

# CONCEPTION D'UNE MÉTHODE POUR ÉVALUER LE RISQUE D'EXPANSION CAUSÉE PAR LA FORMATION DIFFÉRÉE DE L'ETTRINGITE

N. Petrov, A. Tagnit-Hamou  
Département de Génie Civil, Faculté de Génie  
Université de Sherbrooke

## Résumé

Les éléments en béton préfabriqués sont couramment utilisés dans les ouvrages d'art. Ces éléments sont souvent chauffés à des températures élevées lors de la production, ce qui peut présenter un risque de formation différée d'ettringite et de l'expansion qui en résulte. Plusieurs méthodes permettant d'évaluer le risque d'expansion des mortiers et bétons ont été proposées. En règle générale, ces méthodes sont fondées sur l'élévation de la température des échantillons au-delà de la limite de 70 °C. Cependant, l'expansion causée par la formation différée d'ettringite dépend non seulement de la température maximum, mais aussi de nombreux autres facteurs tels que le type de ciment utilisé ou les conditions de service. La nouvelle méthode développée pour évaluer le risque d'expansion consiste à soumettre des échantillons conservés dans l'eau à des cycles thermiques. La température de l'eau varie de 10 °C à 50 °C, à raison de 6 cycles par jour. Les résultats montrent que l'expansion des échantillons de mortier est de 20% à 90% plus grande lorsque les échantillons subissent des cycles thermiques, comparativement aux échantillons de contrôle conservés dans de l'eau à 23 °C. L'absence d'expansion pour certains mortiers soumis à des cycles thermiques permet d'accepter le mélange ainsi que la méthode de fabrication, même si la température a dépassé la limite de 70 °C. Cette méthode pourrait servir à évaluer la sensibilité d'un béton à l'expansion causée par la formation différée d'ettringite, ainsi que pour déterminer la température maximale en dessous de laquelle le risque d'expansion d'un béton spécifique est minime.

## Introduction

La dégradation prématurée des bétons due à la formation différée de l'ettringite a été le sujet de nombreuses recherches au cours des quelques dernières années. Il est généralement accepté que la formation différée de l'ettringite est étroitement liée à une température élevée lors de la prise du ciment et du durcissement du béton (1-7). Les diverses normes limitent la température maximale, la période minimale de précuré, le taux d'augmentation de la température et la vitesse de refroidissement, afin de minimiser le risque de formation différée de l'ettringite (8-9). Pour les bétons préfabriqués, la norme CSA A23 limite la température maximale à 60°C pour les éléments qui seront exposés à un milieu humide et à 70°C pour ceux qui, en service, seront dans un milieu sec (10).

Certains travaux récents ont montré que la formation différée de l'ettringite et l'expansion conséquente peuvent également avoir lieu dans les bétons non chauffés de l'extérieur, c'est-à-dire chauffés seulement par la chaleur d'hydratation (11).

De nombreuses recherches ont démontré l'effet de différents facteurs tels la composition du béton, la procédure de fabrication et les conditions d'exposition en service, à la formation différée de l'ettringite et l'expansion. Cependant, dans les codes mentionnés antérieurement, l'historique thermique et la température maximale ne sont pas clairement reliées au type de ciment utilisé ni aux caractéristiques relatives à la composition du béton (rapport E/C, teneur en air entraîné, etc.). Les recherches ont montré que les ciments à résistance initiale élevée (Type 30) sont plus sensibles à la formation différée de l'ettringite que le ciment Portland normal de Type 10 ou le ciment de Type 50 résistant aux sulfates. (12-14).

Également, les ciments composés ayant une teneur appropriée de cendres volantes, de laitier, de fumée de silice ou d'argile calciné (métakaolin), peuvent être utilisés pour diminuer l'expansion due à la formation différée de l'ettringite (15-17).

De plus, l'expansion due à la formation différée de l'ettringite peut être diminuée, et dans certains cas éliminée, en utilisant de l'air entraîné (14; 18). Ce facteur et le rapport E/C ne sont pas considérés par les normes actuelles traitant de la formation différée de l'ettringite.

La multitude de facteurs pouvant influencer l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite montre la nécessité de développer une méthode holistique expérimentale pour évaluer le risque d'expansion. Les méthodes proposées ont été classées dans trois catégories :

- Modèles mathématiques où le risque d'expansion est le plus souvent calculé à partir de la composition chimique du ciment,
- Analyses microstructurales de la composition des hydrates après le traitement thermique, et
- Mesures de l'expansion après le traitement thermique.

La plus grande limitation des méthodes mathématiques est le nombre limité des facteurs et des interactions qui peuvent être prises en considération et qui ont des effets significatifs sur l'expansion (19-21).

Les analyses microstructurales sont basées sur la détection des dépôts d'ettringite mal cristallisée ou sur la détection des changements dans la composition des hydrates (C-S-H) formés après le traitement thermique. Ces méthodes sont largement utilisées aux fins d'études fondamentales pour déterminer l'effet d'un facteur particulier sur l'expansion (22-28). Cependant, elles nécessitent un équipement sophistiqué et un personnel hautement qualifié ayant une expérience considérable dans le domaine, ce qui diminue la possibilité de leur utilisation dans la pratique.

Les méthodes basées sur les mesures de l'expansion des échantillons en laboratoire semblent être les plus proches de la réalité. Elles sont utilisées par de nombreux chercheurs (3; 15; 16; 29; 30). Cependant, lorsque l'expansion est mesurée sur les échantillons soumis à des conditions simulant les conditions en service, il ne s'agit pas d'une méthode d'évaluation mais d'une constatation des faits. De plus, dans de telles conditions, la période avant une expansion significative peut prendre des mois, voire des années. L'expansion, par contre, peut être accélérée lorsque les échantillons sont de très petite dimension (15) ou encore endommagés par les cycles de mouillage et de séchage, par exemple, ce qui est souvent combiné à de sévères chocs thermiques (12; 30-32). Dans ces cas, le risque de création artificielle de l'expansion est très élevé.

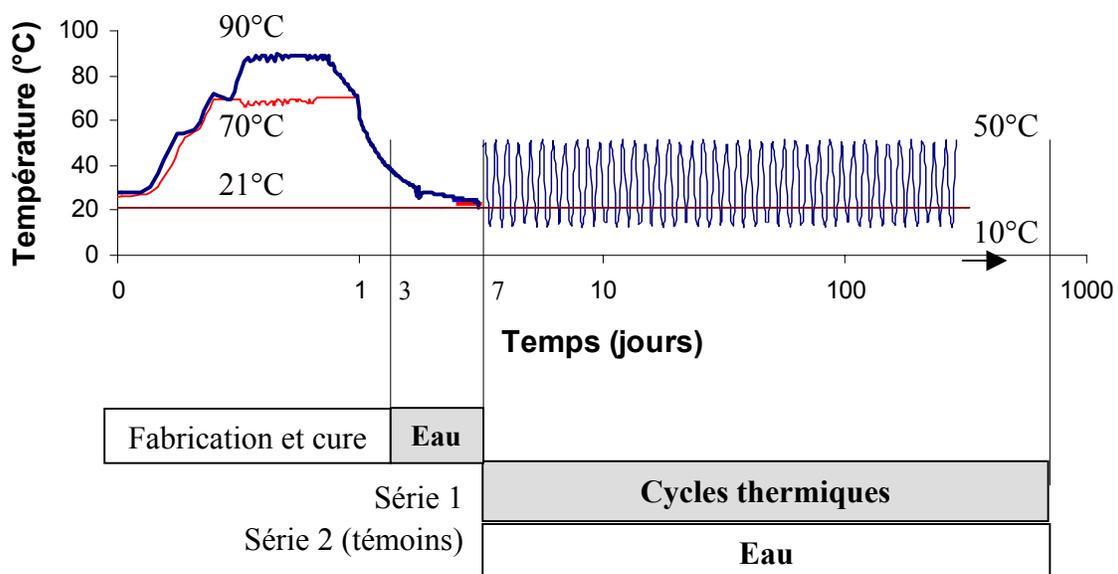
La méthode proposée dans cet article est basée sur l'application de cycles thermiques alors que les échantillons sont continuellement immergés dans l'eau saturée en chaux. Cette méthode a l'avantage d'éviter la microfissuration du béton, qui à son tour, pourrait promouvoir l'expansion.

## **Procédure**

Les échantillons de mortier ont été soumis à des cycles thermiques dans de l'eau saturée en chaux. La température de l'eau change de 10°C à 50°C à raison de 6 cycles par jour. L'idée est de simuler, de façon accélérée, les changements de température dans des conditions de climat chaud et humide, tout en évitant la microfissuration causée par l'application de la méthode d'évaluation

elle-même, et d'évaluer l'influence de telles conditions d'exposition sur le développement de l'expansion.

Le schéma de traitement thermique lors de la fabrication des échantillons et des conditions de mûrissement et d'exposition à des cycles thermiques, dans le temps, est présenté dans la figure 1. Le temps, en échelle logarithmique, est présenté en abscisse, tandis que la température des échantillons est présentée en ordonnée.



**Figure 1** Conditions de mûrissement et d'exposition des échantillons de mortier soumis à des cycles thermiques

Deux séries d'échantillons, telles que présentées dans la figure 1, ont été utilisées pour la présente étape de l'étude : une première série comprenant des échantillons chauffés à 90°C et une deuxième série comprenant des échantillons chauffés à 70°C. Cinq ciments différents ont été utilisés : trois ciments différents de Type 30, un ciment de Type 10 et un ciment de Type I. Les compositions de ces ciments sont présentées dans le tableau 1.

TABLEAU 1 COMPOSITION DES CIMENT UTILISÉS

Type de ciment	T10	T30-a	T30-b	T30-c	T I
SiO <sub>2</sub>	19,1	19,9	20,0	19,5	20,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0	5,3	5,1	4,7	5,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	2,3	2,4	2,0	3,7

CaO	62,4	63,4	62,7	63,8	65,6
CaO libre	1,1	1,3	0,6	0,9	-
MgO	2,6	2,6	2,7	2,0	1,4
SO <sub>3</sub>	3,8	4,4	3,8	3,6	2,5
Na <sub>2</sub> O <sub>équiv.</sub> *	0,60	0,90	0,91	0,83	0,09
Finesse Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	380	600	550	600	380
C <sub>3</sub> S	55	50	55	66	63
C <sub>2</sub> S	14	20	16	6	11
C <sub>3</sub> A	8	10	10	9	8
C <sub>4</sub> AF	10	7	8	6	11
$\bar{S}$ / A (SO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,75	0,83	0,75	0,77	0,48

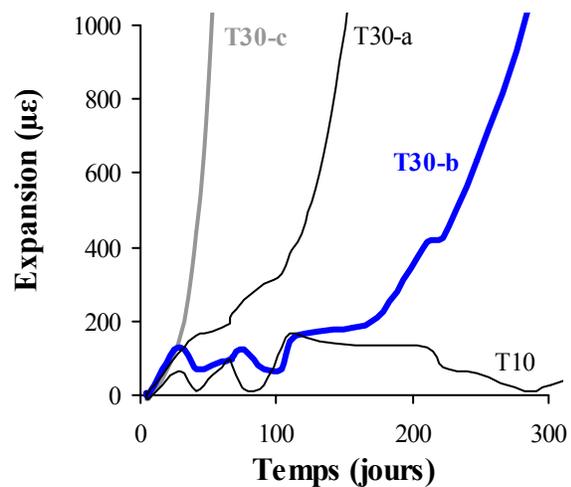
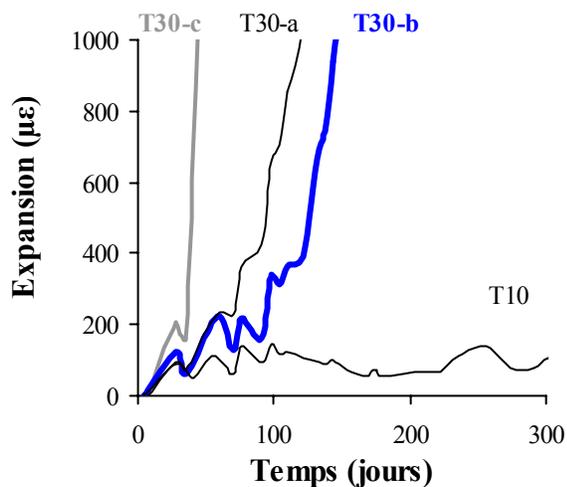
\*Na<sub>2</sub>O<sub>équiv.</sub> = Na<sub>2</sub>O(%) + 0,685K<sub>2</sub>O(%)

Des mortiers soumis à des cycles thermiques, ayant un rapport E/C de 0,45, ont été fabriqués sans air entraîné en utilisant un sable quartzique standardisé. Tous les échantillons d'une même série ont été fabriqués, traités thermiquement, mûris et soumis à des cycles thermiques en même temps et dans les mêmes conditions thermiques et hydriques. Les échantillons témoins ont été gardés continuellement dans de l'eau saturée en chaux à une température constante de 21°C.

### Échantillons traités thermiquement à 90°C

Dans les figures 2a à 2c, l'expansion des échantillons traités thermiquement à 90°C, puis soumis à des cycles thermiques, est comparée à l'expansion des échantillons témoins. L'expansion des échantillons fabriqués à partir du ciment T I n'est pas présentée car elle était toujours négligeable.

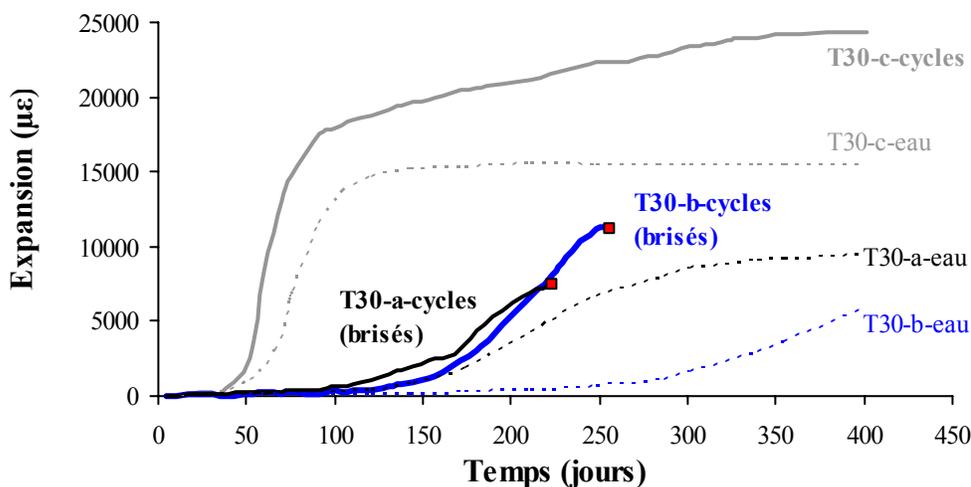
Les figures 2a et 2b montrent une accélération de l'expansion lorsque les échantillons ont été soumis à des cycles thermiques, par rapport à celle des échantillons témoins. L'expansion du mortier fabriqué avec du ciment T30-c se fait plus rapidement que l'expansion du mortier T30-a, tandis que l'expansion du mortier T30-b est la plus retardée dans le temps. Ce décalage de début de l'expansion est plus visible dans le cas des échantillons gardés dans de l'eau à température constante que pour les échantillons soumis à des cycles thermiques.



**Figure 2.a/** Expansion des mortiers traités thermiquement à 90°C, soumis à des cycles thermiques

**Figure 2.b/** Expansion des échantillons témoins traités thermiquement à 90°C

L'expansion maximale du mortier fabriqué avec du ciment T30-c, mesurée sur des échantillons soumis à des cycles thermiques après 360 jours, est de 50% plus grande que l'expansion maximale des échantillons témoins. Les échantillons fabriqués avec des ciments T30-a et T30-b, soumis à des cycles thermiques, ont été accidentellement brisés après 220 et 260 jours d'application des cycles thermiques, respectivement. Leurs expansions respectives de 7400 et 11 200  $\mu\text{m}$  à ce moment étaient suffisamment élevées pour montrer l'accélération et l'amplification de l'expansion lorsque les cycles thermiques sont appliqués. Les échantillons témoins de mortier T30-a ont atteint assez rapidement après, à 260 jours, une expansion de 7400  $\mu\text{m}$ , la même valeur d'expansion que les échantillons comparatifs soumis à des cycles thermiques. Après 400 jours, les échantillons témoins de mortier T30-b n'ont atteint que 50% de l'expansion des échantillons comparatifs soumis à des cycles thermiques, que ces derniers ont atteint au moment où ils ont été brisés.



**Figure 2.c/** Comparaison des expansions des mortiers traités thermiquement à 90°C, soumis à des cycles thermiques et des témoins

Les raisons possibles des expansions différentes en fonction du ciment utilisé résident dans les différences de compositions chimiques et minéralogiques des ciments, ainsi que dans leurs finesses différentes. En effet, le ciment T30-c contient 66% de  $\text{C}_3\text{S}$ , tandis que les ciments T30-a et T30-b en contiennent 50% et 55%, respectivement (tableau 1). Les teneurs en  $\text{C}_3\text{A}$  et en  $\text{SO}_3$ , plus faibles dans le ciment T30-c, montrent que de nombreux autres facteurs et leurs interactions influencent l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite, sa vitesse et son ampleur.

Une expansion significative se développe plus rapidement et sa valeur maximale est plus élevée lorsque la finesse du ciment augmente (12; 13; 16).

L'augmentation de la teneur en  $\text{C}_3\text{S}$ , augmente l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite, car elle augmente la teneur en portlandite qui par la suite sert de source de calcium

pour la formation de l'ettringite (26). La solubilité des métaux, ainsi que des sulfates, augmente lorsqu'un milieu alcalin est saturé en chaux (20), ce qui donne plus d'alumine et de sulfates disponibles pour former de l'ettringite. De plus, d'après les résultats présentés, la dissolution de la portlandite pourrait être favorisée et accélérée par les cycles thermiques.

### Échantillons traités thermiquement à 70°C

Une deuxième série d'échantillons de mortier soumis à des cycles thermiques sous l'eau a été traitée thermiquement à 70°C. Les expansions de ces échantillons sont comparées aux expansions des échantillons témoins de ces mortiers gardés dans de l'eau à une température constante de 21°C, ce qui est présenté dans les figures 3a à 3c.

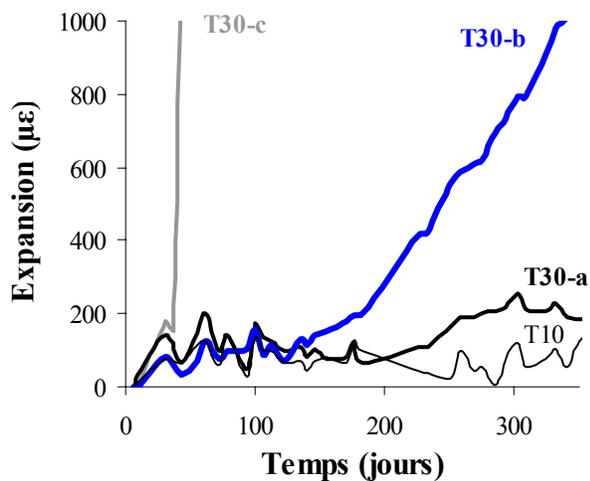


Figure 3.a/ Expansion des mortiers traités thermiquement à 70°C, soumis à des cycles thermiques

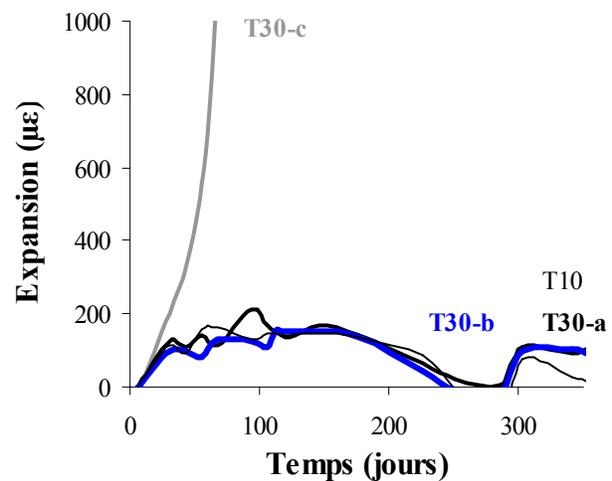
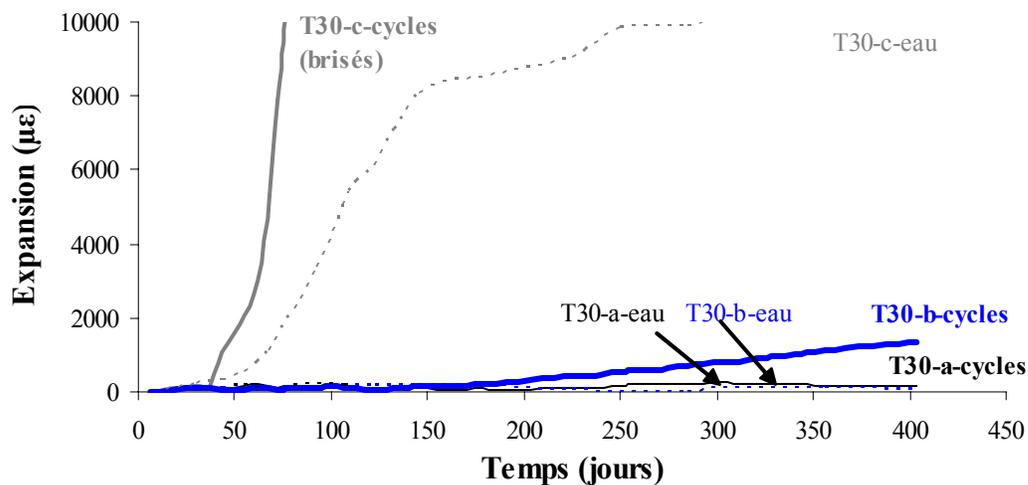


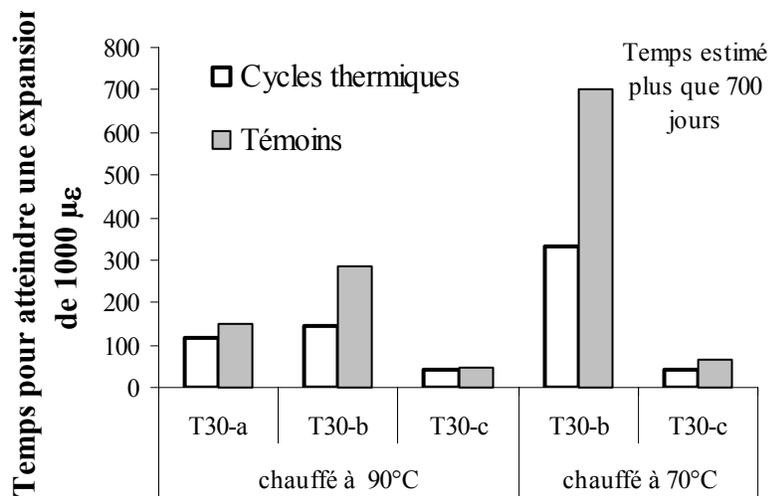
Figure 3.b/ Expansion des échantillons témoins traités thermiquement à 70°C



**Figure 3.c/** Comparaison des expansions des mortiers traités thermiquement à 70°C, soumis à des cycles thermiques et des témoins

Dans le temps d'expérimentation de 400 jours, les échantillons de mortier fabriqués avec les ciments T30-c et T30-b, soumis à des cycles thermiques, ont montré de l'expansion significative. Les échantillons témoins du mortier T30-c ont également montrés de l'expansion significative, mais légèrement plus tard par rapport aux échantillons soumis à des cycles thermiques,.

Le temps précédant une expansion de 1000  $\mu\text{m}$ , considérée comme une expansion significative, pour tous les échantillons ayant montré cette expansion, est présenté dans la figure 4.



**Figure 4/** Temps précédant une expansion de 1000  $\mu\text{m}$

Lorsque les cycles thermiques ont été appliqués, l'expansion du mortier T30-b a débuté après 200 jours, significativement plus tard que celle du mortier T30-c, qui a débuté à 40 jours. L'expansion des échantillons témoins de mortier T30-b n'a pas débuté durant les 400 jours de l'expérience. En se basant sur les temps précédant une expansion significative des échantillons traités thermiquement à 90°C, présentées précédemment, ainsi que sur les résultats des mesures sur les échantillons traité thermiquement à 70°C, nous estimons que l'expansion des échantillons témoins de mortier T30-b aura également lieu, mais qu'elle ne débutera pas avant 700 jours.

### Conclusions

Parmi les mortiers traités thermiquement, il n'en existe pas un qui a montré de l'expansion lorsque soumis à des cycles thermiques et en même temps n'en a pas montrée sur les échantillons témoins (l'expansion du mortier T30-b témoin est estimée à 700 jours). Les cycles thermiques accélèrent donc l'expansion mais ne la causent pas.

La méthode des cycles thermiques dans de l'eau saturée en chaux est indépendante de la composition du mélange ou de l'historique thermique. Elle peut donc être appliquée pour évaluer

la sensibilité d'un mélange donné à l'expansion, pour évaluer la température maximale d'un traitement thermique en dessous de laquelle le risque d'expansion est minime ou tout autre facteur impliquant l'historique thermique ou la composition du mélange. La fabrication des échantillons peut se faire en minimisant la création de microfissures, évitant ainsi l'effet de ces dernières. La méthode des cycles thermiques dans l'eau elle-même ne crée pas de microfissures.

## References

- 1 SCRIVENER K.L., (2002), "Critical Role of Temperature in Expansion Due to Delayed Ettringite Formation", ACI Fall 2002 Convention, October 27 – November 1, 2002, Phoenix, AZ.
- 2 SCRIVENER K.L. and LEWIS M.C., (1999), "Effect of heat curing on expansion of mortars and composition of calcium silicate hydrate gel", Ettringite the sometimes host of destruction, SP 177-7, pp. 93-104.
- 3 LAWRENCE C.D., (1995), "Mortar Expansions Due to Delayed Ettringite Formation. Effects of Curing Period and Temperature", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp. 903-914.
- 4 ODLER I. and CHEN Y., (1996), "On the delayed expansion of heat cured Portland cement pastes and concretes", Cement and Concrete composites, Vol.18, June 1996, pp. 181-185.
- 5 GLASSER F.P., (1996), "The role of sulfate mineralogy and cure temperature in delayed ettringite formation", Cement and Concrete composites, Vol.18, June 1996, pp. 187-193.
- 6 ABO-EL-ENEIN S.A., HANAFI S., SALEM T.M. and HEKAL E.E., (1991), "Physicochemical studies on ettringite. IV – modes of interaction with water and associated energetics", Il cemento 1/1992, pp. 31-42.
- 7 MEHTA, P.K., (1972), "Stability of ettringite on heating", J. Amer. Ceram. Soc., V 55, No 1, 55-6.
- 8 German Committee for Reinforced Concrete, Recommendation on the Heat Treatment of Concrete, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DIN Deutsches Institut für Normung e.b. Bindsalle 216/218, D-1000 Berlin 15, Sept., pp.13, 1989.
- 9 European Committee for Standardization, Concrete – performance, production, placing and compliance criteria.
- 10 R3 SCA A23.4 -00 "Precast Concrete – Materials and Construction / Code for architectural and Structural Precast Concrete Products", CSA International, 2000.
- 11 PETROV N. (2003) "Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite", thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 203 p.
- 12 FU Y. AND BEAUDOIN J.J., (1996), "Microcracking as a precursor to delayed ettringite formation in cement systems", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No 10, pp. 1493-1498.
- 13 GRATTAN-BELLEW P.E., BEAUDOIN J.J. and VALLÉE V.-G., (1998), "Delayed ettringite formation: Effect of clinker particle size and composition on expansion of mortar bars", Materials Science of Concrete ed. the Sidney Diamond Symposium, pp. 295-307.
- 14 STARK J. and LUDWIG H.M., (1995), "The influence of the type of cement on the freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concrete", Intern. Conference on Concrete under severe conditions, "Consec" Sapporo/Japan.
- 15 HEINZ D., KALDE M., LUDWIG U. and RUEDIGER I., (1999), "Present state of investigation on damaging late ettringite formation (dlef) in mortars and concretes", in Ettringite the sometimes host of destruction, ACI SP 177-1, pp. 1-14.
- 16 KELHAM S., (1996), "The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite", Cement and Concrete composites, Vol.18, June 1996, pp. 171-179.
- 17 LAWRENCE C.D., (1999), "Long – term expansion of mortars and concretes", Ettringite the sometimes host of destruction, SP 177-8, pp. 105-123.
- 18 SAHU S., CLARK B.A. and LEE R.J., (1998), "Delayed ettringite formation and the mode of concrete failure", Materials science of concrete ed. the Sydney Diamond symposium, pp. 379-394.
- 19 KELHAM S., (1999), "Influence of cement composition on volume stability of mortar", Ettringite the sometimes host of destruction, SP 177-3, pp. 27-45
- 20 MOHAMED A.M.O., BOILY J.F., HOSSEIN M. and HASSANI F.P., (1995), "Ettringite formation in lime – remediated mine tailings: I. Thermodynamic modeling", CIM bulletin, Vol. 88, No. 995, November/December 1995, pp. 69-75.

- 21 NEGRO A., (1985), "Modèle mathématique de l'expansion de l'ettringite", Ciments, bétons, plâtres, chaux, No. 756, 1985, pp. 319-326.
- 22 SCRIVENER K.L. and TAYLOR H.F.W., (1993), "Delayed ettringite formation: a microstructural and microanalytical study", Advances in cement research, Vol. 5, No. 20, 1993, pp. 139-146.
- 23 SKALNY J., JOHANSEN V., THAULOW N. and PALOMO A., (1996), "As a form of sulfate attack", Materiales de construccion, Vol. 46, No. 244, October-December 1996, pp. 5-29.
- 24 PATEL H.H., BLAND C.H. and POOLE A.B., (1995), "The microstructure of concrete cured at elevated temperatures", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 3, 1995, pp. 485-490.
- 25 DIAMOND S., ONG S. AND BONEN D., (1994), "Characteristics of secondary ettringite deposited in steam cured concretes undergoing ASR", Proceeding of the Sixteenth International Conference on Cement Microscopy, April 11-14, Richmond, Virginia, USA, pp. 294-305
- 26 FAMY C., (1999), "Expansion of heat-cured mortars", Thesis of doctor of philosophy, University of London, September 1999.
- 27 MORANVILLE M., (1995), "Implications of curing temperatures for durability of cement based systems, Curing temperatures and durability" Materials research society, fall meeting 1995, seminar on mechanism of chemical degradation of cement – based systems, pp. 1-8.
- 28 XU A., SHAYAN A. and BAUBURAMANI P., (1998), "Test methods for sulfate resistance of concrete and mechanism of sulfate attack", State-of-the-art Review, ARRB Transport Research, Review Report 5.
- 29 HOBBS D.W., (1999), "Expansion and cracking in concrete associated with delayed ettringite formation", Ettringite the sometimes host of destruction, SP 177-11, pp. 159-181.
- 30 PATEL H.H., BLAND C.H. and POOLE A.B., (1996), "Microstructure and sulfate levels within the hydrated matrix of steam cured concrete", ICMA, Houston, Texas, USA, April 1996, pp. 112-124.
- 31 DUGGAN, C.R AND SCOTT, J.F., (1989), "New test for Deleterious Expansion in Concrete", Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, July 17-20, 1989.
- 32 STARK J. and BOLLMANN K., (1999), "Laboratory and field examinations of ettringite formation in pavement concrete", Ettringite the sometimes host of destruction, SP 177-12, pp. 183-198.
- 33 MEHTA P. K., (2000), "Sulfate attack on concrete - separating myths from reality", Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, June 2000, pp. 1-11.