



HAL
open science

Synthèse de la révision des recommandations françaises pour la prévention de la réaction sulfatique interne

Bruno Godart

► **To cite this version:**

Bruno Godart. Synthèse de la révision des recommandations françaises pour la prévention de la réaction sulfatique interne. Les journées nationales du béton, Troisième édition, JNB'17, May 2017, HAMMAMET, Tunisie. 9 p. hal-02543092

HAL Id: hal-02543092

<https://hal.science/hal-02543092>

Submitted on 15 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Synthèse de la révision des recommandations françaises pour la prévention de la réaction sulfatique interne

Bruno Godart¹

¹ : Université Paris-Est, IFSTTAR, Département MAST, Champs sur Marne, France

Résumé

La réaction sulfatique interne due à la formation différée d'Ettringite (RSI) est une réaction expansive du béton qui peut endommager sévèrement les structures fabriquées avec ce matériau. La RSI est définie comme la formation d'ettringite dans un béton après son durcissement, sans aucun apport de sulfate externe, mais avec un approvisionnement en eau. Ce phénomène apparaît dans les bétons exposés à une humidité fréquente ou en contact avec l'eau, soumis à un traitement thermique relativement élevé (> 65 ° C) ou ayant atteint des températures équivalentes pour d'autres raisons (béton massif coulé en place, etc.).

En l'absence de méthodes de traitement efficaces et durables pour réparer ou réhabiliter les structures affectées par la RSI, l'IFSTTAR (ex-LCPC) a publié en 2007 les recommandations françaises pour la prévention des désordres dus à la RSI ; une version anglaise a été publiée en 2009. Après dix ans d'application de ces recommandations, le moment est venu de réviser ce guide dont la diffusion est programmée en 2017. L'article présente les principales évolutions de ces recommandations et notamment les modifications apportées aux précautions, l'amélioration de la méthode de calcul de la température maximale atteinte à l'intérieur du béton à la construction, et la modification des critères d'interprétation de l'essai de performance.

Mots clés : Béton, Formation différée d'ettringite, Prévention, Recommandations, Révision

1. INTRODUCTION

La Réaction Sulfatique Interne (RSI) se traduit par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire, après la prise, sans apport de sulfates externes. Le mécanisme peut être décomposé schématiquement en trois séquences : la constitution d'une source en sulfates potentiellement remobilisable, la précipitation différée de l'ettringite et l'expansion qui se traduit par la fissuration du béton.

Une élévation importante de la température modifie les réactions d'hydratation du ciment. En effet, les sulfates apportés par le régulateur de prise (gypse) ne sont pas mobilisés en totalité pour former l'ettringite primaire [1-4]. Par ailleurs, la solubilité de l'ettringite primaire augmente avec la température ce qui se traduit par une concentration plus élevée en ions sulfate dans la solution interstitielle du béton [5,6]. De plus, la présence d'autres ions en solution tels que les ions alcalins Na⁺ ou K⁺ augmentent également la solubilité de l'ettringite [7]. Des calculs thermodynamiques et de nombreuses expériences attestent qu'en présence d'une forte quantité d'alcalins et à des températures supérieures à 65 °C, le domaine de stabilité de l'ettringite est considérablement réduit [8, 9].

Après la prise du béton et le retour à la température ambiante, la précipitation de l'ettringite peut se produire dans la pâte de ciment durcie à partir des inclusions de monosulfoaluminates et des ions SO₄²⁻ sous forme de cristaux nanométriques à micrométriques. Il peut alors régner des conditions de concentration qui conduisent à la formation dans un espace confiné, d'une ettringite mal cristallisée. Elle peut développer localement des pressions élevées et provoquer un gonflement ainsi qu'une fissuration de la pâte de ciment. Au cours du temps et en conditions humides, les microcristaux d'ettringite peuvent être dissous et recristalliser dans

les fissures où cette ettringite de formation différée apparaît alors sous forme de veines caractéristiques, ou dans les auréoles de transition situées autour des granulats.

Le processus expansif conduit à des effets macroscopiques similaires à ceux créés par la Réaction Alkali-Granulat (RAG) et consistant principalement en un gonflement du matériau, une fissuration généralement multidirectionnelle, et une diminution des propriétés mécaniques qui peuvent causer d'importants désordres structurels dus à des déformations inattendues et à des contraintes additionnelles dans le béton et les armatures.

Il n'existe actuellement aucune méthode permettant d'arrêter une réaction sulfatique interne, et il n'existe donc pas aujourd'hui de méthode de réparation pouvant être jugée comme suffisamment fiable et durable pour être considérée comme une solution de réparation définitive de l'ouvrage. C'est pourquoi la priorité a été mise en France sur la mise au point d'une politique de prévention qui a conduit en 2007 à la publication des Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne,

2. RAPPEL SUR LES RECOMMANDATIONS POUR LA PREVENTION DE LA RSI

La démarche de prévention suivie dans ce guide [15] publié par le LCPC en 2007 consiste à identifier les parties d'ouvrages susceptibles de développer des désordres dus à la réaction sulfatique interne ; ce sont principalement :

- les parties d'ouvrage définies comme étant des pièces critiques (c'est à dire des pièces en béton pour lesquelles la chaleur dégagée n'est que très partiellement évacuée vers l'extérieur et conduit à une élévation importante de la température du béton)
- les produits préfabriqués en béton ayant subi un traitement thermique.

On effectue ensuite un croisement entre, d'une part la catégorie dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) définie en fonction du niveau de risque d'apparition de désordres que l'on est prêt à accepter, et d'autre part les actions environnementales auxquelles est soumis l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) pendant la vie de la structure. Ce croisement permet de définir un niveau de prévention qui détermine alors les précautions à appliquer.

2.1 Catégorie de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage

Les ouvrages (ou parties d'ouvrage) sont classés en 3 catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne que l'on est prêt à accepter pour un ouvrage (ou une partie d'ouvrage) donné. Le choix de la catégorie d'ouvrage est fonction de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur.

La catégorie I concerne les ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont faibles ou acceptables. La plupart des produits préfabriqués en béton entrent dans cette catégorie à l'exception des éléments préfabriqués structurels et des produits destinés à être utilisés dans des ambiances agressives (écrans acoustiques, corniches d'ouvrages d'art, certaines canalisations d'assainissement,...).

La catégorie II rassemble les ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont peu tolérables. Les éléments porteurs de la majeure partie des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) entrent dans cette catégorie, ainsi que les éléments préfabriqués structurels.

La catégorie III correspond à des ouvrages (ou parties d'ouvrage) pour lesquels les conséquences d'une apparition de désordres sont inacceptables ou quasi inacceptables. Ce sont généralement des ouvrages à caractère exceptionnel dont l'absence totale de désordres peut être nécessitée par des raisons de sécurité, d'esthétique ou d'impossibilité de réparation ou de remplacement.

2.2 Classes d'exposition vis-à-vis de la RSI

La norme NF EN-206/CN qui définit de nombreuses classes d'exposition relatives aux différentes agressions possibles du béton, ne définit pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne. C'est pourquoi les recommandations du LCPC [15] introduisent trois classes complémentaires par rapport à cette norme : XH1, XH2 et XH3. Celles-ci tiennent compte du fait que l'eau ou une hygrométrie ambiante élevée sont des facteurs nécessaires au développement de la réaction sulfatique interne. L'apport d'alcalins et de sulfates par le milieu environnant est également source d'aggravation de désordres, mais l'on considère qu'ils font partie d'un processus de dégradation par la surface et qu'ils relèvent de dispositions préventives qui sont traitées par ailleurs.

Ces trois classes d'exposition XH1, XH2 et XH3 sont définies selon les indications du tableau 1 qui présente également à titre informatif des exemples de parties d'ouvrage classées dans les milieux ambiants appropriés.

Tableau 1 : Classes d'exposition de la partie d'ouvrage vis-à-vis de la RSI (D'après [15])

Désignation de la classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
XH1	Sec ou humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen Partie d'ouvrage en béton située à l'extérieur et abritée de la pluie
XH2	Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumise aux intempéries, sans stagnation d'eau à la surface Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumise à des condensations fréquentes
XH3	En contact durable avec l'eau : immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	<ul style="list-style-type: none"> Partie d'ouvrage en béton submergée en permanence dans l'eau Eléments de structures marines Un grand nombre de fondations Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau

2.3 Niveaux de prévention

La détermination du niveau de prévention se fait en croisant la catégorie de l'ouvrage avec la classe d'exposition XH à laquelle est soumise la partie d'ouvrage considérée. La détermination du niveau de prévention peut se faire en considérant l'ouvrage dans son entier,

Tableau 2 : Choix du niveau de prévention

Classe d'exposition de la partie d'ouvrage	XH1	XH2	XH3
Catégorie d'ouvrage I	As	As	As
II	As	Bs	Cs
III	As	Cs	Ds

mais il est recommandé d'examiner chaque partie d'ouvrage pour déterminer le niveau de prévention adapté. Le choix des niveaux de prévention désignés par les lettres As, Bs, Cs et Ds, est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui peut s'aider pour cela du tableau 2.

2.4 Précautions en fonction des niveaux de prévention

Le type de précaution à appliquer est directement lié à chacun des quatre niveaux de prévention As, Bs, Cs et Ds. Le principe de la prévention repose principalement sur la limitation de l'échauffement du béton caractérisé par la température maximale T_{max} susceptible d'être atteinte dans la structure et, si nécessaire, par la durée de la période où une température élevée est maintenue.

Dans le cas où la température maximale recommandée en accord avec le niveau de prévention est dépassée, plusieurs solutions de remplacement sont parfois proposées. Les précautions correspondant aux quatre niveaux de prévention sont les suivantes:

• Niveau As : $T_{max} < 85 \text{ °C}$

Toutefois, dans le cas d'un traitement thermique appliqué sur un élément préfabriqué, il est autorisé de dépasser la température $T_{max} = 85 \text{ °C}$ jusqu'à 90 °C , à condition que la durée de la période pendant laquelle la température dépasse 85 °C soit limitée à 4 heures.

• Niveau Bs : $T_{max} < 75 \text{ °C}$

Cependant, si la température maximale atteinte dans le béton ne peut pas rester inférieure à 75 °C , elle doit rester inférieure à 85 °C et au moins une des six conditions indiquées dans le tableau 3 doit être respectée.

• Niveau Cs : $T_{max} < 70 \text{ °C}$

Toutefois, si la température maximale atteinte dans le béton ne peut pas rester inférieure à 70 °C , elle doit rester inférieure à 80 °C et au moins une des six conditions indiquées dans le tableau 3 doit être respectée.

Tableau 3: Les six conditions utilisables lorsque la température seuil T_{max} est dépassée.

Condition 1	Condition 2	Condition 3
<ul style="list-style-type: none"> - Durée de maintien de la température du béton au-dessus de $75 \text{ °C} < 4$ heures pour Bs et au-dessus de $70 \text{ °C} < 4$ heures pour Cs - Alcalins actifs équivalents du béton $< 3 \text{ kg / m}^3$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES), avec : <ul style="list-style-type: none"> a) pour le béton préfabriqué: Dans le cas de l'utilisation des ciments CEM I et CEM II / A : alcalins actifs équivalents du béton $< 3 \text{ kg / m}^3$ b) pour le béton coulé en place : CEM I, CEM II / A-L et CEM II / A-LL ne sont pas acceptés 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 de type CEM II/B-V ou CEM II/B-S ou CEM II/B-Q ou CEM II/B (S-V) ou CEM III/A ou CEM V <ul style="list-style-type: none"> - avec SO_3 du ciment $< 3 \%$ et C3A du clinker $< 8\%$
Condition 4	Condition 5	Condition 6
<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de cendres volantes, de laitiers, de pouzzolanes naturelles calcinées ou de métakaolin en combinaison avec un CEM I : <ul style="list-style-type: none"> - teneur en additions $> 20\%$ - avec SO_3 du ciment $< 3 \%$ et C3A du clinker $< 8\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérification de la durabilité du béton par rapport à la RSI, à l'aide de l'essai de performance et en satisfaisant les critères 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour les éléments préfabriqués, le couple béton / échauffement envisagé est identique ou similaire à un couple béton / échauffement ayant au moins 5 références d'utilisation sans aucun problème

• **Niveau Ds : $T_{max} < 65 \text{ °C}$**

Pour ce niveau de prévention, le risque de développement de la DEF doit être pris en compte par l'une des deux précautions suivantes, la première précaution étant recommandée en priorité :

- Précaution 1: $T_{max} < 65 \text{ °C}$
- Précaution 2: Si T_{max} ne peut pas rester inférieur à 65 °C , elle doit rester inférieure à 75 °C avec le respect des 2 conditions suivantes :
 - Respect de la condition 2 du tableau 3
 - Validation de la composition du béton par un laboratoire indépendant expert en RSI.

3. REVISION DES RECOMMANDATIONS

Sur la base d'un retour d'expérience de dix ans dans l'application des recommandations de 2007, il a été décidé de ne pas modifier les définitions et les caractéristiques des catégories, des classes d'exposition et des niveaux de prévention. Il a également été décidé de maintenir les valeurs de la température maximale (85 °C , 75 °C , 70 °C et 65 °C) correspondant respectivement aux niveaux de prévention (As, Bs, Cs et Ds) et à supprimer la condition 6 sur les références d'utilisation pour les produits préfabriqués parce que cette solution était particulièrement difficile à appliquer.

3.1 Modifications des précautions

Les résultats d'études menées à l'IFSTTAR en collaboration avec le LNEC de Lisbonne et la Fédération Nationale des Travaux Publics, montrent que l'utilisation d'additions minérales normalisées (laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes et fumées de silice), même lorsqu'elles sont utilisées avec du ciment composé à base de fines calcaires, peuvent atténuer considérablement le risque de RSI indépendamment de leur effet bénéfique sur l'élévation de la température du béton dans des éléments massifs et dans des éléments préfabriqués étuvés. Au-delà de ces études, les modifications introduites pour les précautions concernent les niveaux Bs, Cs et Ds. Pour les niveaux Bs et Cs, la nouvelle condition 4 permet aujourd'hui d'utiliser des fumées de silice avec un taux de substitution supérieur à 10% et des laitiers avec un taux de substitution augmenté de 20% à 35%. La nouvelle condition 4 permet l'utilisation de CEM II/A-L & LL avec des additions minérales pour la formulation de bétons. Pour le niveau Ds, la validation de la composition du béton par un laboratoire indépendant expert en RSI a été supprimée. En outre, les conditions 4 et 5 sont maintenant autorisées pour ce niveau de prévention.

3.2 Modifications de la méthode de calcul de la température atteinte

Il a également été décidé d'améliorer la méthode de calcul pour estimer la température atteinte dans une structure et décrite dans l'annexe 4 des recommandations précédentes. Les différentes étapes du processus sont décrites à la figure 1.

Dans la première étape de cette méthode, la chaleur Q_m libérée à long terme par un ciment a été calculée en multipliant la chaleur dégagée par le ciment à 41 heures par le rapport Q_m / Q_{41} donné en fonction du rapport de résistance à la compression R_{c28} / R_{c2} . Les nouvelles recommandations proposent d'améliorer l'estimation de Q_m en considérant la chaleur libérée par le ciment à 120 heures : Q_{120} . Si cette valeur améliore la prédiction, elle sous-estime les valeurs Q_m des ciments CEM III et CEM V ; par conséquent, les relations suivantes doivent être appliquées:

- pour les ciments CEM I et CEM II : $Q_m = 1,05 Q_{120}$
- pour les ciments CEM III et CEM V : $Q_m = 1,15 Q_{120}$

Q 120 n'est pas une valeur standardisée et elle doit être donnée par le producteur de ciment à la demande du client. Mais si cette valeur n'est pas disponible, le calcul de Q_m est basé sur Q41 et les relations suivantes sont appliquées :

$$Q_m = \max (Q_{41}; Q_{41} \times Q_m / Q_{41} \text{ ratio})$$

où la valeur du rapport Q_m / Q_{41} est donnée par l'équation suivante:

$$Q_m / Q_{41} = 1,71 - 1,16 R_{c2} / R_{c28}$$

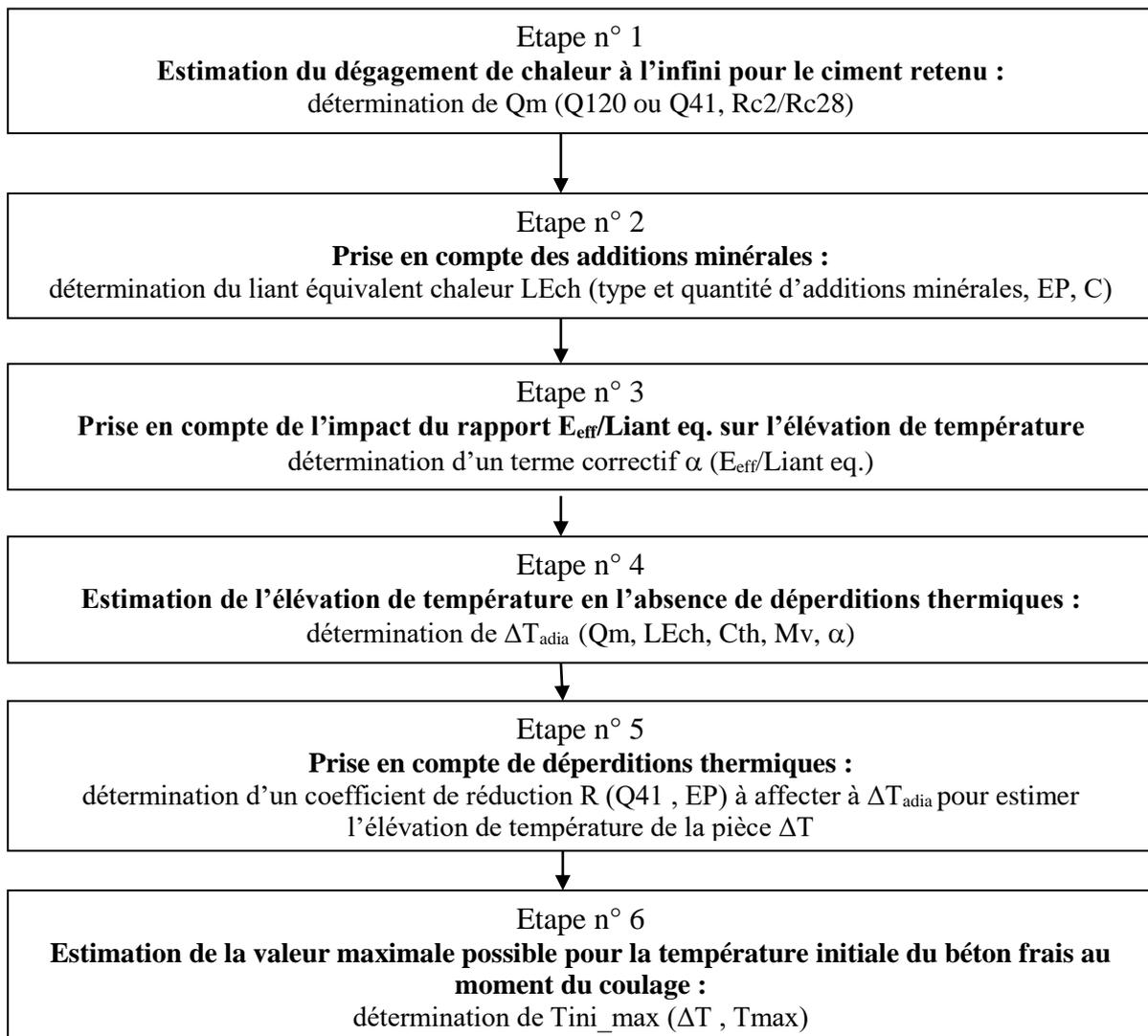


Figure 1 : Diagramme illustrant les 6 étapes du calcul de la température atteinte dans une structure.

Dans la deuxième étape de la méthode, les additions qui participent à la libération de chaleur sont prises en compte par un liant thermique équivalent LEch (en kg/m³) donné par la formule suivante:

$$LEch = C + \sum K_i 'A_i$$

où A_i et K_i 'sont respectivement la teneur et le coefficient de pondération de la ième addition. Dans cette étape, la nouvelle addition de métakaolin est ajoutée avec une valeur $K' = 1$ comme pour la fumée de silice (voir figure 2).

La troisième étape prend en compte l'effet de la limitation de l'hydratation sur le dégagement

de chaleur. La correction sur le degré d'hydratation proposé dans les recommandations précédentes n'est pas fondée sur une relation physique et une autre formule est proposée dans la nouvelle version :

$$\Delta T_{adia} = \alpha (Q_m \times LE_{ch}) / (C_{th} \times M_v)$$

où C_{th} est la capacité thermique du béton pris égal à $1 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ \text{C})$ et α est un coefficient de correction donné par la figure 3.

Les quatrième et cinquième étapes de la méthode ne sont pas modifiées.

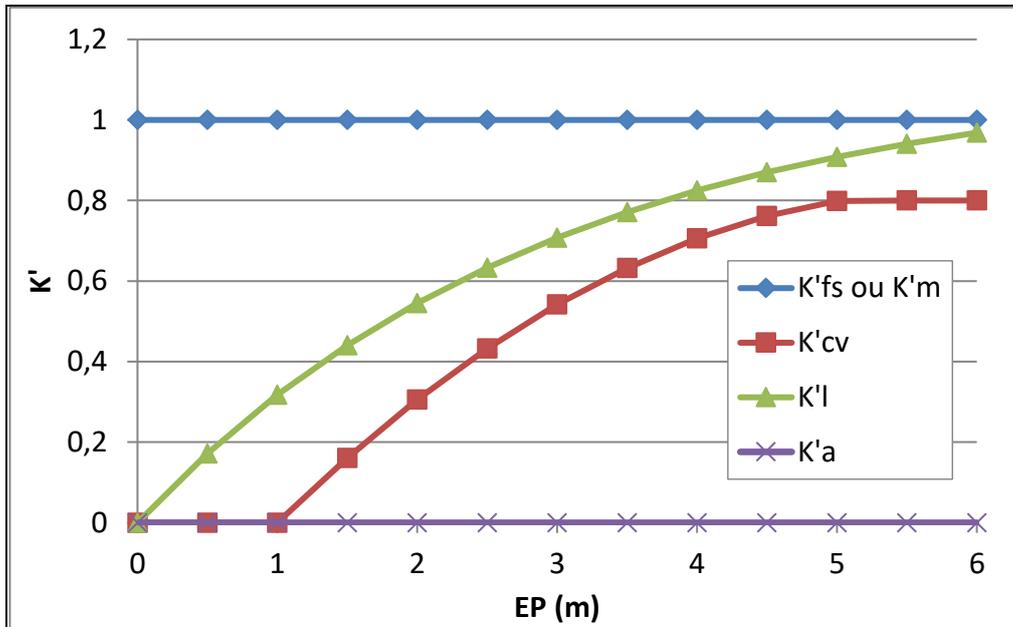


Figure 2: coefficient d'ajustement K' des additions pour le calcul du liant équivalent chaleur LE_{ch} en fonction de l'épaisseur de la pièce EP (fs ou m = fumée de silice ; cv = cendres volantes, l = laitier de haut fourneau ; a = additions calcaires ou siliceuses)

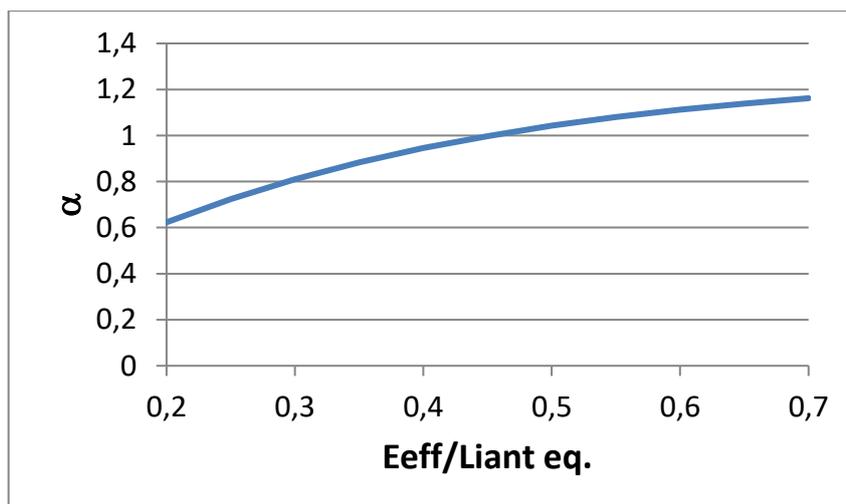


Figure 3: correction de l'élevation de température liée au rapport $E_{eff}/Liant \text{ eq.}$. La formule est calée pour ne donner aucune correction pour un rapport $E_{eff}/Liant \text{ eq.}$ égal à 0,43.

3.3 Modification des critères d'interprétation du test de performance

Parce qu'il était difficile de mesurer avec une précision suffisante la variation mensuelle de l'expansion longitudinale moyenne d'une éprouvette afin de respecter les seuils antérieurs très

précis, il a été décidé de supprimer les conditions relatives à cette variation mensuelle et les critères ont été modifiés comme suit :

Critère 1 :

La déformation longitudinale moyenne de 3 éprouvettes est inférieure à 0,04 % et aucune valeur individuelle ne dépasse 0,06 % à l'échéance de 12 mois ;

Critère 2 :

Si la déformation longitudinale moyenne des 3 éprouvettes est supérieure à 0,04 % à l'échéance de 12 mois, il est nécessaire de prolonger l'essai jusqu'au 15^{ème} mois. Dans ce cas, la déformation longitudinale moyenne des 3 éprouvettes doit être inférieure à 0,06 % à l'échéance de 15 mois, et la variation cumulée entre le 12^{ème} mois et le 15^{ème} mois doit être inférieure à 0,01 %, et en outre aucune valeur individuelle ne doit dépasser 0,07 % à l'échéance de 15 mois.

4. CONCLUSION

La réaction sulfatique interne due à la formation différée d'ettringite a été découverte il y a plus de vingt ans dans certains éléments préfabriqués soumis à un étuvage, et c'est seulement depuis environ une quinzaine d'années qu'il fut reconnu que cette pathologie pouvait affecter les structures coulées en place dont le béton avait atteint une température élevée. Cette découverte assez récente explique le petit nombre d'études et de recherches consacrées à ce problème jusqu'à maintenant.

En ce qui concerne la prévention, il est important de noter le travail important mené par le LCPC (actuellement IFSTTAR) avec l'aide de l'industrie cimentière et des entreprises de génie civil pour élaborer des recommandations destinées à éviter de nouveaux désordres, malgré le niveau relativement faible de connaissances sur ce sujet. Des efforts ont également été déployés pour développer un essai d'expansion accélérée sur un béton soumis à DEF, dans le but d'aller vers une approche performantielle.

Ces nouvelles recommandations seront publiées au cours de l'année 2017 et si le retour d'expérience avec l'application de cette nouvelle version des recommandations semble être positif dans quelques années, on s'acheminera alors vers une norme française.

Références bibliographiques

[1] Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K., 200. Review : Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n°5, p. 683-693.

[2] Divet L., 2001. Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude de la formation différée de l'ettringite, *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ouvrages d'art*, OA 40, 227 p.

[3] Barbarulo R., 2002. Comportement des matériaux cimentaires : action des sulfates et de la température, *Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 271 p.

[4] Glasser F.P., 2002. The stability of ettringite, in *International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Suisse, p. 43-64.

[5] Ghorab H.Y., Kishar E.A., 1985. Studies on the stability of the calcium sulfoaluminate hydrates. Part 1: effect of temperature on the stability of ettringite in pure water, *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n° 1, p. 93-99.

[6] Glasser F.P., Damidot D., Atkins M., 1995. Phase development in cement in relation to the secondary ettringite formation problem, *Advances in Cement Research*, vol. 7, n° 6, p. 57-68.

- [7] Damidot D., Glasser F.P., 1992. *Thermodynamic investigations of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 50 °C and 85 °C*, *Cement and Concrete Research*, vol. 22, p. 1179-1191.
- [8] Damidot D., Glasser F.P., 1993. *Thermodynamic investigations of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O system at 25 °C and the influence of Na₂O*, *Cement and Concrete Research*, vol. 23, p. 221-238.
- [9] Brown P.W., Bothe J.V., 1993. *The stability of ettringite*, *Advances in Cement Research*, vol. 5, n° 18, p. 47-63.
- [10] Scrivener K., Lewis M., 1997. *A microstructural and microanalytical study of heat cured mortars and delayed ettringite formation*, 10th *International Congress on the Chemistry of Cement*, Goteborg, Suède, 4iV061.
- [11] Odler I., 1980. *Interaction between gypsum and C-S-H phase formed in C₃S hydratation*, 7th *International Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, 4, p. 493-495.
- [12] Fu Y., Xie P., Gu P., Beaudoin J.J., 1994. *Effect of temperature on sulphate adsorption/desorption by tricalcium silicates hydrates*, *cement and Concrete Research*, vol. 24, n° 8, p. 1428-1432.
- [13] Divet L., Randriambololona R., 1998. *Delayed Ettringite Formation : the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H phase*, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n° 3, p. 357-368.
- [14] Barbarulo R., Peycelon H., Leclercq S., 2007. *Chemical equilibria between C-S-H and ettringite at 20 and 80°C*, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, p. 1176-1181.
- [15] LCPC, 2007. *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, *Guide technique du LCPC*, 59 p.
- [16] Godart B., Divet L., 2008. *The new French recommendations to prevent disorders due to delayed ettringite formation. – Conference proceedings of the 13th ICAAR*, Maarten A.T.M. Broekmans & Borge J. Wigum, editors, 16-20 juin.
- [17] Godart B., Divet L., 2009. *Réaction sulfatique interne dans les structures en béton : Mécanisme, pathologie et prévention. - Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, C 2 254 -1*, 19 pages.
- [18] Godart B., Divet L., 2012. *DEF Prevention in France and temperature control at early age. - CONCRACK 3 – RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*, 15-16 March 2012, Paris, France.
- [19] Godart B., Divet L., 2013. *Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy. Fifth international conference on Forensic Engineering*, Institution of Civil Engineers, London, 15-17 April.
- [20] Godart B., 2016 *How to deal with DEF affected structures? – IABSE international symposium*, Stockholm, Sept. 21-23.
- [21] Godart B., Omikrine-Metalssi O., Kchakech B., Lavaud S., 2016. *The effects of Delayed Ettringite Formation on the expansion of a massive bridge pier and a precast prestressed concrete beam of a bridge. - ICAAR 2016, 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, São Paulo, Brazil, 3-7 Jul 2016. ISSN 2525-4189.
- [22] Godart B., Divet L., 2017. *The revision of the French Recommendations for the prevention of Delayed Ettringite Formation - JCI-RILEM International Workshop on "Control of Cracking of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early Age Cracking of Concrete Structures" - CONCRACK5- 24-25 avril 2017*, Tokyo, Japon.