



Guide technique

**Recommandations
pour la prévention des désordres
dus à la réaction sulfatique interne**

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne

Guide technique

Août 2007



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été rédigé par un groupe d'experts placé sous le pilotage d'un comité technique :

Membres du comité technique

Président du comité : M. Thierry Kretz (SETRA).

➤ MM. Abdelkim Ammouche (LERM), Claude Bois (CGPC), François Cussigh (FNTP), Michel Delort (ATILH), Loïc Divet (LCPC), Gilles Escadeillas (LMDC Toulouse), Hervé Foucard (Ville de Paris), Bruno Godart (LCPC), Bruno Huvelin (SNBPE), Yann Jaffré (SETRA), Alain Jeanpierre (EDF), Jean-Marc Morin (SNCF), Christian Partenay (SNBPE), Alexandre Pavoine (LCPC), Patrick Rougeau (CERIB).

Membres du groupe d'experts

Animateurs du groupe : MM. Bruno Godart et Loïc Divet (LCPC).

➤ MM. Jean-Luc Clément (LCPC), François Cussigh (Vinci Construction France), Gilles Escadeillas (LMDC Toulouse), Patrick Guiraud (CIMBETON), Lofti Hasni (CEBTP), Sylvie Lecrux (CTG ITALCEMENTI), Lionel Linger (Vinci Construction Grands Projets), Alexandre Pavoine (LCPC), Patrick Rougeau (CERIB), Angélique Vichot (ATILH), Vincent Waller (CTG ITALCEMENTI).

Pour commander cet ouvrage :

Laboratoire central des ponts et chaussées DISTC-Diffusion

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15

Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 30 Euros HT

Ce document est propriété du Laboratoire central des ponts et chaussées
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général
(ou de ses représentants autorisés)

© 2007 - LCPC
ISSN 1151-1516
ISBN 2-7208-2503-1

Sommaire

Introduction.....	5
-------------------	---

Chapitre 1. Généralités sur la réaction sulfatique interne (RSI)	7
--	---

1. Le phénomène de la réaction sulfatique interne (RSI).....	9
2. Les principaux paramètres de la réaction sulfatique interne (RSI)	10
3. Le contexte normatif.....	10
4. Influence du ciment et des additions	11

Chapitre 2. Détermination du niveau de prévention nécessaire.....	13
---	----

1. Catégories de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage.....	15
2. Classes d'exposition vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (RSI).....	16
3. Niveaux de prévention	16

Chapitre 3. Précautions en fonction des niveaux de prévention.....	19
--	----

1. Niveau de prévention As	22
2. Niveau de prévention Bs	22
3. Niveau de prévention Cs.....	22
4. Niveau de prévention Ds.....	23

Chapitre 4. Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages, à la formulation et à la fabrication du béton ainsi qu'à sa mise en œuvre..... 25

1. Généralités.....	27
2. Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages	27
2.1. Pour éviter les contacts prolongés avec l'eau	27
2.2. Pour réduire l'échauffement du béton.....	28
3. Dispositions liées à la formulation du béton.....	28
4. Dispositions liées à la fabrication et au transport du béton.....	29
5. Dispositions liées à la mise en oeuvre du béton	30
5.1. Organisation du chantier.....	30
5.2. Refroidissement du béton.....	30
5.3. Choix du coffrage.....	31
6. Dispositions spécifiques à la préfabrication	31

Annexes 35

Annexe I : Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne (RSI)	37
Annexe II : Bilan des ouvrages touchés par la réaction sulfatique interne (RSI) et présentation des désordres.....	39
Annexe III : Rappel sur l'exothermie des bétons.....	43
Annexe IV : Estimation des températures atteintes dans les structures à construire.....	47
Annexe V : Essai performantiel	55

Références..... 57

Bibliographie..... 59

Introduction

La réaction sulfatique interne (RSI) par formation différée d'ettringite est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement des ouvrages en béton. Si les cas répertoriés en France sont peu nombreux, ils sont néanmoins suffisamment importants pour justifier que des précautions soient prises pour les nouveaux ouvrages à construire. Les recommandations présentées dans ce document ont pour objectif de limiter le risque d'apparition de désordres liés à cette réaction.

Ces recommandations concernent les ouvrages de génie civil et les bâtiments comportant des éléments de dimensions importantes en contact avec l'eau ou soumises à une ambiance humide. Elles fixent le niveau de prévention à atteindre en fonction de la catégorie de l'ouvrage ou (la partie d'ouvrage) et des conditions d'environnement auxquelles il (elle) est soumis(e). À chacun de ces niveaux de prévention, sont associées des précautions à appliquer et des vérifications à effectuer. Les recommandations présentent également des dispositions constructives à adopter.

Les premiers cas de réaction sulfatique interne sont apparus à l'étranger à partir de 1987 dans certaines pièces préfabriquées qui avaient été soumises à un traitement thermique inadapté à la formulation et à l'exposition du béton (comme, par exemple, des traverses de chemins de fer). Les formulations de béton ainsi que les cycles d'étuvage ont donc été adaptés de façon à éviter l'apparition de nouveaux désordres ; depuis lors, ceci a été formalisé dans la norme relative aux produits préfabriqués NF EN 13369. Des désordres provoqués par la réaction sulfatique interne ont été observés en France, à partir de 1997, sur des ponts dont le béton avait été coulé en place ; il s'agit essentiellement de parties d'ouvrages massives (piles, chevêtres sur piles ou culées, embases de pylône, etc.) en contact avec l'eau ou soumises à une forte humidité.

Dans l'état actuel de nos connaissances, peu de résultats de recherche ayant été publiés sur le sujet du traitement des ouvrages atteints de réaction sulfatique interne et aucune solution de traitement n'ayant été proposée pour bloquer l'évolution de cette réaction au sein des ouvrages, une démarche préventive s'avère donc indispensable pour éviter l'apparition et le développement de cette réaction dans les ouvrages à construire.

Ces recommandations viennent en complément des règles de l'art habituelles qui assurent à la fois la qualité du béton et sa durabilité au sein des structures, en particulier elles sont complémentaires de la norme NF EN 206-1, des normes de produits préfabriqués en béton

et de la série des normes NF EN 1992. Elles proposent des solutions adaptées en cas de contradictions avec certains textes en vigueur ; c'est notamment le cas des recommandations relatives au gel des bétons durcis qui prescrivent d'utiliser des dosages élevés en ciment de type CEM I pour résister à l'écaillage, cette disposition pouvant s'avérer néfaste vis-à-vis de la durabilité en matière de réaction sulfatique interne. En outre, elles reprennent quelques concepts de base qui ont parfois tendance à être négligés, voire oubliés, dans l'acte de construire :

■ *Pour les structures coulées en place :*

- *L'évolution actuelle vers des rythmes de construction de plus en plus soutenus, la recherche de résistances élevées du béton au jeune âge pour accélérer la rotation des coffrages ou la précocité des mises en précontrainte, notamment dans le cas de pièces massives, ne doit pas se faire au détriment de la durabilité des structures construites dans ces conditions (cf. annexe III).*
- *Il convient de respecter le principe du choix d'une formulation de béton adaptée à la partie d'ouvrage à construire dans son environnement, et adopter une optimisation multicritère lors du choix du ciment et de la formulation du béton, en évitant par exemple l'utilisation de ciments CEM I fortement exothermiques à un dosage élevé dans une pièce massive.*
- *Il faut éviter le coulage de pièces massives lors des fortes chaleurs d'été lorsqu'il n'est pas mis en œuvre de dispositions spécifiques pour limiter l'échauffement excessif du béton.*

■ *Pour les structures constituées de produits préfabriqués en béton :*

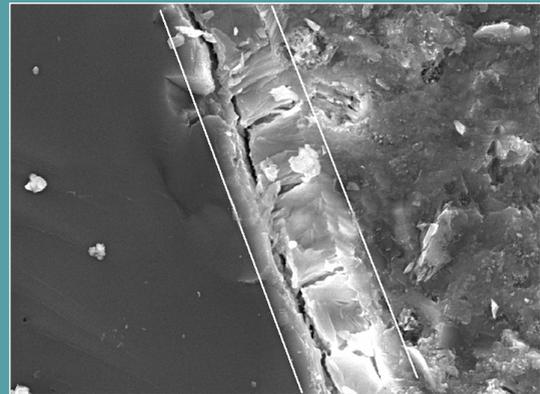
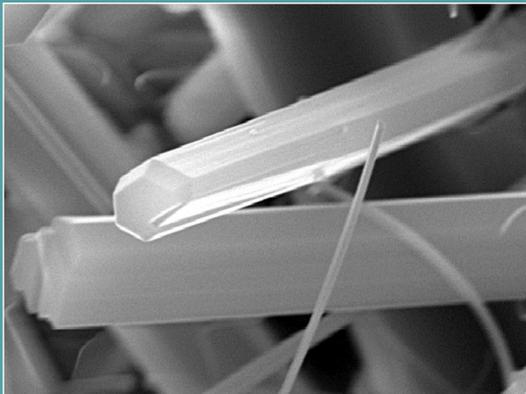
- *Il convient d'éviter, pour ces produits, les cycles de traitement thermique comportant des températures maximales trop élevées associées à des paliers de maintien en température de trop longue durée pour des formules de béton sensibles à la RSI.*

Les présentes recommandations combinent approche performantielle et prescriptions de moyens, ces dernières restant nécessaires lorsque des spécifications de nature performantielle ne peuvent être appliquées.

Enfin, elles présentent un caractère provisoire, compte tenu de l'état actuel des connaissances. Dans le cas où l'application de ces recommandations conduirait à des dispositions particulièrement contraignantes (par exemple niveau de prévention Ds), il est fortement conseillé de faire appel à un expert ou de faire intervenir un laboratoire spécialisé connaissant bien ce type de réaction.

Chapitre 1

Généralités sur la réaction sulfatique interne (RSI)



1. Le phénomène de la réaction sulfatique interne (RSI)

La réaction sulfatique interne (RSI) peut être définie par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire, plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment, et sans apport de sulfate externe. Le terme différée (*cf. annexe I*) signifie que l'ettringite n'a pas pu se former lors de l'hydratation du ciment, et ceci en raison d'un échauffement important du béton intervenant plusieurs heures ou plusieurs jours après son coulage.

Il faut distinguer le phénomène de réaction sulfatique interne (RSI), du phénomène de réaction sulfatique externe (RSE), connu depuis 1887, et signalé par Candlot à la suite d'observations sur les mortiers des fortifications de Paris lorsqu'ils se trouvaient en contact avec des eaux gypseuses. Dans le cas de la RSE, les sources de sulfates peuvent être apportées par les sols, les sels de déverglaçage, ou être véhiculés par les eaux souterraines, les eaux d'infiltration, l'eau de mer ou les eaux générées par des sites industriels. Les sulfates pénètrent par le réseau capillaire du béton et ils peuvent provoquer la formation d'ettringite dite « secondaire » (*cf. annexe I*) qui peut générer des phénomènes d'expansion et donc des dégradations du béton. Il s'agit donc, dans le cas de la RSE, d'une dégradation progressive depuis la surface vers le cœur de la pièce en béton.

Dans certains cas, lorsque le béton subit un échauffement au jeune âge, le phénomène de réaction sulfatique interne (RSI) peut apparaître, et ce, sans apport de sulfate par une source extérieure. Son appellation internationale est DEF (Delayed Ettringite Formation) dont la traduction française est Formation Différée d'Ettringite. Ce phénomène peut se rencontrer pour deux types de béton : les bétons traités thermiquement et les bétons coulés en place dans des **pièces critiques : 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** (*cf. annexe III*).

La grande majorité des ions sulfate d'origine interne proviennent du ciment et peuvent dans certaines conditions être dissous dans la solution interstitielle du béton. La réaction sulfatique met alors en jeu ces ions sulfate présents dans la solution interstitielle ainsi que les aluminates du ciment et peuvent conduire à la formation d'ettringite susceptible de provoquer de l'expansion dans le béton durci. Le phénomène de gonflement interne sulfatique peut se manifester par l'apparition à la surface du béton d'une fissuration multidirectionnelle à maille relativement large de 10 à 30 cm.

Il n'y a pas de symptômes spécifiques à la formation différée de l'ettringite car d'autres pathologies peuvent présenter les mêmes symptômes en particulier les phénomènes d'alcali-réaction.

À ce jour, il a été constaté que les éléments en béton atteints de cette pathologie :

- sont 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, ce qui conduit à une élévation importante de la température du béton (*cf. annexe III*) ;

- ont été coulés en période estivale et ont subi une température estimée supérieure à 80 °C à cœur pendant le durcissement du béton ;
- ont été soumis à un environnement humide pendant plusieurs années.

Ces éléments peuvent être également des éléments préfabriqués ayant subi un traitement thermique très élevé.

2. Les principaux paramètres de la réaction sulfatique interne (RSI)

Les causes, les mécanismes physico-chimiques et la cinétique de la réaction engendrant le phénomène de gonflement interne sulfatique ainsi que l'incidence des divers paramètres intervenant lors de la réaction sulfatique, ne sont pas à ce jour parfaitement connus et font l'objet de nombreuses recherches. Néanmoins, il apparaît que la conjonction de plusieurs paramètres est indispensable pour amorcer et développer la RSI, ce qui explique vraisemblablement le faible nombre d'ouvrages actuellement recensés comme étant atteints par la RSI. Les paramètres primordiaux sont l'eau, la température et sa durée de maintien, les teneurs en sulfates et en aluminates du ciment ainsi que la teneur en alcalins du béton :

- **Eau et humidité** : On a pu constater depuis longtemps, aussi bien en laboratoire que sur ouvrages, le rôle fondamental de l'eau dans le développement de la réaction. L'eau est un milieu réactionnel nécessaire au déroulement de la réaction. Elle intervient aussi bien dans les processus de transfert que dans la formation des produits de réaction. La RSI touche essentiellement les parties d'ouvrage en contact avec l'eau (zone immergée, zone de marnage) ou soumises à des venues d'eau (défaut d'étanchéité, absence de drainage, etc.), voire exposées à un taux d'humidité élevé.
- **Température et durée de maintien** : La température maximale atteinte ainsi que la durée de maintien à haute température conditionnent le risque de formation différée de l'ettringite. Il a été montré en laboratoire que si la température dépasse 65 °C et que si les autres paramètres primordiaux sont présents, on se trouve généralement dans une situation où peut se développer une RSI. Un fort échauffement du béton pendant sa prise et son durcissement est une condition indispensable mais qui n'est pas suffisante.
- **Teneurs en sulfates et en aluminates du ciment** : Les sulfates et les aluminates interviennent directement dans le mécanisme réactionnel pour former l'ettringite qui est un trisulfoaluminate de calcium hydraté. Par conséquent, la RSI n'est possible que si le ciment utilisé contient suffisamment d'aluminates tricalcique ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A) et de sulfates SO_3 .
- **Teneurs en alcalins du béton** : Leur rôle sur la solubilité de l'ettringite est bien connu. L'ettringite est plus soluble quand le taux d'alcalins augmente. Du fait de la variation de la solubilité de l'ettringite avec la température, une interaction forte existe entre ces deux paramètres au cours du processus de la RSI. Toutes choses égales par ailleurs, une diminution de la teneur en alcalins augmente la valeur critique de la température.

3. Le contexte normatif

La norme NF EN 206-1 *Béton – partie 1 : Spécification, performances, production et conformité* fixe pour le béton des prescriptions de composition qui dépendent des classes d'exposition auxquelles la structure ou la partie de structure sera soumise pendant sa durée d'utilisation. Ces prescriptions sont censées garantir la durabilité de la structure vis-à-vis de certaines agressions physico-chimiques et, en particulier vis-à-vis de la réaction sulfatique externe. Mais, cette norme

n'apporte pas de réponse en matière de prévention de la RSI, et les classes d'exposition qu'elle définit ne sont pas adaptées à la prise en compte de ce risque.

Par contre, le projet de norme prEN 13670-1 *Exécution des ouvrages en béton* donne quelques recommandations concernant l'échauffement du béton pendant sa prise. En effet, il indique que le pic de température du béton dans un élément ne doit pas dépasser 70 °C, à moins que des données prouvent qu'avec les matériaux utilisés, des températures supérieures n'ont aucun effet néfaste significatif sur la performance en service du béton.

Dans le domaine de la préfabrication, la norme NF EN 13369 *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton* prend en compte la RSI et fournit des recommandations en fonction de l'environnement (sec ou humide) reposant :

- soit sur la température maximale du traitement thermique,
- soit sur une expérience de durabilité du béton,
- soit sur une teneur limite en sulfates du ciment et en alcalins du béton.

La réaction sulfatique interne est également prise en compte dans certaines normes de produits préfabriqués telles que la norme NF EN 13230-1 *Application ferroviaire – voie – traverses et supports en béton*.

4. Influence du ciment et des additions

Dans le cas de bétons coulés en place pour la réalisation de pièces critiques, il est souhaitable d'utiliser des ciments courants à faible chaleur d'hydratation conformes à la norme NF EN 197-1 Amendement A1 (notation LH) ou des ciments dont la chaleur d'hydratation, déterminée selon la norme NF EN 196-9 et vérifiée à une fréquence identique à celle utilisée pour les ciments LH, n'excède pas une valeur limite qui doit être définie dans les spécifications. Ce dernier point concerne en particulier les ciments CEM I qui ne peuvent pas, dans la grande majorité des cas, respecter la valeur caractéristique de 270 J/g à 41 heures spécifiée dans la norme NF EN 197-1/A1.

Il est également possible d'utiliser des additions minérales en substitution du ciment de type CEM I pour diminuer l'exothermie du béton, de même qu'il est possible d'utiliser des ciments Portland composés CEM II, des ciments de haut fourneau CEM III, des ciments pouzzolaniques CEM IV, des ciments composés CEM V, ou des ciments sursulfatés CSS (norme NF P15-313). De plus, dans le cas d'utilisation de laitiers de haut fourneau ou de cendres volantes, la résistance des bétons vis-à-vis de la RSI devrait être améliorée, notamment du fait de la diminution relative de la quantité d'aluminates provenant du clinker et de la modification de la nature et de la texture des hydrates. En outre, l'utilisation d'additions en substitution du ciment contribue à réduire la quantité de sulfates dans le béton.

Chapitre 2

Détermination du niveau de prévention nécessaire



L'objet de ces recommandations est de définir des précautions pour la mise en œuvre et la formulation d'un béton vis-à-vis des risques de réaction sulfatique interne (RSI) susceptibles de se développer pendant la vie de l'ouvrage.

La démarche consiste à identifier les parties d'ouvrages susceptibles de développer des désordres dus à la réaction sulfatique interne ; ce sont essentiellement les parties d'ouvrage définies comme étant des pièces critiques (au sens de l'annexe III) et les produits préfabriqués en béton ayant subi un traitement thermique. Pour cela, on effectue 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 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 pour ces parties d'ouvrage un niveau de prévention qui détermine alors les précautions à appliquer. Ces précautions reposent de façon importante sur la limitation de la température maximale atteinte au cœur des parties d'ouvrages lors du durcissement du béton et sur le choix d'une formulation adéquate du béton.

1. Catégories de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage

Les ouvrages (ou parties d'ouvrage) sont classés en trois 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 de la responsabilité du maître d'ouvrage ; il est fonction de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur (Tableau I).

■ TABLEAU I - EXEMPLES D'OUVRAGES OU D'ÉLÉMENTS D'OUVRAGE CLASSÉS PAR CATÉGORIE

Catégories	Exemples d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrage
Catégorie I (conséquences faibles ou acceptables)	Ouvrages en béton de classe de résistance inférieure à C 16/20 Éléments non porteurs des bâtiments Éléments aisément remplaçables Ouvrages provisoires La plupart des produits préfabriqués non structurels
Catégorie II (conséquences peu tolérables)	Les éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants) La plupart des produits préfabriqués structurels (y compris les canalisations sous pression)
Catégorie III (conséquences inacceptables ou quasi inacceptables)	Bâtiments réacteurs des centrales nucléaires et aéroréfrigérants Barrages Tunnels Ponts et viaducs exceptionnels Monuments et bâtiments de prestige Traverses de chemin de fer

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, etc.).

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. Classes d'exposition vis-à-vis de la réaction sulfatique interne (RSI)

La norme NF EN-206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites dans le présent document pour traiter ce cas. 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 (par exemple dans la norme NF EN 206-1).

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

Les classes d'exposition XH1 à XH3 viennent en complément des dix-huit classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206-1 et doivent être spécifiées au CCTP pour chaque partie d'ouvrage. Il n'y a pas, *a priori* de corrélation directe possible entre les trois classes XH1 à XH3 et les dix-huit classes d'exposition de la norme NF EN-206-1. Néanmoins, on peut considérer que les parties d'ouvrage classées en XC4 relèvent de la classe XH2.

Pour un ouvrage (ou une partie d'ouvrage) donné(e), les spécifications définies dans le présent document devront être prises en compte en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1.

3. Niveaux de prévention

Il est fixé quatre niveaux de prévention désignés par les lettres As, Bs, Cs et Ds. La détermination du niveau de prévention se fait en fonction d'une part de la catégorie de l'ouvrage, et d'autre part de 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, mais il est recommandé d'examiner chaque partie d'ouvrage pour déterminer le niveau de prévention adapté. Le choix des niveaux de prévention est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui peut s'aider pour cela du tableau III.

À titre d'exemple, dans le cas d'un pont classé en catégorie II, les pieux et les semelles de fondation relèveront d'un niveau de prévention Cs, alors que les piles et le tablier relèveront du

niveau de prévention Bs ; quant aux chevêtres sur pile et les sommiers sur culée, le choix du niveau de prévention se fera en fonction des dispositions prises pour assurer l'évacuation des eaux sur ces parties d'ouvrage : le niveau de prévention sera Bs ou Cs selon les risques de stagnation d'eau.

■ TABLEAU II - CLASSES D'EXPOSITION DE LA PARTIE D'OUVRAGE VIS-À-VIS DE LA RSI

Désignation de la classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
XH1	Sec ou humidité modérée	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	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 protégé par un revêtement et soumis 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	Partie d'ouvrage en béton submergée en permanence dans l'eau Éléments de structures marines Un grand nombre de fondations Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau

■ TABLEAU III - CHOIX DU NIVEAU DE PRÉVENTION

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

Chapitre 3

Précautions en fonction des niveaux de prévention



À chacun des quatre niveaux de prévention As, Bs, Cs et Ds correspond un type de précaution à appliquer. Le principe de prévention repose essentiellement sur la limitation de l'échauffement du béton caractérisé par la température maximale T_{max} susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage et, le cas échéant, par la durée de maintien d'une température élevée.

Afin de pouvoir estimer la température maximale susceptible d'être atteinte au cœur d'un élément, l'annexe IV présente une méthode simple d'estimation de celle-ci en ne faisant appel qu'à un nombre minimal de données de base comme l'épaisseur de l'élément (dans sa plus petite dimension) et quelques données sur la composition du béton (dosages, résistance en compression à 2 jours et à 28 jours du ciment, chaleur d'hydratation à 41 h du ciment, etc.). Une méthode d'estimation plus précise de la température maximale consiste à utiliser un code de calcul aux éléments finis et à prendre en compte la chaleur dégagée par le béton lors d'un essai spécifique.

Pour éviter tout dégagement de chaleur excessif non maîtrisé du béton, il convient de mettre en œuvre les moyens possibles (choix de la formulation et des constituants du béton, choix de la période de bétonnage, refroidissement du béton frais, dispositions constructives adaptées, etc.) pour abaisser la température du béton lors de sa mise en place puis dans les premiers jours qui suivent celle-ci.

Dans tous les cas, la formulation du béton doit respecter les spécifications des normes et recommandations en vigueur. Toutefois, il peut s'avérer extrêmement difficile, voire impossible, de concilier les exigences de moyens imposées pour des questions de durabilité et les présentes recommandations, en particulier pour ce qui concerne la nature du liant et son dosage minimal. Par exemple, la spécification G + S des « *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel* » du LCPC ou la classe XA3 de la norme NF EN 206-1 imposent un dosage minimal de 385 kg/m^3 (pour un D_{max} égal à 20 mm) et limitent fortement la possibilité d'incorporer des additions ou d'utiliser des ciments composés, ce qui peut conduire à des échauffements importants dans le cas de pièces critiques. La superposition des exigences de moyens n'étant pas toujours pertinente, il est nécessaire de conduire une étude spécifique. Celle-ci doit être menée au stade de l'élaboration du projet pour définir des exigences réalistes à prescrire dans le cahier des charges. Cette étude peut conduire à adopter une approche performantielle adaptée aux classes d'exposition considérées et reposant sur des essais reconnus, à modifier des dispositions constructives ou à revoir le projet.

En ce qui concerne le gel et les sels de déverglaçage, les essais performantiels sont les essais P18-424 ou P18-425 (gel « sévère » ou « modéré ») et/ou l'essai d'écaillage P18-420. L'attention est attirée sur les délais nécessaires à de telles justifications (au minimum trois mois).

1. Niveau de prévention As

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par la précaution suivante :

- La température Tmax susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage doit rester inférieure à 85 °C.

Dans le cas d'un traitement thermique maîtrisé* : un dépassement de la température Tmax = 85 °C est autorisée jusqu'à 90 °C, à condition que la durée pendant laquelle la température dépasse 85 °C soit limitée à 4 heures.

2. Niveau de prévention Bs

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes :

- La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 75 °C.
- Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 75 °C, alors elle doit rester inférieure à 85 °C et au moins une des six conditions suivantes doit être respectée :
 - le traitement thermique est maîtrisé*, la durée de maintien de la température du béton au-delà de 75 °C ne doit pas excéder 4 heures et les alcalins équivalents actifs du béton doivent être en quantité inférieure à 3 kg/m³. (La durée de maintien est définie comme la période pendant laquelle la température est supérieure à 75 °C) ;
 - utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) avec, dans le cas des CEM I et CEM II/A, une limitation à 3 kg/m³ de la teneur en alcalins équivalents actifs du béton ;
 - utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A ou CEM V, ciments dont la teneur en SO₃ ne doit pas excéder 3 %, et fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C₃A ne doit pas excéder 8 % ;
 - utilisation, en combinaison avec du CEM I, de cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1, de laitiers de haut fourneau moulus conformes à la norme NF EN 15167-1, ou encore de pouzzolanes naturelles calcinées (norme française en préparation). La proportion d'addition doit être d'au moins 20 % sous réserve de respecter les exigences des normes (en particulier la norme NF EN 206-1). Le CEM I utilisé doit respecter les exigences suivantes : C₃A (rapporté au ciment) ≤ 8 % et SO₃ ≤ 3 % ;
 - vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance et par la satisfaction aux critères décisionnels ;
 - pour les éléments préfabriqués, le couple béton/échauffement envisagé est identique ou analogue à un couple béton/échauffement disposant d'au moins cinq références d'emploi satisfaisantes dans des lieux différents**. Cette analogie devra être justifiée par une documentation satisfaisante et devra être approuvée par un laboratoire indépendant expert en RSI.

3. Niveau de prévention Cs

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes :

- La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 70 °C.

■ Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 70 °C, alors elle doit rester inférieure à 80 °C et au moins une des six conditions suivantes doit être respectée :

- le traitement thermique est maîtrisé*, la durée de maintien de la température du béton au-delà de 70 °C ne doit pas excéder 4 heures et les alcalins équivalents actifs du béton doivent être en quantité inférieure à 3 kg/m³. (La durée de maintien est définie comme la période pendant laquelle la température est supérieure à 70 °C) ;
- utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) avec, dans le cas des CEM I et CEM II/A, une limitation à 3 kg/m³ de la teneur en alcalins équivalents actifs du béton ;
- utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A ou CEM V, ciments dont la teneur en SO₃ ne doit pas excéder 3 %, et fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C₃A ne doit pas excéder 8 % ;
- utilisation, en combinaison avec du CEM I, de cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1, de laitiers de haut fourneau moulus conformes à la norme NF EN 15167-1, ou encore de pouzzolanes naturelles calcinées (norme française en préparation). La proportion d'addition doit être d'au moins 20 % sous réserve de respecter les exigences des normes (en particulier la norme NF EN 206-1). Le CEM I utilisé doit respecter les exigences suivantes : C₃A (rapporté au ciment) ≤ 8 % et SO₃ ≤ 3 % ;
- vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance et par la satisfaction aux critères décisionnels ;
- pour les éléments préfabriqués, le couple béton/échauffement envisagé est identique ou analogue à un couple béton/échauffement disposant d'au moins cinq références d'emploi satisfaisantes dans des lieux différents**. Cette analogie devra être justifiée par une documentation satisfaisante et devra être approuvée par un laboratoire indépendant expert en RSI.

4. Niveau de Prévention Ds

Pour ce niveau de prévention, le risque vis-à-vis de la réaction sulfatique interne doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes, la première précaution étant recommandée comme prioritaire :

- La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 65 °C.
- Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 65 °C, alors elle doit rester inférieure à 75 °C et les deux conditions suivantes doivent être respectées :
 - utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) avec, dans le cas des CEM I et CEM II/A, une limitation à 3 kg/m³ de la teneur en alcalins équivalents actifs du béton ;
 - validation de la formulation du béton par un laboratoire indépendant expert en RSI.

* Le traitement thermique maîtrisé peut être réalisé en usine de préfabrication ou dans des installations adéquates sur chantier.

** Une référence d'emploi satisfaisante correspond à l'utilisation du couple béton/échauffement pour la réalisation d'une structure exposée à des conditions favorables au développement de la RSI (environnement XH2 ou XH3) sur une durée significative (au moins 10 ans) pour laquelle aucun désordre lié à la RSI n'est apparu.

Deux couples béton/échauffement sont considérés comme analogues lorsque les formules de béton sont très voisines et que, en particulier, les conditions ci-dessous sont réunies :

- l'échauffement de la formule envisagée ne dépasse pas celle de la formule de référence,
- les teneurs en C₃A et en SO₃ du ciment envisagé ne dépassent pas celles en C₃A et en SO₃ du ciment de référence,
- les teneurs en alcalins des deux bétons ne diffèrent pas de plus de 10 %,
- les granulats des deux bétons sont de même origine,
- les dosages des constituants ne diffèrent pas de plus de 10 %.

Chapitre 4

Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages, à la formulation et à la fabrication du béton ainsi qu'à sa mise en œuvre



1. Généralités

Les dispositions détaillées dans le présent chapitre visent à :

- éviter les contacts prolongés avec l'eau de la pièce critique pendant la durée d'utilisation de la structure ;
- limiter la température maximale atteinte au sein du béton des pièces critiques ;
- maîtriser les traitements thermiques des éléments préfabriqués.

2. Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages

2.1. Pour éviter les contacts prolongés avec l'eau

L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter, dans la mesure du possible, de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et des cheminements préférentiels dus aux ruissellements, ce qui nécessite de prévoir des profils et des formes de pente permettant une évacuation rapide des eaux.

Il est aussi possible de mettre en oeuvre des dispositions nécessaires pour éviter la pénétration d'eau et d'humidité au sein des structures en béton :

- soit en assurant l'étanchéité de la pièce critique,
- soit en assurant l'étanchéité des éléments de structure abritant la pièce critique et en prévoyant des dispositifs d'évacuation des eaux.

C'est notamment le cas avec les tabliers de ponts où il est exigé de mettre en oeuvre une chape d'étanchéité* et de prévoir des dispositifs d'évacuation des eaux qui soient efficaces et entretenus régulièrement. L'application d'un système d'étanchéité (chape) adapté peut permettre de classer l'ouvrage ou la partie d'ouvrage en XH1, mais il faut bien considérer que la pérennité de ce système d'étanchéité nécessite un remplacement régulier de celui-ci.

* Pour les parties horizontales des tabliers des ponts supportant un trafic routier, le document de référence est le fascicule 67 du CCTG , titre I qui est complété par la procédure d'avis technique du SETRA. Sur les dispositions techniques à mettre en oeuvre, le guide STER 81 publié par le SETRA et ses deux mises à jour sont les documents à utiliser.

Parmi les autres revêtements susceptibles de limiter la pénétration d'humidité et/ou d'eau, les plus utilisés sont les revêtements de protection (peintures, revêtements minces, imprégnation, etc.) (cf. Guide LCPC *Protection des bétons*). L'application d'une peinture est une solution qui n'a qu'une très faible efficacité pour lutter contre les effets de la réaction sulfatique interne et n'est donc pas recommandée. L'application d'un revêtement de protection du béton d'épaisseur plus importante (quelques millimètres) constitue une voie de protection, à condition de faire appel à des systèmes suffisamment étanches (y compris à la vapeur d'eau). Cependant, ce type de revêtement garde son efficacité pendant une durée de vie limitée (de l'ordre de la dizaine d'années...), ce qui nécessite plusieurs remplacements de celui-ci pendant la durée d'utilisation d'un ouvrage et oriente donc le choix vers les solutions de prévention présentées au chapitre 3.

L'application d'un revêtement de protection du béton permet donc d'éviter la réaction en minimisant la pénétration de l'eau dans la structure. C'est une solution qui peut être employée pour accompagner une solution de prévention plus fiable, mais pas pour assurer de façon définitive la prévention d'une RSI.

Enfin, dans le cadre de la surveillance des ouvrages, il est nécessaire d'inspecter les parties jugées critiques des ouvrages de façon à détecter les fissures qui peuvent apparaître et laisser pénétrer de l'eau au sein du béton. Il convient alors de traiter ces fissures afin de les étancher ; diverses techniques existent telles que le pontage, l'injection, etc.

Pour les autres parties, il convient de se référer au guide LCPC sur la protection du béton (déjà cité) et la note d'information du SETRA (CTOA n° 25) : *Ne pas confondre étanchéité de surface de tablier et protection du béton*.

Dans le cas de pièce critique enterrée, les remblais périphériques doivent être équipés de systèmes de drainage canalisant les eaux de ruissellements.

Note : L'application d'un bardage peut accompagner une solution de prévention plus fiable, mais il ne constitue pas en lui-même un moyen de prévention suffisant.

2.2. Pour réduire l'échauffement du béton

Il est recommandé d'éviter les pièces critiques en optimisant conjointement le matériau et la conception de l'élément. Ainsi, l'utilisation de Béton à Hautes Performances peut permettre la réalisation de structures élancées moins sensibles au risque de RSI. Il est, d'une manière générale, recommandé de concevoir des structures intégrant des pièces creuses ou, lorsque cela est possible, des pièces élégies.

À titre d'exemple, l'ordre de grandeur de l'impact potentiel de l'utilisation d'une pièce creuse sur la température maximale atteinte est le suivant :

- pour un ajout d'un coffrage intérieur à une pile (construction d'une pile creuse à la place d'une pile pleine conduisant à une épaisseur apparente de 0,5 m au lieu de 3 m avec un béton dosé à 350 kg/m³ de CEM I 52,5 N), la diminution de la température maximale est de 15 °C environ.

3. Dispositions liées à la formulation du béton

Le choix du type de ciment et d'addition éventuelle par le prescripteur doit prendre en compte leur influence sur l'échauffement du béton.

En effet, le liant sélectionné doit être le moins exothermique possible tout en restant compatible avec les spécifications liées aux classes d'exposition et avec les exigences de résistance au jeune âge du béton (il est souhaitable de définir les spécifications de résistance au jeune âge les moins contraignantes possibles voire de ne pas en définir pour les bétonnages qui peuvent poser problème, mais ceci doit bien sûr être intégré dans le planning global). De même, le dosage en liant peut être minimisé tout en permettant de répondre aux exigences d'ouvrabilité, de résistance

et de durabilité. L'utilisation de ciments composés et/ou l'incorporation d'additions sont des solutions adaptées pour minimiser l'exothermie du béton.

À titre d'exemple, le remplacement dans la formulation du béton d'un ciment CEM I 52,5 N par un CEM III 42,5 N (sur une pièce ayant une épaisseur apparente de 1 m) se traduit par une diminution de la température maximale de 15 °C environ.

4. Dispositions liées à la fabrication et au transport du béton

Avant d'examiner les dispositions qu'il est possible d'adopter pour limiter la température d'échauffement du béton, il est utile de faire un rappel sur un paramètre important qui intervient dans cet échauffement : la capacité calorifique du béton.

La capacité calorifique du béton est définie comme la quantité de chaleur qu'il est nécessaire d'apporter à une masse unitaire de béton pour élever sa température de 1 °C. Celle-ci dépend de la capacité calorifique de chacun des constituants du béton. Le tableau IV fournit un ordre de grandeur des capacités calorifiques en jeu lorsque l'on fabrique 1 m³ de béton :

Ce tableau montre qu'en raison de leur présence en grande quantité, les granulats (gravillons + sable) pèsent lourdement en terme de capacité calorifique dans le mélange ; cela signifie qu'un changement dans la température des granulats provoquera le changement de température le plus important au niveau du mélange. Ce tableau montre également que l'eau de gâchage a un poids important dans la chaleur du mélange, et que sa substitution par de la glace peut entraîner un abaissement significatif de la chaleur du mélange (il faut alors prendre en compte en outre la chaleur de fusion de la glace qui est de 334 kJ/kg).

■ TABLEAU IV - CAPACITÉ CALORIFIQUE DE DIVERS CONSTITUANTS DU BÉTON

Constituants	Masse (kg)	Capacité calorifique massique (kJ/kg.K) *	Capacité calorifique des constituants (kJ/K)
Gravillons calcaires (secs)	1050	0,84	882
Sable silico-calcaire (secs)	750	0,80	600
Ciment	400	0,75	300
Eau totale	200	4,18	836
Total			2618

* D'après Loïc Divet - ERLPC OA 40.

La température du béton à la mise en œuvre doit être tenue sous contrôle et peut être abaissée par différentes méthodes :

- utilisation d'eau de gâchage froide ou réfrigérée,
- refroidissement des granulats (pulvérisation d'eau sur les gravillons),
- protection des stocks de granulats vis-à-vis de l'ensoleillement,
- substitution d'une partie de l'eau de gâchage par de la glace.

Les deux premières méthodes sont relativement simples à mettre en œuvre même si elles nécessitent un matériel adapté qui n'est pas présent en général sur les centrales de béton prêt à l'emploi. L'utilisation de glace est plus délicate et nécessite des installations lourdes ; il faut en particulier recourir à un temps de malaxage prolongé pour garantir une fonte complète.

La technique d'injection d'azote liquide dans le malaxeur à béton ou dans la toupie peut être intéressante mais elle est très peu utilisée car très onéreuse et techniquement compliquée.

À titre d'exemple, les ordres de grandeur de l'impact potentiel des différents paramètres évoqués ci-avant sur la température maximale atteinte sont :

- avec un gâchage à l'eau froide (de 4 °C au lieu de 20 °C), le refroidissement est de 3 °C environ ;
- grâce à un arrosage des gravillons avec de l'eau froide (permettant d'abaisser leur température de 10 °C), le refroidissement est de 3 °C environ.

Note : il convient de tenir compte de la température du ciment lors de sa livraison. En effet, un ciment qui vient d'être fabriqué en usine peut atteindre une température élevée (à titre indicatif supérieure à 50 °C). à titre d'exemple, une augmentation de 10 °C du ciment élève de 1 °C la température du béton.

Il faut aussi tenir compte de l'impact du transport et du temps d'attente des camions malaxeurs dont les durées d'attente doivent être minimisées. Il faut bien sûr s'efforcer de limiter le stationnement en plein soleil des camions malaxeurs.

5. Dispositions liées à la mise en œuvre du béton

5.1. Organisation du chantier

Les conditions de température ambiante sont difficilement maîtrisables. En particulier, il n'est en général pas possible de choisir la saison du bétonnage étant données les contraintes de planning global du chantier. Toutefois, il peut être préférable de choisir une période de la journée favorable pour minimiser la température du béton frais (fin de journée ou période nocturne).

À titre d'exemple, l'ordre de grandeur de l'impact potentiel de ce paramètre sur la température maximale atteinte se traduit, pour un bétonnage nocturne (en période estivale), par une diminution de la température maximale de 5 °C environ.

Il est fortement recommandé, sur des pièces de grande dimension, de ne pas faire l'économie des coffrages intérieurs prescrits de façon à ne conserver que les sections effectivement nécessaires à la résistance de la structure (piles de pont par exemple). Il convient aussi d'éviter de créer, pour des facilités d'exécution, des pièces massives alors que les pièces étaient conçues creuses.

Pour les pièces de grande dimension, il est possible de prévoir un fractionnement du bétonnage en plusieurs phases de façon à favoriser les échanges thermiques. Le fractionnement n'est efficace que si un délai conséquent (au minimum une semaine) est respecté entre les coulages successifs. Il convient cependant de rester dans des limites acceptables permettant de conserver un comportement monolithique de la structure, de positionner les reprises de bétonnage dans les zones adéquates du point de vue mécanique, et de respecter les règles de bonne exécution des reprises de bétonnage.

5.2. Refroidissement du béton

Il est également possible, comme moyen complémentaire, de refroidir le béton après sa mise en œuvre en incorporant des serpentins dans le béton. Ils constituent un circuit de refroidissement dans lequel on fait circuler de l'eau fraîche. Cette méthode doit faire l'objet d'un dimensionnement du système de refroidissement afin d'éviter l'apparition de gradients thermiques à l'intérieur de la masse de béton, notamment au voisinage des tubes, ces gradients pouvant générer des fissures radiales ou tangentielles. En outre, elle n'est réellement efficace que lorsque le béton présente une exothermie modérée ou faible. Dans le cas d'une formule fortement exothermique, non optimisée du point de vue des problèmes thermiques propres à l'élément à bétonner, le dégagement de chaleur (qui est activé par la température) est beaucoup plus rapide que l'évacuation des calories par le circuit de refroidissement. Enfin, la mise en place du circuit de refroidissement se fait en

interférence avec les travaux de ferrailage et les délais d'exécution sont augmentés. Le refroidissement dans la masse doit intervenir en dernier recours (notons qu'il est par ailleurs nécessaire au final de reboucher les conduits avec un coulis de ciment).

5.3. Choix du coffrage

Pour des pièces de taille moyenne, des coffrages favorisant les échanges thermiques peuvent permettre de limiter la température maximale atteinte au sein du béton.

À titre d'exemple, un voile de 40 cm bétonné en coffrage bois avec un béton de classe C40/50 dosé à 400 kg/m³ de CEM I 52,5 R pourra conduire à une élévation de température de 40 °C. Dans le cas d'utilisation de coffrage métallique, cette élévation ne serait plus que de 35 °C.

6. Dispositions spécifiques à la préfabrication

La nécessité de réduire la durée d'immobilisation des moyens de production et d'augmenter le nombre de fabrications journalières fait que l'on peut être conduit à accélérer, au moyen d'un apport extérieur de chaleur, les différentes réactions chimiques intervenant dans le processus de durcissement du béton.

Le durcissement du béton est accéléré pour procurer au béton des résistances mécaniques suffisantes pour, selon les cas, le démoulage, la manutention, le relâchement des armatures de précontrainte ou encore les traitements d'aspect.

En règle générale, le traitement thermique et les moyens utilisés pour l'appliquer doivent être déterminés en prenant en compte la géométrie et les dimensions des éléments, la composition du béton, sa plasticité ainsi que les conditions de fabrication de façon à ce que le démoulage, la mise en précontrainte, le levage ou le transport des éléments puissent être effectués en fin de traitement. En outre, les modalités de traitement doivent être étudiées en tenant compte des conditions d'ambiance thermohygrométriques de la production et du stockage, de façon à éviter tout choc thermique ainsi que l'apparition de fissures ou de défauts de surface nuisibles à la durabilité du béton ou à l'aspect des éléments.

Dans sa forme la plus générale, un cycle thermique comporte quatre phases (Fig. 1), définies chacune par un couple durée-température ou bien par une vitesse :

- la phase de prétraitement,
- la phase de montée en température,
- la phase de maintien à la température du palier,
- la phase de refroidissement.

Des essais préalables sont réalisés pour optimiser chacune des phases.

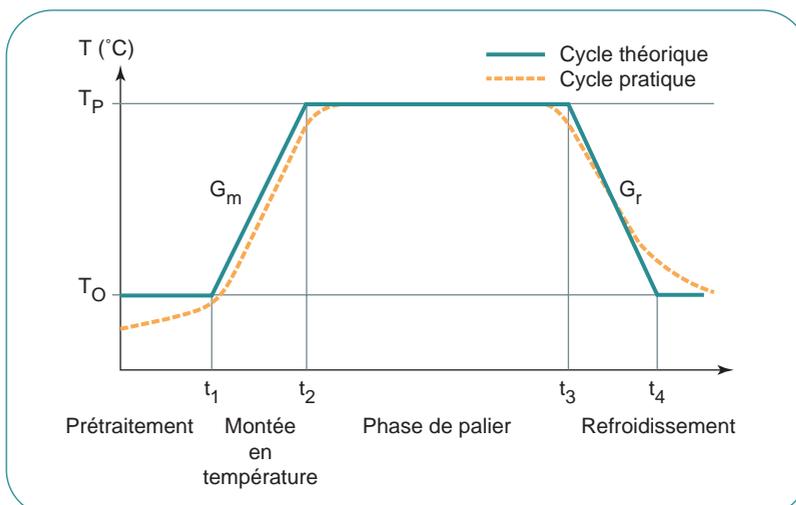
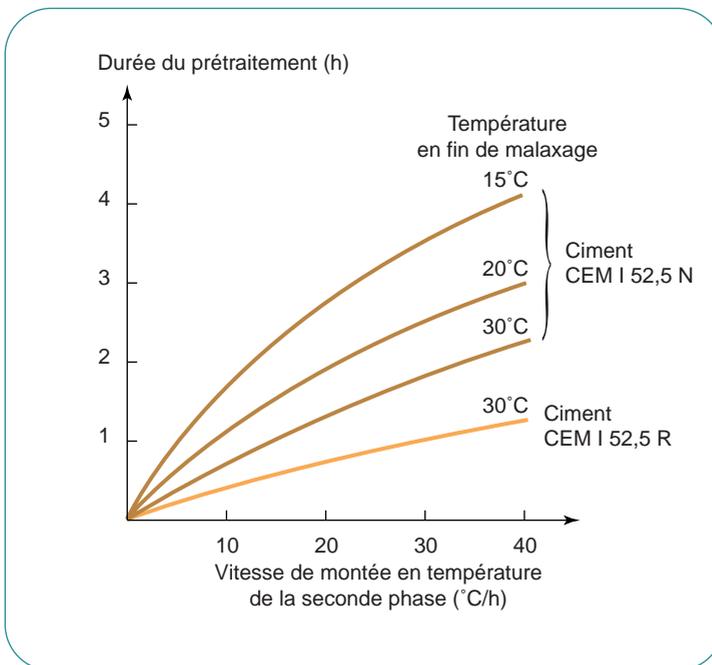


FIGURE 1 - Forme générale d'un cycle.

■ Phase de prétraitement

La phase de prétraitement est destinée à procurer au béton une cohésion suffisante pour qu'il puisse absorber les efforts internes occasionnés par la dilatation thermique de ses constituants, en particulier de l'eau et de l'air, au moment de l'élévation en température. La période de prétraitement doit être d'autant plus longue que la vitesse de montée en température de la phase qui va lui succéder est élevée et que la prise du béton est lente (Fig. 2).

FIGURE 2 - Influence du type de ciment et de la vitesse de montée en température sur la durée de la phase de prétraitement.



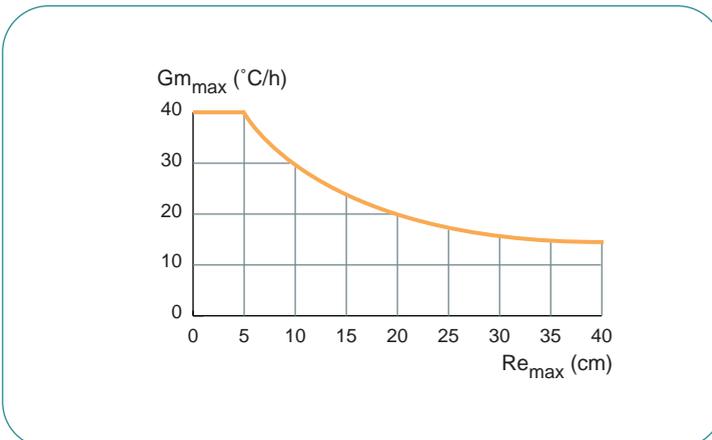
■ Phase de montée en température

La vitesse de montée en température doit être telle que les efforts dus à la dilatation développés dans l'élément soient absorbés à tout moment par le béton qui se rigidifie progressivement. La figure 3 donne, à titre indicatif, l'ordre de grandeur de la vitesse maximale de montée en température $G_{m_{max}}$ (en °C/h) en fonction du « rayon maximal d'étuvage » Re_{max} (en cm).

Définition de Re_{max} :

Considérant l'ensemble des distances les plus courtes qui séparent chaque point du béton du parement chauffé, le Re_{max} correspond à la plus grande de ces distances (Fig. 4).

FIGURE 3 - Valeurs du gradient thermique $G_{m_{max}}$ en fonction du rayon d'étuvage Re_{max} .



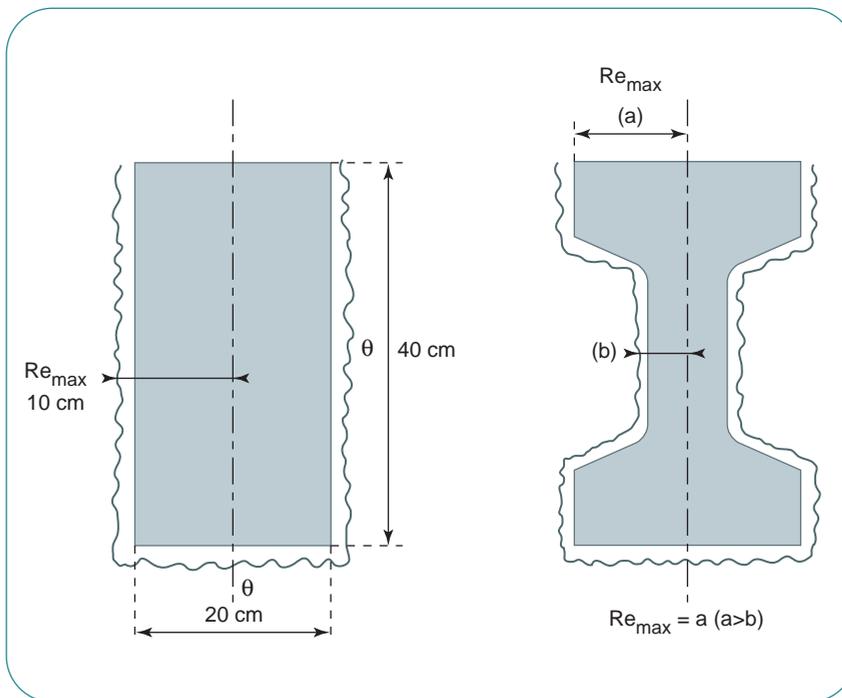


FIGURE 4 - Exemples de définition du rayon maximal d'étuvage Re_{max} .

■ Phase de maintien à la température du palier

La durée et la température de cette phase au cours de laquelle le processus de durcissement du béton (amorcé lors de la précédente période) se poursuit, dépendent :

- de la maturité acquise par le béton en fin de phase de montée en température,
- du nombre de fabrications journalières,
- de la résistance que l'on cherche à obtenir.

La durée du palier dépend de la température du palier. Elle est généralement comprise entre une et trois heures pour 85 °C, quatre et douze heures pour 65 °C. Sur le plan normatif, la norme NF EN 13369 précise la température maximale du béton en fonction de l'environnement dans lequel sera exposé l'élément préfabriqué.

Au cours de cette phase, il est nécessaire de veiller tout particulièrement aux précautions permettant d'éviter la dessiccation du béton de manière à ce que l'hydratation s'effectue de façon aussi complète que possible.

Il faut aussi s'assurer que les températures entre les différents points des grands éléments ou entre les différents produits soumis au même traitement, restent proches et homogènes pour obtenir des niveaux de résistance identiques et éviter les conséquences néfastes des dilatations différentielles.

■ Phase de refroidissement

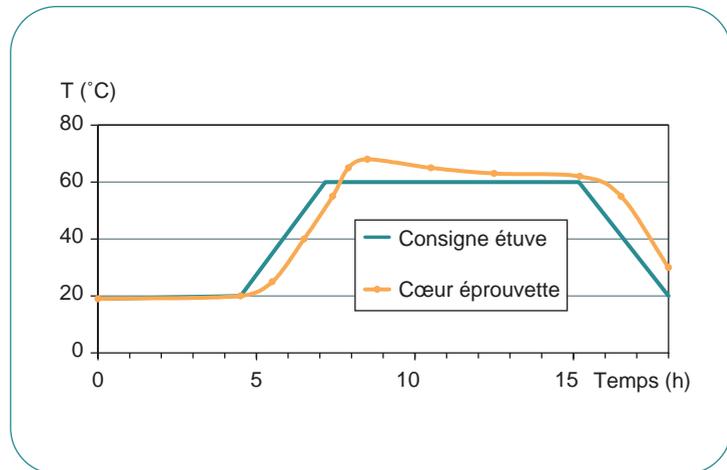
Le refroidissement doit être également réalisé de façon homogène. Les désordres sont en effet plus imputables aux différences de température qui existent entre les différents points d'un produit qu'à la vitesse de refroidissement elle-même. La vitesse de refroidissement de la surface est supérieure à celle au cœur. Des risques de fissuration existent lorsque la différence de température entre le cœur du produit et sa surface est supérieure à 15 °C.

Exemple de traitement thermique

La figure 5 représente un exemple de cycle thermique appliqué à une formulation de BAP. La température maximale atteinte au cœur du béton est pour le premier cycle de 68 °C. Les

résistances mécaniques à la compression obtenues sur des éprouvettes cylindriques 11×22 à 18 heures et 28 jours sont respectivement égales à 39 et 59,5 MPa.

FIGURE 5 - Exemple de cycle thermique.



Annexes

I. Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne (RSI)

II. Bilan des ouvrages touchés par la réaction sulfatique interne (RSI) et présentation des désordres

III. Rappel sur l'exothermie des bétons

IV. Estimation des températures atteintes dans les structures à construire

V. Essai performantiel

ANNEXE I

Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne (RSI)

Le phénomène de réaction sulfatique interne (RSI) résulte de la formation différée d'un minéral dénommé ettringite et de formule chimique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Cette formation retardée de l'ettringite est susceptible de provoquer une expansion qui se manifeste par l'apparition à la surface du béton d'une fissuration multi-directionnelle à maille relativement large. Mais, l'ettringite n'est pas systématiquement délétère pour le béton puisqu'il s'agit d'un produit normal de l'hydratation des ciments. C'est pourquoi, nous donnons ci-dessous quelques informations sur les différents types d'ettringite rencontrés dans les bétons.

Les différentes formes d'ettringite (primaire, secondaire et différée)

Aujourd'hui, plusieurs termes sont employés dans la littérature pour bien distinguer les différents modes et échéances de formation de l'ettringite dans le béton. On distingue alors trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. La dénomination utilisée est celle proposée par l'Association Française de Génie Civil, qui résulte des travaux du groupe GrandDuBé (Grandeurs associées à la durabilité des bétons) [1] :

- **l'ettringite de formation primaire** qui ne provoque pas d'expansion ;
- **l'ettringite de formation secondaire** qui peut provoquer une expansion ;
- **l'ettringite de formation différée** consécutive à une élévation de température subie par le béton au jeune âge, qui peut aussi provoquer une expansion.

L'ettringite de formation primaire correspond à un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise (sulfate de calcium) et les aluminates de calcium. L'ettringite se rencontre sous l'aspect de cristaux de forme aciculaire. Ces cristaux ne provoquent pas de gonflement car ils se forment avant le durcissement du béton et dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange. Ce phénomène est notamment prépondérant dans le cas de la prise des ciments sursulfatés et des ciments sulfoalumineux.

L'ettringite de formation secondaire se forme quand le béton a déjà durci. Elle résulte de mouvements d'eau dans le béton (phénomènes de dissolution / précipitation) et d'apports en sulfates d'origine externe (sols, eau séléniteuse, etc.) ou d'origine interne (utilisation de granulats contenant des sulfates, eau de gâchage). Dans ce dernier cas, le respect des textes normatifs permet d'éviter cette réaction. Pour les phénomènes de dissolution / précipitation, l'ettringite cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton et ne présente généralement pas de caractère expansif. Par contre, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe de sulfates est susceptible de générer des gonflements. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée.

L'ettringite de formation différée concerne uniquement les bétons ayant subi au jeune âge un échauffement supérieur à 65 °C. 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. La source des ions sulfate est donc d'origine interne car elle provient de l'absence ou de la décomposition de l'ettringite primaire. Après retour à 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.

Les mécanismes physico-chimiques de la réaction sulfatique interne (RSI)

La RSI se traduit donc 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 plusieurs séquences. Il s'agit principalement de la constitution d'une source en sulfates potentiellement remobilisable, de la précipitation différée de l'ettringite et de l'expansion qui se traduit par la fissuration du béton.

La constitution d'une source en sulfates

Une élévation conséquente de la température modifie les réactions d'hydratation du ciment. En effet, les sulfates apportés par le régulateur de prise ne sont pas alors mobilisés en totalité pour former l'ettringite primaire. 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. Une quantité importante de ces ions est également piégée par adsorption physique à la surface de certains produits d'hydratation du ciment. Ce phénomène est réversible ce qui constitue une réelle réserve en sulfate pour former ultérieurement de l'ettringite.

La précipitation de l'ettringite

Après durcissement du béton et retour à la température ambiante associé éventuellement à un lessivage des alcalins contenus dans la solution interstitielle du béton, la précipitation de l'ettringite peut se produire au niveau des sites réactifs contenant des aluminates. Il peut alors régner des conditions de concentration qui conduisent à une très forte instabilité du système chimique local et à la formation dans un espace confiné, d'une ettringite souvent qualifiée de mal cristallisée. Elle peut développer localement des pressions élevées et provoquer un gonflement.

L'expansion

Le caractère expansif ou non de l'ettringite dépend de la composition chimique initial, en particulier du type de ciment (teneurs en aluminates, en alcalins, quantité de portlandite susceptible d'être formée) et de la quantité de sulfates susceptibles d'être mobilisée. Le mécanisme exact par lequel la formation d'ettringite peut générer des pressions au sein du béton ne fait pas encore l'unanimité. Deux principaux mécanismes plus ou moins associés ont été proposés pour expliquer le gonflement induit par la formation d'ettringite :

- un gonflement en relation avec les pressions de cristallisation associées à la croissance des cristaux d'ettringite,
- un gonflement en relation avec les pressions osmotiques dues à la croissance d'une ettringite colloïdale.

Dans la réalité, il est vraisemblable que les deux mécanismes puissent entrer en jeu simultanément et ne peuvent être vraiment dissociés.

ANNEXE II

Bilan des ouvrages touchés par la réaction sulfatique interne (RSI) et présentation des désordres

Bilan des ouvrages touchés par la réaction sulfatique interne (RSI)

Les premiers cas reconnus où la RSI est considérée comme la principale source de dégradation correspondent à des traverses de chemin de fer préfabriquées en béton ayant subi un traitement thermique. Plusieurs pays ont rencontré ce phénomène et l'on peut citer notamment la Finlande en 1987 [2], l'Allemagne en 1989 [3], l'ancienne Tchécoslovaquie en 1991 [4], l'Australie en 1992 [5], l'Afrique du Sud en 1992 [6], les États-Unis en 1995 [7] et plus récemment la Suède en 2004 [8]. Les premiers désordres apparaissent après plusieurs années d'utilisation, généralement en moins de dix ans et il s'agit toujours de traverses de chemin de fer exposées à l'humidité. En effet, les mêmes traverses mises en place dans des tunnels ne présentent pas de signes d'altération. Dans certains cas, la RSI est parfois associée à d'autres mécanismes de dégradation du béton tels que le gel-dégel ou la réaction alcali-silice.

La RSI a également été identifiée dans quelques autres éléments préfabriqués en béton. Cette réaction a été notamment mise en évidence dans un mur d'escalier de parking aux États-Unis [9], dans des poutres précontraintes et dans des caniveaux en Grande-Bretagne [10], dans une tribune de stade aux États-Unis [11] et au sein de toitures en fibro-ciment en Italie [12]. Dans la majorité de ces éléments préfabriqués, les désordres ont été observés en moins de dix ans après la construction.

La RSI a été aussi rencontrée dans des pièces massives en béton coulées en place. Cela concerne notamment des fondations de pylônes de lignes électriques aux États-Unis [9 et 13] et en Italie [12]. Ces désordres sont apparus entre trois et huit ans après le coulage du béton. Une importante expertise d'ouvrages d'art a été réalisée en Grande-Bretagne qui a révélé vingt-trois cas de parties de ponts touchées par la RSI : fondations, culée, chevêtre, mur en aile [10]. Ces bétons ont été coulés le plus souvent durant les périodes d'été et comportent de forts dosages en ciment (entre 420 et 550 kg/m³) ainsi que des teneurs élevées en alcalins équivalents (> 4 kg/m³). Il s'agit généralement de pièces de grandes épaisseurs (au moins 60 cm). La température maximale atteinte dans les pièces en béton a été estimée proche de 80 °C. Les désordres sont apparus entre huit et vingt ans après la construction.

En France, la découverte de la RSI et de ses manifestations délétère est récente, avec les premiers cas identifiés vers les années 1990. Ce phénomène a été principalement observé dans des pièces massives de ponts en béton coulées en place et lors de fortes chaleurs d'été [14 et 15]. Les cas de structures malades, répertoriées en France par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, sont pour l'instant peu nombreux (environ une vingtaine), mais concernent le plus souvent des ouvrages de catégorie II. Il s'agit de bétons atteints essentiellement d'une RSI et ne faisant pas notamment l'objet d'une réaction alcali-silice. D'une manière générale, la manifestation de désordres est visible sur un ouvrage entre cinq et dix ans après la construction. De plus, ces désordres n'affectent jamais la totalité de l'ouvrage mais essentiellement les parties massives exposées à l'humidité ou à des venues d'eau. Un échauffement important des bétons a été estimé (de l'ordre de 80 °C) résultant de la géométrie de la pièce, de la période de coulage (en été) et d'un fort dosage en ciment.

Une expertise plus détaillée a été réalisée à partir de huit ouvrages afin de rechercher les paramètres simultanément présents et *a priori* nécessaires au développement de la RSI [15]. Ces paramètres ont été classés en quatre groupes :

- paramètres liés à la température ;
- paramètres liés au ciment ;
- paramètres liés au béton ;
- paramètres liés à l'environnement.

Ces données sont rassemblées dans le tableau V.

■ TABLEAU V - ÉTUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS FACTEURS DÉTERMINANTS DE LA RSI RENCONTRÉS DANS DES PONTS EXPERTISÉS

	Pont A	Pont B	Pont C	Pont D	Pont E	Pont F	Pont G	Pont H
Année de construction	1955	1967	1980	1988	1990	1982	1988	1989
Partie d'ouvrage concernée	Chevêtre	Pile	Chevêtre	Pile	Pile	Chevêtre	Socle de pile	Chevêtre
Paramètres liés à la température • T max (°C) • période de bétonnage	> 80 août	> 80 inconnue	> 80 août/sept.	> 75 juillet/août	> 80 août/sept.	> 70 juillet/août	> 75 juillet/août	> 75 juillet/août
Paramètres liés au ciment • Type de ciment	CPA	CPAL (10 % de laitier)	CPA 55R	CPJ 55 (10 % filler calcaire)	CPA 55R	CPA	CPA	CPA 55R
• SO ₃ (% massique)	2,5	2,7	2,6	2,5	2,8	3,2	2,2	3,5
• C ₃ A (% massique)	11,2	9,6	9,8	7	8,2	11	7,1	10,1
Paramètres liés au béton • Dosage en ciment (kg/m ³) • Rapport E/C • Nature des granulats	430 0,50 Siliceux	430 0,50 Siliceux	400 0,47 Silico-calcaire	380 0,54 Siliceux	410 0,46 Siliceux	350 0,49 Silico-calcaire	385 0,48 Siliceux	400 0,50 Silico-calcaire
• Teneur en alcalins (Na ₂ O équivalent en kg/m ³)*	2	4,3	4	4,1	2,3	3	3,9	4,6
Paramètre lié à l'environnement • Humidité	Problème étanchéité	Absence de drainage	Condensation Alternance humidification-séchage	Zone de marnage	Zone de marnage	Soumis aux intempéries	Soumis aux intempéries	Absence de drainage

* Na₂O équivalent = Na₂O + 0,658 K₂O.

Note : Les données des ponts A à E sont issues de la référence [15]. Les données des ponts F à H sont rendues anonymes.



FIGURE 6 - Extrémité d'une traverse de chemin de fer présentant un réseau de fissures provoquées par une RSI (à l'étranger).



FIGURE 7 - Vue générale d'un pont dont l'un des chevêtre est atteint d'une RSI (France).



FIGURE 8 - Fissuration multidirectionnelle localisée sur la face verticale, aux extrémités d'un chevêtre du pont de la figure 7.

De cette étude, il apparaît que le phénomène de RSI est rencontré lorsque plusieurs des conditions suivantes sont réunies :

- un échauffement important des bétons, proche de 80 °C, qui résulte de plusieurs facteurs (pièces massives, ciment fortement exothermique, dosage en ciment élevé et bétonnage en période estivale) ;
- une teneur en alcalins équivalents actifs du béton supérieure à 3 kg/m³ ;
- l'utilisation de ciments dont la teneur en SO₃ est généralement supérieure à 2,6 % et la teneur en C₃A est comprise entre 7 et 11 % ;
- des cycles d'humidification / séchage ou des conditions d'humidité relativement élevées ;
- des granulats issus majoritairement de roches siliceuses ou silicatées.

Néanmoins, il convient de noter que nous ne connaissons pas aujourd'hui le bilan réel du patrimoine d'ouvrages français atteints par cette pathologie, car le recensement est très difficile à réaliser pour diverses raisons :

- symptômes similaires à la réaction alcali-silice ;
- réaction alcali-silice parfois associée à la RSI ;
- diagnostic difficile de la RSI ;
- structure faisant l'objet de procédure judiciaire exigeant une confidentialité.

Présentation des désordres

La RSI se traduit par le développement d'expansion entraînant des dégradations importantes au niveau des structures. Les symptômes visuels sont similaires à ceux provoqués par une réaction alcali-silice. La fissuration en réseau est fréquemment rencontrée sur les parements de structures présentant une RSI. Elle est souvent considérée comme anarchique dans la mesure où elle est constituée de fissures au tracé erratique.

Elle peut prendre la forme d'un réseau de fissures multidirectionnelles à larges mailles. La fissuration présente parfois des orientations préférentielles en fonction de la distribution des armatures. L'ouverture des fissures varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres. Elle augmente avec l'avancement de la réaction. Ces fissures sont souvent soulignées par l'humidité et l'on observe parfois un exsudat blanchâtre au droit des fissures.

ANNEXE III

Rappels sur l'exothermie des bétons

La prise et le durcissement des bétons s'accompagnent d'un dégagement de chaleur dû à l'exothermie des réactions d'hydratation. En fonction de la formulation du béton et en particulier du dosage et de la nature du liant, la quantité de chaleur varie sensiblement ainsi que la vitesse du dégagement de chaleur et la sensibilité de cette vitesse à la température.

On donne à titre d'exemple (Fig. 9) les chaleurs dégagées par huit ciments manufacturés français de types différents, mesurées sur mortiers normaux conservés en conditions quasi-adiabatiques en bouteille de Langavant (bouteille calorifugée) :

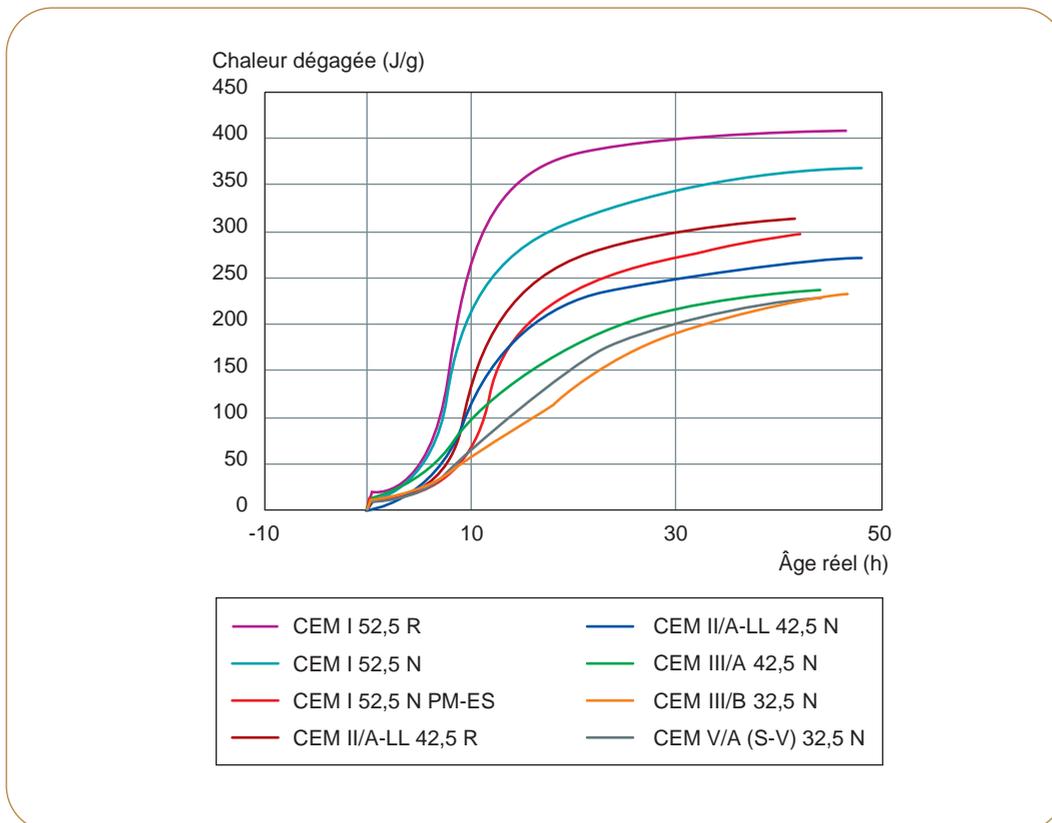


FIGURE 9 - Exemples de courbes de dégagement de chaleur pour différents types de ciment.

Une étude conduite par le TC 51 du CEN en 1995 sur les dégagements de chaleur en condition semi-adiabatique d'une douzaine de ciments européens a montré que les valeurs de la chaleur dégagée à 41 h (Q 41) variaient entre 210 et 320 J/g. Les rapports entre la chaleur dégagée à 41 h (Q41) et la chaleur dégagée à 72 h (Q 72) variaient entre 0,85 et 0,95 selon les types de ciment.

De façon générale, les vitesses des réactions d'hydratation sont fortement influencées par la température (on observe par exemple une accélération par un facteur allant de 2 à 4 lorsque la température est de 40 °C au lieu de 20 °C) et la sensibilité de la formulation de béton est décrite par un paramètre appelé énergie d'activation (Fig. 10).

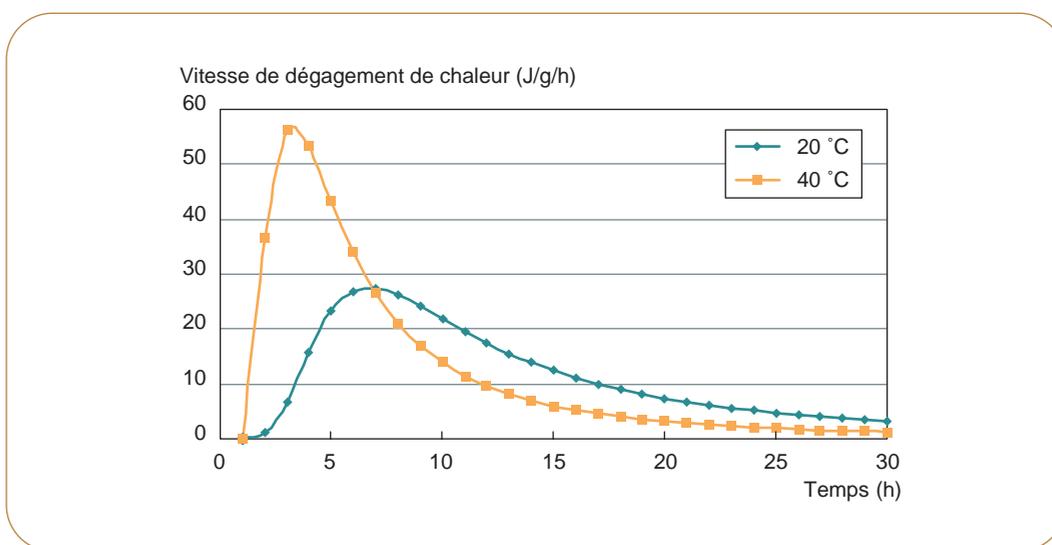


FIGURE 10 - Vitesse de dégagement de chaleur d'un ciment CEM I 52,5 R en fonction de la température.

Cette sensibilité (et donc cette énergie) est d'autant plus faible que le liant est plus réactif au jeune âge, comme l'illustre le tableau VI qui donne des exemples de valeurs de coefficient d'activation (E/R, énergie d'activation divisée par la constante des gaz parfaits - à noter que cette valeur peut néanmoins sensiblement varier d'un béton à l'autre pour un même type de ciment) correspondant à différents types de ciment :

■ TABLEAU VI - POUR DIFFÉRENTS TYPES DE CIMENT, UN EXEMPLE DE VALEURS DE COEFFICIENT D'ACTIVATION

Ciment	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 N	CEM II 32,5 R	CEM II 32,5 N	CEM III/C 32,5 N
E/R (°K)	3540	3970	4150	4810	5530	6700

L'élévation de température au sein d'un élément en béton dépend de l'exothermie du béton mais aussi de sa géométrie, de la température initiale du matériau et des déperditions thermiques. On ne peut établir une limite précise concernant l'épaisseur de la pièce (le plus souvent les déperditions thermiques se font suivant une direction préférentielle pour laquelle la dimension de la pièce est ici appelée « épaisseur ») à partir de laquelle il faudrait parler de pièce massive et craindre *a priori* une élévation de température trop importante du béton, car la compétition de vitesse entre le dégagement de chaleur et les déperditions calorifiques met en jeu à la fois le matériau, la géométrie de la pièce et les conditions aux limites. Ainsi une semelle de 1,5 m d'épaisseur avec un béton C30/37 dosé à 370 kg/m³ de CEM III/A 42,5 N pourra présenter une élévation de température de 29 °C là où un voile de 60 cm bétonné en coffrage bois avec un C40/50 dosé à 400 kg/m³ de CEM I 52,5 R conduira à une élévation de 45 °C. La notion de pièce massive n'est donc finalement pas pertinente pour la prévention des risques de réaction sulfatique interne.

On utilisera donc plutôt la notion de pièce critique, c'est-à-dire de pièce en béton pour laquelle la chaleur dégagée ne sera que très partiellement évacuée vers l'extérieur et conduira à une élévation importante de la température du béton.

Il convient de noter également que la température n'est pas uniforme au sein du béton et que des gradients plus ou moins prononcés (en fonction des conditions d'isolation par le coffrage) sont présents en périphérie. C'est pourquoi la température maximale qui nous intéresse pour la réaction sulfatique interne est celle qui est atteinte au cœur des pièces.

Pour évaluer l'élévation de température dans une pièce en béton et savoir si l'on se trouve dans les conditions d'une pièce critique, des outils sont fournis dans l'annexe IV du présent document.

Il faut enfin souligner que l'élévation de température dans une pièce en béton peut être dommageable sur plusieurs points :

- fissuration par retrait thermique gêné,
- altération des propriétés mécaniques du béton à long terme,
- risque de formation d'ettringite différée.

En effet, une élévation importante est souvent liée à des gradients élevés entre le cœur et la peau du béton pouvant conduire à des fissures lors du refroidissement superficiel initial (qui sont les moins graves car le refroidissement ultérieur du béton à cœur a tendance à les refermer) mais aussi à des gradients de température par rapport aux pièces adjacentes coulées précédemment et qui ont pu avoir le temps de se refroidir. Dans ce dernier cas, on observe une fissuration traversante régulièrement répartie (elle est d'autant mieux répartie que la densité de ferrailage est élevée) et naissant à la reprise de bétonnage. Cette fissuration peut faciliter les pénétrations d'eau dans le matériau et favoriser les réactions sulfatiques internes. Les gradients peuvent se développer également dans les zones de changement brutal de section de la pièce en béton et donner lieu là aussi à une fissuration traversante préjudiciable.

D'autre part, comme évoqué ci-avant, les réactions d'hydratation peuvent être accélérées par un apport de chaleur mais il est connu que des températures élevées de maturation modifient la nature des hydrates formés et abaissent les caractéristiques du béton à long terme par rapport au même béton non étuvé, et en particulier la résistance en compression. Comme pour l'impact sur les résistances à court terme, celui sur les résistances à long terme dépend sensiblement de la formulation du béton. À titre d'exemple, un traitement thermique à 70 °C pendant 9 heures (avec une montée de 10 °C /h) peut induire une baisse de résistance en compression mesurée à 700 jours de 10 % alors qu'un traitement à 90 °C pendant 6 heures (avec même vitesse de montée) peut donner une diminution de 20 % (réf : Mamillan).

Bien entendu, en optimisant les paramètres du traitement thermique, des bétons durables peuvent être obtenus malgré une baisse des résistances mécaniques.

ANNEXE IV

Estimation des températures atteintes dans les structures à construire

1. Objet

La présente annexe a pour objet de proposer une méthode simplifiée permettant d'évaluer en phase amont d'un projet si certaines pièces doivent être considérées comme des pièces critiques vis-à-vis des risques de formation d'ettringite différée (risques liés à une température excessive au cœur des pièces réalisées), étant donnés les principes de formulation de béton prévus au CCTP.

Cette annexe permet donc une estimation de la température maximale au cœur d'une pièce en béton pour laquelle on ne connaît que l'épaisseur (dans sa plus petite dimension) et quelques données de base sur la composition du béton.

Sa précision est limitée car elle fait intervenir un nombre restreint de paramètres (connus ou facilement consultables en phase amont). Elle doit être utilisée comme un outil d'alerte, si elle conduit à conclure que la pièce est critique alors une étude plus fine doit être réalisée ou les paramètres doivent être modifiés.

2. Données pour l'estimation de la température maximale atteinte

La méthode simplifiée nécessite la détermination des paramètres suivants :

- dosage en ciment du béton C (en kg/m^3),
- dosage en addition minérale A (en kg/m^3),
- masse volumique du béton Mv (en kg/m^3),
- dosage en eau efficace Eeff du béton (en kg/m^3),
- résistance en compression à 2 jours du ciment Rc2 (en MPa) selon NF EN 196-1,
- résistance en compression à 28 jours du ciment Rc28 (en MPa) selon NF EN 196-1,
- chaleur d'hydratation à 41 h du ciment Q41 (en kJ/kg) selon NF EN 196-9,
- épaisseur de la pièce EP (en m) si supérieure à 0,25 m (en deçà de cette valeur, la pièce n'est pas critique vis-à-vis des risques de formation d'ettringite différée).

Les données ciment sont généralement disponibles dans les fiches techniques.

L'épaisseur de la pièce est sa plus petite dimension (direction préférentielle pour les déperditions thermiques).

3. Les étapes de calcul

Les étapes successives de calcul sont illustrées par le schéma suivant (Fig. 11) et décrites en détail à la suite de ce chapitre.

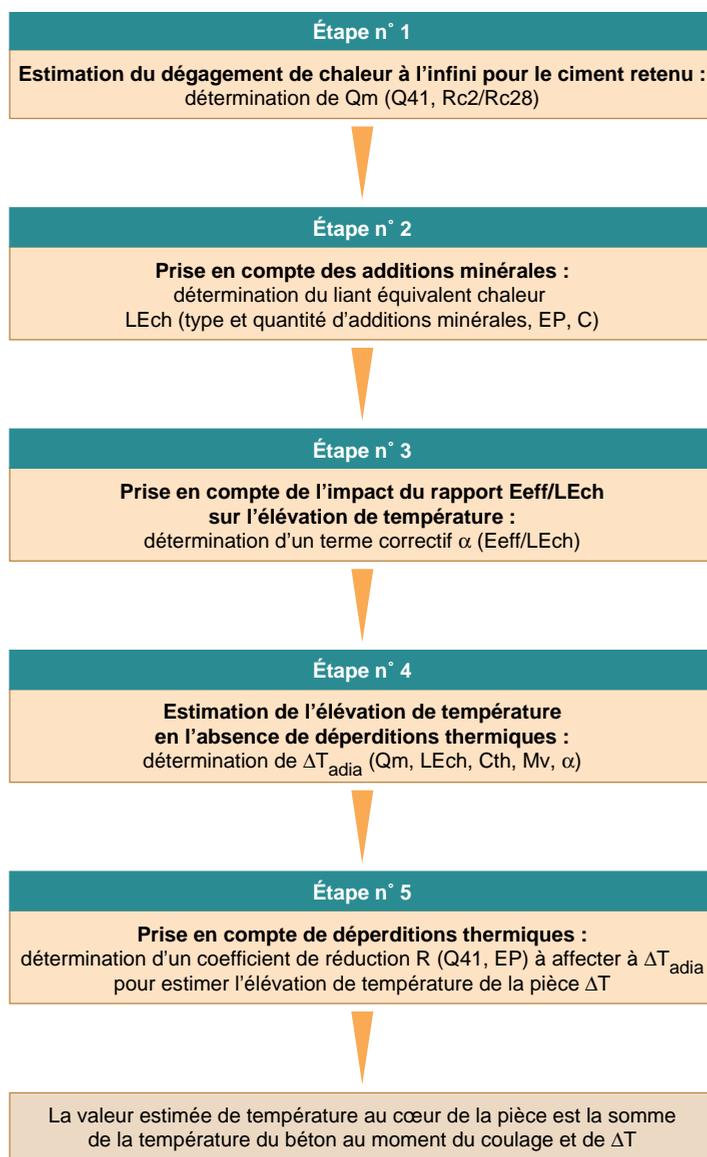


FIGURE 11 - Étapes successives de calcul de la température maximale atteinte dans les structures à construire.

3.1. Estimation du dégagement de chaleur à l'infini pour le ciment retenu

Les fiches techniques des ciments n'indiquant que les dégagements de chaleur à 41 heures, la première étape est l'estimation de la chaleur maximale dégagée à long terme par le ciment Q_m (en kJ/kg) par la formule :

$$Q_m = Q_{41} \times \text{ratio_}Q_m/Q_{41}$$

où la valeur $\text{ratio_}Q_m/Q_{41}$ est donnée par l'abaque n° 1 (Fig. 12) sur la base du rapport $\frac{R_{c2}}{R_{c28}}$.

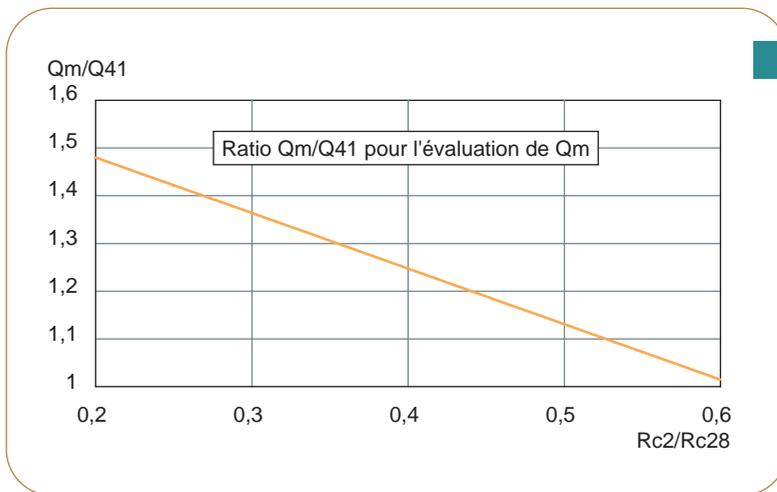


FIGURE 12 - Abaque n° 1 pour l'estimation de la chaleur maximale dégagée à long terme par le ciment (Q_m).

3.2. Prise en compte des additions minérales

Les additions participent au dégagement de chaleur du béton. Pour les prendre en compte, on introduit un liant équivalent chaleur noté LEch (en kg/m^3) par la formule :

$$\text{LEch} = C + K' A$$

où A est le dosage en addition

K' le coefficient de pondération des additions donné par l'abaque n° 2 (Fig. 13).

En l'absence d'addition, on prend : $\text{LEch} = C$.

Pour les additions calcaires et les additions siliceuses, le coefficient K' est égal à 0.

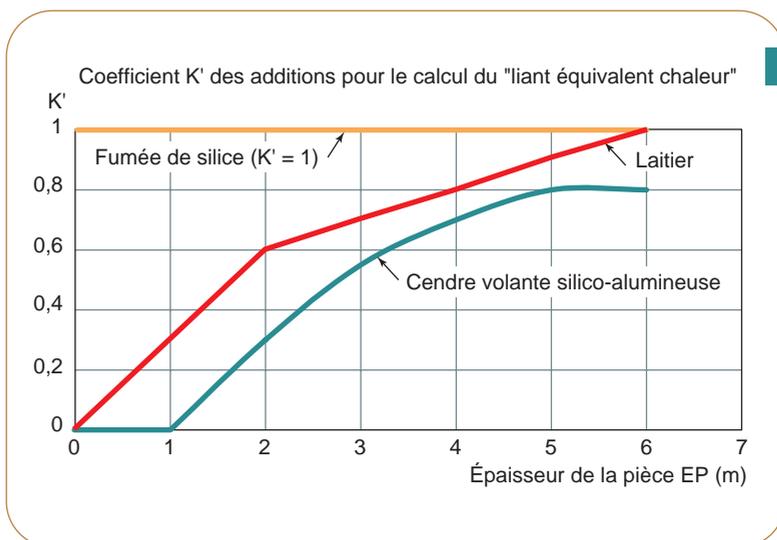


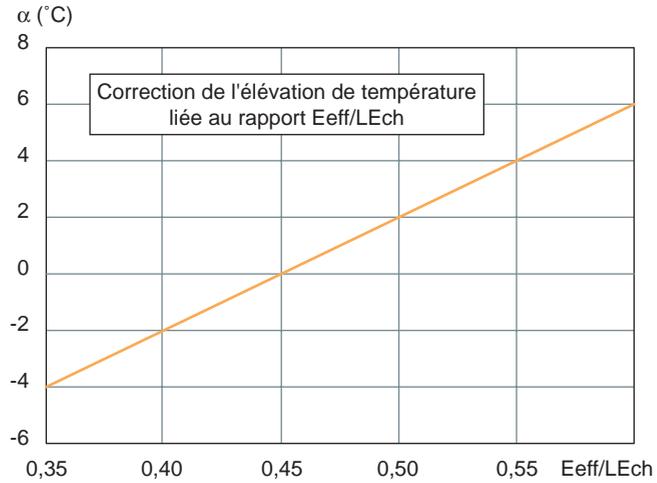
FIGURE 13 - Abaque n° 2 pour l'estimation du coefficient de pondération des additions (K').

3.3. Prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}}/\text{LEch}$

L'élévation de température découlant de la chaleur dégagée par le liant est également fonction du rapport $E_{\text{eff}}/\text{LEch}$ qui conditionne le taux d'hydratation maximal à long terme : plus ce rapport est faible, moins l'hydratation est complète et moindre est la chaleur dégagée. Ceci est pris en compte au travers d'un terme correctif α ($^{\circ}\text{C}$) donné par l'abaque n° 3 (Fig. 14).

ABAQUE 3

FIGURE 14 - Abaque n° 3 pour l'estimation du terme correctif α lié au rapport E_{eff}/LE_{ch} .



3.4. Estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

À ce stade, on peut évaluer l'élévation de température ΔT_{adia} (en °C) en conditions adiabatiques (isolation parfaite) à partir de la formule :

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

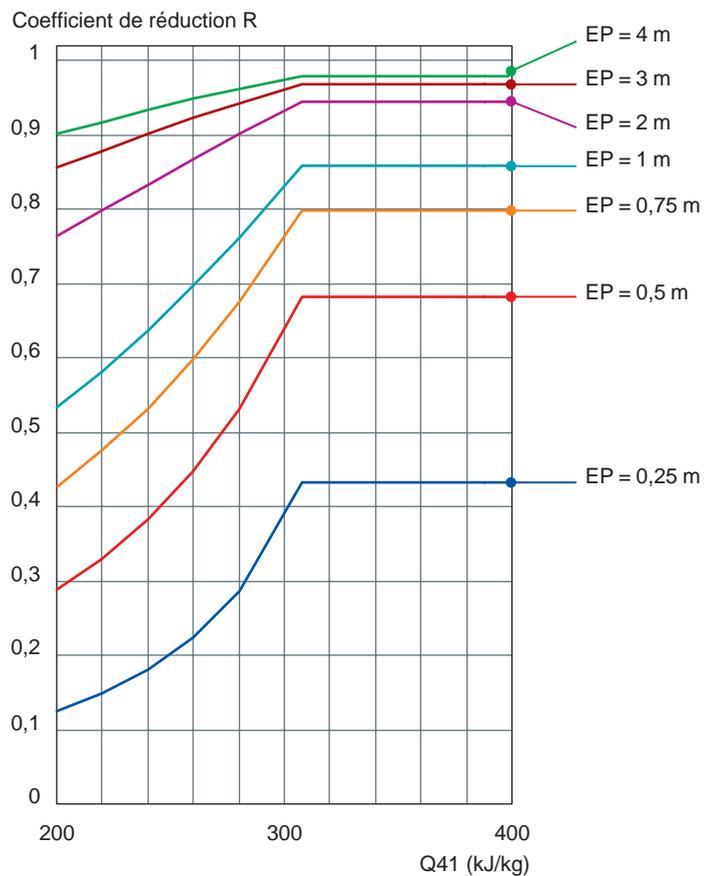
où C_{th} est la capacité thermique du béton prise égale à 1 kJ/(kg .°C).

3.5. Prise en compte des déperditions thermiques

Les déperditions thermiques dépendent en particulier de la nervosité du ciment et de l'épaisseur de la pièce (la vitesse de production de chaleur est en compétition avec la vitesse de dissipation). On obtient avec l'abaque n° 4 (Fig. 15) le coefficient de réduction R (compris entre 0 et 1) qui permet de prendre en compte ces déperditions, la nervosité du ciment étant exprimée au travers du Q_{41} :

ABAQUE 4

FIGURE 15 - Abaque n° 4 pour l'estimation du coefficient de réduction R lié aux déperditions thermiques.



Si l'épaisseur EP est supérieure ou égale à 5 m, on prend $R = 1$.

R permet d'estimer l'élévation de température ΔT (en °C) par la formule :

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}}$$

Si cette valeur additionnée de la température de béton frais au moment du bétonnage est supérieure à la limite définie en fonction du niveau de prévention retenu (chapitre III), la pièce est considérée comme critique et seule une étude plus précise peut permettre de justifier que l'échauffement sera acceptable du point de vue des risques de réaction sulfatique interne.

4. Exemples d'application

4.1. Exemple n°1 : Béton sans addition (pièce d'épaisseur 1 m)

Données

• Dosage en ciment du béton	$C = 350 \text{ kg/m}^3$
• Dosage en additions minérales	$A = 0 \text{ kg/m}^3$
• Masse volumique du béton	$M_v = 2400 \text{ kg/m}^3$
• Dosage en eau efficace du béton	$E_{\text{eff}} = 175 \text{ kg/m}^3$
• Résistance en compression à 2 jours du ciment	$R_{c2} = 27 \text{ MPa}$
• Résistance en compression à 28 jours du ciment	$R_{c28} = 68 \text{ MPa}$
• Chaleur d'hydratation à 41 h du ciment	$Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$
• Épaisseur de la pièce	$EP = 1 \text{ m}$

- **Étape n° 1** : Estimation du dégagement de chaleur à l'infini pour le ciment retenu

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,4$. L'utilisation de l'abaque n°1 permet de déterminer le ratio $Q_m/Q_{41} = 1,25$.

La chaleur maximale dégagée à long terme est alors $Q_m = Q_{41} \times 1,25 = 383 \text{ kJ/kg}$.

- **Étape n° 2** : Prise en compte des additions minérales

La formulation de béton ne comporte pas d'additions minérales $A = 0 \text{ kg/m}^3$. Dans ce cas, le liant équivalent $LE_{\text{ch}} = C$.

- **Étape n° 3** : Prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}}/LE_{\text{ch}}$

Dans cet exemple, $E_{\text{eff}}/LE_{\text{ch}} = E_{\text{eff}}/C = 0,5$ qui correspond, à partir de l'abaque n° 3, au terme correctif $\alpha = 2 \text{ °C}$.

- **Étape n° 4** : Estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques :

$$\Delta T_{\text{adia}} = (Q_m \times LE_{\text{ch}})/(C_{\text{th}} \times M_v) + a = (383 \times 350)/(1 \times 2400) + 2 = 58 \text{ °C}.$$

- **Étape n° 5** : Prise en compte des déperditions thermiques

L'utilisation de l'abaque n° 4, avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 1 \text{ m}$, conduit au coefficient de réduction $R = 0,85$.

L'élévation de température de la pièce est estimée par la relation :

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}} = 0,85 \times 58 = 49 \text{ °C}.$$

En supposant la température du béton frais au moment du bétonnage égale à 20 °C , la température au cœur de la pièce peut être estimée à 69 °C .

4.2. Exemple n° 2 : Béton avec cendres volantes (pièce d'épaisseur 3 m)

Données

• Dosage en ciment du béton	$C = 320 \text{ kg/m}^3$
• Dosage en additions minérales	$A = 80 \text{ kg/m}^3$
• Masse volumique du béton	$M_v = 2400 \text{ kg/m}^3$
• Dosage en eau efficace du béton	$E_{\text{eff}} = 175 \text{ kg/m}^3$
• Résistance en compression à 2 jours du ciment	$R_{c2} = 27 \text{ MPa}$
• Résistance en compression à 28 jours du ciment	$R_{c28} = 68 \text{ MPa}$
• Chaleur d'hydratation à 41 h du ciment	$Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$
• Épaisseur de la pièce	$EP = 3 \text{ m}$.

- **Étape n° 1** : Estimation du dégagement de chaleur à l'infini pour le ciment retenu.

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,4$. L'utilisation de l'abaque n°1 permet de déterminer le ratio $Q_m/Q_{41} = 1,25$.

La chaleur maximale dégagée à long terme est alors $Q_m = Q_{41} \times 1,25 = 383 \text{ kJ/kg}$.

- **Étape n° 2** : Prise en compte des additions minérales

La formulation béton comporte des cendres volantes $A = 80 \text{ kg/m}^3$. Dans ce cas, le liant équivalent $LE_{\text{ch}} = C + K' \times A$. Le coefficient $K' = 0,55$ est issu de l'abaque n° 2 pour $EP = 3 \text{ m}$ et des cendres volantes silico-alumineuses.

$$LE_{\text{ch}} = C + K' \times A = 320 + 0,55 \times 80 = 364 \text{ kg/m}^3.$$

- **Étape n° 3** : Prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}}/LE_{\text{ch}}$

Dans cet exemple, $E_{\text{eff}}/LE_{\text{ch}} = 175/364 = 0,48$ qui correspond, à partir de l'abaque n° 3, au terme correctif $\alpha = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

- **Étape n° 4** : Estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{\text{adia}} = (Q_m \times LE_{\text{ch}})/(C_{\text{th}} \times M_v) + \alpha = (383 \times 364)/(1 \times 2400) + 1,2 = 59 \text{ }^\circ\text{C}.$$

- **Étape n° 5** : Prise en compte des déperditions thermiques

L'utilisation de l'abaque n° 4 avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 3 \text{ m}$ conduit au coefficient de réduction $R = 0,95$.

L'élévation de température de la pièce est estimée par la relation

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}} = 0,95 \times 59 = 56 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Avec une température du béton frais au moment du bétonnage de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, la température au cœur de la pièce est alors estimée à $76 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Précision de la méthode

La méthode a été développée en s'appuyant sur une série de dix-neuf cas d'ouvrages réels pour lesquels on connaît l'élévation de température qui a été soit mesurée dans l'ouvrage, soit calculée par une simulation aux éléments finis. Elle a été ajustée pour donner des résultats qui vont dans le sens de la sécurité (Fig. 16).

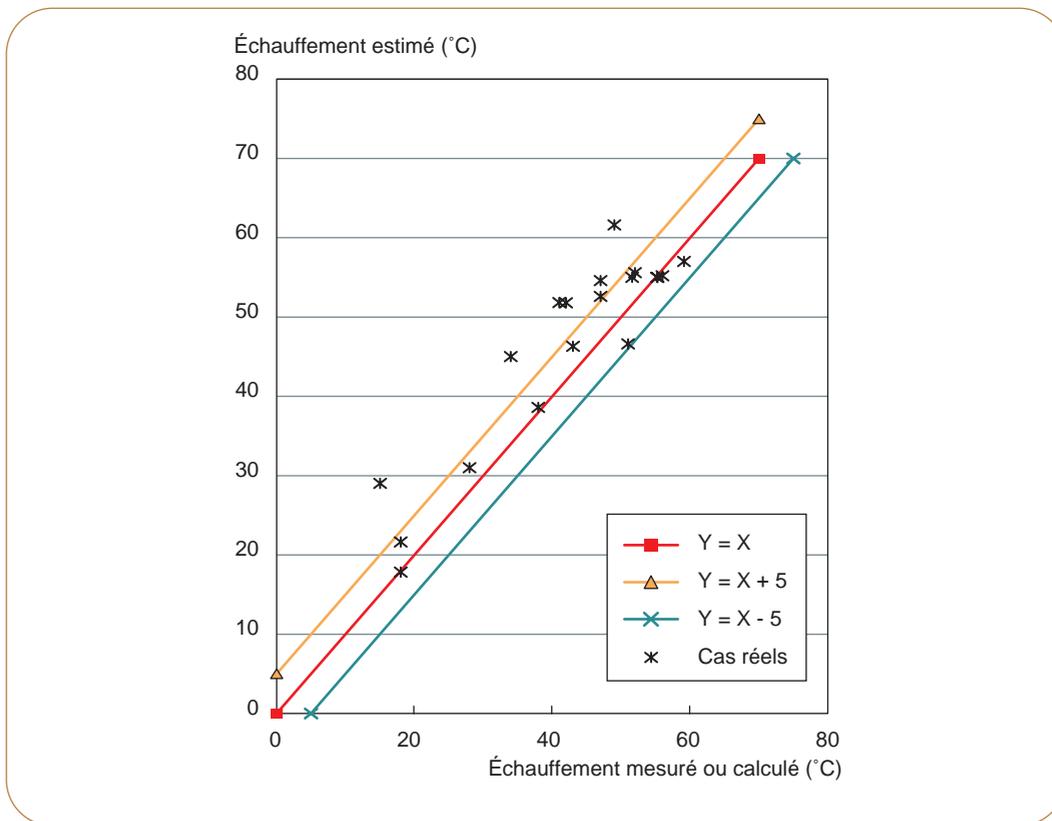


FIGURE 16 - Précision du modèle d'estimation (établi sur la base de 19 cas d'ouvrages réels).

6. Calcul par modélisation aux éléments finis de l'échauffement

Une méthode plus précise pour estimer la température maximale atteinte au sein du béton consiste à utiliser un code de calcul aux éléments finis et à prendre en compte la chaleur dégagée par le béton à partir de mesures de chaleur dégagée en fonction du temps (essai calorimétrique). Cette chaleur peut être déduite des mesures de chaleur effectuées sur mortier normalisé (essai « ciment »), être mesurée sur MBE (mortier de béton équivalent) ou directement sur béton.

La mise en œuvre d'un calcul aux éléments finis nécessite la fourniture d'un certain nombre de données dont :

- la géométrie de la structure,
- les modalités de coulage (nombre de coulage, durées des coulages, temps d'attente entre les coulages, etc.),
- les conditions thermiques initiales (température du béton, température de l'environnement extérieur, etc.),
- les caractéristiques physiques relatives à la conduction de la chaleur des matériaux (capacité calorifique volumique et conductivité du béton, du sol, de l'acier, etc.),
- les conditions aux limites sur le contour (température imposée, éventuellement flux imposé),
- les coefficients d'échanges sur le contour du modèle (surface libre à l'air, coffrage métallique, coffrage bois, etc.),
- les données d'un essai calorimétrique consistant à enregistrer, en fonction du temps, la courbe de température d'un échantillon de béton représentatif du béton de la structure (histoire de la température de l'échantillon, histoire de la température à l'extérieur du calorimètre, coefficients d'étalonnage des pertes du calorimètre utilisé, capacité calorifique volumique de l'échantillon, constante d'Arrhénius E_a/R).

ANNEXE V

Essai performantiel

Généralités

Un essai de performance sur éprouvette de béton a été développé en partenariat entre l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH), le Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Cet essai est publié par le LCPC sous l'intitulé :

Méthode d'essai des LPC n° 66. Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essai de performance.

Ce mode opératoire a été mis au point pour proposer une méthode alternative fiable à des essais proposés dans la littérature et dont la représentativité est remise en question à cause des températures excessives imposées au matériau et des dimensions d'éprouvettes retenues.

Depuis une première publication en tant que projet de méthode d'essai des LPC n° 59 (mai 2003), des essais ont été réalisés par le CERIB et le réseau des LPC sur des bétons représentatifs de pièces massives d'ouvrage d'art ou de produits issus de l'industrie de la préfabrication du béton et dont le comportement in situ vis-à-vis de la réaction sulfatique interne était connu. Ces études ont alors permis de valider la pertinence et la discrimination de l'essai.

La reproductibilité de la méthode d'essai a été ensuite étudiée au cours d'essais croisés menés dans le cadre des travaux du groupe GranDuBé de l'AFGC. Elle est fonction de l'expansion du béton et peut atteindre 60 % de la valeur moyenne du gonflement lorsqu'une expansion de 0,2 % est mesurée. Malgré cette dispersion, attribuable au phénomène de gonflement, les mesures effectuées conduisent l'ensemble des laboratoires à la même conclusion quant au caractère « non réactif » ou « potentiellement réactif » des couples béton/échauffement utilisés.

L'exploitation des résultats d'essais croisés ajoutée à l'ensemble des études réalisées depuis plus de six ans par le Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Équipement permettent d'établir les critères décisionnels indiqués ci-après.

Principe de l'essai

L'essai consiste à caractériser le risque de gonflement d'un béton vis-à-vis de la RSI. Ce béton est défini à la fois par sa formulation et par l'échauffement auquel il est exposé au jeune âge.

L'essai comporte quatre étapes distinctes :

- la fabrication du béton,
- le traitement thermique simulant l'échauffement du béton,
- les cycles de séchage et d'humidification,
- l'immersion définitive dans de l'eau et le suivi des déformations longitudinales.

La durée minimale de cet essai est de 12 mois d'immersion, elle peut être prolongée à 15 mois lorsqu'une expansion significative est mesurée.

Interprétation des résultats

Le compte rendu d'essai contient au minimum :

- les données indiquées dans les feuilles d'essais annexées à la méthode d'essai ;
- le relevé des températures à l'intérieur de l'enceinte climatique lors du traitement thermique, et si possible celles enregistrées dans le béton ;
- un graphique dans lequel l'expansion de chaque éprouvette ainsi que l'expansion moyenne des trois éprouvettes sont tracées en fonction du temps d'immersion ;
- une interprétation des résultats au regard des critères décisionnels indiqués ci-après. Pour confirmer l'origine du gonflement, ces mesures peuvent être accompagnées par un examen au microscope électronique à balayage lorsqu'un gonflement du béton a été mesuré.

Le couple « formule de béton et échauffement » est considéré comme apte à l'emploi si l'un des deux critères suivants (un ou deux) portant sur le seuil de gonflement et sur la pente de la courbe de gonflement est respecté :

Critère 1

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

ET

la variation mensuelle de la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes mesurée à partir du 3e mois est inférieure à 0,004 %.

Critère 2

La déformation longitudinale individuelle des trois éprouvettes est comprise entre 0,04 % et 0,07 % à l'échéance de 12 mois. Dans ce cas, il est nécessaire de prolonger l'essai jusqu'au 15e mois,

ET

la variation mensuelle de la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes mesurée à partir du 12e mois est inférieure à 0,004 % et la variation cumulée entre le 12e mois et le 15e mois est inférieure à 0,006 %.

RÉFÉRENCES

Norme NF EN 196-1	Méthodes d'essai des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques.
Norme NF EN 196-9	Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : Chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique.
Norme NF EN 197-1	Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
Norme NF EN 197-1/A1	Amendement A1 à la norme NF EN 197-1.
Norme NF EN 206-1	Béton - Partie 1 : Spécifications, performances, production et conformité.
Norme NF EN 450-1	Cendres volantes pour béton - Partie 1 : Définition, spécifications et critères de conformité.
Norme NF EN 1992-1-1	Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.
Norme NF EN 1992-1-1/NA	Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments - Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1: 2005 - Règles générales et règles pour les bâtiments.
Norme NF EN 1992-1-2	Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu.
Norme NF EN 1992-2	Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives.
Norme NF EN 1992-2/NA	Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives - Annexe nationale à la NF EN 1992-2 : 2006 - Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives.
Norme NF EN 1992-3	Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 3 : Silos et réservoirs.
Norme EN 13230-1	Applications ferroviaires - Voie - Traverses et supports en béton - Partie 1 : Prescriptions générales.
Norme NF EN 13369	Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
Norme NF EN 13369/A1	Amendement A1 à la norme NF EN 13369.
Norme NF EN 15167-1	Laitier granulé de haut fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : Définitions, exigences et critères de conformité.
Norme NF P15-313	Liants hydrauliques - Ciment sursulfaté - Composition, spécification et critères de conformité.

Norme NF P15-319	Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
Norme XP P18-420	Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
Norme P18-424	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau.
Norme P18-425	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau.
Norme NF P 18-508	Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité.
Norme NF P 18-509	Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité.
Norme XP ENV 13670-1	Exécution des ouvrages en béton - Partie 1 : Tronc commun et document d'application nationale.

Méthode d'essai n° 66 - LCPC, Essai performantiel (à paraître).

Cahier des clauses techniques générales - Fascicule 67 - Titre I - Étanchéité des ponts routes. Support en béton de ciment - Numéro spécial 85-32 bis.

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement - LCPC ; SETRA, 2002 - (Guide technique) - Réf. F0231.

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel - LCPC, 2003 - (Guide technique) - Réf. RECDUR.

STER 81 : Surfaçage, étanchéité et couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art - SETRA, 1981 - (Guide technique) - Réf. F8210.

STER 81 : Mise à jour n° 2 - Réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art. Réparations localisées - SETRA ; LCPC, 2001 - (Guide technique) - Réf. F0112.

Ne pas confondre étanchéité de surface de tablier et protection du béton - Note d'Information - Ouvrages d'Art - Série(OA) n° 25 - SETRA, août 2004 - Réf. 0422w.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARLIGUIE G., HORNAIN H., GranDuBé, *Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Association Française de Génie Civil, Réseau Génie Civil et Urbain, Presses de l'ENPC, **2007**.
- [2] TEPPONEN P., ERIKSSON B.-E., Damages in concrete railway sleepers in Finland, *Nordic Concrete Research*, n° 6, **1987**, pp. 199-209.
- [3] HEINZ D., LUDWIG U., RÜDIGER I., Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes, *Betonwerk und Fertigteil-Technik.*, vol. 55, n° 11, **1989**, pp. 56-61.
- [4] VITOUVA L., Concrete Sleepers in CSD tracks, *International symposium on precast concrete railway sleepers*, Madrid, **1991**, pp. 253-264.
- [5] SHAYAN A., QUICK G.-W., Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers, *ACI Materials*, vol. 89, n° 4, **1992**, pp. 348-361.
- [6] OBERHOLSTER R.-E., MAREE H., BRAND J.-H.-B., Cracked prestressed concrete railway sleepers : alcali-silica reaction or delayed ettringite formation, *Proceedings of the 9th International conference on alkali-silica reaction in concrete*, London, Concrete society publication, CS104, vol. 2, **1992**, pp. 739-749.
- [7] MIELENZ R.-C., MARUSIN S.-L., HIME W.-G., JUGOVIC Z.T., Investigation of prestressed concrete railway tie distress, *Concrete International*, vol. 17, n° 12, **1995**, pp. 62-68.
- [8] SAHU S., THAULOW N., Delayed ettringite formation in swedish concrete railroad ties, *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 9, **2004**, pp. 1675-1681.
- [9] HIME W.-G., Delayed ettringite formation - a concern for precast concrete ? *PCI Journal*, vol. 41, n° 4, **1996**, pp. 26-30.
- [10] HOBBS D.-W. , Cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation, *Proceedings of the eleventh annual BCA/concrete society conference on higher education and the concrete industry*, UMIST, Manchester, paper 6, **2001**, pp. 51-60.
- [11] OZOL M.-A. , STRAND W., Delayed ettringite formation at Brewer Stadium, Boone, North Carolina, *Cement concrete and aggregates*, vol. n° 22, n° 1, **2000**, pp. 24-34.
- [12] COLLEPARDI M., Damage by delayed ettringite formation, *Concrete international*, vol. 21, n° 1, **1999**, pp. 69-74.
- [13] LAWRENCE B.-L., MYERS J.-J., CARRASQUILLO R.-L., Premature concrete deterioration in Texas department of transportation precast elements, Ettringite - The sometimes host of destruction, *American concrete institute*, vol. SP 177, chapter 10, **1999**, pp. 141-158.
- [14] DIVET L., GUERRIER F., LE MESTRE G., Existe-t-il un risque de développement d'une activité sulfatique d'origine endogène dans les pièces en béton de grande masse ? Le cas du pont d'Ondes (Haute-Garonne), *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 213, **1998**, pp. 59-72.
- [15] DIVET L., Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, *Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, OA n° 40, **2001**, 227 p.

- En couverture :
 - Appui du pont haubané d'Allonne (OA 17) sur la déviation de Beauvais (RN31) (Photo LCPC).
- Page 7 :
 - Cristaux aciculaires d'ettringite et forme d'ettringite massive (Photos LCPC).
- Page 13 :
 - Semelles du Pont de Normandie (Photos LCPC).
 - Exécution en Seine des fondations d'une pile du Pont de Normandie ((Photos de la Chambre de Commerce et d'Industrie du Havre).
- Page 19 :
 - Viaduc de Millau. Pile P1 levée 24, préparation du bétonnage (Photo Eiffage Construction).
- Page 25 :
 - Bétonnage d'une poutre du pont d'Aquitaine et dispositif de refroidissement par circulation d'eau (Photos Vinci Construction).

Document publié par le LCPC	sous le numéro C1502503
Conception et réalisation	LCPC-DISTC, Marie-Christine Pautré
Dessins	LCPC-DITSC, Philippe Caquelard
Impression	Jouve - N°
Dépôt légal	3e trimestre 2007



Les présentes recommandations ont pour objectif de limiter le risque d'apparition de désordres liés à la réaction sulfatique interne. Cette dernière est provoquée par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire et se produit notamment en raison d'un échauffement important du béton intervenu plusieurs heures ou plusieurs jours après son coulage. Elle provoque un gonflement du béton qui engendre à son tour une fissuration des structures. Cette réaction peut se rencontrer avec deux types de béton : les bétons traités thermiquement et les bétons coulés en place dans des pièces dites critiques.

Ces recommandations concernent les ouvrages de génie civil et les bâtiments comportant des éléments de dimensions importantes en contact avec l'eau ou soumises à une ambiance humide. Elles fixent le niveau de prévention à atteindre en fonction de la catégorie de l'ouvrage (ou de la partie d'ouvrage) et des conditions d'exposition auxquelles il (ou elle) est soumis(e). A chacun des quatre niveaux de prévention retenus, sont associées des précautions à appliquer et des vérifications à effectuer. Elles présentent également des dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages, à la formulation et à la fabrication du béton ainsi qu'à sa mise en oeuvre.

The recommendations presented in this document aim at limiting the risk of disorders occurring due to an internal sulfatic reaction. The latter is caused by the formation of delayed ettringite in a cementitious material and occurs in particular because of an important heating of the concrete intervened several hours or several days after its casting. It causes an expansion of concrete which generates in its turn a cracking of the structures. This reaction can be encountered with two types of concrete: the heat treated concretes and the concretes cast in place in elements known as critical.

These recommendations are concerned with civil engineering structures and buildings comprising elements of important size that are in contact with water or subjected to a humid environment. They fix the level of prevention to be reached according to the category of the structure (or to the part of structure) and to the exposure conditions. For each of the four levels of prevention selected, associated precautions are applied and associated checks are carried out. They also present provisions related to the design and dimensioning of the structures, the formulation and the manufacture of the concrete as well as to its pouring.