DIAGNOSTIC D'UNE RÉACTION DE GONFLEMENT INTERNE DU BÉTON

CONTEXTE

Description et mécanisme des réactions

Les réactions de gonflement interne (RGI) du béton regroupent deux grands types de réaction : les alcali-réactions (encore appelées réactions alcalis-granulats) et les réactions sulfatiques internes.

Nous ne traiterons pas dans cette fiche du cas particulier de la réaction de gonflement résultant de la formation de thaumasite qui reste jusqu'à présent exceptionnelle en France.

Description et mécanisme de l'alcali-réaction

Le mécanisme de la réaction alcali-silice (RAG) peut être représenté schématiquement en 3 étapes :

– la dissolution de la silice (SiO_2) sous l'action des ions hydroxyde OH- de la solution interstitielle du béton ;
– la pénétration dans le réseau de la silice des ions alcalin (K^+, Na^+) pour maintenir l'électroneutralité et former un silicate alcalin ;
– la précipitation du produit de réaction (souvent dénommé « gel d'alcali-réaction ») sous l'action des ions calcium (Ca^{++}) qui se substituent partiellement aux ions alcalin pour former un gel silico-calco-alcalin qui a la propriété d'être gonflant.

L'action de l'eau est encore sujette à débat dans la mesure où elle véhicule les ions, participe à la formation du gel, et peut également être absorbée par le gel par phénomène d'osmose. Les gels sont fortement hydrophiles et très expansifs.

Le développement de la réaction est donc dépendant :

– de la quantité de silice réactive disponible dans les granulats ;
– du pH de la solution interstitielle ;
– de la quantité d'ions alcalin disponibles ;
– de la quantité d'ions calcium disponibles (provenant de la chaux) ;
– de la présence d'eau.

Description et mécanisme de la réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) est provoquée par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire durci, plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment, et sans apport de sulfate externe. L'ettringite de formation différée concerne uniquement les bétons ayant subi au jeune âge un échauffement supérieur à 65 °C. En effet, au-delà de cette température, l'ettringite de formation primaire ne se forme pas au cours des réactions d'hydratation du ciment et/ou est décomposée. Après retour à la température ambiante et en présence d'humidité, l'ettringite peut se former ou se reformer. Elle est alors susceptible de générer des pressions de gonflement dans certaines conditions.

Ce phénomène peut se rencontrer pour deux types de béton :

– les bétons traités thermiquement (par exemple dans le cas de certains processus de préfabrication) ;
– les bétons coulés en place dans des pièces critiques qui sont 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.

Le risque de RSI est particulièrement élevé pour les pièces massives coulées en été.

La conjonction de plusieurs paramètres est indispensable pour amorcer et développer la RSI :

– la température du béton lors de son durcissement ;
– la durée de maintien de cette température ;
– la teneur en sulfates du ciment ;
– la teneur en aluminates du ciment ;
– la teneur en alcalins du béton et les apports extérieurs ;
– les apports ultérieurs d'eau.

Influence des caractéristiques du béton

L'alcali-réaction

La nature et la composition du béton peuvent avoir une influence sur :

– le pH et la concentration en alcalins de la solution interstitielle (les alcalins proviennent principalement du ciment mais aussi des additions minérales, adjuvants, et granulats, etc.) ;
– l'état cristallin et la quantité de silice réactive contenue dans les granulats ;

– la quantité d'ions calcium provenant de la portlandite et généralement en quantité suffisante ;
– la pénétration d'eau et d'agents alcalins extérieurs.

Dans un objectif de diagnostic, il est important de connaître le classement des granulats utilisés vis à vis de l'alcali-réaction (selon le fascicule FD P 18-542), soit :

– non réactifs (NR) ;
– potentiellement réactifs (PR) ;
– potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

La réaction sulfatique interne

Les caractéristiques du béton ont également une influence sur :

– la température maximale atteint par le béton au cœur des pièces et sa durée de maintien ;
– la quantité de sulfates et d'aluminates apportée par le ciment et donc fonction de la nature du ciment utilisé ;
– le pH et la concentration en alcalins de la solution interstitielle (les alcalins proviennent principalement du ciment mais aussi des additions minérales, adjuvants, et granulats, etc.) ;
– la pénétration d'eau et d'agents alcalins extérieurs.

Dans un objectif de diagnostic, et à la différence de l'alcali-réaction, il est important de connaître les conditions de mise en œuvre du béton, et notamment si des dispositions constructives ont été adoptées pour limiter l'échauffement du béton sur chantier ou en usine de préfabrication.

Influence des paramètres extérieurs

Quel que soit le type de réaction de gonflement interne, plusieurs agents jouent un rôle important dans l'apparition et le développement de la pathologie :

– l'eau ;
– l'humidité (et notamment les cycles séchage/mouillage) ;
– les alcalins extérieurs (et notamment ceux provenant de l'eau de mer et des sels de déverglaçage, etc.).

D'autres facteurs peuvent influencer ces deux types de réaction. Il s'agit souvent de facteurs entraînant des désordres dans le matériau béton et diminuant ainsi sa résistance et son aptitude à s'opposer à l'intrusion d'agents agressifs :

– la fissuration au jeune âge ;
– la fissuration de fonctionnement ;
– le gel interne, l'écaillage, les épaufrures, etc.

Les deux pathologies peuvent co-exister au sein d'un même béton. Par ailleurs, les désordres créés par l'une des deux réactions (fissurations avec pénétration d'eau) peuvent provoquer l'initiation de l'autre réaction ou accélérer son développement et aboutir ainsi à une concomitance des deux réactions.

Modélisation du comportement du matériau

Selon les développements théoriques proposés par Li [1], la déformation totale du béton est la somme de la déformation élastique, de la déformation plastique, de la déformation de retrait et de fluage, et de la déformation d'origine chimique. La partie de la déformation induite par la réaction chimique est basée sur la loi de Larive [2] pour l'alcali-réaction et sur cette même loi améliorée par Brunetaud [3] pour la réaction sulfatique interne. Elle est résumée dans l'équation 1 ci-dessous :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty \cdot \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_C}}}{1 - e^{-\frac{(t-\tau_L)}{\tau_C}}} \cdot \begin{cases} 1 & \text{pour la RAG} \\ 1 - \dfrac{\varphi}{\delta + t} \; with \; 0 \le \varphi \le \delta & \text{pour la RSI} \end{cases} \quad \text{Eq (1)}$$

Dans cette équation, ε_∞ correspond à l'expansion finale, τ_C and τ_1 sont respectivement les temps caractéristique et de latence (correspondant à la vitesse de gonflement et au temps avant le démarrage de l'expansion), ϕ and δ sont deux paramètres complémentaires introduits par Brunetaud dans la loi de Larive pour modéliser une phase avec une asymptote linéaire à la fin de la réaction dans le cas de la RSI.

Cette loi de comportement a été introduite dans le module de calcul aux éléments finis RGIB de CESAR-LCPC afin de pouvoir modéliser le gonflement de structures en béton. D'autres logiciels de calculs intégrant d'autres lois existent également.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic : – formulation du béton (nature, provenance et réactivité des granulats, nature et dosage du ciment ; rapport E/C, nature, provenance et dosage des additions,etc.) ; – teneur en alcalins, en sulfates et en aluminates du ciment ; – conditions d'exposition climatique. et plus particulièrement dans le cas d'une RSI : – pour les bétons coulés en place : température extérieure et du béton lors du coulage, date de coulage, type de coffrage, temps avant le décoffrage – pour les bétons préfabriqués : étuvage, température, durée On regardera également si l'ouvrage fait partie d'une famille d'ouvrages dont certains membres ont déjà été identifiés comme atteints de réaction de gonflement interne.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE (PRÉ-DIAGNOSTIC)	Cette deuxième étape est souvent à l'origine du repérage des désordres susceptibles d'indiquer une réaction de gonflement du béton ; pour cela on pourra s'aider du manuel LCPC d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art [4] : – faïençage et fissuration multi-directionnelle (RAG ou RSI) ; – fissures le long des aciers (RAG ou RSI) ; – déformations permanentes (RAG ou RSI) ; – gonflements différentiels entre parties d'un même ouvrage (RAG ou RSI) ; – rejet de fissures (décalage des lèvres hors du plan) (RAG ou RSI) ; – contact entre about de tablier et murs garde-grève (RAG ou RSI) ; – exsudations (RAG) ; – pop-outs (petits cratères) (RAG) ; – parements tachetés (RAG). En général la simple inspection détaillée ne permet pas de diagnostiquer le type de réaction de gonflement, et si de tels défauts existent, il est nécessaire de passer à la troisième étape du diagnostic qui est l'auscultation. Il faut cependant rappeler ici que nombre de ces défauts ne sont pas toujours caractéristiques d'une RGI ; le cas échéant, il faudra donc également examiner d'autres causes possibles pour les expliquer (cycles de gel/dégel, défaut de cure, enduits fissurés, retrait excessif, etc.).
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	Conformément au guide LCPC pour l'aide à la gestion des OA atteints de réaction de gonflement interne [5], il convient de déterminer dans quelle classe de priorité se trouve l'ouvrage : – classe 1 lorsque des parties vitales sont affectées par des désordres ; – classe 2 dans le cas contraire. Quel que soit le classement de l'ouvrage, le guide recommande de l'équiper de repères pour mesurer des indices de fissuration (en appliquant la méthode d'essai LPC n°47) [6] et de plots pour opérer des mesures de distancemétrie à l'aide d'un fil d'invar ou par infrarouge [7]. Cela permet d'effectuer un suivi de la fissuration et des déformations globales de l'ouvrage. Dans la mesure du possible, on profitera de cette opération de mise en place de l'instrumentation pour équiper aussi l'ouvrage de sondes de température et d'humidité qui pourront se révéler utile dans le cas d'une modélisation. Selon l'importance de la fissuration initiale et/ou l'importance de l'ouverture des fissures isolées, on s'oriente vers des fréquences de suivi différentes. Ainsi, lorsque l'indice de fissuration IF_0 est inférieur à 1 mm/m et/ou que l'ouverture de fissures isolées est inférieure à 0,5 mm, on se contente d'un suivi annuel de ces grandeurs ; dans le cas contraire, on effectue des relevés trimestriels. Au bout d'un an, on examine les vitesses d'évolution des désordres. Si la variation d'indice de fissuration ΔIF ou si la variation de déformation globale $\Delta Dm/Dm$ est inférieure à 0,5 mm/m par an, et/ou si la variation de l'ouverture de fissures isolées (de plus de 0,5 mm d'ouverture) Δf est inférieure à 0,2 mm par an, alors on peut soit arrêter le suivi, soit l'espacer dans le temps et le faire tous les 3 ans (ouvrage évoluant peu). Dans le cas contraire (ouvrage évoluant significativement), il convient de procéder à un diagnostic de la maladie. Pour les ouvrages classés en 1, on peut s'orienter vers un diagnostic de la pathologie en parallèle à l'instrumentation et au suivi de l'ouvrage. **Étape 3.1 : Diagnostic de la pathologie** **L'objectif, à ce stade, est d'identifier l'origine de la pathologie parmi les causes possibles suivantes :** – alcali-réaction ; – réaction sulfatique (interne, ou externe) ; – association de l'alcali-réaction et de la réaction sulfatique ; – autre cause, non liée aux réactions de gonflement interne. **a) Prélèvements d'échantillons** Cette identification est effectuée à partir d'échantillons prélevés sur l'ouvrage par carottage, tant en zone altérée qu'en zone apparemment saine. Dans ce dernier cas, il peut s'agir d'une autre partie de l'ouvrage formulée avec le même béton, par exemple mieux protégée des venues d'eau ou moins massive. La comparaison entre zone saine et zone altérée fournit des éléments intéressants pour le diagnostic. Elle permet notamment de disposer d'un point de référence susceptible d'apporter des éléments d'information à la compréhension de l'apparition du phénomène au sein de certaines zones de l'ouvrage. Par ailleurs, même dans une zone apparemment saine, la réaction peut être déjà initiée et son potentiel de gonflement est alors à évaluer. À titre indicatif, le nombre d'échantillons recommandé sera, au minimum, constitué de : – en zone altérée, 5 échantillons – 2 échantillons pour les analyses en laboratoire ; – 3 échantillons pour l'essai d'expansion résiduelle ;

– en zone saine représentative, 2 échantillons
    – 1 échantillon pour les analyses en laboratoire ;
    – 1 échantillon pour l'essai d'expansion résiduelle.

Il est recommandé de prélever des carottes de diamètre 10 cm lorsque l'on réalise aussi des essais d'expansion résiduelle ; sinon, le diamètre peut être réduit à 8 cm pour des examens d'échantillons en laboratoire. Quoiqu'il en soit, le diamètre doit aussi être fonction de la taille des hétérogénéités du béton (on pourra prendre un diamètre minimal de 3 fois la taille des plus gros granulats).

La longueur des carottes est adaptée à l'épaisseur de la pièce et à son exposition aux agressions extérieures. Il est nécessaire de prélever au cœur des pièces massives, en tenant compte du phasage de bétonnage, de façon à être sûr de carotter dans les zones où la température a été maximale pour le diagnostic d'une réaction sulfatique interne, et d'éviter un biais lié au lessivage des alcalins en surface pour le diagnostic d'une alcali-réaction. Il est possible de s'aider des modélisations thermiques de l'échauffement du béton pour implanter les carottages.

Dans l'hypothèse où la démarche de diagnostic amènerait à un recalcul spécifique de l'ouvrage prenant en compte les effets du gonflement du béton, il convient de prélever des éprouvettes pour opérer des essais complémentaires destinés à fournir les données mécaniques et physiques à prendre en compte dans le recalcul (E, fc, ft, porosité, etc.) (voir l'annexe 4 du guide LCPC [5]).

Toutefois, selon l'avancement de la réaction de gonflement interne, la micro-fissuration et les pressions internes qui en résultent, les résultats d'essais de caractérisation mécanique du béton menées sur des prélèvements déconfinés ne sont pas forcément représentatifs du comportement du béton dans l'ouvrage. Parfois, les résultats peuvent conduire à des conclusions alarmistes qui ne correspondent pas à la réalité de l'ouvrage et dans des cas extrêmes, les prélèvements peuvent ne pas arriver intègres jusqu'au laboratoire et même se fragmenter avant leur arrivée. De même, une caractérisation de la porosité du béton sur un prélèvement déconfiné sera à la fois peu représentative du béton confiné en place et ne reflètera pas la porosité apparente d'un élément en béton fortement affecté par des fissures localisées.

Plusieurs approches complémentaires sont alors possibles pour contourner ces difficultés :

– conduire la modélisation en prenant en compte l'efficacité réelle des éléments de structure en les examinant zone par zone (suppression de certaines parties d'élément fortement fissurées ;
– prise en compte du confinement apporté par les armatures des zones fortement ferraillées, alimenter les modèles de caractéristiques physiques déterminées à l'aide d'essais de laboratoire tri-axiaux calés sur les pressions de confinement supposées, ou d'essais de caractérisation *in-situ*.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

b) Méthodes de diagnostic

Les méthodes permettant d'identifier la nature de la réaction sont actuellement de 3 types :

– le test par fluorescence des ions uranyle [8]

C'est une méthode de pré-diagnostic qui nécessite toujours une confirmation par examen au Microscope Electronique à Balayage. Cette méthode est principalement pertinente pour donner une information sur l'étendue de la réaction alcali-silice, et pour orienter le choix des échantillons soumis à l'examen au MEB. Elle peut parfois produire des faux-positifs.

Par ailleurs, cette méthode ne permet pas de révéler la présence d'ettringite ; elle n'a donc pas d'intérêt pour une réaction sulfatique interne.

– l'examen au microscope électronique à balayage (MEB), associé à la microanalyse élémentaire par spectrométrie X

Le MEB, associé à la microanalyse élémentaire est actuellement la seule technique permettant d'identifier des produits résultant soit d'une alcali-réaction (produits cristallisés ou sous l'aspect de gel), soit d'une réaction sulfatique (ettringite). Cette technique permet aussi de distinguer une ettringite normale résultant d'une hydratation du ciment, d'une ettringite délétère ayant des propriétés expansives. En effet, la présence d'ettringite n'est pas une indication suffisante pour déclarer un béton affecté par une réaction sulfatique interne.

– En complément, il pourra être nécessaire de recourir à des analyses minéralogiques et chimiques et à des examens pétrographiques.

La réalisation de ce complément d'investigations sera décidée en concertation avec un spécialiste du diagnostic physico-chimique des bétons. Cette étude permettra alors :

    – d'obtenir des informations utiles sur la formule du béton, pouvant expliquer l'origine de la réaction (nature des constituants, nature des granulats, type de ciment, dosage en ciment, teneur en alcalins, etc). À noter que tout ou partie de ces informations pourront être utilisées pour le pronostic ;
    – dans le cas de la réaction sulfatique, de déterminer l'origine des sulfates (interne ou externe).

Par ailleurs, la présomption d'une réaction sulfatique liée à une température élevée lors de la prise du béton pourra aussi être confirmée par une évaluation, à l'aide d'un modèle aux éléments finis par exemple (module TEXO de CESAR-LCPC), des températures ayant pu être atteintes dans la pièce, dans les jours qui suivent le coulage.

À l'issue de cette étape, il peut s'avérer que la pathologie ne résulte d'aucune des trois causes envisagées (alcali-réaction, réaction sulfatique, association des deux réactions). D'autres origines possibles, plus rares, pourront alors être recherchées : formation de thaumasite, gel interne du béton, pression de cristallisation de sels dans les bétons, etc.

c) Suivi de l'évolution de la structure

Les évolutions de fissuration et de déformations globales mesurées sur l'ouvrage permettent également de confirmer le diagnostic porté à partir des prélèvements.

Elles permettent également, avec un suivi à long terme, d'identifier la phase dans laquelle se trouve la réaction et d'estimer la cinétique de la réaction.

Enfin, elles se révèlent très utiles pour vérifier et, si besoin, recaler le modèle numérique utilisé pour simuler le comportement de l'ouvrage.

Étape 3.2 : Pronostic d'évolution de la pathologie

L'origine de la pathologie ayant été confirmée, l'objectif est d'établir un pronostic sur l'évolution du phénomène et ses conséquences sur l'ouvrage.

Ce pronostic s'appuie sur les résultats du suivi *in situ* de l'ouvrage et sur une évaluation du potentiel de gonflement futur du béton à partir de carottes prélevées sur l'ouvrage. Pour cela, les carottes sont soumises à un essai d'expansion accéléré qui consiste à les placer dans un environnement favorisant la réaction, et à mesurer leur déformation au cours du temps afin de déterminer si le gonflement du béton de l'ouvrage peut encore augmenter fortement.

Le choix du mode opératoire de l'essai d'expansion résiduelle dépend de la nature de la réaction :

– méthode LPC n° 44, pour l'alcali-réaction [9] ;
– méthode LPC n° 67 pour la réaction sulfatique [10].

Dans le cas où les deux réactions ont été diagnostiquées, les deux types d'essai sont à pratiquer.

Une analyse du fonctionnement de la structure sera également menée afin de déterminer dans quelle mesure l'évolution de la pathologie pourrait, ou non, obérer son aptitude au service.

Dans le cas d'un ouvrage dont une partie structurelle est déjà fortement atteinte ou dont l'évolution pourrait conduire rapidement à un doute sur sa capacité portante ou son aptitude au service, il pourra alors être utile de procéder à un recalcul spécifique prenant en compte les effets du gonflement du béton. Le module RGIB du progiciel CESAR-LCPC permet de le faire à condition de connaître :

– les données climatologiques (température, hygrométrie) environnantes de l'ouvrage au cours du temps ;
– les résultats du suivi dimensionnel (ou à défaut du suivi de fissuration) ainsi que les résultats des essais d'expansion résiduelle.

Toutefois, ce type de recalcul est lourd et complexe et nécessite une expertise préalable quant à l'opportunité de le conduire.

Dans ce cas, une analyse des risques est alors indispensable, en étudiant les conséquences liées aux différents scénarii de ruine envisageables et en fonction du mode de rupture associé (ductile ou fragile).

Les résultats de cette analyse des risques devront alimenter une ou des stratégies d'exploitation de la structure et éventuellement des procédures de gestion de crise [11].

RÉFÉRENTIEL

[1] Li, K., and Coussy O. (2002). Concrete ASR degradation: from material modeling to structure assessment. Concrete Science and Engineering, 4, pp 34-46.

[2] Larive C. (1998). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA28, 395p.

[3] Brunetaud, X. (2005). Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris.

[4] LCPC (1999). Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide TMMANDEGBET, 44p.

[5] LCPC (2003). Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide méthodologique GONFLIN, 66p.

[6] LCPC (1997). Détermination de l'indice de fissuration d'un parement en béton. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Projet de méthode d'essai LPC n° 47, 16p.

RÉFÉRENTIEL

[7] Godart B. (2009). Méthodes de suivi dimensionnel et de suivi de la fissuration des structures : Avec application aux structures atteintes de réaction de gonflement interne du béton. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique SUIVIDIM, 60p.

[8] LCPC (1993). Essai de mise en évidence du gel d'alcali-réaction par fluorescence des ions uranyl. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Projet de méthode d'essai LPC n° 36, 8p.

[9] LCPC (1997). Alcali-réaction du béton. Essai d'expansion résiduelle sur béton durci. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Projet de méthode d'essai LPC n° 44. 12p.

[10] LCPC (2009). Réaction Sulfatique Interne au béton - Essai d'expansion résiduelle sur carotte de béton extraite de l'ouvrage. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, méthode d'essai LPC n° 67, 28p.

[11] LCPC (2010). Protection et réparation des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne du béton : Recommandations provisoires. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique PROGONFLIN, 141p.

[12] AFNOR, FD P 18-542 : Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

A1-1 : Carottage de béton

A1-2 : Analyse minéralogique du béton

A1-3 : Analyse pétrographique

A1-4 : Détection des gels d'alcali-réaction par Fluorescence des ions uranyl

C2-3 : Mesure de distance à fil d'invar (type distancemètre orientable DO1 du LRPC de Lyon)

C2-4 : Mesure de distance par infrarouge

C3-17 : Mesures de température par thermocouple, thermistance ou sonde

C3-18 : Mesure d'humidité relative (méthode basée sur les capteurs

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre.

D1-3 : DIAGNOSTIC D'UNE RÉACTION DE GONFLEMENT INTERNE DU BÉTON

