

TECHNIQUES ET MÉTHODES

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



guide technique

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

Octobre 2017



TECHNIQUES ET MÉTHODES

Membres du comité d'experts

Animateurs du comité : Bruno GODART et Loïc DIVET, (Ifsttar)

AMMOUCHE Abdelkrim, Lerm
BEAUFORT Yohan, Vicat
BENBOUDJEMA Farid, ENS Cachan
BESSETTE Laetitia, Vicat
CASABIEL Ludovic, CIMbéton
CUSSIGH François, VINCI Construction France
DELORT Michel, ATILH
DIVET Loïc, Ifsttar
ESCADEILLAS Gilles, INSA Toulouse
FOURMENT Yvon, CEMEX
GODART Bruno, Ifsttar
GONNON Pascal, Omya
GOTTELAND Philippe, FNTP
GUILLOT Xavier, Lafarge France
HASNI Lotfi, Ginger-CEBTP
IZORET Laurent, ATILH
JEAN-PIERRE Alain, EDF
LAVAUD Stéphane, Ifsttar
LEKLOU Nordine, Université de Nantes
LINGER Lionel, VINCI Construction grands projets
MARTIN Renaud-Pierre, Ifsttar
PETITPAIN Marjorie, Cerib
POTIER Jean-Marc, SNBPE
RIZZO Nicola, ECOCEM France
ROUGEAU Patrick, Cerib
SAUVAGET Cyril, EDF
TORRENTI Jean-Michel, Ifsttar
WALLER Vincent, Unibéton / HeidelbergCement Group

Comment citer cet ouvrage :

Ifsttar. Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne.
Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2017. Techniques et méthodes, GT15. 70 pages.
Numéro ISBN 978-2-85782-738-2

Photo de couverture :

Viaduc de la nouvelle route du littoral à la Réunion vu depuis la mer
Crédit : Sébastien Marchal, photothèque Viaduc Littoral

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Ifsttar
14-20, boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
www.ifsttar.fr

Les collections de l'Ifsttar
techniques et méthodes - guide technique - référence : GT15
ISBN 978-2-85782-738-2 – ISSN 2492-5438



Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution.
Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse :
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Sommaire

Introduction	5
Chapitre 1. Généralités sur la réaction sulfatique interne	7
1.1 Le phénomène de la réaction sulfatique interne	9
1.2 Les principaux paramètres de la RSI	10
1.3 Le contexte normatif	10
1.4 Influence des constituants du béton et formulation	11
Chapitre 2. Détermination du niveau de prévention nécessaire	13
2.1 Catégories de l’ouvrage ou de la partie d’ouvrage	15
2.2 Classes d’exposition vis-à-vis de la RSI	16
2.3 Niveaux de prévention	17
Chapitre 3. Précautions en fonction des niveaux de prévention	19
3.1 Niveau de prévention As	21
3.2 Niveau de prévention Bs.....	22
3.3 Niveau de prévention Cs.....	23
3.4 Niveau de prévention Ds.....	23
3.5 Remarques sur les combinaisons Ciment + additions minérales	24
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	27
4.1 Généralités	29
4.2 Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages	29
4.3 Dispositions liées à la formulation du béton.....	31
4.4 Dispositions liées à la fabrication et au transport du béton	31
4.5 Dispositions liées à la mise en œuvre du béton	33
4.6 Dispositions spécifiques à la préfabrication	35
Annexe 1	
Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne	41
Annexe 2	
Rappel sur l’exothermie des bétons.....	45
Annexe 3	
Estimation des températures atteintes dans les structures à construire.....	49
Annexe 4	
Essai performantiel	61
Annexe 5	
Méthodologie de qualification des ciments SR3 et SR5 conformes à la marque NF liants hydrauliques (NF002)	63
Références	65
Bibliographie	67
Fiche bibliographique	68
Publication data form	69



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 soumis 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'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 RSI 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 RSI 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. Depuis, des désordres dus à la RSI ont été constatés sur des poutres préfabriquées de ponts de type PRAD dont la fabrication était antérieure à la publication des recommandations du LCPC de 2007 pour la prévention des désordres dus à la RSI.

Dans l'état actuel de nos connaissances, peu de résultats de recherche ont été publiés sur le sujet du traitement des ouvrages atteints de RSI et aucune solution de traitement n'a 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/CN, 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 RSI. En outre, elles reprennent quelques concepts de base qui ont parfois tendance à être négligés, voire oubliés, dans l'acte de construire.

a) pour les structures coulées en place

- Les rythmes de construction 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 doivent pas se faire au détriment de la durabilité des structures construites dans ces conditions (voir annexe 2).
- 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 fortement exothermiques à un dosage élevé dans une pièce massive.
- Il faut éviter le coulage de pièces massives lors de fortes chaleurs lorsqu'il n'est pas mis en œuvre de dispositions spécifiques pour limiter l'échauffement excessif du béton.

b) 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 constituent une actualisation des précédentes recommandations de 2007 auxquelles elles se substituent, en tenant compte des nouvelles connaissances acquises depuis.

The background of the slide is a microscopic image of a plant stem or root. It shows a central vascular cylinder with a distinct cambium, surrounded by cortical layers. The image is in grayscale and has a high magnification, showing cellular details.

Chapitre 1
Généralités
sur la réaction
sulfatique interne

Photo de la page 7

Couche d'ettringite différée à l'interface entre un granulat et la pâte de ciment

Crédit : Béatrice Desrues, Ifsttar

1.1 Le phénomène de la réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne (RSI) peut être définie comme la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire durci, plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment, et sans apport de sulfate externe. Le terme « différée » (voir annexe 1) 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 sulfates peuvent être apportés 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 » (voir annexe 1) 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 progressant 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 RSI peut apparaître, et ce, sans apport de sulfate par une source extérieure. Son appellation internationale est « *Delayed Ettringite Formation* » (DEF) 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 (voir annexe 2).

La grande majorité des ions sulfates d'origine interne provient du ciment et peut dans certaines conditions être dissoute dans la solution interstitielle du béton. La réaction sulfatique met alors en jeu ces ions sulfates présents dans la solution interstitielle ainsi que les aluminates du ciment qui peuvent conduire à la formation différée d'ettringite susceptible de provoquer 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 signes 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 dites 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 (voir annexe 2).
- 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.

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

1.2 Les principaux paramètres de la 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 toujours 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 (exposition aux intempéries, 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 influence sur la solubilité de l'ettringite est bien connue. 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 initiale en alcalins augmente la valeur critique de la température.

1.3 Le contexte normatif

La norme NF EN 206/CN « Béton : 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. Cette norme renvoie aux présentes recommandations et n'apporte pas d'autre réponse spécifique en matière de prévention de la RSI.

Par contre, la norme NF EN 13670/CN « Exécution des structures en béton » indique que le pic de température du béton dans un élément ne doit pas dépasser 70 °C, à moins que des données ne prouvent qu'avec les matériaux utilisés, des températures supérieures n'ont aucun effet néfaste significatif sur la performance en service du béton. Cette norme renvoie également aux présentes recommandations.

Dans le domaine de la préfabrication, la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton » prend en compte la RSI en se référant aux présentes recommandations 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 RSI 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 ».

1.4 Influence des constituants du béton et formulation

Chaque constituant du béton doit être sélectionné rigoureusement, il faut notamment pour certains niveaux de prévention, établir un bilan en alcalins équivalents actifs du béton comme précisé dans le chapitre 3. Ce bilan des alcalins est conduit conformément au fascicule de documentation FD P 18-464.

1.4.1 Les ciments

Le choix du ciment a son importance. Par exemple, le ciment utilisé doit être couvert par la norme NF EN 197-1. Par ailleurs, certaines caractéristiques intrinsèques doivent être considérées, comme cela est précisé dans les précautions du chapitre 3.

Par ailleurs, l'évolution de la chaleur d'hydratation mesurée par la méthode du calorimètre Langavant (norme NF EN 196-9) doit être caractérisée par une cinétique de montée en température et une chaleur d'hydratation dégagée à l'infini.

Certains types de ciments permettent d'obtenir des chaleurs d'hydratation moindres : ciments Portland composés de type CEM II, ciments de haut fourneau de type CEM III, ciments pouzzolaniques de type CEM IV, ciments composés de type CEM V, ou ciments sursulfatés CSS (norme NF EN 15743).

1.4.2 Les additions minérales

Il est également possible d'utiliser des additions minérales en complément ou en substitution des ciments de type CEM I et CEM II pour diminuer l'exothermie du béton. De plus, dans le cas d'utilisation de constituants à propriétés hydrauliques latentes ou pouzzolaniques (laitiers de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes naturelles ou artificielles), la résistance des bétons vis-à-vis de la RSI est 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.

1.4.3 Les granulats

Il est recommandé de vérifier la teneur en alcalins des granulats tel que mentionné dans le fascicule de documentation FD P18-464 « Béton - Dispositions pour prévenir à des phénomènes d'alcali-réaction ». En outre, la nature pétrographique et la masse volumique des granulats ont une influence dans les transferts de chaleur.

1.4.4 Les adjuvants

Les adjuvants peuvent également intervenir dans la cinétique de dégagement de chaleur.

1.4.5 La formulation

Le travail de formulation du béton reste incontournable pour limiter la formation différée de l'ettringite.



Chapitre 2

Détermination du niveau de prévention nécessaire



Photo de la page 13
Piles en construction au « Puento del Atlantico » au Panama
Crédit : photothèque VINCI et ses filiales

L'objet des présentes recommandations est de définir des précautions pour la mise en œuvre et la formulation d'un béton vis-à-vis des risques de désordres dus à une réaction sulfatique interne (RSI) susceptible 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 RSI ; ce sont essentiellement les parties d'ouvrage définies comme étant des pièces critiques (au sens de l'annexe 2) 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 jugé acceptable, 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.

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

Les ouvrages (ou parties d'ouvrage) sont classés en 3 catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de la RSI 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.

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, des traverses de chemin de fer, 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 nécessaire pour des raisons de sécurité, d'esthétique ou d'impossibilité de réparation ou de remplacement. Certains de ces ouvrages peuvent faire l'objet de dispositions complémentaires au niveau des précautions à prendre.

Tableau 1
Exemples d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages classés par catégorie

Catégorie	Exemples d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages
Catégorie I Conséquences faibles ou acceptables	Ouvrages en béton de classe de résistance inférieure à C 16/20 (dont les bétons de bouchon) 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 ou viaducs exceptionnels Monuments ou bâtiments de prestige Traverses de chemin de fer

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

La norme NF EN 206/CN ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la RSI, 3 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 RSI. 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/CN).

Ces 3 classes d'exposition XH1, XH2 et XH3 sont définies selon les indications du tableau 2 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 18 classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206/CN et doivent être spécifiées au CCTP pour chaque partie d'ouvrage. Il n'y a pas, a priori de corrélation directe possible entre les 3 classes XH1 à XH3 et les 18 classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN. Néanmoins, on peut considérer que les parties d'ouvrage classées en XC4 relèvent de la classe XH2. Le guide de l'EFB (École française du béton) fournit un tableau d'aide au choix de la classe XH pour tous les types de structures.

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/CN.

Tableau 2
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 protégée 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 immergée 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

2.3 Niveaux de prévention

Il est fixé 4 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 3.

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 3
Choix du niveau de prévention

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

Chapitre 3

Précautions en fonction des niveaux de prévention



Photo de la page 19

Mise à l'eau d'une pile du viaduc de la nouvelle route du littoral à La Réunion

Crédit : photothèque Viaduc Littoral, Sébastien Marchal

À chacun des 4 niveaux de prévention As, Bs, Cs et Ds correspond un type de précautions 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 du béton de la partie d'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 3 présente une méthode simple d'estimation de celle-ci en ne faisant appel qu'à un nombre limité de données de base comme l'épaisseur de l'élément (dans sa plus petite dimension), 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 ou préférablement à 120 h du ciment, etc.) et la température initiale du béton frais. 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 déterminée par un essai spécifique.

Pour éviter toute élévation excessive de chaleur non maîtrisée du béton, il convient de mettre en œuvre les moyens potentiels (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 et maîtriser 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 impose un dosage minimal en ciment de 385 kg/m^3 (pour un D_{\max} égal à 20 mm) et limite 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 massives. 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 de la durabilité 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 définis par les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (gel « sévère » ou « modéré ») et/ou l'essai d'écaillage décrit par la norme XP P 18-420. L'attention est attirée sur les délais nécessaires à de telles justifications (au minimum 3 mois).

3.1 Niveau de prévention As

Pour ce niveau de prévention, le risque de désordres vis-à-vis de la RSI doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes notées 1 et 2.

- 1) La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à $85 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 2) Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à $85 \text{ }^\circ\text{C}$, alors elle doit rester inférieure à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ et la condition suivante doit être respectée :
 - le traitement thermique est maîtrisé (note 1) et la durée de maintien de la température du béton au-delà de $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ne doit pas excéder 4 heures.

Note 1 : le traitement thermique maîtrisé peut être réalisé en usine de préfabrication ou dans des installations adéquates sur chantier. Il doit s'accompagner d'un suivi périodique de mesures de température ou de contrôles dans le cadre d'un plan qualité.

3.2 Niveau de prévention Bs

Pour ce niveau de prévention, le risque de désordres vis-à-vis de la RSI doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes notées 1 et 2.

- 1) La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 75 °C.
- 2) 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 (note 1), 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 P15-319 (ES) ou d'un ciment SR selon la norme NF EN 197-1 excepté les ciments CEM I SR3 et SR5, pour les bétons devant être soumis à une température supérieure à 75 °C pendant une durée supérieure à 10 heures. Ces ciments SR3 et SR5 sont autorisés pour les bétons lorsque la durée de maintien de la température au-delà de 75 °C est inférieure à 10 heures, à condition que la teneur en alcalins équivalents actifs du béton soit inférieure à 3 kg/m³.
 - Utilisation d'un ciment CEM I SR3 ou SR5 conforme à la marque NF Liants hydrauliques et qualifié selon la méthodologie donnée en annexe 5, dans le cas où la durée de maintien de la température au-delà de 75 °C est supérieure à 10 heures.
 - Utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) sous réserve d'avoir plus de 20 % de cendres volantes, CEM III/A ou CEM V, tous ces ciments devant avoir une teneur en SO₃ qui ne doit pas excéder 3 %, et être fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C3A ne doit pas excéder 8 %.
 - Utilisation, en combinaison avec du CEM I ou du CEM II/A, 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, de fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1 ou de métakaolins conformes à la norme NF P18-513. Leur proportion dans le liant (combinaison ciment + additions) doit être d'au moins 20 % pour les cendres volantes, 35 % pour les laitiers de haut fourneau, 10 % pour la fumée de silice (note 2) et 20 % pour le métakaolin. Le liant utilisé doit respecter les exigences suivantes : C3A (rapporté au clinker) inférieur à 8 % et SO₃ (rapporté au liant) inférieur à 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.

Note 1 : le traitement thermique maîtrisé peut être réalisé en usine de préfabrication ou dans des installations adéquates sur chantier. Il doit s'accompagner d'un suivi périodique de mesures de température ou de contrôles dans le cadre d'un plan qualité.

Note 2 : cette limite pour la fumée de silice peut être abaissée à 5 % dans la mesure où le liant comporte au moins 15 % de cendres volantes.

3.3 Niveau de prévention Cs

Pour ce niveau de prévention, le risque de désordres vis-à-vis de la RSI doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes notées 1 et 2 :

- 1) La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 70 °C.
- 2) 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 (note 1), 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.
 - Utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P15-319 (ES) ou d'un ciment SR selon la norme NF EN 197-1 excepté les ciments CEM I SR3 et SR5, pour les bétons devant être soumis à une température supérieure à 70 °C pendant une durée supérieure à 10 heures. Ces ciments SR3 et SR5 sont autorisés pour les bétons lorsque la durée de maintien de la température au-delà de 70 °C est inférieure à 10 heures à condition que la teneur en alcalins équivalents actifs du béton soit inférieure à 3 kg/m³.
 - Utilisation d'un ciment CEM I SR3 ou SR5 conforme à la marque NF Liants hydrauliques et qualifié selon la méthodologie donnée en annexe 5, dans le cas où la durée de maintien de la température au-delà de 70 °C est supérieure à 10 heures.
 - Utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) sous réserve d'avoir plus de 20 % de cendres volantes, CEM III/A ou CEM V, tous ces ciments devant avoir une teneur en SO₃ qui ne doit pas excéder 3 %, et être fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C₃A ne doit pas excéder 8 %.
 - Utilisation, en combinaison avec du CEM I ou du CEM II/A, 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, de fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1 ou de métakaolins conformes à la norme NF P18-513. Leur proportion dans le liant (combinaison ciment + additions) doit être d'au moins 20 % pour les cendres volantes, 35 % pour les laitiers de haut fourneau, 10 % pour la fumée de silice (Note 2) et 20 % pour le métakaolin. Le liant utilisé doit respecter les exigences suivantes : C₃A (rapporté au clinker) inférieur à 8 % et SO₃ (rapporté au liant) inférieur à 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.

Note 1 : le traitement thermique maîtrisé peut être réalisé en usine de préfabrication ou dans des installations adéquates sur chantier. Il doit s'accompagner d'un suivi périodique de mesures de température ou de contrôles dans le cadre d'un plan qualité.

Note 2 : cette limite pour la fumée de silice peut être abaissée à 5 % dans la mesure où le liant comporte au moins 15 % de cendres volantes.

3.4 Niveau de Prévention Ds

Pour ce niveau de prévention, le risque de désordres vis-à-vis de la RSI doit être pris en compte par une des deux précautions suivantes notées 1 et 2, la première précaution étant recommandée comme prioritaire.

- 1) La température maximale atteinte dans le béton doit rester inférieure à 65 °C.

2) Si la température maximale atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 65 °C, alors elle doit rester inférieure à 75 °C et au moins une des cinq conditions suivantes doit être respectée :

- Utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P15-319 (ES) ou d'un ciment SR selon la norme NF EN 197-1 excepté les ciments CEM I SR3 et SR5, pour les bétons devant être soumis à une température supérieure à 65 °C pendant une durée supérieure à 10 heures. Ces ciments SR3 et SR5 sont autorisés pour les bétons lorsque la durée de maintien de la température au-delà de 65 °C est inférieure à 10 heures à condition que la teneur en alcalins équivalents actifs du béton soit inférieure à 3 kg/m³.
- Utilisation d'un ciment CEM I SR3 ou SR5 conforme à la marque NF-Liants hydrauliques et qualifié selon la méthodologie donnée en annexe 5, dans le cas où la durée de maintien de la température au-delà de 65 °C est supérieure à 10 heures.
- Utilisation de ciments non conformes à la norme NF P 15-319 (ES) de type CEM II/B-V, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V) sous réserve d'avoir plus de 20 % de cendres volantes, CEM III/A ou CEM V, tous ces ciments devant avoir une teneur en SO₃ qui ne doit pas excéder 3 %, et être fabriqués à partir d'un clinker dont la teneur en C₃A ne doit pas excéder 8 %.
- Utilisation, en combinaison avec du CEM I ou du CEM II/A, 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, de fumées de silice conformes à la norme NF EN 13263-1 ou de métakaolins conformes à la norme NF P18-513. Leur proportion dans le liant (combinaison ciment + additions) doit être d'au moins 20 % pour les cendres volantes, 35 % pour les laitiers de haut fourneau, 10 % pour la fumée de silice (note 1) et 20 % pour le métakaolin. Le liant utilisé doit respecter les exigences suivantes : C₃A (rapporté au clinker) 8 % et SO₃ (rapporté au liant) 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.

Note 1 : cette limite pour la fumée de silice peut être abaissée à 5 % dans la mesure où le liant comporte au moins 15 % de cendres volantes.

Pour les chantiers de longue durée, et quel que soit le niveau de prévention, on s'attachera à vérifier que les conditions de non réactivité du béton vis à vis de la RSI sont maintenues.

3.5 Remarques sur les combinaisons ciment + additions minérales

3.5.1 Remarques sur les matériaux pouzzolaniques

Les matériaux pouzzolaniques (cendres volantes, fumées de silice, métakaolin) ont un effet bénéfique pour limiter, voire inhiber, le développement d'une RSI. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer le rôle joué par ces additions minérales : effet de dilution des teneurs en C₃A et SO₃, diminution de la teneur en portlandite, diminution de l'alcalinité de la solution interstitielle, changement de la microstructure des hydrates.

3.5.2 Remarques sur les laitiers de haut-fourneau

Des taux de substitution en laitier peuvent être supérieurs à ceux indiqués dans la norme NF EN 206/CN sans nécessité d'appliquer la démarche des bétons d'ingénierie. Dans ces conditions, la quantité de laitier dépassant la limite imposée par la norme NF EN 206/CN n'est simplement pas comptabilisée dans le calcul du liant équivalent du béton.

3.5.3 Exemples de combinaisons ciment + additions minérales

Pour aider à la compréhension des différents mélanges de ciments et d'additions minérales pouvant être utilisés comme moyen de relaxation, six exemples sont donnés ci-après, dont les deux derniers concernent le cas des combinaisons CEM II/A + addition pour lesquelles le CEM II/A ne contient qu'un constituant principal autre que le clinker, ce constituant principal étant de même nature que l'addition utilisée. Dans ce dernier cas, il est possible de retrancher de la proportion minimum d'addition préconisée la quantité de ce constituant déjà présent dans le ciment ; cela concerne les combinaisons suivantes :

- **CEM II/A-S + laitier de haut-fourneau** selon le calcul : pourcentage de laitier à ajouter* = $0,35 - (0,65 \times x)/(1-x)$ avec x = pourcentage de laitier dans le CEM II/A-S.
- **CEM II/A-D + fumée de silice** selon le calcul : pourcentage de fumée de silice à ajouter* = $0,1 - (0,9 \times x)/(1-x)$ avec x = pourcentage de fumée de silice dans le CEM II/A-D.
- **CEM II/A-Q + métakaolin** selon le calcul : pourcentage de métakaolin à ajouter* = $0,2 - (0,8 \times x)/(1-x)$ avec x = pourcentage d'argile calcinée dans le CEM II/A-Q.
- **CEM II/A-V + cendres volantes** selon le calcul : pourcentage de cendres volantes à ajouter* = $0,2 - (0,8 \times x)/(1-x)$ avec x = pourcentage de cendres volantes dans le CEM II/A-V.

* Ce pourcentage est calculé par rapport à la combinaison ciment + addition minérale.

Exemple 1 : 80 % de CEM I 52,5 R CE CP2 NF et 20 % de cendres volantes

Exemple 2 : 90 % CEM I 52,5 N SR3 CE PM-CP2 NF et 10 % de fumée de silice

Exemple 3 : 65 % de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 35 % de laitier de haut-fourneau
Pour un C30/37 avec un dosage en liant équivalent minimum de 330 kg (classe d'exposition XS1)

Selon le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206/CN, $A/A+C \leq 0,2$

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant :

- 269 kg de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 68 kg de laitier de haut-fourneau (avec k = 0,9)
- Auquel il faut ajouter 77 kg de laitier de haut-fourneau pour respecter la quantité minimale de 35 % des préconisations RSI mais non comptabilisés dans le liant équivalent
- Le liant est donc constitué de 269 kg de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 145 kg de laitier de haut-fourneau

Selon le tableau NA.F.3 de la norme NF EN 206/CN (béton d'ingénierie), $A/(A+C) \leq 0,35$ (si la teneur en calcaire du CEM II/A-LL est inférieure à 15 %)

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant :

- 222 kg de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 120 kg de laitier de haut-fourneau (si k = 0,9)

Exemple 4 : 80 % de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 20% de cendres volantes
Pour un C30/37 avec un dosage en liant équivalent minimum de 330 kg

Selon le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206/CN, $A/(A+C) \leq 0,2$

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant :

- 287 kg de CEM II/A-LL 42,5 R CE CP2 NF et 72 kg de cendres volantes (si $k = 0,6$)

Exemple 5 : CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF (avec 15 % de laitier) et laitier de haut-fourneau

La combinaison (ciment + laitier) doit comporter au minimum 35 % de laitier ; le CEM II/A-S considéré contenant déjà $x = 15$ % de laitier, le mélange devra comporter au minimum : pourcentage de laitier à ajouter = $0,35 - (0,65 \times x)/(1-x) = 0,35 - (0,65 \times 0,15)/(1 - 0,15) = 0,235$ soit 23,5 %

Il faut ajouter 24 % de laitier de haut-fourneau en tant qu'addition, soit par exemple 76 % de CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF (avec 15 % de laitier) et 24 % de laitier de haut-fourneau

Pour un C30/37 avec un dosage en liant équivalent minimum de 330 kg ; selon le tableau NAF.1 de la norme NF EN 206/CN, $A/(A + C) \leq 0,2$

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant :

- 269 kg de CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF et 68 kg de laitier de haut-fourneau (avec $k = 0,9$)
- Auquel il faut ajouter $((24 \times 269) / 76) - 68 = 17$ kg de laitier de haut-fourneau pour respecter la quantité minimale de 35 % des préconisations RSI mais non comptabilisés dans le liant équivalent
- Le liant est donc constitué de 269 kg de CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF et 85 kg de laitier de haut-fourneau

Selon le tableau NA.F.3 de la norme NF EN 206/CN (béton d'ingénierie), $A/(A+C) \leq 0,35$

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant :

- 259 kg de CEM II/A-S 52,5 N CE PM-CP2 NF et 80 kg de laitier de haut-fourneau (avec $k = 0,9$)

Exemple 6 : CEM II/A-V 42,5 N CE CP2 NF (avec 13 % de cendres volantes) et cendres volantes

La combinaison (ciment + cendres volantes) doit comporter au minimum 20 % de cendres volantes ; le CEM II/A-V considéré contenant déjà $x = 13$ % de cendres volantes, le mélange devra comporter au minimum : pourcentage de cendres volantes à ajouter = $0,20 - (0,80 \times x)/(1-x) = 0,20 - (0,80 \times 0,13)/(1 - 0,13) = 0,08$ soit 8 %

Il faut ajouter 8 % de cendres volantes en tant qu'addition, soit par exemple 92 % de CEM II/A-V 42,5 N CE CP2 NF (avec 13 % de cendres volantes) et 8 % de cendres volantes

Pour un C30/37 avec un dosage en liant équivalent minimum de 330 kg ; selon le tableau NA.F.1 de la norme NF EN 206/CN, $A/(A+C) \leq 0,2$

Il faut respecter le dosage en liant équivalent suivant si 8 % de cendres volantes sont introduites :

- 314 kg de CEM II/A-V 42,5 N CE CP2 NF et 27 kg de cendres volantes (avec $k = 0,6$)

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

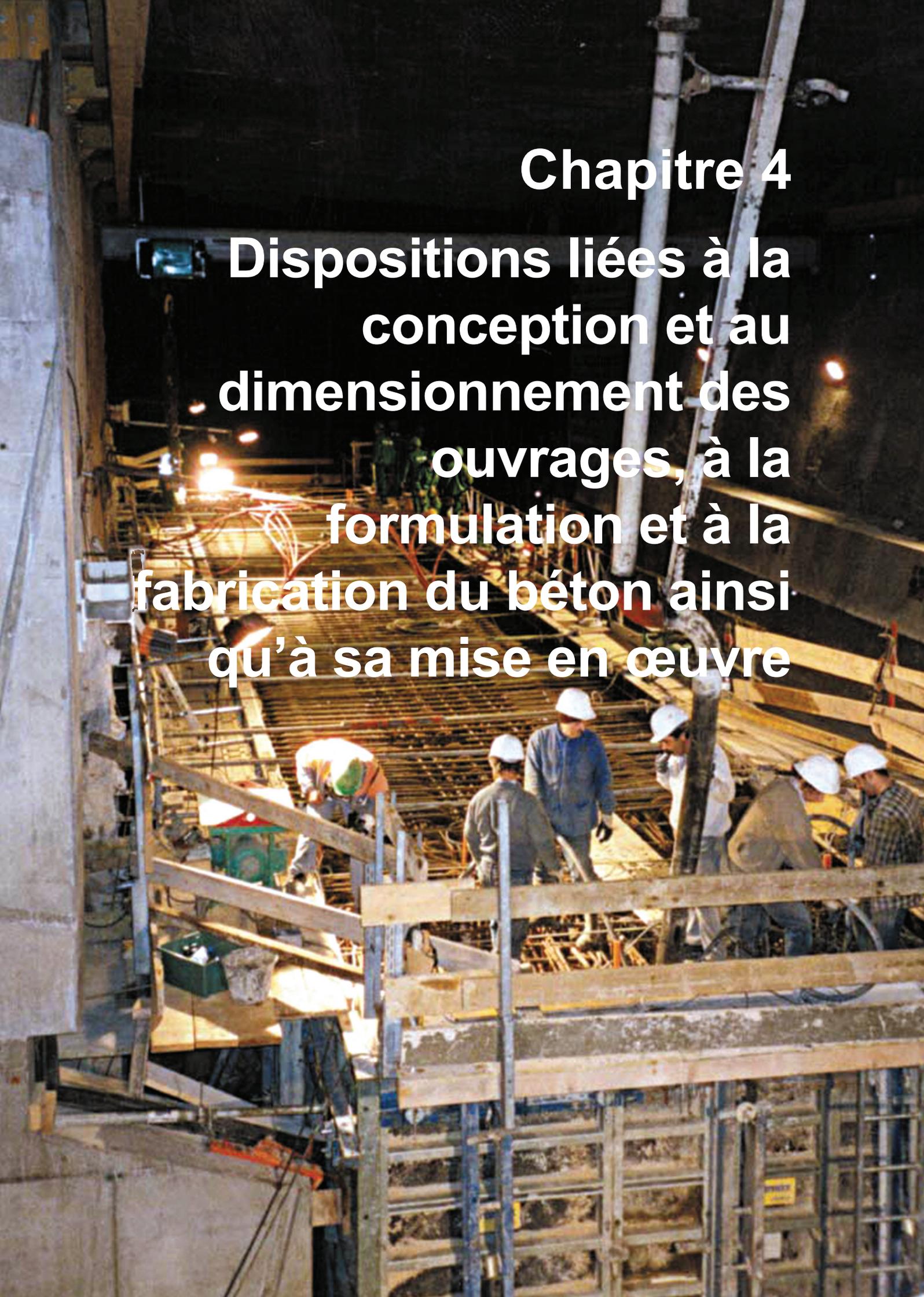


Photo de la page 27

Bétonnage de nuit avec refroidissement d'une poutre du pont d'Aquitaine

Crédit : VINCI Construction

4.1 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.

4.2 Dispositions liées à la conception et au dimensionnement des ouvrages

4.2.1 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 œuvre 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 œuvre 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.

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.) (voir le guide LCPC « *Protection des bétons* », la norme NF P 95-103 et le guide d'application GA P 18-902). L'application d'une peinture est une solution qui n'a qu'une très faible efficacité pour lutter contre les effets de la RSI 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, etc.), 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.

* 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 Sétra. Sur les dispositions techniques à mettre en œuvre, le guide STER 81 publié par le Sétra et ses deux mises à jour sont les documents à utiliser.

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.

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 avec un produit souple capable de suivre l'ouverture future éventuelle des fissures ; diverses techniques existent telles que le pontage, l'injection, etc.

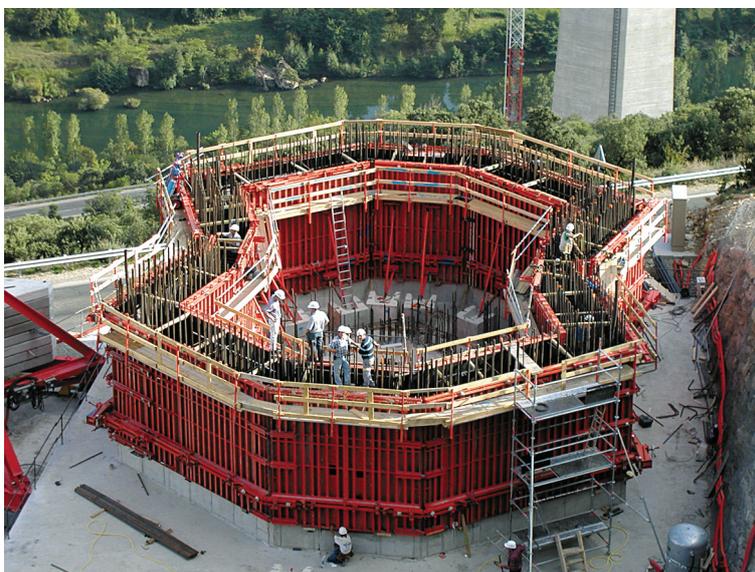
Pour les autres parties, il convient de se référer au guide LCPC sur la protection du béton, à la norme NF P 95-103 et au GA P 18-902, ainsi qu'à la note d'information du Sétra (CTOA N° 25) : « Ne pas confondre étanchéité de surface de tablier et protection du béton ».

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

4.2.2 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.

Viaduc de Millau, pile P1, levée 24, préparation du bétonnage



Crédit photo : Eiffage Construction

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/m^3 de CEM I 52,5 N), la diminution typique de la température maximale est de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ environ.

Piles du pont de la rivière Saint-Étienne à La Réunion



Crédit photo : photothèque VINCI et ses filiales, Thierry Roux

4.3 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 mètre) se traduit par une diminution de la température maximale de 15 °C environ.

4.4 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 thermique du béton.

La capacité thermique 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 thermique de chacun des constituants du béton. Le tableau suivant fournit un ordre de grandeur des capacités thermiques 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 4

Ordre de grandeur des capacités thermiques de divers constituants du béton, pour 1 m³ de béton

Constituants	Masse (kg)	Capacité thermique massique (kJ / (kg . K)) [#]	Capacité thermique des constituants (kJ / K)
Gravillons calcaires secs	1050	0,84	882
Sable silico-calcaire sec	750	0,80	600
Ciment	400	0,75	300
Eau	200	3,76	752
Total			2534

D'après L. Divet - ERLPC OA 40 [1] - La capacité thermique de l'eau en cours d'hydratation dans des pièces massives est plutôt de 3,76 et non 4,18 kJ / (kg . K) (voir NF EN 196-9).

Refroidissement du béton par azote liquide sur le chantier de construction du Puento del Atlantico au Panama



Crédit photo : photothèque VINCI et ses filiales

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

- utilisation d'eau de gâchage froide ou réfrigérée ;
- refroidissement des granulats (par aspersion 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), la diminution de la température maximale atteinte est de 3 °C environ ;
- grâce à un arrosage des gravillons avec de l'eau froide (permettant d'abaisser leur température de 10 °C), la diminution de la température maximale atteinte 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 de la température 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.

Bétonnage de nuit d'une poutre du pont d'Aquitaine avec dispositif de refroidissement par circulation d'eau



Crédit photo : VINCI construction

4.5 Dispositions liées à la mise en œuvre du béton

4.5.1 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 donné 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 atteinte 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.

4.5.2 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 boucher les conduits avec un coulis de ciment).

Vue en détail d'un système de refroidissement du béton dans la masse.
Construction du *Puente del Atlantico* au Panama



Crédit photo : photothèque VINCI et ses filiales

4.5.3 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.

Utilisation de coffrages métalliques pour la construction des piles du viaduc de la nouvelle route du littoral à La Réunion



Crédit photo : photothèque Viaduc Littoral, Sébastien Marchal

4.6 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 thermo-hygrométriques de la production et du stockage, afin d'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.

Piles en cours de préfabrication pour la construction du viaduc de la nouvelle route du littoral à La Réunion



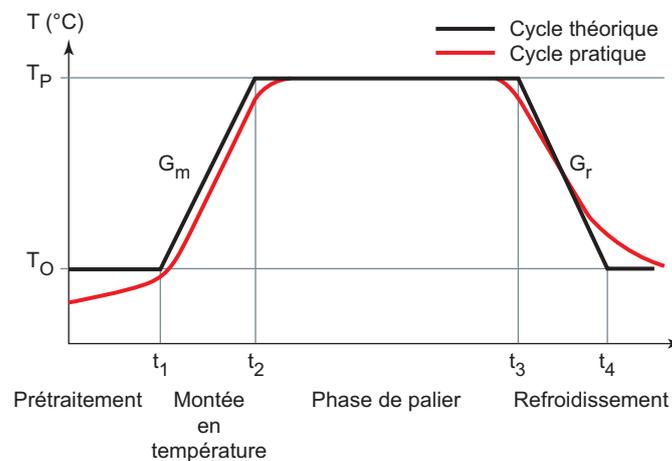
Crédit photo : photothèque Viaduc Littoral, Sébastien Marchal

Dans sa forme la plus générale, un cycle thermique comporte quatre phases (figure 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 de ces phases.

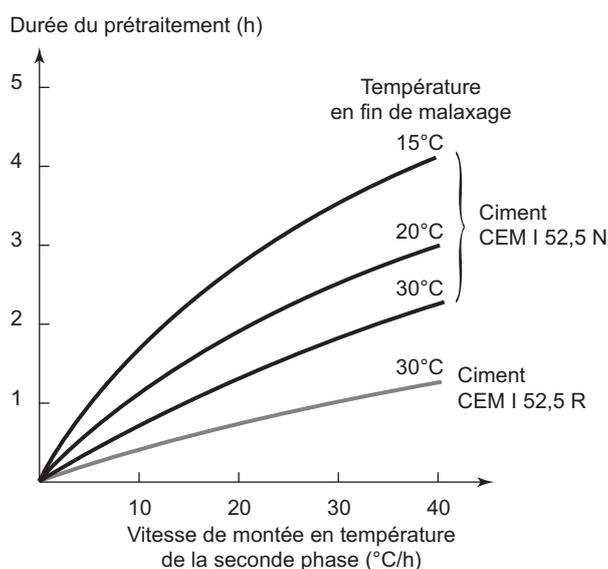
Figure 1
Forme générale d'un cycle



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 (figure 2).

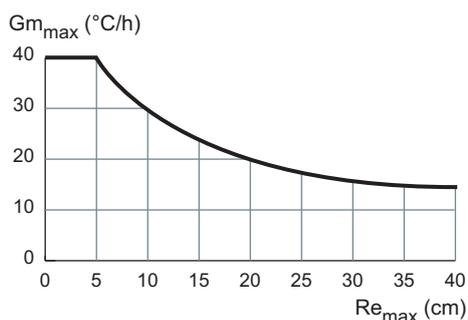
Figure 2
Influence du type de ciment et de la vitesse de montée en température sur la durée de la phase de prétraitement



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).

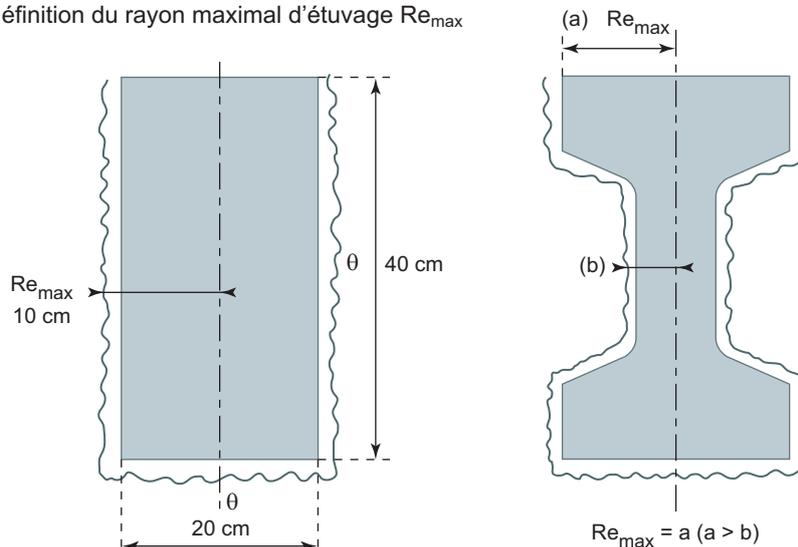
Figure 3
Valeurs de la vitesse maximale de montée en température $G_{m_{max}}$ en fonction du rayon d'étuvage Re_{max}



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 (figure 4).

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 1 et 3 heures pour 85 °C, 4 et 12 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

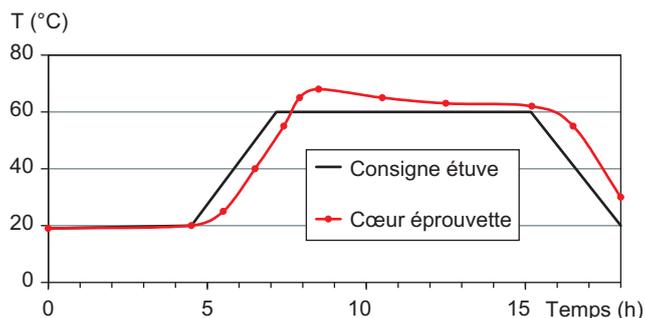
Le refroidissement doit être également réalisé de façon homogène. Les désordres sont en effet plus imputables aux différences de température qui existent entre les différents points d'un produit qu'à la vitesse de refroidissement elle-même. La vitesse de refroidissement de la surface est supérieure à celle au cœur. La norme NF EN 13369 stipule que la différence de température entre les parties adjacentes* du produit pendant le chauffage et le refroidissement doit être limitée à 20 °C.

* Dans le cadre des présentes recommandations, les parties adjacentes sont considérées comme étant le cœur et la surface du produit.

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 de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm à 18 heures et à 28 jours sont respectivement égales à 39 et 59,5 MPa.

Figure 5
Exemple de cycle thermique



Annexe 1.

Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne

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 3 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 GranDuBé (grandeurs associées à la durabilité des bétons) [3] :

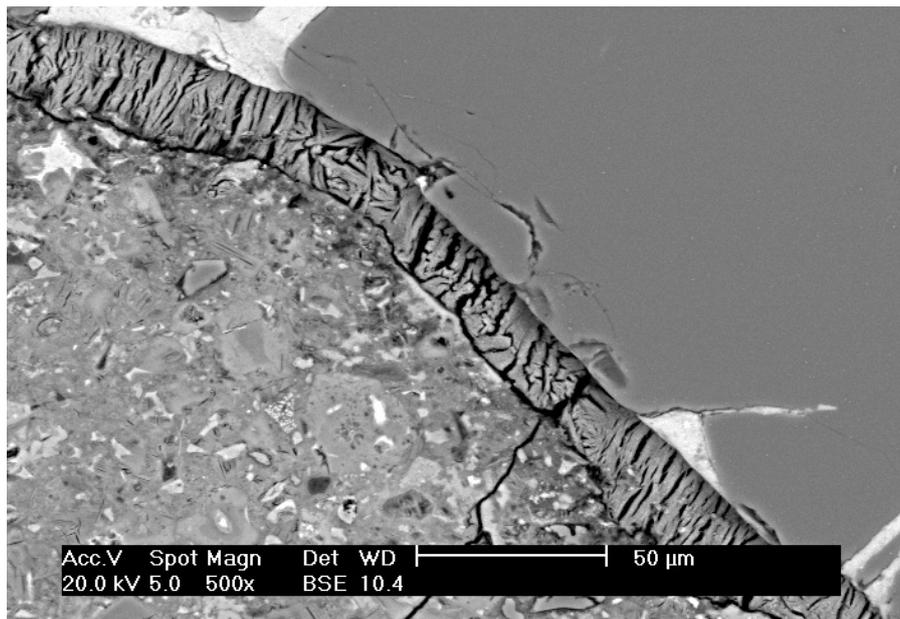
- l'ettringite de formation primaire qui ne provoque pas d'expansion ;
- l'ettringite de formation secondaire qui peut provoquer une expansion ;
- l'ettringite de formation différée consécutive à une élévation de température subie par le béton au jeune âge, qui peut aussi provoquer une expansion.

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 essentiellement 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 sulfates 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.

Couche d'ettringite différée à l'interface entre un granulat et la pâte de ciment



Crédit photo : Béatrice Desrues, Ifsttar

Les mécanismes physico-chimiques de la 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 remobilisables, de la précipitation différée de l'ettringite et de l'expansion qui se traduit par la fissuration du béton [4].

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 sulfates 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 sulfates 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 initiale, 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 puissent être vraiment dissociés.

Conséquences de la RSI sur les propriétés mécaniques

Le développement d'une RSI génère des gonflements qui altèrent les caractéristiques mécaniques du béton en fonction de l'amplitude de la réaction. Dans la suite de ce paragraphe, on analyse les évolutions des caractéristiques mécaniques de béton dont la résistance à 28 jours est de l'ordre de 35 à 40 MPa.

Pour des bétons exposés à des cycles thermiques représentatifs d'ouvrages massifs (palier de température constante de 81 °C durant 3 jours), Martin [5] obtient des chutes de résistance à la compression de plus de 75 % pour un béton ayant développé sous l'effet de la RSI une expansion libre maximale de l'ordre de 1,4 % (béton testé après environ 1 450 jours de vieillissement). Ce même matériau subit une dégradation du module d'Young de près de 90 % (module d'Young déterminé par régression linéaire de la courbe contrainte-déformation sur 3 cycles de chargement entre 5 et environ 30 % de la résistance en compression du béton). Ces chutes drastiques de performances mécaniques sont néanmoins à mettre en relation avec la très forte amplitude d'expansion subie par ce matériau. En effet, dans le cas d'une expansion libre plus modérée (0,12 %), Martin [5] observe une chute du module d'Young bien moindre, d'environ 14 % après 1 350 jours.



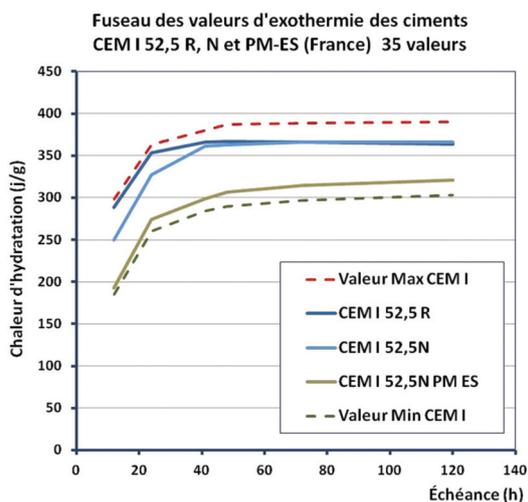
Annexe 2.

Rappel 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, la vitesse du dégagement de chaleur ainsi que la sensibilité de cette vitesse à la température varient sensiblement.

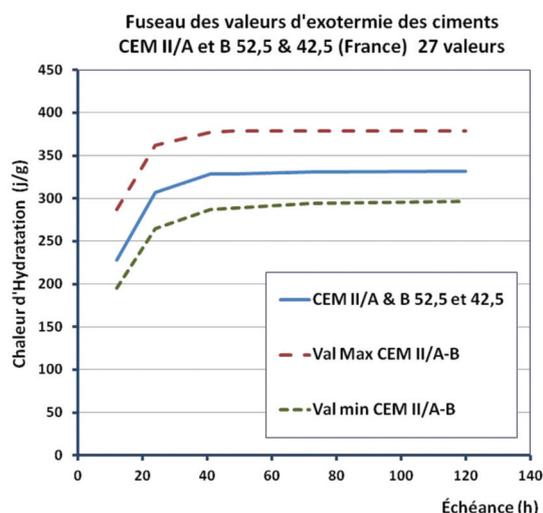
On présente ci-dessous, à titre d'exemple, 4 figures donnant sous forme de minimum, moyenne et maximum, les courbes de chaleurs dégagées par des ciments manufacturés français de types différents, mesurées sur mortiers normalisés conservés en conditions quasi-adiabatiques en bouteille de Langavant (bouteille calorifugée).

Figure 6
Exemples de courbes de dégagement de chaleur pour différents ciments de type CEM I 52,5 produits en France (valeurs moyennes issues des données de 4 producteurs : 35 valeurs)



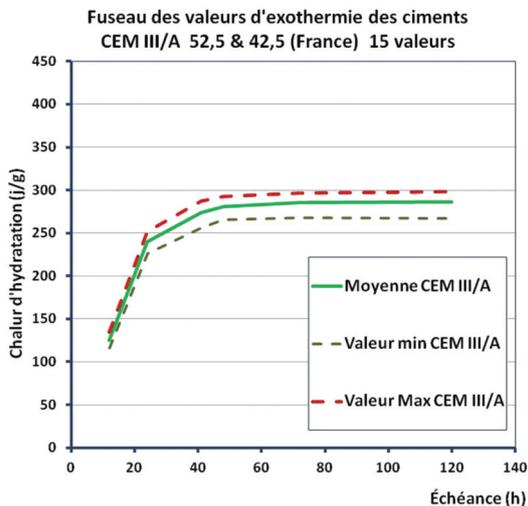
Source : ATILH

Figure 7
Exemples de courbes de dégagement de chaleur pour différents ciments de type CEM II/A et B 42,5 et 52,5 produits en France (valeurs moyennes issues des données de 4 producteurs ; 27 valeurs pour principalement CEM II/A-LL, CEM II/A-S et CEM-II/B-M(S-LL))



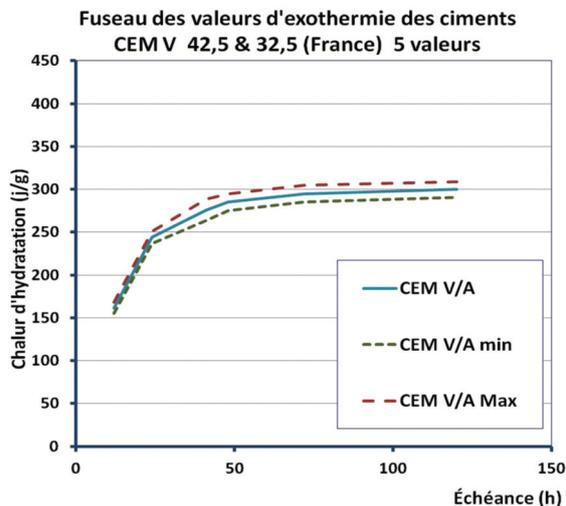
Source : ATILH

Figure 8
Exemples de courbes de dégagement de chaleur pour différents ciments de type CEM III/A produits en France (valeurs moyennes issues des données de 3 producteurs ; 15 valeurs)



Source : ATILH

Figure 9
Exemples de courbes de dégagement de chaleur pour différents ciments de type CEM V/A produits en France (valeurs moyennes issues des données de 2 producteurs ; 5 valeurs)

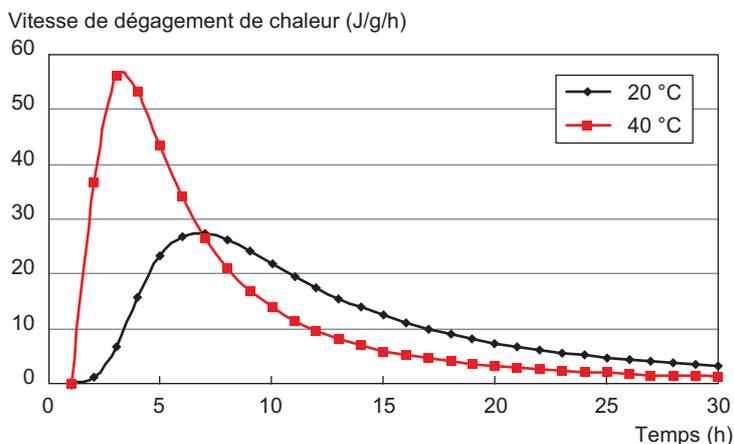


Source : ATILH

Une étude conduite par le comité technique CEN/TC 51 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 (Q41) variaient entre 210 et 320 J/g. Les rapports entre la chaleur dégagée à 41 h (Q41) et la chaleur dégagée à 72 h (Q72) 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.

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 ciment est plus réactif au jeune âge, comme l'illustre le tableau 5 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 5
Pour différents types de ciment, un exemple de valeurs de coefficient

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 RSI.

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 RSI 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 3 du présent document.

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

- 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 la même vitesse de montée) peut donner une diminution de 20 % (Mamillan [2]).

Pour des bétons formulés avec des ciments de type CEM I 52,5 R et pour des bétons soumis à des échauffements représentatifs de pièces massives (différents profils de traitements thermiques appliqués avec des températures maximales comprises entre 71 °C et 81 °C et des durées d'application variant de 1 à 3 jours), Kchakech [6] a obtenu des résistances à la compression mesurées à 28 jours systématiquement plus faibles d'environ 20 % (voire près de 30 % dans certains cas).

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

Annexe 3.

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 donné les principes de formulation de béton prévus au CCTP.

Cette annexe permet donc une estimation de l'élévation maximale de température 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. Compte tenu de la température maximale T_{max} à ne pas dépasser au cœur de l'élément considéré (correspondant au niveau de prévention recherché), on en déduit la valeur maximale possible T_{ini_max} pour la température initiale du béton frais au moment du bétonnage.

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. C'est aussi pourquoi, dans tous les exemples traités plus loin, les valeurs des températures obtenues ont été arrondies au degré le plus proche.

2. Données pour l'estimation de la température initiale maximale autorisée

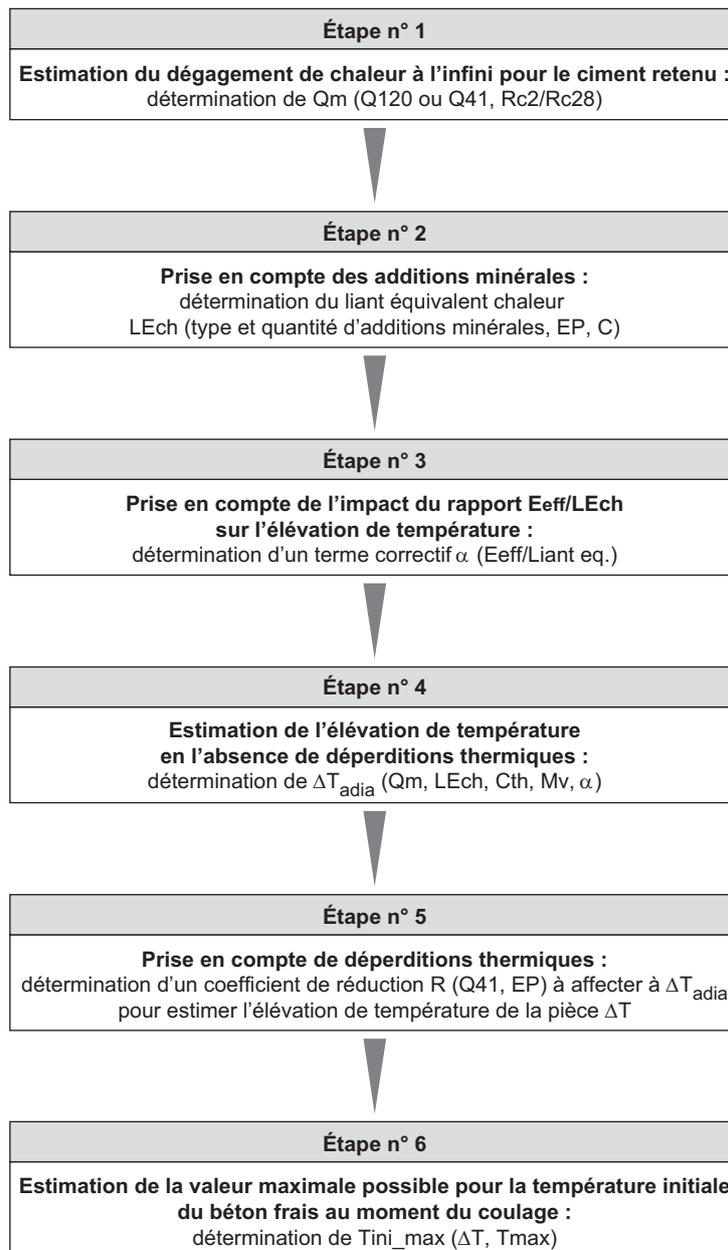
La méthode simplifiée nécessite la détermination des paramètres suivants :

- Température maximale autorisée selon le niveau de prévention T_{limite} (en °C), cf. chapitre 3 ;
- dosage en ciment du béton C (en kg/m^3) ;
- dosage en addition minérale A (en kg/m^3) ;
- masse volumique du béton M_v (en kg/m^3) ;
- dosage en eau efficace E_{eff} du béton (en kg/m^3) ;
- résistance en compression à 2 jours du ciment R_{c2} (en MPa) selon NF EN 196-1 ;
- résistance en compression à 28 jours du ciment R_{c28} (en MPa) selon NF EN 196-1 ;
- chaleurs d'hydratation du ciment selon NF EN 196-9 à l'échéance de 41 h Q_{41} ou, préférablement, de 120 h Q_{120} (en kJ/kg) ;
- 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, cf. notion de pièce critique paragraphe 1 du chapitre 1).

Les données ciment sont généralement disponibles dans les fiches techniques et/ou sur demande auprès des fournisseurs. La donnée du Q120 est particulièrement adaptée pour les ciments ayant un dégagement de chaleur lent comme les CEM III et CEM V. 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 et décrites en détail à la suite de ce chapitre.



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

Deux cas sont considérés ici : soit la chaleur Q_{120} est disponible soit seulement la chaleur Q_{41} est disponible. Si Q_{120} est disponible, on privilégiera cette donnée dans l'estimation de la chaleur à l'infini du ciment.

L'estimation de la chaleur à l'infini du ciment Q_m (en kJ/kg) est obtenue au moyen des formules suivantes :

- pour les ciments CEM I et CEM II : $Q_m = 1,05 Q_{120}$ [eq. 1] ;
- pour les ciments CEM III et CEM V : $Q_m = 1,15 Q_{120}$ [eq. 2].

Ou bien si Q_{120} n'est pas disponible

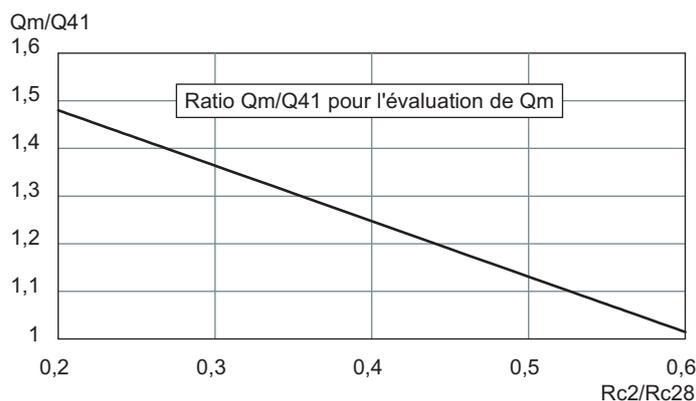
$$Q_m = \max (Q_{41}, Q_{41} \times \text{ratio_}Q_m/Q_{41}) \text{ [eq. 3]}$$

où la valeur $\text{ratio_}Q_m/Q_{41}$ est donnée par l'équation suivante sur la base du rapport R_{c2}/R_{c28} :

$$\text{ratio_}Q_m/Q_{41} = 1,71 - 1,16 R_{c2}/R_{c28} \text{ [eq. 4]}$$

La figure 11 illustre cette relation.

Figure 11
Relation Q_m/Q_{41} fonction de R_{c2}/R_{c28} [eq. 4]



Les ciments CEM IV ne sont pas considérés dans cette annexe en raison de l'absence de ce type de ciment en France et donc de données les concernant. Ils sortent donc du champ d'application de l'annexe.

3.2 Prise en compte des additions minérales

Les additions participent au dégagement de chaleur du béton. Pour les prendre en compte, on introduit la notion de « liant équivalent chaleur » noté LE_{ch} (en kg/m^3) par la formule :

$$LE_{ch} = C + \sum K'_i A_i \text{ [eq. 5]}$$

où A_i est le dosage en addition i

K'_i le coefficient de pondération de l'addition i donné par les équations suivantes :

- cas de la fumée de silice $K'_{fs} = 1$;
- cas du métakaolin $K'_m = 1$;
- cas des additions calcaires et des additions siliceuses, $K'_a = 0$;
- cas des cendres volantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } EP \leq 1 \text{ m, } K'_{cv} = 0 \\ \text{si } 1 \text{ m} < EP \leq 5 \text{ m, } K'_{cv} = -0,0357 EP^2 + 0,4143 EP - 0,38 \text{ [eq. 6]} \\ \text{si } EP > 5 \text{ m, } K'_{cv} = 0,8 \end{array} \right.$$

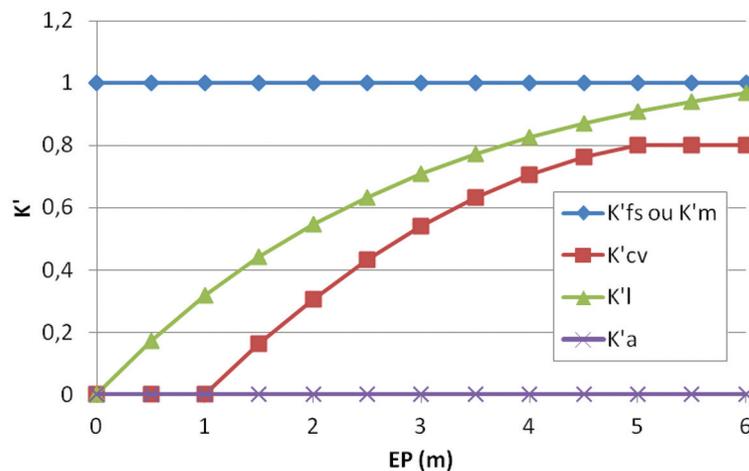
- cas des laitiers : $K'_l = 1,12 (1 - \exp(-EP/3))$ [eq. 7].

En l'absence d'addition, on prend $LE_{ch} = C$

La figure 12 donne l'évolution des coefficients de pondération des additions en fonction de l'épaisseur.

Figure 12

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



3.3 Prise en compte de l'impact du rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$.

L'élévation de température découlant de la chaleur dégagée par le liant est également fonction du rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$ (eau efficace sur liant équivalent) qui conditionne le taux d'hydratation maximal à long terme. « Liant eq. » est ici le liant équivalent au sens de la norme NF EN 206/CN (se rapporter à cette norme pour le détail du calcul). 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 multiplicatif α donné par la relation suivante :

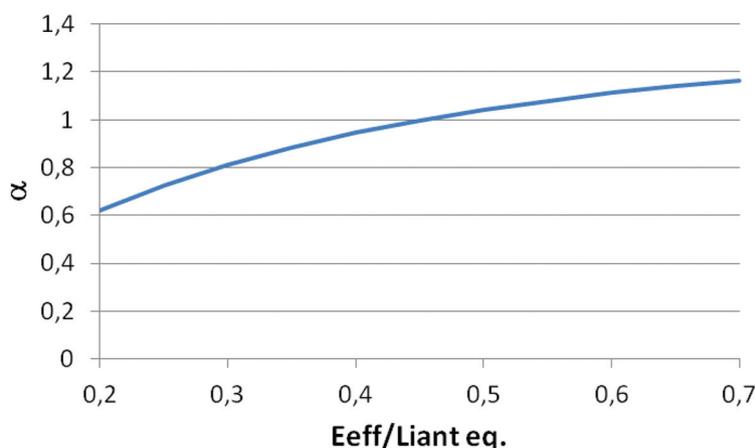
$$\alpha = 1,29 \left(1 - e^{-3,3 \frac{E_{eff}}{Liant_{eq}}} \right) \text{ [eq. 8]}$$

La figure 13 donne la variation du terme correctif avec le rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$.

Figure 13

Correction de l'élévation de température liée au rapport Eeff/Liant eq. [eq. 8]

La formule est calée pour ne donner aucune correction ($\alpha = 1$) pour un rapport Eeff/Liant eq. égal à 0,45



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 :

$$\Delta T_{\text{adia}} = \alpha \times (Q_m \times LE_{\text{ch}}) / (C_{\text{th}} \times M_v) \quad [\text{eq. 9}]$$

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 réactivité 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 la formule suivante, le coefficient de réduction R (compris entre 0 et 1) qui permet de prendre en compte ces déperditions, la réactivité du ciment étant exprimée au travers du Q41 :

$$R(\text{EP}, \text{Q41}) = \min(1 ; (1 / (1 + ((\text{MAX}(0,3 ; - 0,0057 \cdot \text{Q41} + 2,0558)) / \text{EP})^{1,5}))) \quad [\text{eq. 10}]$$

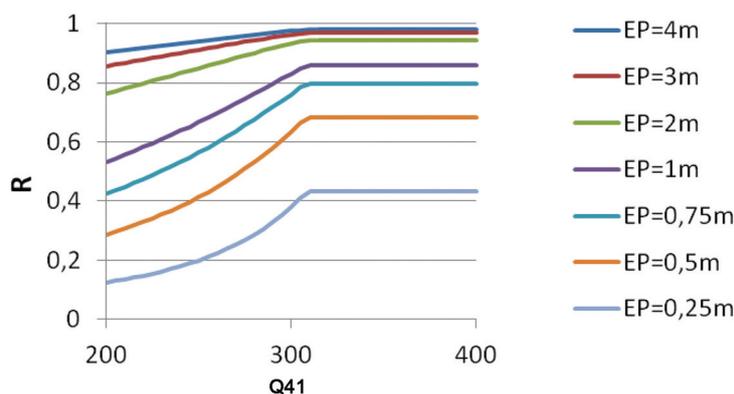
Si l'épaisseur EP est supérieure ou égale à 5 m, on prend $R = 1$

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

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

Figure 14

Coefficient de réduction R



3.6 Estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais au moment du coulage

La température initiale maximale du béton T_{ini_max} est calculée par la formule :

$$T_{ini_max} = T_{max} - \Delta T \text{ [eq. 11]}$$

où T_{max} est la température maximale autorisée du béton dans la structure.

Si la valeur de la température de béton frais prévisible au moment du bétonnage dans les conditions du chantier est supérieure à la valeur T_{ini_max} , 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 RSI.

4. Exemples d'application

Dans les exemples ci-dessous, les résultats des calculs des ratios (Q_m/Q_{41}) et ($E_{eff}/Liant$ eq.), de α , de K' et de R sont arrondis à deux décimales, les autres résultats sont arrondis à l'unité près.

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

Données :

- Type de ciment	CEM I
- 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	$E_{eff} = 175 \text{ kg/m}^3$
- 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 41h du ciment	$Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$
- Épaisseur de la pièce	$EP = 1 \text{ m}$
- Température maximale autorisée	$T_{limite} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$

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

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,40$

L'utilisation de l'équation 4 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'addition minérale $A = 0 \text{ kg/m}^3$

Dans ce cas, le liant équivalent chaleur $LE_{ch} = C$

Étape n° 3 : prise en compte de l'impact du rapport $E_{eff}/Liant$ eq.

Dans cet exemple, $E_{eff}/Liant \text{ eq.} = E_{eff}/C = 0,50$. L'équation 8 donne alors $\alpha = 1,04$

Étape n° 4 : estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{adia} = \alpha \times (Q_m \times LE_{ch}) / (C_{th} \times M_v) = 1,04 \times (383 \times 350) / (1 \times 2400) = 58 \text{ }^\circ\text{C}$$

Étape n° 5 : prise en compte des déperditions thermiques

L'équation 10 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 :

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

Étape n° 6 : estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais

La température maximale autorisée du béton étant de $65 \text{ }^\circ\text{C}$, la température initiale du béton frais au moment du bétonnage doit être égale au plus à $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Données :

- Type de ciment	CEM I
- Dosage en ciment du béton	$C = 320 \text{ kg/m}^3$
- Dosage en additions minérales : cendres ($k = 0,4$)	$A = 80 \text{ kg/ m}^3$
- 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 41h du ciment	$Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$
- Épaisseur de la pièce	$EP = 3 \text{ m}$
- Température maximale autorisée	$T_{\text{limite}} = 75 \text{ °C}$

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

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,40$

L'utilisation de l'équation 4 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 chaleur $LE_{\text{ch}} = C + K' \times A$. Le coefficient $K'_{cv} = 0,54$ est issu de l'équation 6 pour $EP = 3,00 \text{ m}$ et des cendres volantes silico-alumineuses

$$LE_{\text{ch}} = C + K' \times A = 320 + 0,54 \times 80 = 363 \text{ kg/m}^3$$

Étape n° 3 : prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq.}$

Dans cet exemple, $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq.} = E_{\text{eff}}/(C + 0,4 \times A) = 175/352 = 0,50$.

L'équation 8 donne alors $\alpha = 1,04$

Étape n° 4 : estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{\text{adia}} = \alpha \times (Q_m \times LE_{\text{ch}})/(C_{\text{th}} \times M_v) = 1,04 \times (383 \times 363)/(1 \times 2400) = 60 \text{ °C}$$

Étape n° 5 : prise en compte des déperditions thermiques

L'équation 10, avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 306 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 3,00 \text{ m}$, conduit au coefficient de réduction $R = 0,97$.

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

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}} = 0,97 \times 60 = 58 \text{ °C}$$

Étape n° 6 : estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais

La température maximale autorisée du béton étant de 75 °C , la température initiale du béton frais au moment du bétonnage doit être égale au plus à 17 °C

4.3 Exemple n° 3 : béton avec addition de laitier (pièce d'épaisseur 1,50 m)

Données :

- Type de ciment	CEM I
- Dosage en ciment du béton	$C = 180 \text{ kg/ m}^3$
- Dosage en additions minérales : laitier ($k = 0,9$)	$A = 140 \text{ kg/ m}^3$
- Masse volumique du béton	$M_v = 2460 \text{ kg/ m}^3$
- Dosage en eau efficace du béton	$E_{\text{eff}} = 153 \text{ kg/ m}^3$
- Résistance en compression à 2 jours du ciment	$R_{c2} = 34,6 \text{ MPa}$
- Résistance en compression à 28 jours du ciment	$R_{c28} = 65 \text{ MPa}$
- Chaleur d'hydratation à 41h du ciment	$Q_{41} = 297 \text{ kJ/kg}$
- Épaisseur de la pièce	$EP = 1,50 \text{ m}$
- Température maximale autorisée	$T_{\text{limite}} = 65 \text{ °C}$

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

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,53$

L'utilisation de l'équation 4 permet de déterminer le ratio $Q_m/Q_{41} = 1,09$

La chaleur maximale dégagée à long terme est alors $Q_m = Q_{41} \times 1,09 = 324 \text{ kJ/kg}$

Étape n° 2 : prise en compte des additions minérales

La formulation de béton comporte du laitier moulu avec un dosage $A = 140 \text{ kg/ m}^3$

Le coefficient $K'l$, du fait de l'épaisseur de 1,5 m, vaut 0,44

Dans ce cas, le liant équivalent chaleur est égal à $LE_{\text{ch}} = C + 0,44 \times A = 242 \text{ kg/m}^3$

Étape n° 3 : prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq.}$

Dans cet exemple, $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq.} = E_{\text{eff}}/(C + 0,9 \times A) = 153/306 = 0,50$ qui correspond, à partir de l'équation 8, au terme correctif $\alpha = 1,04$

Étape n° 4 : estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{\text{adia}} = \alpha \times (Q_m \times LE_{\text{ch}})/(C_{\text{th}} \times M_v) = 1,04 \times (324 \times 242)/(1 \times 2460) = 33 \text{ °C}$$

Étape n° 5 : prise en compte des déperditions thermiques

L'utilisation de l'équation 10 avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 297 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 1,50 \text{ m}$ conduit au coefficient de réduction $R = 0,89$.

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

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}} = 0,89 \times 33 = 29 \text{ °C}$$

Étape n° 6 : estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais

La température maximale autorisée du béton étant de 65 °C , la température initiale du béton frais au moment du bétonnage doit être égale au plus à 36 °C .

4.4 Exemple n° 4 : béton avec CEM III, comparaison de la prise en compte de Q120 ou de Q41

Données :

- Type de ciment	CEM III
- Dosage en ciment du béton	$C = 385 \text{ kg/ m}^3$
- Masse volumique du béton	$Mv = 2310 \text{ kg/ m}^3$
- Dosage en eau efficace du béton	$E_{\text{eff}} = 165 \text{ kg/ m}^3$
- Résistance en compression à 2 jours du ciment	$R_{c2} = 15 \text{ MPa}$
- Résistance en compression à 28 jours du ciment	$R_{c28} = 56 \text{ MPa}$
- Chaleur d'hydratation à 41h du ciment	$Q_{41} = 220 \text{ kJ/kg}$
- Chaleur d'hydratation à 120h du ciment	$Q_{120} = 250 \text{ kJ/kg}$
- Épaisseur de la pièce	$EP = 1,80 \text{ m}$
- Température maximale autorisée	$T_{\text{limite}} = 65 \text{ °C}$

1er cas : prise en compte de Q120

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

La chaleur maximale dégagée à long terme est donnée par l'équation $Q_m = 1,15 Q_{120} = 1,15 \times 250 = 288 \text{ kJ/kg}$

Étape n° 2 : prise en compte des additions minérales

La formulation de béton ne comportant pas d'addition, $LE_{\text{ch}} = C = 385 \text{ kg/ m}^3$

Étape n° 3 : prise en compte de l'impact du rapport $E_{\text{eff}} / L_{\text{iant eq}}$.

Dans cet exemple, $E_{\text{eff}} / L_{\text{iant eq}} = E_{\text{eff}} / C = 0,43$ qui correspond, à partir de l'équation 8, au terme correctif $\alpha = 0,98$

Étape n° 4 : estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{\text{adia}} = \alpha \times (Q_m \times LE_{\text{ch}}) / (C_{\text{th}} \times Mv) = 0,98 \times (288 \times 385) / (1 \times 2310) = 47 \text{ °C}$$

Étape n° 5 : prise en compte des déperditions thermiques

L'utilisation de l'équation 10 avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 220 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 1,80 \text{ m}$ conduit au coefficient de réduction $R = 0,77$

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

$$\Delta T = R \times \Delta T_{\text{adia}} = 0,77 \times 47 = 36 \text{ °C}$$

Étape n° 6 : estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais

La température maximale autorisée du béton étant de 65 °C , la température initiale du béton frais au moment du bétonnage doit être égale au plus à 29 °C .

2e cas : prise en compte de Q41 (calcul sans prise en compte de Q120)

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

Avec les données précédentes, le rapport $R_{c2}/R_{c28} = 0,27$

L'utilisation de l'équation 4 permet de déterminer le ratio $Q_m/Q_{41} = 1,40$

La chaleur maximale dégagée à long terme est alors $Q_m = Q_{41} \times 1,40 = 308 \text{ kJ/kg}$

Étape n° 2 : prise en compte des additions minérales

La formulation de béton ne comportant pas d'addition, $LE_{ch} = C = 385 \text{ kg/m}^3$

Étape n° 3 : prise en compte de l'impact du rapport $E_{eff}/Liant \text{ eq.}$

Dans cet exemple, $E_{eff}/Liant \text{ eq.} = E_{eff}/C = 0,43$ qui correspond, à partir de l'équation 8, au terme correctif $\alpha = 0,98$

Étape n° 4 : estimation de l'élévation de température en l'absence de déperditions thermiques

$$\Delta T_{adia} = \alpha \times (Q_m \times LE_{ch}) / (C_{th} \times M_v) = 0,98 \times (308 \times 385) / (1 \times 2310) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

Étape n° 5 : prise en compte des déperditions thermiques

L'utilisation de l'équation 10 avec la chaleur d'hydratation du ciment $Q_{41} = 220 \text{ kJ/kg}$ et une épaisseur de la pièce à réaliser $EP = 1,80 \text{ m}$ conduit au coefficient de réduction $R = 0,77$

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

$$\Delta T = R \times \Delta T_{adia} = 0,77 \times 50 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$$

Étape n° 6 : estimation de la valeur maximale possible pour la température initiale du béton frais

La température maximale autorisée du béton étant de $65 \text{ }^\circ\text{C}$, la température initiale du béton frais au moment du bétonnage doit être égale au plus à $26 \text{ }^\circ\text{C}$

5. Comparaison de la méthode avec des cas réels

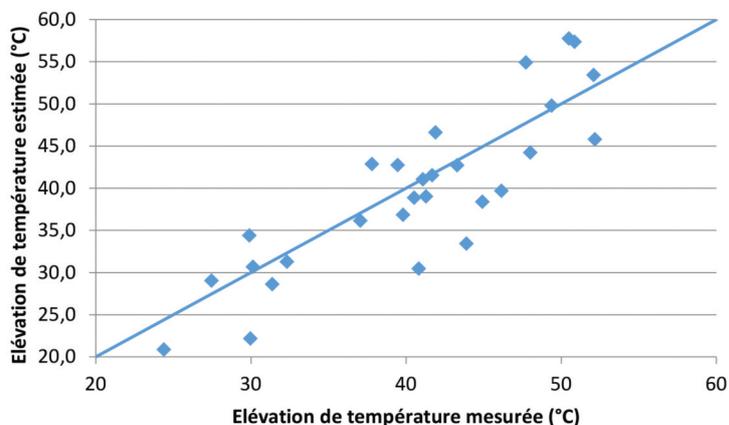
Afin d'illustrer la capacité prédictive de la méthode présentée dans cette annexe, celle-ci est comparée à des mesures sur divers bétons, tout d'abord en conditions adiabatiques puis sur des chantiers. Cette dernière comparaison permet d'estimer une « précision » de la méthode.

5.1 Comparaison avec des mesures de dégagement de chaleur adiabatique

Dans le cadre de la thèse d'Agathe Bourchy [7], des mesures de dégagement de chaleur adiabatique de différents bétons ont été réalisés sur 27 bétons. Ceux-ci avaient des compositions variées utilisant un CEM I, un CEM II, des fumées de silice et du laitier. Ces mesures sont comparées aux élévations de températures obtenues à l'aide de l'annexe 3 à la fin de l'étape 4 (figure 15). La comparaison fait clairement apparaître que le modèle prédit assez correctement l'élévation de température en conditions adiabatiques.

Pour caractériser l'erreur du modèle par rapport aux mesures, l'indicateur RMSE est utilisé. Le RMSE (*root mean square error*) est la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations. Il donne l'écart-type de l'erreur de prédiction du modèle et donc une indication de sa précision. Dans le cas des données de la figure 15, le RMSE est égal à $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

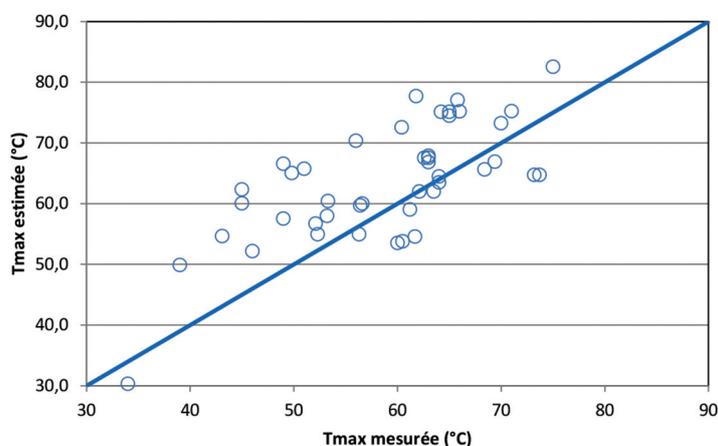
Figure 15
 Comparaison des élévations de température en conditions adiabatiques
 sur 27 bétons de la thèse d'A. Bourchy [7]



5.2 Comparaison avec des mesures *in-situ*

L'ensemble de la méthode est appliquée au cas de 44 ouvrages réels pour lesquels on connaît l'élévation de température qui a été mesurée dans l'ouvrage. Dans ces ouvrages, des bétons de formulations très différentes, avec des ciments de types différents et des additions variées, ont été mis en œuvre. La figure 16 permet de comparer les températures maximales estimées avec les mesures sur ouvrages. On constate que l'application de la méthode proposée dans cette annexe conduit en général à une légère surestimation de la température maximale (ce qui était recherché afin d'être sécuritaire). Le RMSE est égal à 8,5 °C ce qui fait apparaître, par comparaison au RMSE obtenu à la fin de l'étape 4, que l'étape 5 (estimation des déperditions thermiques) introduit une incertitude supplémentaire importante. Ceci peut sans doute être expliqué par la non prise en compte de différents paramètres (température initiale du béton, température extérieure, type de coffrage, etc.).

Figure 16
 Comparaison des températures maximales sur 44 cas réels





Annexe 4.

Essai performantiel

Généralités

Un essai de performance sur éprouvette de béton a été développé en partenariat entre l'Association technique et industrielle des liants hydrauliques (ATILH), le Centre d'étude et de recherche 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 RSI 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 % (m/m) 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 » vis-à-vis de la RSI des couples béton/échauffement utilisés.

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 4 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 (1 ou 2) portant sur le seuil de gonflement et sur la pente de la courbe de gonflement est respecté :

Critère 1

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

Critère 2

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

Annexe 5.

Méthodologie de qualification des ciments CEM I SR3 et SR5 conformes à la marque NF - Liants hydrauliques (NF002)

Objet

Prévention des risques liés à la RSI : méthodologie de qualification d'aptitude à l'usage des ciments CEM I SR3 et SR5 conformes à la marque NF - Liants hydrauliques (NF002) pour des échauffements de durée supérieure à 10 h.

Principe

Confection d'un « béton d'essai » et évaluation à partir de l'essai performantiel LPC n° 66 selon un cycle thermique donné pour un niveau de prévention souhaité.

Béton d'essai

Le dosage en ciment CEM I SR3 ou SR5 sera fixé à 400 kg/m³. Le rapport Efficace/C sera également constant et égal à 0,45. L'affaissement sera maintenu à une valeur de 180 +/- 30 mm à l'aide d'un plastifiant ou superplastifiant si besoin. Des granulats siliceux secs provenant de la sablière Palvadeau (granulats NF, non réactifs à l'alcali-réaction) seront utilisés à un dosage de 1 800 kg/m³ selon la répartition granulaire donnée dans le tableau 6. Par ailleurs, l'essai doit être dopé en alcalins suivant la norme NF P18-454 avec un dosage éventuellement majoré pour intégrer une marge de variabilité supplémentaire.

Tableau 6
Proportion massique (kg/m³) de chaque fraction granulaire

Sable 0/0,315 mm	Sable 0,315/1 mm	Sable 1/4 mm	Gravillon 4/8 mm	Gravillon 8/12,5 mm	Gravillon 12,5/20 mm
130	130	450	210	570	310

Cycles thermiques

Pour le niveau de prévention Bs, (couvrant Cs et Ds) : température du béton frais à température ambiante, 12 heures de montée en température à 85 °C, 3 jours de maintien du palier à 85 °C, redescente à 20 °C en 32 heures (taux de refroidissement de 2 °C/h).

Pour le niveau de prévention Cs (couvrant Ds) : température du béton frais à température ambiante, 12 heures de montée en température à 80 °C, 3 jours de maintien du palier à 80 °C, redescente à 20 °C en 30 heures (taux de refroidissement de 2 °C/h).

Pour le niveau de prévention Ds : température du béton frais à température ambiante, 12 heures de montée en température à 75 °C, 3 jours de maintien du palier à 75 °C, redescente à 20 °C en 27 heures (taux de refroidissement de 2 °C/h).

Évaluation

Le ciment CEM I SR3 ou SR5 sera qualifié pour l'emploi au niveau de prévention souhaité si le niveau d'expansion du « béton d'essai » associé au cycle thermique préconisé est inférieur aux valeurs limites spécifiées aux échéances de temps définies à l'annexe 4 du présent document.

Précautions de mise en œuvre

Les bétons réellement mis en œuvre dans l'élément d'ouvrage ne devront pas contenir un dosage en ciment supérieur à celui du « béton d'essai ». Par ailleurs, le niveau en alcalins du béton mis en œuvre ne devra pas excéder celui du « béton d'essai ».

Vérification par simulation

Il faudra par ailleurs vérifier à l'aide de l'outil de simulation que la température maximale du béton mis en œuvre dans l'élément d'ouvrage considéré correspond au même niveau de prévention que celui utilisé pour le « béton d'essai ».

Durée de validité de la qualification du ciment

Cette méthode permet de qualifier un ciment pour une durée d'utilisation de 5 ans sous réserve d'emploi du même clinker. Les bétons qui seront utilisés dans le cadre de cette qualification ne devront pas avoir une teneur en alcalins supérieure à la teneur maximale utilisée dans le « béton d'essai ».

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 critère de conformité des ciments courants
Norme NF EN 206/CN	Béton Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité
Norme NF EN 450-1	Cendres volantes pour béton Définitions, spécifications et critères de conformité
Norme NF EN 1992	Eurocode 2 - Calcul des structures en béton
Norme NF 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 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, spécifications et critères de conformité
Norme NF P15-319	Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates
Norme NF EN 15743	Ciment sursulfaté - Composition, spécifications et critères de conformité
Norme NF EN 13263-1	Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité
Norme XP P18-420	Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline
Norme NF P18-424	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau
Norme NF P18-425	Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau
Norme NF P18-454	Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance

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 NF P18-513	Addition pour béton hydraulique - Métakaolin - Spécifications et critères de conformité - Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons
Norme NF EN 13670/CN	Exécution des structures en béton - Complément national à la NF EN 13670/2013
Norme NF P 95-103	Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés
Fascicule FD P18-464	Béton - Dispositions pour prévenir à les phénomènes d'alcali-réaction
Référenciel de certification	NF-Liants hydrauliques, NF 002

Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil. Guide d'application GA P 18-902.

Aide au choix des classes d'exposition pour les ouvrages d'art. Fascicule 02, EFB (École française du béton), **juin 2010**.

PAVOINE, A., DIVET, L., *Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne - Essai de performance.* Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Méthode d'essai n° 66, **2007**.

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Guide technique du LCPC, **décembre 2003**.

CCTG. Fascicule 65, notamment les articles 8.2.1.2.1 ; 8.3.2.1.2.3 ; 8.4.2.5 et 8.5.4.2 dispositions à prendre aux stades de l'épreuve d'étude et des contrôles.

CCTG. Fascicule 67. Titre I. *Étanchéité des ouvrages d'art. Support en béton de ciment.* N° spécial 85-32 bis. Décret 93-1164.

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement. Guide technique Sétra - LCPC, **décembre 2002**.

STER 81. *Surfaçage, étanchéité et couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art.* Guide technique, Sétra, réf. : F 8210, **1981**.

Étanchéité constituée par des complexes mis en œuvre par des moyens à haute cadence. Mise à jour n° 1, Sétra, réf. : F 8210, **juillet 1990**.

Réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art. Réparations localisées. Guide technique, mise à jour n° 2, Sétra, réf. : F0112, **mai 2001**.

Ne pas confondre étanchéité de surface de tablier et protection du béton. Fiche et note d'information n° 25, série OA, Sétra, réf. : 0422 w, **août 2004**.

Bibliographie

- [1] L. DIVET, *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, 227 p, **2001**.
- [2] M. MAMILLAN, *Accélération du durcissement du béton par la chaleur*. Techniques de l'ingénieur, Réf : C2235 v1, février **1993**.
- [3] G. ARLIGUIE, H. HORNAIN, *GranDuBé, mesures des grandeurs associées à la durabilité des bétons*. Presses de l'ENPC, **2007**.
- [4] X. BRUNETAUD, *Étude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne*. PhD thesis, École centrale de Paris, **2005**.
- [5] R.-P. MARTIN, *Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne du béton*. PhD thesis, Université Paris-Est, **2010**.
- [6] B. KCHAKECH, *Étude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la réaction sulfatique interne*. PhD thesis, Université Paris-Est, **2015**.
- [7] A. BOURCHY, *Relation chaleur d'hydratation du ciment – montée en température et contraintes générées au jeune âge du béton*. PhD thesis, Université Paris-Est, **2018**.

Fiche bibliographique

Collection techniques et méthodes		Sous collection guide technique	
ISSN 2492-5438		ISBN Papier : 978-2-85782-737-5 Pdf : 978-2-85782-738-2	
Référence GTI5			
Titre Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne			
Auteur Ifsttar			
Coordinateurs de la publication Bruno Godart et Loïc Divet, Ifsttar			
Contributeurs Les membres du groupe de travail			
Date de publication Octobre 2017		Langue Français	
Résumé <p>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. Elle peut se rencontrer avec deux types de béton : les bétons traités thermiquement et les bétons coulés en place dans des pièces dites critiques.</p> <p>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). À 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.</p> <p>Les présentes recommandations combinent approche performantielle et prescriptions de moyens, et constituent une actualisation des précédentes recommandations de 2007 auxquelles elles se substituent, en tenant compte des nouvelles connaissances acquises depuis.</p>			
Mots clés Ouvrage, béton, réaction sulfatique interne, ettringite différée, prévention, précaution, température, échauffement, conception, formulation, mise en oeuvre			
Nombre de pages 70		Prix Papier 30 euros PDF gratuit	

Publication data form

Collection technics and methods		Sub collection technical guide	
ISSN 2492-5438		ISBN Print : 978-2-85782-737-5 Pdf : 978-2-85782-738-2	
Reference GTI5			
Title Recommendations for preventing disorders due to delayed ettringite formation			
Author Ifsttar			
Coordinators of the publication Bruno Godart, Ifsttar and Loïc Divet, Ifsttar			
Contributors The members of the working group			
Publication date October 2017		Language French	
Summary <p>The aim of the present recommendations is to limit the risk of disorders occurring due to an internal sulphate reaction. The latter is caused by the delayed formation of ettringite in a cementitious material and occurs in particular because of a significant heating of the concrete intervened several hours or several days after its casting. It causes an expansion of concrete which in turn generates a cracking of the structures. This reaction can be encountered with two types of concrete: heat-treated concretes and concretes cast in place in so-called critical elements.</p> <p>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 wet environment. They set the level of prevention to be achieved according to the category of the structure (or to the part of the 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 contain provisions relating to the design and dimensioning of structures, the composition and manufacture of concrete, and its pouring.</p> <p>The present recommendations combine a performance approach and specifications of means, and are an update of the previous 2007 recommendations they are replacing, taking into account new knowledge gained since.</p>			
Key words Concrete, internal sulphate reaction, delayed ettringite, prevention, precaution, temperature, heating, design, composition, placing			
Number of pages 70		Price Print 30 euros PDF free	



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. Elle 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). À 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.

Les présentes recommandations combinent approche performantielle et prescriptions de moyens, et constituent une actualisation des précédentes recommandations de 2007 auxquelles elles se substituent, en tenant compte des nouvelles connaissances acquises depuis.



LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR



ISSN : 2492-5438

Référence : GTI5

Crédit photo :
photothèque Viaduc Littoral,
Sébastien Marchal

Octobre 2017