

Mise au point d'une cure thermique représentative de l'échauffement d'une pièce massive de béton

Renaud-Pierre MARTIN*
François TOUTLEMONDE

Université Paris-Est, Laboratoire central
des Ponts et Chaussées, Paris, France

■ RÉSUMÉ

La réaction sulfatique interne (RSI) est une pathologie du béton qui affecte, suivant leur composition, certains matériaux ayant subi au jeune âge une élévation conséquente de leur température (seuil de l'ordre de 65 °C). Lors du coulage de pièces massives notamment, sous les effets combinés de transferts thermiques faibles et de l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment, la température à cœur peut augmenter de manière significative et induire des risques de RSI importants. Afin d'étudier les effets mécaniques de cette pathologie pour mieux gérer les ouvrages qui en sont atteints, des études sont en cours au LCPC. Cet article décrit la mise au point d'un procédé de cure thermique permettant de simuler les conditions de prise au cœur d'une structure massive afin d'induire des effets de RSI. Il présente dans un premier temps les concepts de dimensionnement considérés et notamment l'utilisation de l'essai QAB pour la détermination de la phase de chauffe. Ensuite, une validation numérique et expérimentale de la cure thermique est proposée.

Development of a thermal treatment representative of heating a massive concrete element

■ ABSTRACT

Delayed Ettringite Formation (DEF) is a concrete pathology that affects certain materials, depending on their composition, previously exposed at early age to a significant temperature rise (with a threshold of about 65 °C). During the casting of massive elements in particular, the combined effects of weak heat transfers and of the heat of hydration can lead to a significant temperature increase in the core of the structure inducing a major risk of DEF. In order to investigate the mechanical effects of this reaction to improve the management of the affected structures, studies are ongoing at the French Public Works Research (LCPC). This article describes the design of a heat treatment process that simulates the setting conditions in the core of a massive structure to induce DEF. The design concepts are presented in a first part, and describes in details the use of the QAB test to determine the heating phase. Then a numerical and experimental validation of this heat treatment is proposed in a second part.

* AUTEUR À CONTACTER :

Renaud-Pierre MARTIN
renaud-pierre.martin@lcpc.fr

INTRODUCTION

La réaction sulfatique interne (RSI) est une réaction endogène susceptible d'endommager des structures en béton : cette pathologie se caractérise par un gonflement du matériau conduisant à sa fissuration et à une dégradation de ses performances mécaniques. En France, plusieurs dizaines d'ouvrages sont aujourd'hui atteints de cette réaction [1]. Elle est susceptible d'affecter des matériaux ayant

subi une élévation de température importante au jeune âge, au-delà d'un seuil de l'ordre de 65 °C [2]. Ainsi, les structures massives se révèlent être particulièrement exposées à ce risque, les effets combinés de l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment et de transferts thermiques faibles conduisant à des élévations de température à cœur importantes et prolongées. Ces variations de température interne sont responsables de mécanismes de dissolution-recristallisation d'ettringite expansive dans le matériau durci [3, 4], conduisant alors aux désordres mentionnés ci-dessus et responsables de graves problèmes d'intégrité physique à l'échelle de la structure.

Pour mettre au point des outils utiles à la gestion des ouvrages atteints [5], le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) mène actuellement une étude expérimentale [6] ayant pour objectif d'améliorer la compréhension des effets mécaniques de la RSI à l'échelle du matériau (essais sur éprouvettes) et de la structure (essais sur poutres) à l'instar des actions déjà menées sur la réaction alcali-granulat dans le passé [7]. Pour générer un « potentiel de RSI », cette étude expérimentale propose de soumettre les matériaux après coulage à une cure thermique représentative des conditions thermique et hydrique dans lesquelles se déroule la prise au cœur d'une pièce massive de béton. Afin d'appliquer une histoire thermique comparable pour les différents corps d'épreuve, une approche spécifique a été mise en œuvre afin de tenir compte des différents mécanismes thermiques mis en jeu.

Cet article présente la méthodologie développée pour la mise au point du procédé de traitement thermique. Il présente dans un premier temps son dimensionnement, mettant notamment en évidence l'intérêt de l'essai QAB pour la définition de la phase de chauffe. Dans un second temps, il expose des éléments de validation numérique avec la modélisation du traitement thermique à l'aide du code aux éléments finis CESAR-LCPC (module TEXO). Enfin, la validation expérimentale du traitement thermique est décrite.

DÉFINITION THÉORIQUE DE LA CURE THERMIQUE

■ Cahier des charges

Après coulage, on souhaite appliquer une cure thermique aux corps d'épreuve afin de recréer les conditions de maturation existant au cœur d'une pièce massive, notamment les conditions de température susceptibles d'y régner du fait de l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment. Afin de faciliter la réalisation de la cure thermique en laboratoire (en réduisant notamment considérablement le temps de refroidissement du matériau par rapport à la réalité), le profil de température réel de l'élément massif est idéalisé sous la forme d'un trapèze. Il convient donc de déterminer les phases de chauffe, palier de température constante et refroidissement nécessaires à la réalisation d'un tel procédé.

L'objectif principal de la cure thermique est d'appliquer une histoire thermique répétable pour l'ensemble des corps d'épreuve et ce afin de disposer de matériaux dont le « potentiel de RSI » est comparable : on a en effet pu montrer [8, 11] que la température maximale atteinte mais aussi la durée de maintien à haute température influent sur l'amplitude potentielle de la RSI. En particulier, il est souhaité que les écarts de température entre les différents corps d'épreuve soient inférieurs à ± 1 °C durant le palier de température constante. D'autre part, l'application d'un champ de température homogène pour chaque corps d'épreuve tout au long de cette phase est souhaitée afin que toutes les parties de la structure modèle puissent être considérées comme identiquement réactives, quelle que soit leur taille : les différences de température au sein d'un même corps d'épreuve ne doivent pas excéder ± 1 °C. En outre, le procédé mis au point se doit d'être répétable : les écarts de répétabilité entre deux cures thermiques successives ne doivent pas dépasser ± 1 °C durant le palier. Enfin, la phase de refroidissement ne doit pas engendrer de fissuration de choc thermique.

■ Humidité

Lors de la fabrication d'une pièce de béton, l'hydratation du ciment n'utilise qu'une partie de l'eau de gâchage pour la formation d'hydrates. Cet excès d'eau, outre la porosité qu'il crée après séchage du matériau, induit une humidité relative importante dans le matériau au jeune âge. Des résultats expérimentaux [9] montrent que l'humidité relative dans de petits prismes de béton ($76 \times 76 \times 280 \text{ mm}^3$) reste supérieure à 90 % pendant plus de 7 jours, et ce même pour des corps d'épreuve soumis à un séchage sous une humidité relative égale à 50 %.

A la lumière de ces éléments, il a été décidé de réaliser la cure thermique en eau. Ceci permet d'une part de disposer de conditions de cure réalistes par rapport aux conditions d'humidité régnant au cœur d'une pièce massive après coulage, et d'autre part de maintenir saturés les corps d'épreuve ce qui favorisera le développement de la RSI. Par ailleurs, la réalisation pratique d'un dispositif de traitement thermique est facilitée par l'emploi d'eau plutôt que d'air humide. L'eau apporte également une inertie thermique au dispositif de cure qui rend la régulation de la température plus robuste vis-à-vis des perturbations extérieures.

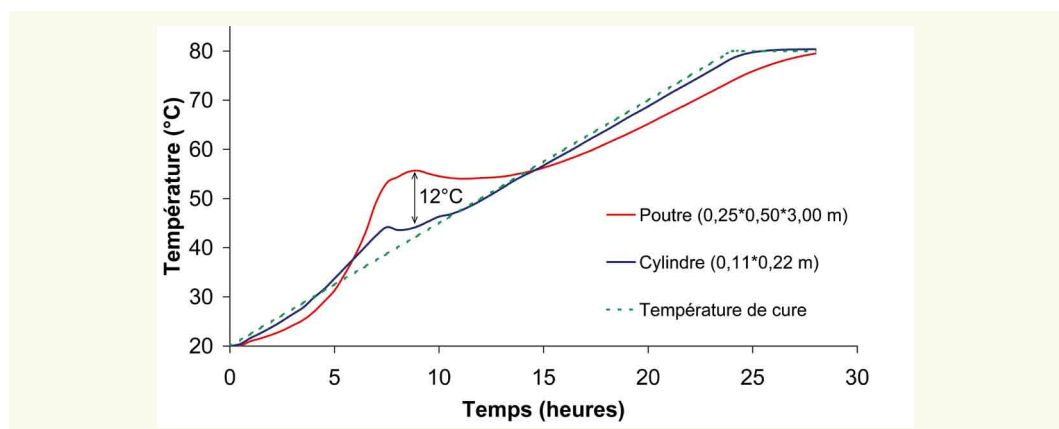
■ Phase de chauffe

Étant donné les choix du programme en termes de taille de corps d'épreuve, l'objectif du traitement thermique (indifféremment appelé ici « cure thermique ») est d'appliquer au sein de poutres ($0,25 \times 0,50 \times 3,00 \text{ m}^3$) et d'éprouvettes cylindriques (de l'ordre de 0,1 m de diamètre pour 0,2 à 0,3 m de hauteur) une même histoire thermique afin de disposer d'un potentiel de gonflement équivalent d'un corps d'épreuve à un autre, mais également au sein d'un même corps d'épreuve.

Du fait de leurs dimensions, le contrôle de la température au cœur des poutres par application d'une condition limite en température en surface est difficile à assurer, et ce tout particulièrement au jeune âge où le mécanisme thermique prédominant est l'hydratation du ciment. D'autre part, l'inertie thermique des poutres pose également des problèmes de dépassement de consigne de cure lors de la transition phase de chauffe – palier de température constante : le cœur d'une poutre ne « ressent » le changement de régime de chauffe que tardivement par rapport à sa surface. Au contraire, la température de petits corps d'épreuve cylindriques est aisément contrôlée par la température du bain de cure, grâce notamment à la prépondérance dans ce cas des phénomènes d'échange thermique (rapport surface d'échange/volume plus important pour une éprouvette, faible inertie thermique et coefficient d'échange thermique élevé dans l'eau). Ces phénomènes sont illustrés par la **figure 1** : dans cet exemple, la température au cœur d'une poutre présente des écarts par rapport à la consigne de cure bien plus importants que pour une éprouvette cylindrique ce qui conduit entre corps d'épreuve de différentes dimensions à des écarts de température conséquents.

Afin d'éviter ces effets d'échelle, il a été décidé de simuler des conditions adiabatiques durant la phase initiale de montée en température (cf. **figure 3**) : l'histoire des températures en phase de

figure 1
Simulation des températures à cœur d'éléments en béton soumis à un échauffement (échauffement constant à $2,5 \text{ °C/h}$).



chauffe est calquée sur l'évolution de température déterminée par un essai QAB pour la formule de béton considérée. En limitant les échanges thermiques avec l'extérieur, cette approche permet d'assurer une température homogène dans les corps d'épreuve quelle que soit leur taille : ceci revient à asservir (de manière théorique) la température de cure à l'élévation de température mesurée lors de l'hydratation du ciment en conditions adiabatiques. Par ailleurs, ceci permet également de recréer une histoire de température se rapprochant de celle d'une pièce massive après coulage où les conditions d'échange très faible conduisent à des élévations de température importantes lors de l'hydratation du ciment.

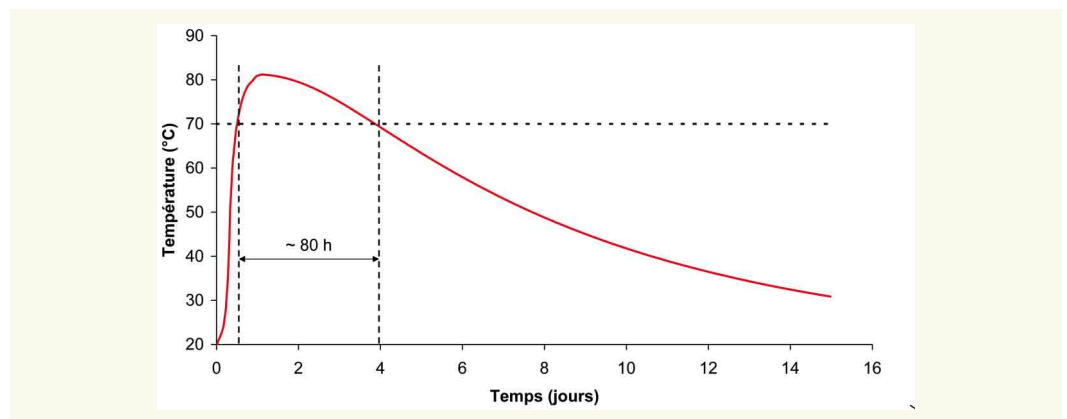
■ Palier de température

› Durée

En fin de phase de chauffe, les corps d'épreuve sont soumis à un palier de température constante permettant, outre la solubilisation des cristaux d'ettringite déjà formés lors de la prise du ciment, l'adsorption des sulfates par les C-S-H qui constitueront alors une réserve de réactifs pour le développement de RSI par la suite [3, 10]. Le potentiel d'expansion augmente avec la durée de cure thermique [4, 8, 11]. D'autre part, des mesures sur ouvrages réels montrent que la température au sein d'une pièce massive peut rester supérieure à 70 °C pendant huit jours [12]. La **figure 2** correspond à la simulation de l'évolution de température au cœur d'une pièce massive de dimensions $2 \times 2 \times 8 \text{ m}^3$ (caractéristiques du matériau identiques à celles présentées en section « Modélisation », coefficient d'échange des faces latérales et inférieure égal à $2,55 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour représenter un coffrage en bois de 20 mm d'épaisseur, coefficient d'échange de la face supérieure non coffrée égal à $10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, température extérieure constante égale à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) : dans ce cas, la température excède 70 °C durant plus de trois jours.

A la lumière de ces éléments, une durée de palier de trois jours a été fixée, faisant ainsi un compromis entre le potentiel de gonflement apporté par le traitement thermique et les contraintes d'organisation associées à la durée de celui-ci.

figure 2
Simulation de l'évolution de température au jeune âge au cœur d'une pièce massive ($2 \times 2 \times 8 \text{ m}^3$).



› Température

La phase de chauffe simule des conditions adiabatiques en ajustant la température de cure sur le dégagement de chaleur évalué lors de la réalisation d'un essai QAB (cf. section « Phase de chauffe »). Ainsi, la température atteinte à la fin de cette phase peut être évaluée en calculant l'élévation de température du matériau en conditions adiabatiques. Waller propose une approche permettant d'évaluer ce dégagement de chaleur [13]. Dans cet article, nous considérons la formule de béton donnée par le **tableau 1**. L'équation (1) permet de calculer l'élévation de température en conditions adiabatiques [13].

tableau 1
Formulation du béton
(kg/m^3).

Ciment	Eau d'ajout	Sable siliceux 0/2	Gravillon siliceux 4/8	Gravillon siliceux 8/12	E/C
410	199	854	100	829	0,46

$$\Delta T(\infty) = \frac{Q(\infty)}{C_{th}} \quad (1)$$

Dans cette relation, $\Delta T(\infty)$ est l'élévation de température en conditions adiabatiques à la fin de l'hydratation du ciment (en K), $Q(\infty)$ est la chaleur d'hydratation du béton à temps infini (en J/m³ de béton) et C_{th} est la capacité calorifique moyenne du béton (en J/K/m³) évaluée sur la base du béton frais et des capacités thermiques massiques des constituants à 20 °C.

La chaleur d'hydratation du ciment peut être évaluée en l'absence d'autre information à partir de la composition chimique de celui-ci [13]. Le **tableau 2** donne la composition chimique du ciment utilisé. Waller [13] propose les chaleurs massiques d'hydratation données dans le **tableau 3** pour chaque phase du ciment. La chaleur d'hydratation du ciment se calcule alors suivant l'équation (2) où q_c est la chaleur massique d'hydratation du ciment (en J/g), q_i la chaleur d'hydratation de la phase i (en J/g) et ϕ_i la proportion massique de la phase i dans le ciment (en g/g). L'application numérique de l'équation (2) donne une chaleur massique d'hydratation du ciment de 384 J/g.

tableau 2

Composition du ciment (méthode de Bogue).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄ ·2H ₂ O
41,5 %	27,2 %	5,0 %	11,5 %	7,4 %

tableau 3

Chaleurs massiques d'hydratation des phases du ciment selon [13] (J/g).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
510	260	1100	410

$$q_c = \sum_i (\phi_i \cdot q_i) \quad (2)$$

La chaleur d'hydratation du ciment à temps infini $Q(\infty)$ se calcule en appliquant l'équation (3). Dans cette relation, $\alpha(\infty)$ est le degré d'hydratation final du ciment, c le dosage en ciment du béton considéré (en g/m³) et q_c la chaleur massique d'hydratation du ciment (en J/g).

$$Q(\infty) = \alpha(\infty) \cdot c \cdot q_c \quad (3)$$

Sur la base d'une étude bibliographique et de ses propres résultats, Waller propose l'équation (4) pour évaluer le degré d'hydratation final d'un béton [13]. Le degré d'hydratation final du béton considéré est donc égal à 0,78 pour un rapport E/C de 0,46. Avec un dosage en ciment de 410 kg/m³, le dégagement de chaleur en conditions adiabatiques à temps infini du béton considéré est donc de 123 000 kJ/m³.

$$\alpha(\infty) = 1 - e^{-3,3 \frac{E}{C}} \quad (4)$$

Il reste à ce stade à calculer la capacité calorifique du béton. Waller [13] propose l'équation (5) où m_i est la quantité de constituant i dans le mélange (en g/m³) et c_i la capacité thermique massique du constituant i (en J/K/g). La capacité thermique massique d'un ciment peut s'évaluer par combinaison linéaire des proportions massiques de chaque phase du ciment et de leurs capacités thermiques massiques données dans le **tableau 4** [13]. Le calcul permet alors d'évaluer la capacité thermique massique à 20 °C du ciment à 0,72 J/K/g.

$$C_{th} = \sum_{i=\text{constituants}} m_i \cdot c_i^{th} \quad (5)$$

tableau 4

Capacités thermiques massiques à 20°C des phases du ciment [13] (J/K/g).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄ ·2H ₂ O
0,745	0,740	0,768	0,815	1,074

Waller [13] donne une capacité thermique massique à 20 °C égale à 0,73 J/K/g pour des granulats siliceux et à 4,19 J/K/g pour l'eau. Afin de prendre en compte la réduction de capacité thermique

massique induite par la mobilisation d'eau pour la formation d'hydrates, l'AFNOR [14] propose d'utiliser une capacité thermique massique réduite de l'eau égale à 3,80 J/K/g. Jolicœur [15] considère quant à lui une réduction de capacité thermique massique fonction de la quantité d'eau liée suivant l'équation (6).

$$C_{th} = \sum_{i=\text{constituants}} m_i \cdot c_i^{th} - e_{liée} \cdot 2,0 \quad (6)$$

Dans cette relation, la masse d'eau liée est évaluée en considérant qu'elle est égale à 23 % de la masse de ciment hydraté. Enfin, Waller propose quant à lui une réduction forfaitaire de la capacité calorifique suivant l'équation (7) permettant de prendre en compte le changement de capacité thermique du béton sous l'effet de l'hydratation des différentes phases du ciment. c est le dosage en ciment du béton (kg/m³) et α le degré d'hydratation de celui-ci.

$$C_{th} = \sum_{i=\text{constituants}} m_i \cdot c_i^{th} - 0,44 \cdot c \cdot \alpha(\infty) \quad (7)$$

Le **tableau 5** synthétise les résultats du calcul de capacité calorifique du béton en fonction de l'approche considérée. La précision et l'exactitude de ces capacités thermiques volumiques peuvent difficilement être évaluées : la réaction d'hydratation du ciment se révèle en effet très complexe et conduit à la formation d'hydrates possédant eux-mêmes leur propre capacité calorifique. En outre, ces capacités calorifiques varient en réalité avec la température. Néanmoins, cette approche a le mérite de la simplicité et permet d'obtenir une estimation de la capacité calorifique réelle du matériau sans devoir mettre en œuvre des essais complexes.

Finalement, en fonction de l'approche considérée pour l'évaluation de la capacité thermique du matériau, le **tableau 5** donne une évaluation de l'élévation de température du béton en conditions adiabatiques à partir de l'équation (1). Les fabrications de corps d'épreuve étant réalisées à une température moyenne de 20-25 °C, la température finale en conditions adiabatiques sera donc de l'ordre de 75-80 °C. A ce stade de la mise au point du traitement thermique, une température de palier de 80 ± 1 °C est retenue.

tableau 5

Estimation de la capacité calorifique du béton (kJ/K/m³) et de l'élévation de température associée en conditions adiabatiques (K).

Méthode de calcul	Sans réduction H ₂ O (eau libre)	Réduction H ₂ O forfaitaire NF EN 196-9	(Jolicœur 1994)	(Waller 2000)
Capacité calorifique (kJ/K/m ³)	2 388	2 314	2 240	2 247
Élévation de température telle que calculée (K)	51	53	55	55

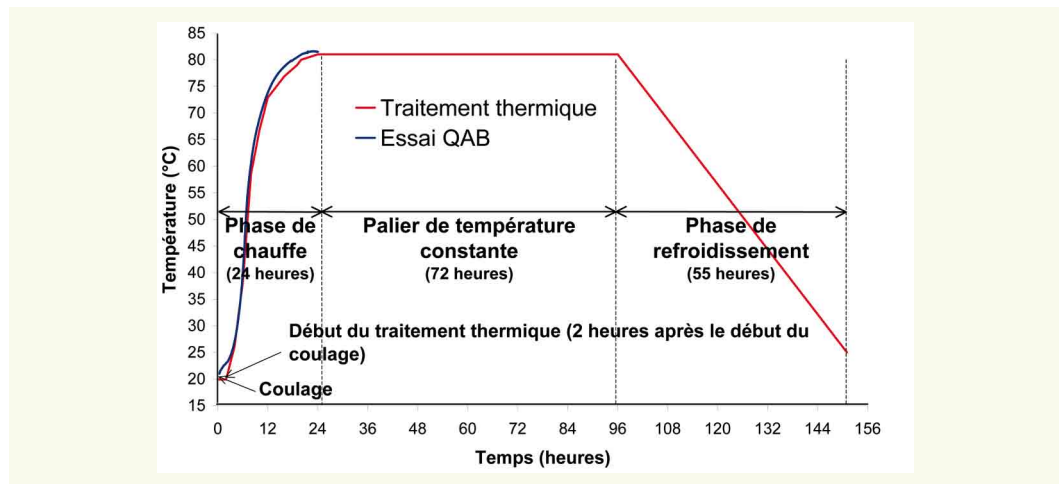
■ Refroidissement

Le traitement thermique que l'on souhaite appliquer aux corps d'épreuve s'achève par une phase de refroidissement. Afin d'éviter la fissuration des corps d'épreuve par choc thermique et pour être représentatif des phénomènes observés lors de la fabrication de pièces massives, la vitesse de refroidissement est fixée à -1 °C/h. Ceci permet également de limiter la durée totale du procédé afin que celui-ci soit aisément réalisable en laboratoire.

■ Profil de température de cure

Sur la base des critères déterminés ci-avant, le traitement thermique appliqué aux corps d'épreuve est représenté par la **figure 3**. La phase de chauffe (durée = 24 heures, vitesse de chauffe maximale = 10 °C/h) a été déterminée sur la base des résultats d'un essai QAB (cf. **figure 3**) réalisé pour la formule de béton considérée. Compte tenu des activations des diverses réactions mises en jeu lors de l'hydratation d'un ciment, il est difficile de prévoir théoriquement le dégagement de chaleur associé et sa cinétique. Il est donc préférable de réaliser une détermination expérimentale de ces

figure 3
Évolution de température
au cours du traitement
thermique.



paramètres à l'aide d'un essai QAB. La phase de chauffe est initialisée 2 heures après le début du coulage des corps d'épreuve, cet intervalle de temps correspondant à la phase de mise en œuvre du matériau en laboratoire. Ensuite, on réalise un palier à une température de 81 °C durant 72 heures (*cf.* section précédente). Enfin, les corps d'épreuve sont refroidis à une vitesse de -1 °C/h jusqu'à une température de 25 °C. La durée totale du procédé est de 151 heures soit un peu plus de six jours.

SIMULATION NUMÉRIQUE DU PROCÉDÉ DE CURE THERMIQUE

■ Modélisation

Afin d'estimer la pertinence du procédé déterminé en section précédente, des modélisations numériques ont été mises en œuvre : à l'aide du module TEXO [16–18] du code aux éléments finis CESAR-LCPC [19], la cure thermique d'une poutre ($0,25 \times 0,50 \times 3,00$ m³) et d'une éprouvette (diamètre = 0,11 m ; hauteur = 0,22 m) ont été simulées. La principale donnée d'entrée est l'élévation de température en conditions adiabatiques obtenue par un essai QAB. Les autres caractéristiques et paramètres principaux des calculs sont regroupés dans le **tableau 6** et la **figure 4**. La conductivité thermique et la capacité calorifique du matériau sont des ordres de grandeur estimés représentatifs d'un béton ordinaire. Le coefficient d'échange a été fixé à une valeur de 100 W/(m² °C), ordre de grandeur du coefficient d'échange dans l'eau [20]. Par ailleurs, une étude de sensibilité des résultats à ce paramètre a montré qu'une augmentation du coefficient d'échange d'un facteur

figure 4
Maillages et points de
post-traitement : a.
poutre ; b. éprouvette
11-22.

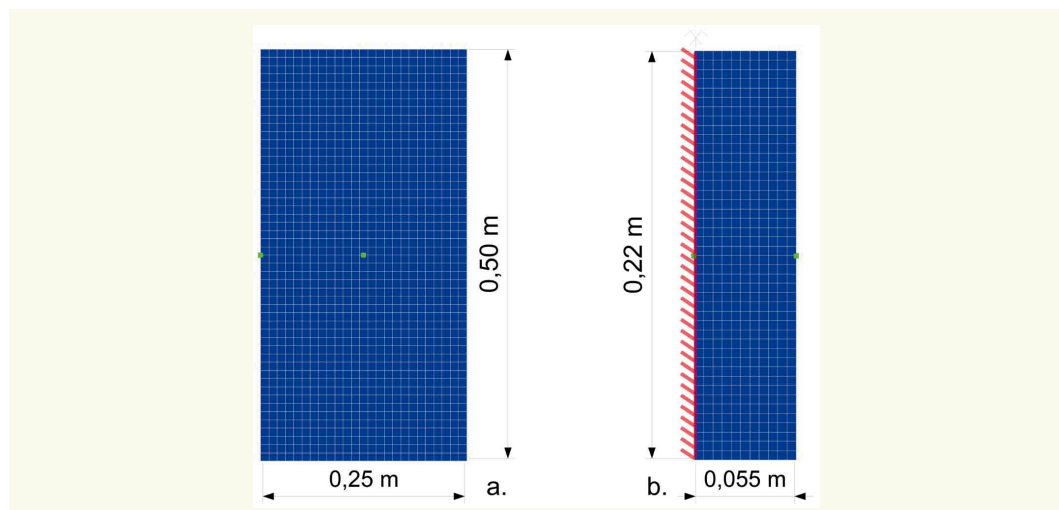


tableau 6
Caractéristiques
des modèles TEXO.

Modèle poutre		2D
Modèle éprouvette		2D axisymétrique
Coefficient d'échange thermique coffrage/eau		100 W/(m ² °C)
Conductivité thermique	K_x	1,67 W/(m °C)
	K_y	1,67 W/(m °C)
	K_{xy}	0 (conductivité isotrope)
Capacité calorifique du béton durci C_{th}		2 400 kJ/(m ³ K)

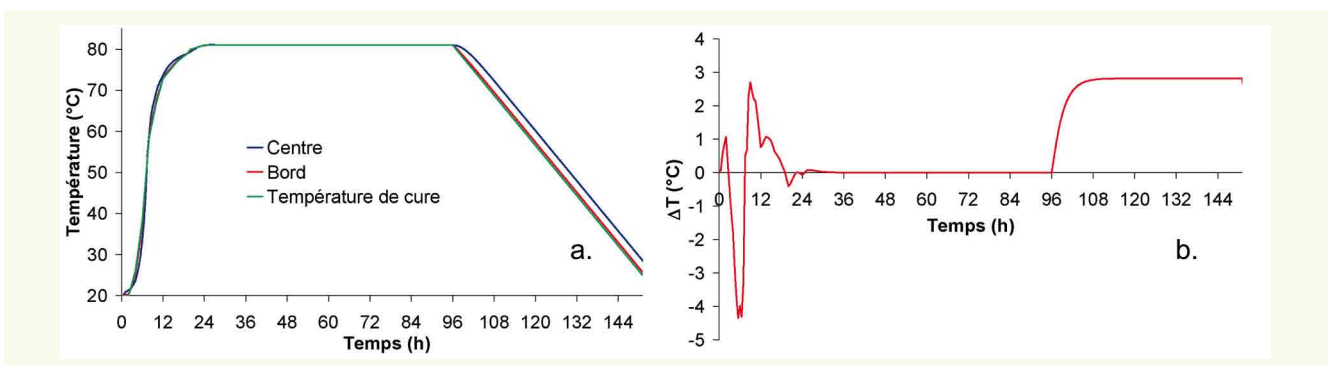
10 n° induit qu'un écart limité sur l'évaluation du champ de température dans les corps d'épreuve considérés dans notre calcul.

■ Réponse thermique théorique d'une poutre

La **figure 5** représente l'évolution de la température au centre et au bord de la section droite courante d'une poutre au cours de la cure thermique. Ces résultats mettent en évidence un des intérêts d'un pseudo-asservissement de la vitesse de chauffe avec l'échauffement du matériau en conditions adiabatiques : on obtient un champ de température relativement homogène dans le corps d'épreuve (cf. **figure 5** et **figure 6**) lors de l'échauffement et ce malgré des vitesses de chauffe importantes pour atteindre le palier de cure thermique. Par ailleurs, lors de la transition phase de chauffe-palier de température, on n'observe qu'un très léger dépassement de la consigne au cœur de la poutre : l'approche proposée permet donc bien de limiter les effets de l'inertie thermique d'un tel corps d'épreuve.

La **figure 5b** représente l'évolution de la différence de température entre centre et bord de la poutre (cf. **figure 4a**) au cours de la cure. Cette différence reste inférieure à 4 °C en phase de chauffe et est de l'ordre de 3 °C en phase de refroidissement. Durant le palier de température (i.e. entre $t = 24$ h et $t = 96$ h), cette différence reste quasi nulle. D'un point de vue théorique, le traitement thermique défini répond donc au critère d'homogénéité du champ de température fixé par le cahier des charges.

figure 5
Réponse thermique
théorique d'une poutre
à la cure thermique (a)
et écart de température
correspondant entre centre
et bord d'une section (b).



■ Influence des dimensions : évaluation théorique

La **figure 7** représente les écarts de température théoriques entre le cœur d'une poutre et celui d'une éprouvette (cf. **figure 4**). Ces résultats mettent en évidence le faible écart existant entre ces deux corps d'épreuve durant la phase de palier (de $t = 24$ h à $t = 96$ h), respectant ainsi le cahier des charges fixé. Durant la phase de chauffe, cet écart s'élève jusqu'à 5 °C de manière ponctuelle, durant les échauffements les plus importants (10 °C/h). Ceci est principalement lié aux différences d'inertie thermique entre les deux éléments : il est en effet bien plus aisé de contrôler, par l'intermédiaire

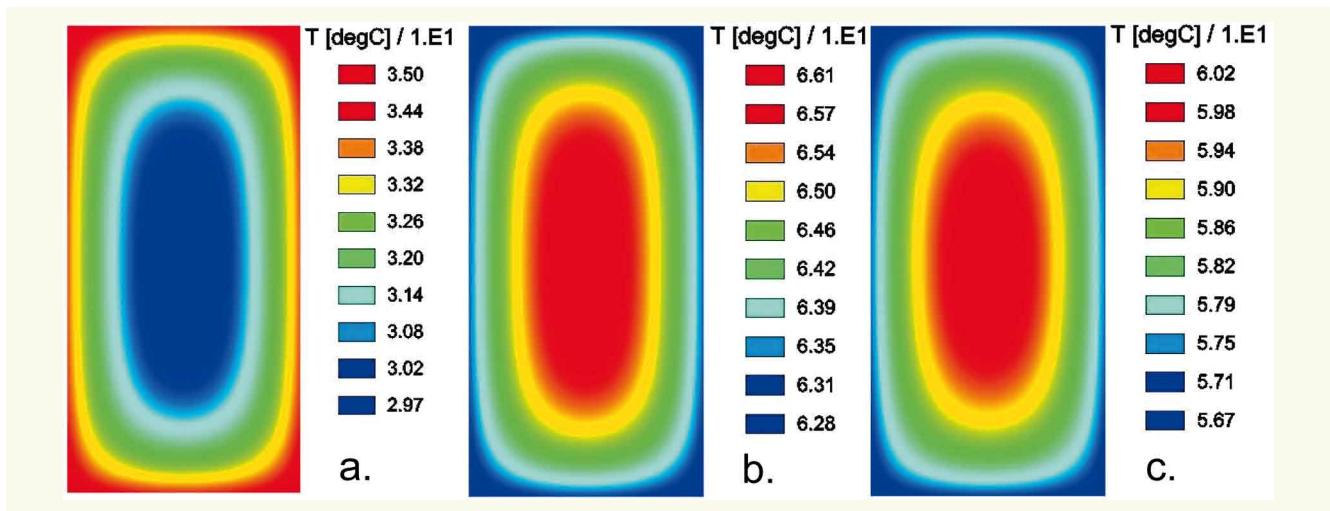


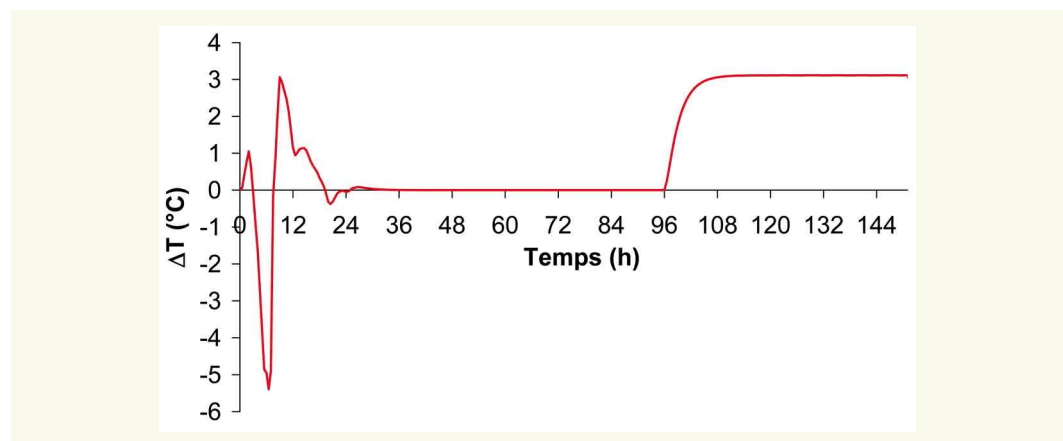
figure 6

Champs de température dans une poutre : a. $t = 5,5$ h ; b. $t = 9$ h ; c. $t = 120$ h.

d'une condition limite imposée, la température du cœur d'un petit corps d'épreuve comme une éprouvette, plutôt que celle d'une poutre. On notera d'ailleurs la forte similarité de la **figure 5b** et de la **figure 7** : la température au cœur d'une éprouvette reste très proche de la température de cure tout au long du procédé. Cette interprétation est également applicable aux écarts observés lors du refroidissement.

figure 7

Écart de température entre le cœur d'une poutre et d'une éprouvette.



■ Étude de sensibilité : influence du changement de ciment

La **figure 8a** compare l'évolution de température dans un calorimètre QAB et en conditions adiabatiques (i.e. après corrections des pertes thermiques et prise en compte de la thermoactivation) du béton choisi pour le dimensionnement de la cure thermique (béton 1 – cf. section « Phase de chauffe ») et d'un béton moins exothermique (béton 2). La composition chimique du ciment correspondant est donnée dans le **tableau 7**. Pour le calcul du temps équivalent, un rapport moyen $E_a/R = 5000$ K a été considéré en première approche. En l'absence de données complémentaires, cette valeur a été considérée comme représentative des bétons étudiés. La réalisation d'essais QAB à des températures différentes permettrait d'améliorer la précision de cette estimation [21].

tableau 7

Composition du ciment du béton 2 (méthode de Bogue).

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄ ·2H ₂ O
43,2 %	32,2 %	2,4 %	11,6 %	5,6 %

La **figure 8b** représente les réponses thermiques des poutres fabriquées avec ces deux bétons. Dans le cas du béton 2, l'approche de type QAB avec une phase de chauffe de type « sigmoïde » se révèle encore relativement efficace, les écarts de température par rapport à la consigne de cure observés

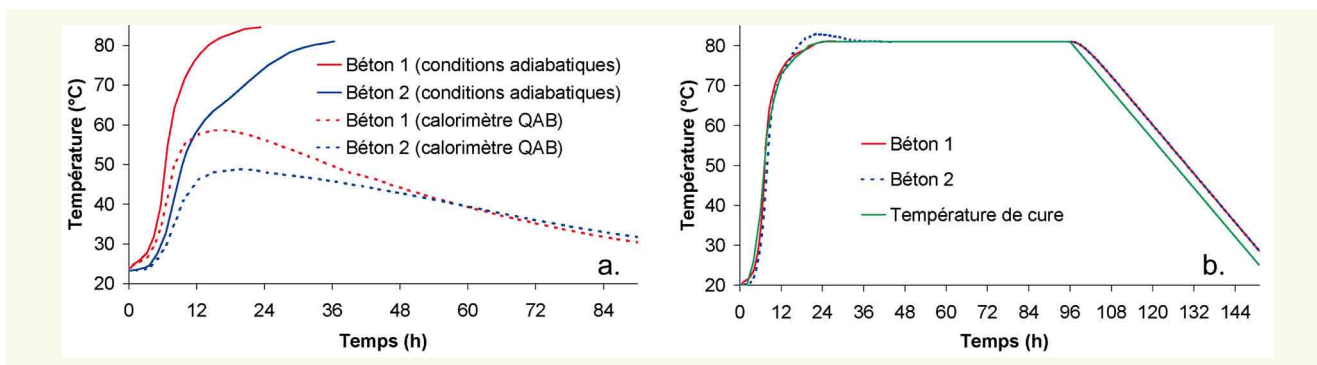


figure 8
Dégagement de chaleur des bétons (a) et réponse thermique (température à cœur) des poutres correspondantes (b).

étant moindres en comparaison de ceux développés dans le cas d'une vitesse de chauffe constante (cf. **figure 1**). Néanmoins, on note un dépassement de consigne à cœur notable entre $t = 14$ h et $t = 30$ h. Cet exemple montre donc l'intérêt d'une détermination de la phase de chauffe ajustée au béton considéré en mettant en œuvre un essai QAB et ce afin de minimiser les écarts de température au sein du corps d'épreuve traité.

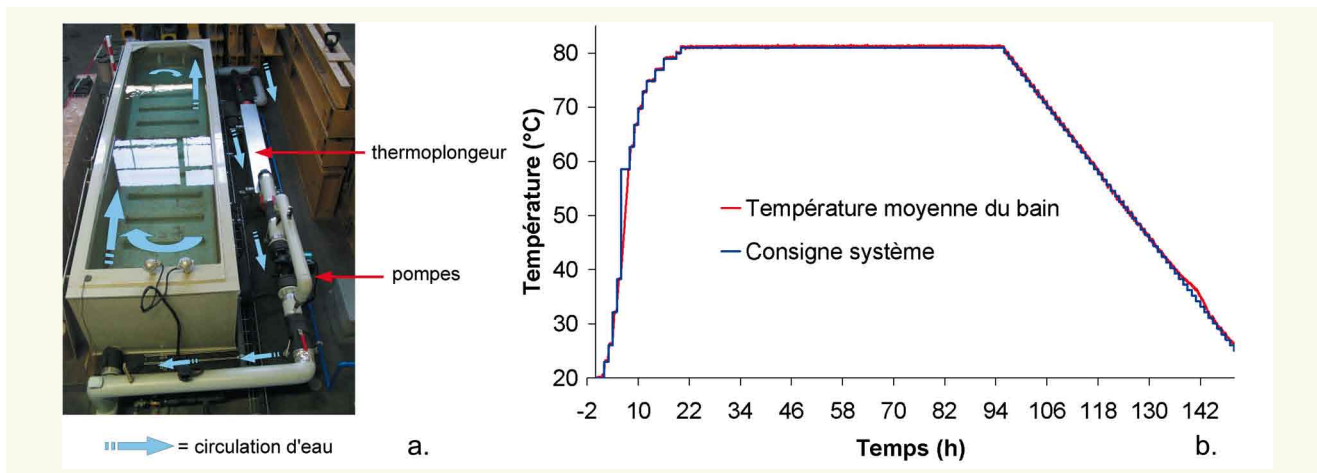
VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU PROCÉDÉ DE CURE THERMIQUE

■ Réalisation expérimentale

En pratique, dans le cadre de la recherche réalisée au LCPC à partir de 2006 sur les effets mécaniques de la RSI, la cure thermique est réalisée à l'aide d'un dispositif spécifiquement conçu pour cette étude [6]. Il s'agit d'un bac rempli d'eau dont la température est régulée à l'aide d'un thermoplongeur de 24 kW piloté par un automate programmable (cf. **figure 9a**) dans lequel les corps d'épreuve sont plongés après coulage. L'homogénéité de la température au sein du bain est assurée par un brassage de l'eau via des pompes. Le dispositif ne comporte pas de système de refroidissement : l'abaissement de la température est assuré par refroidissement naturel dans un premier temps (différence de température entre le bain et l'extérieur) puis par injection d'eau froide dans le circuit d'eau.

Des essais de performance ont permis de garantir que, durant un palier à température constante, la température peut être régulée avec une précision de $\pm 0,5$ °C par rapport à la consigne fixée. Le procédé est répétable avec une précision de $\pm 0,5$ °C compte tenu par ailleurs de l'incertitude sur les mesures de température. L'homogénéité de la température dans le bain a été vérifiée et montre des différences maximales de température dans le bain de 1 °C lors des phases d'échauffement.

figure 9
Dispositif de cure thermique (a) et réalisation expérimentale de la cure (b).



consigne fixée (écart maximal de l'ordre de 2 °C) : à ce stade du procédé, la diminution de l'écart de température entre le bain et l'extérieur limite les capacités de refroidissement naturel du système. Dans ce cas de figure, le refroidissement est forcé en augmentant le débit d'injection d'eau froide.

■ Réponse thermique expérimentale d'une poutre

Afin d'évaluer expérimentalement le comportement d'une poutre au cours du traitement thermique, un corps d'épreuve a été instrumenté dans une section courante (à 0,6 m de l'extrémité longitudinale) à l'aide de capteurs de température en des points nommés M1, M2, M3, M4 et M5 respectivement situés à 0,04 m, 0,08 m, 0,17 m, 0,27 m et 0,37 m de profondeur par rapport à la face supérieure de la poutre. Les figures 10, 11 et 12 représentent l'évolution de la température en ces lieux respectivement durant la phase de chauffe, le palier de température et le refroidissement.

figure 10
Réponse thermique expérimentale d'une poutre – phase de chauffe.

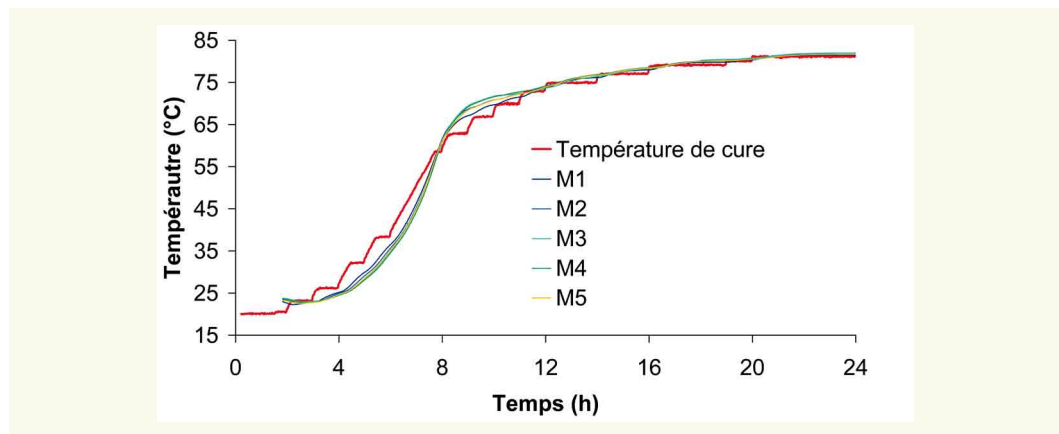


figure 11
Réponse thermique expérimentale d'une poutre – palier de température.

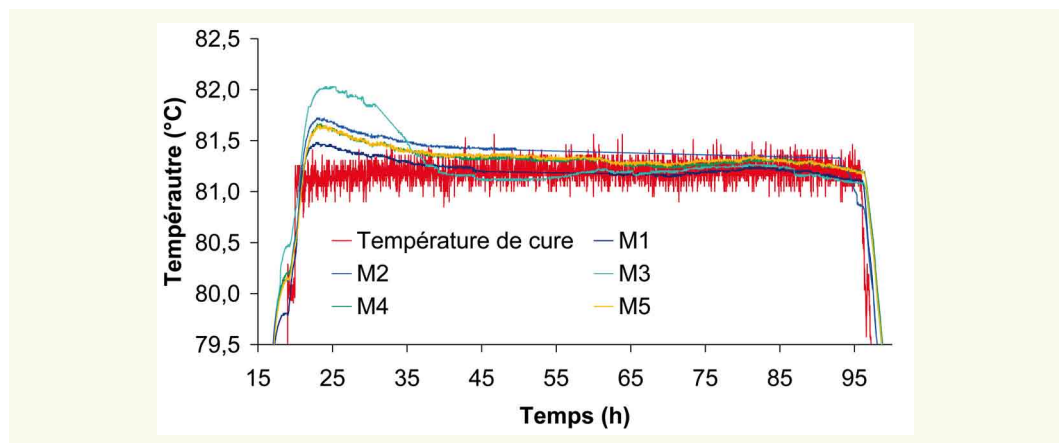
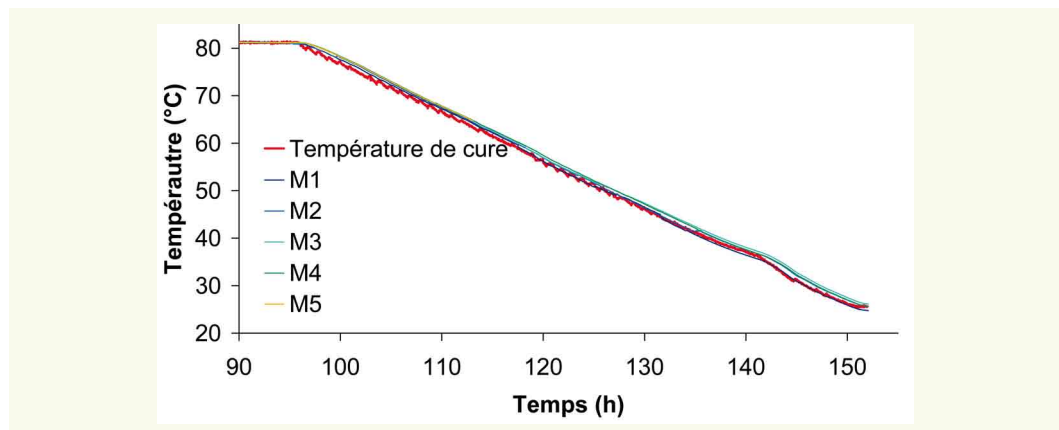


figure 12
Réponse thermique expérimentale d'une poutre – refroidissement.

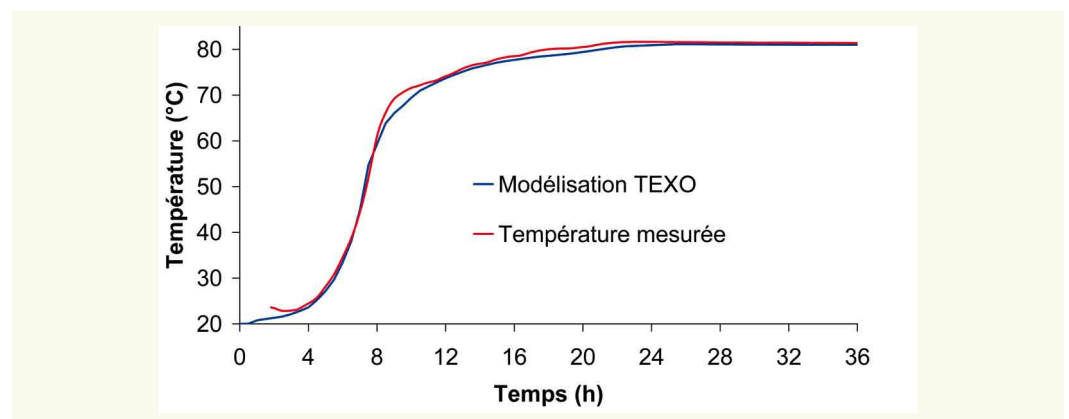


On observe que le comportement expérimental est globalement en accord avec la modélisation présentée en section précédente. Durant la phase de chauffe, les écarts de température aux différents points instrumentés restent inférieurs à ± 2 °C malgré les vitesses de chauffe importantes. Ceci confirme expérimentalement l'intérêt du calage de la phase de chauffe sur les résultats de l'essai QAB correspondant au béton mis en œuvre, assurant ainsi un champ de température le plus homogène possible dans un corps d'épreuve d'inertie thermique importante. Ces différences de température n'excèdent pas $\pm 0,5$ °C durant le palier de la cure, respectant ainsi le critère fixé par le cahier des charges. Néanmoins, lors de la transition phase de chauffe – palier, on observe un léger dépassement de la consigne de cure à l'intérieur de la poutre de l'ordre de 1 °C durant une dizaine d'heures. Enfin, lors du refroidissement, ces écarts restent inférieurs à 1 °C jusqu'à une température d'environ 45 °C à partir de laquelle il devient plus difficile d'assurer une vitesse de refroidissement constante (cf. section précédente). Au delà de cette température, les différences de température n'excèdent pas 2 °C. Finalement, ces résultats permettent de valider le procédé de cure thermique vis-à-vis des critères d'homogénéité du champ de température.

La **figure 13** compare l'évolution de la température au point M4 durant la phase de chauffe, selon qu'elle est obtenue expérimentalement ou numériquement. Les prédictions du modèle TEXO se révèlent en accord avec la réalisation pratique de la cure thermique. Néanmoins, on observe qu'à partir de $t = 8$ heures, le modèle présente une tendance à sous-estimer la température au cœur de la poutre (écart maximal de l'ordre de 3 °C). Ceci peut s'expliquer notamment par une différence d'avancement de la réaction d'hydratation du ciment à cet instant, trouvant son origine dans la différence d'état thermique expérimental et théorique au moment de la mise en œuvre : si le modèle prend en compte un matériau mis en œuvre à une température de 20 °C, l'expérience a montré que cette hypothèse est difficile à satisfaire avec précision (cf. **figure 10** ; $t = 2$ h), du fait notamment de la température ambiante au moment des fabrications ou bien encore sous l'effet du malaxage.

figure 13

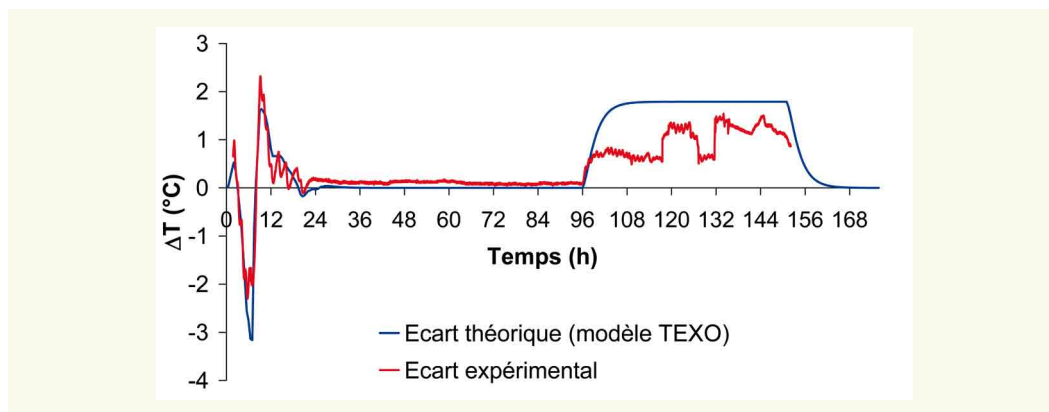
Température en phase de chauffe au point M4 (0,27 m de profondeur).



La **figure 14** représente l'évolution de l'écart de température entre les points M4 et M1 tout au long de la cure. Ces résultats mettent en évidence la bonne corrélation entre le comportement thermique prédit et celui observé expérimentalement. On observe toutefois que le modèle surestime cette fois-ci l'écart durant le refroidissement. Dans cette phase de la cure, les réactions d'hydratation ne constituent plus qu'une part minime des phénomènes thermiques régissant le comportement du corps d'épreuve, les pertes par échange devenant dominantes. Il est probable que la différence observée soit liée à une surestimation de la capacité calorifique de la poutre d'une part (qui se révèle compliquée à évaluer car elle évolue en fonction de la température et du degré d'avancement des réactions d'hydratation) et à une sous-estimation du coefficient d'échange coffrage/eau d'autre part. Toutefois, ces écarts restent limités.

Ces résultats mettent en évidence la pertinence d'une modélisation numérique à l'aide du module TEXO pour la mise au point de la cure en prélude à une réalisation expérimentale.

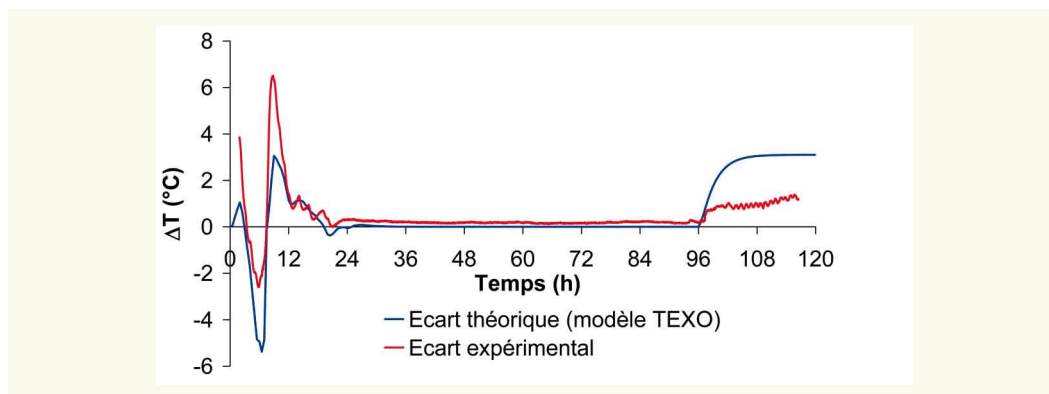
figure 14
Écarts de température
entre les points M4
(0,27 m) et M1 (0,04 m).



■ Maîtrise des effets d'échelle : évaluation expérimentale

La **figure 15** représente l'écart de température existant entre le cœur d'une éprouvette cylindrique (diamètre = 0,11 m ; hauteur = 0,22 m) et celui d'une poutre (approches numérique et expérimentale). On observe durant la phase de chauffe un comportement thermique comparable suivant l'approche considérée. Toutefois, les différences d'état thermique initial conduisent à des écarts maximaux de l'ordre de 3 °C entre le modèle et l'expérience. Tout au long du palier de température, les différences de température entre corps d'épreuve restent inférieures à 1 °C, satisfaisant ainsi la cible fixée (cf. section « Cahier des charges »). Enfin, durant le refroidissement, on note une fois de plus une surestimation de cet écart pour les mêmes raisons que celle exposées en section précédente (évaluation des capacités thermiques et des conditions d'échange). Au final, la réalisation expérimentale de la cure sur une poutre et une éprouvette a permis de valider le procédé vis-à-vis de l'objectif consistant à appliquer une histoire thermique similaire pour des corps d'épreuve de dimensions différentes.

figure 15
Écart de température
entre le cœur d'une poutre
(point M4) et celui d'une
éprouvette.



■ Répétabilité

Afin d'évaluer la répétabilité du procédé de cure thermique, plusieurs poutres de composition et de dimensions identiques ont fait l'objet d'un suivi thermique. La **figure 16a** représente l'évolution de température au sein de chaque corps d'épreuve à une profondeur de 0,27 m par rapport à la face supérieure (point M4). Les principales différences entre les poutres se font ressentir au début de la phase de chauffe sous l'effet d'états thermiques initiaux variables (imputables aux températures ambiantes variables lors des différents coulages et comprises entre 20 °C et 25 °C) ainsi qu'en fin de refroidissement où il devient plus difficile de contrôler la température du bain sous l'effet de la température de l'air environnant. La **figure 16b** propose une représentation graphique des écarts de température entre corps d'épreuve au cours du temps. Les écarts sont les plus importants durant la

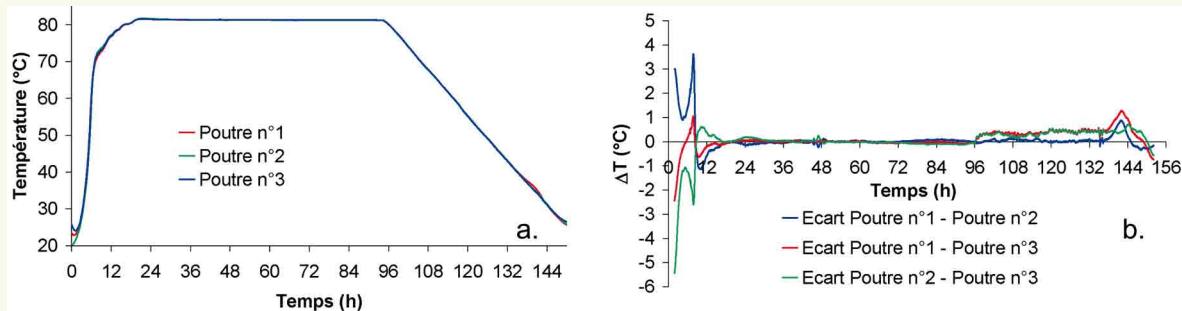


figure 16

- a. Suivi thermique de trois poutres identiques durant la cure (point M4) ;
- b. Écarts de température correspondants.

première dizaine d’heures de la cure : l’influence de la température de mise en œuvre du matériau est ici dominante. Une fois la phase d’échauffement intense achevée, ces écarts sont fortement réduits. Durant le palier de température, les différences de température restent inférieures à la limite de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ fixée par le cahier des charges.

CONCLUSIONS

Cet article présente la méthodologie mise en œuvre pour mettre au point un procédé de cure thermique permettant d’engendrer des gonflements de RSI. Appliqué au matériau après coulage, il a pour objectif de simuler les conditions de prise du béton au cœur d’une pièce massive. Un des objectifs principaux visés pour ce procédé thermique est d’appliquer aux corps d’épreuve une histoire thermique similaire quelles que soient leurs dimensions.

Un élément déterminant de la cure thermique consiste en l’ajustement des vitesses d’échauffement du matériau au jeune âge sur les élévations de température en conditions adiabatiques mesurées à l’aide d’un essai QAB. Il est ainsi possible de simuler des conditions adiabatiques pour les éléments en béton et donc de minimiser les effets thermiques liés à leur inertie et d’assurer une meilleure homogénéité de leur champ de température.

Une étude numérique du procédé a été effectuée. Basée sur des modélisations aux éléments finis à l’aide du module TEXO du code CESAR-LCPC, elle permet en première approche d’estimer la pertinence du profil de température lors de la cure, vis-à-vis de critères d’homogénéité du champ thermique et d’effets d’échelle (comparaison des températures de poutres et d’éprouvettes).

Enfin, une validation expérimentale de la cure thermique a été réalisée. Après avoir vérifié les performances du dispositif spécifiquement mis au point, nous avons mis en évidence les aptitudes du traitement thermique quant à l’application d’un champ de température homogène et répétable pour l’ensemble des corps d’épreuve.

Un tel procédé de cure thermique peut être mis en œuvre quelle que soit la formule de béton considérée. Il suffit pour cela de connaître l’échauffement du matériau lors de sa prise en conditions adiabatiques, information facilement accessible grâce à un essai QAB.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l’unité Expérimentation et Modélisation des Structures du LCPC et plus particulièrement F.-X. Barin, C. Bazin, J. Billo, M. Estivin, L. Lauvin, J.-C. Renaud pour leur aide durant toute la phase expérimentale de validation de la cure thermique ainsi que D. Siegert (département Mesure, Auscultation et Calcul Scientifique) pour sa participation déterminante à l’élaboration du traitement thermique. Ils souhaitent également mentionner le soutien d’EDF (E. Bourdarot, A. Jeanpierre) au programme de recherche sur les effets mécaniques de la RSI.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **KRETZ T., GODART B. & DIVET L.** (sous la direction de), *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, LCPC, Guide technique, **2007**, 59 pages.
- 2 **DIVET L.**, Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, LCPC, ERLPC, OA 40, **2001**, 227 pages.
- 3 **BARBARULO R., PEYCELON H., LECLERCQ S.**, Chemical equilibria between C-S-H and ettringite, at 20 and 85 °C, *Cement and Concrete Research*, vol. **37**, **2007**, pp. 1176-1181.
- 4 **TAYLOR H. F. W., FAMY C., SCRIVENER K. L.**, Delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, vol. **31**, n° 5, **2001**, pp. 683-693.
- 5 **MAHUT B. & FASSEU P.** (sous la direction de), *Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne*, LCPC, Guide technique, **2003**, 66 pages.
- 6 **MARTIN R.-P., SIEGERT D., TOUTLEMONDE F.**, Experimental analysis of concrete structures affected by DEF, *3rd International Symposium GEOPROC'2008*, Lille (France), 2-4 juin, **2008**, pp. 589-596.
- 7 **MULTON S.**, Évaluation expérimentale et théorique des effets mécaniques de l'alcali-réaction sur des structures modèles, LCPC, ERLPC, OA 46, **2004**, 423 pages.
- 8 **BRUNETAUD X.**, Étude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la RSI au béton, Thèse de l'École Centrale de Paris, Paris, **2006**, 253 pages.
- 9 **GRASLEY Z. C., LANGE D. A., D'AMBROSIA M. D., VILLALOBOS-CHAPA S.**, Relative Humidity in concrete, *ACI Committee*, **236**, **2006**, pp. 51-57.
- 10 **PAVOINE A.**, Évaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, **2003**, 229 pages.
- 11 **BAGHDADI N., SEIGNOL J.-F., MARTIN R.-P., RENAUD J.-C., TOUTLEMONDE F.**, Effect of early age thermal history on the expansion due to delayed ettringite formation: experimental study and model calibration, *Advances in Geomaterials and Structures Conference 2008 (AGS 2008)*, Hammamet (Tunisie), 5-7 mai, **2008**, pp. 661-666.
- 12 **DIVET L.**, Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ?, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. **240**, **2002**, pp. 87-94.
- 13 **WALLER V.**, Relations entre compositions des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, *LCPC, ERLPC, OA 35*, **2000**, 316 pages.
- 14 **AFNOR**, NF EN 196-9 Méthodes d'essais des ciments – Partie 9 : Chaleur d'hydratation – Méthode semi-adiabatique, AFNOR, **2004**, 20 pages.
- 15 **JOLICŒUR C., BILODEAU J., SIMARD M.A.**, Étude calorimétrique de l'hydratation du ciment – Détermination de l'énergie d'activation, Rapport d'étape, rapport interne LCPC, **1994**.
- 16 **TORRENTI J.-M.**, *Comportement mécanique du béton – Bilan de six années de recherche*, LCPC, ERLPC, OA **23**, **1996**, 109 p.
- 17 **ULM F.-J.**, Couplages thermomécaniques dans les bétons – Un premier bilan, LCPC, ERLPC, OA **13**, **1999**, 105 p.
- 18 **D'ALOIA L. & CHANVILLARD G.**, Determining the "apparent" activation energy of concrete E_a – numerical simulations of the heat of hydration of cement, *Cement and Concrete Research*, vol. **32**, **2002**, pp. 1277-1289.
- 19 **HUMBERT P., DUBOUCHET A., FEZANS G., REMAUD D.**, CESAR-LCPC, un progiciel de calcul dédié au génie civil, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. **256-257**, **2005**, pp. 7-37.
- 20 **LIENHARD J.H. IV & LIENHARD J.H. V**, *A heat transfer textbook*, Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 3^e édition, **2008**, 749 p.
- 21 Sous la direction de **BUYLE-BODIN F. & CUSSIGH F.**, *Résistance du béton dans l'ouvrage – La maturométrie*, LCPC, Guide technique, **2003**, 66 p.