autre pour éliminer les déformations endogènes qui sont, selon l'hypothèse de départ, identiques dans les deux éprouvettes. Cet écart de déformation correspond à la différence de température, à même maturité, entre les deux éprouvettes.

Les difficultés expérimentales liées à une telle démarche ont été maîtrisées, notamment par l'utilisation d'un capteur souple inclus dans le béton frais (capteur qui a fait l'objet d'une modélisation numérique) et par l'uti-

lisation d'un moule souple qui ne gêne pas les déformations libres du béton durcissant.

D'après cette méthode, le coefficient de dilatation thermique d'un béton ordinaire évolue en quelques heures d'une valeur élevée à une valeur constante qui ne dépend pas du sens de variation de la température. Un comportement à seuil existerait, selon nous, qui expliquerait cette évolution d'un état de suspension solide où l'eau a une grande influence sur le coefficient de dilatation thermique vers un état de matériau suffisamment rigide pour que l'eau et les gaz encore présents n'aient plus une aussi grande influence.

La connaissance du coefficient de dilatation thermique du béton étudié nous a permis, ensuite de déterminer l'évolution des déformations endogènes qui, pour ce béton, commencent à apparaître environ 48 h après la fabrication.

Enfin, les déformations endogènes des deux éprouvettes, exprimées en temps équivalent, sont quasiment identiques, ce qui semble bien vérifier notre hypothèse de départ, tout au moins pour le béton et le domaine de température étudié.

Cette méthode est prometteuse; cependant, il reste à tester sa répétabilité et à la comparer avec des résultats obtenus sur éprouvette isotherme.

REFERENCES

1. Buil, M., 'Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante', *Rapport de Recherche LPC*, n° 92 (1979).
2. Acker, P., 'Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physicochimique', *Ibid.*, n° 152 (1988).
3. Vernet, C. et Cadoret, G., 'Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours', dans 'Les Bétons à Hautes Performances: Caractérisation, Durabilité, Applications', sous la direction d'Yves Malier (Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1991) pp. 115-128.
4. Davis, R. E., 'A summary of the results of investigations having to do with volumetric changes in cements, mortars and concretes due to causes other than stress', *ACI J.* **26** (1930) 407-443.
5. Meyers, S. L., 'Thermal expansion characteristics of hardened cement paste and of concrete', *Highway Res. Board*, **30** (1950) 193-203.
6. Emanuel, J. H. et Hulsey, L., 'Prediction of the thermal coefficient of expansion of concrete', *ACI J.* (avril 1977) 149-155.
7. Alexandersson, J., 'Strength losses in heat cured concrete' (Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1972), *Handl.*, n° 43, p. 135.
8. Lofqvist, B., 'Temperatureffekter i hardnande betong', *Tecniskt meddelande fran kungl. Vattenfallsstyrelsen Nr 22*, Stockholm, rapporté par Emborg [13].
9. Beaudoin, J.J. et Macinnis, C., 'Dimensional changes of hydrated Portland cement mortar due to slow cooling and warming', *Cement Concr. Res.* n° 2 (1972) 235-240.
10. Mamillan, M., 'Recherches expérimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage', *Annales de l'ITBTP*, n° 267-268 (mars-avril, 1970) 133-203.

11. Mamillan, M., 'L'accélération du durcissement du béton par la chaleur, l'influence des conditions de traitements et de la composition sur la qualité du béton', *Ibid.*, n° 302 (février 1973) 15–28.
12. Weigler, V. et Karl, S., 'Junger Beton', Teil I+II, *Betonwerk + Fertigteiltechnik*, n° 6+7, rapporté par Byfors [18].
13. Emborg, M., 'Thermal stresses in concrete structures at early ages', Thèse de doctorat, Lulea University of Technology, Sweden, 1989.
14. Yamakawa, H., Nakauchi, H., Kita, H. et Onuma, 'A study of the coefficient of thermal expansion of concrete', *Trans. Japan Concr. Inst.* **8** (1986) 111–118.
15. Baron, J., 'Mesure de la variation de longueur d'une éprouvette de béton, mortier ou pâte de ciment, au premier âge', *Rapport de recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 15 (mai 1971) 9–25.
16. Boulay, C. et Paties, C., 'Mesure des déformations du béton au jeune âge', *Mater. Struct.* **26** (1993) 308–314.
17. Freiesleben Hansen et Pedersen, 'Maleinstrument til kontrol af betons haerdning', *Nordisk Betong* **1** (1977) 31–55, rapporté par Byfors [18].
18. Byfors, J., 'Plain concrete at early ages', 'CBI Research Report', n° 3:80 (Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1980).
19. Bresson, J., 'La prévision des résistances des produits en béton', dans Colloque RILEM International sur le béton jeune, Paris, 1982, Vol. I, pp. 111–115.
20. Regourd, M. et Gautier, E., 'Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré', *Annales de l'ITBTP*, n° 387, Journée d'étude 'Le durcissement accéléré des bétons', série béton n° 198, octobre 1980, p. 83–96.
21. Acker, P., Lau, M. Y. et Collet, F., 'Comportement différé du béton: validation expérimentale de la méthode du temps équivalent', *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **163** (septembre–octobre 1989) 31–39.
22. Carino, N. J., 'Maturity functions for concretes', RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, Vol. I, Paris, 1982, pp. 123–128.
23. Humbert, P., 'CESAR-LCPC: mode d'emploi' (document LCPC, Paris, 1991).

SUMMARY

Evolution of the thermal expansion coefficient of concrete as a function of its maturity at very early ages

In the first hours after its production and without external loading, the concrete suffers volume changes due to (i) the formation of cement hydrates (autogenous shrinkage), (ii) the heat produced by the reaction, and (iii) air drying. Structural detrimental cracks can appear if these deformations are restrained. The experimental determination of the autogenous shrinkage, without external drying, requires, for each step of hydration, knowledge of the thermal strains,

i.e., the thermal expansion coefficient. After a review of the relevant literature, a method is proposed for the continuous determination of the thermal expansion coefficient. This method contains an experimental part and a measurement procedure based on the hypothesis that there is no interdependence between autogenous shrinkage and thermal strain. After this calculation, an expression is derived for the thermal expansion coefficient as a function of the concrete maturity. This makes it possible to subtract the thermal strains from the total strains measured, in order to obtain the autogenous shrinkage as a function of the maturity. The method is then applied to a normal concrete.