Recommandations pour la prévention des désordres liés aux réactions sulfatiques internes

Janvier 2020

Sommaire

1. Généralités sur la RSI
2. Principe de la démarche de prévention
3. Document de référence
4. Détermination du niveau de prévention
    1. Catégorie d'ouvrage ou de partie d'ouvrage
    2. Classes d'exposition vis-à-vis la RSI
    3. Niveaux de prévention
5. Précautions à appliquer vis-à-vis du risque de RSI
6. Choix du ciment adapté
7. Estimation de la température atteinte dans la structure
8. Essai de performance
9. Principales recommandations des préventions vis-à-vis du risque de RSI
    1. Pour la conception des ouvrages
    2. Pour la formulation des bétons
    3. Pour la fabrication et le transport du béton
    4. Pour la mise en oeuvre du béton

Généralités sur la RSI

La Réaction Sulfatique Interne est déclenchée et se développe par la conjonction de plusieurs paramètres : la présence d'eau, la température du **béton** élevée au jeune âge, et la durée du maintien de cette température initiale élevée ainsi que les teneurs en sulfates et en aluminates du **ciment** et la teneur en alcalins du béton.

La RSI est une pathologie susceptible d'endommager les bétons. Elle est générée par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire durci, plusieurs années après la réalisation de l'ouvrage et sans apport de sulfate externe.

Cette réaction peut se produire à cause d'un échauffement important du béton (au sein de pièces dites critiques pour lesquelles la chaleur dégagée par l'hydratation du ciment n'est que partiellement évacuée vers l'extérieur, ce qui conduit à une élévation importante de la température du béton) au jeune âge (plusieurs heures ou plusieurs jours après son coulage).

Elle peut apparaitre aussi pour des ouvrages coulés en période de chaleur.

Elle provoque un gonflement interne du béton qui se manifeste par l'apparition à la surface du béton d'une fissuration multidirectionnelle à maille de l'ordre de 10 à 30 cm.

Principe de la démarche de prévention

De nombreuses recherches, aussi bien au sein du réseau des laboratoires de l'équipement que dans les centres de recherches de l'industrie cimentière et de l'industrie du **béton** , ont permis de mettre au point et de valider des principes de prévention à mettre en œuvre.

Un groupe de travail piloté par l'IFSTTAR a rédigé des recommandations pour se prémunir contre le développement de Réactions Sulfatiques Internes (RSI) et limiter le risque d'apparition des désordres induits par ces réactions. Elles font l'objet d'un guide technique publié en octobre 2017 intitulé : « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne ».

Ces recommandations précisent des dispositions constructives à mettre en œuvre pour la conception et la réalisation de l'ouvrage (structures de Génie Civil et bâtiment) et des précautions à appliquer pour la **formulation** et la mise en œuvre du béton vis-à-vis de désordres dus à la réaction sulfatique interne, susceptible de se développer pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage. Elles sont complémentaires des spécifications de la **norme** NF EN 206/CN.

Elles prennent en compte :

- la catégorie d'ouvrage
- les actions environnementales auxquelles seront soumises les parties d'ouvrages concernées pendent la durée d'utilisation de la structure
- les conditions thermiques du béton lors de sa mise en œuvre et au cours de son durcissement.

Les précautions à mettre en œuvre sont fonction d'un niveau de prévention défini pour chaque partie d'ouvrage potentiellement « critique ». Sont concernées a priori par ces recommandations uniquement les parties d'ouvrages en béton de dimensions importantes en contact avec l'eau ou soumises à une ambiance humide. Il s'agit de pièces massives ou « critiques » pour lesquelles la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment (la **prise** et le durcissement du béton génèrent un dégagement de chaleur dû à l'exothermie des réactions d'hydratation) est peu évacuée vers l'extérieur, ce qui conduit à une élévation importante de la température au cœur du béton pendant les premières heures et jours suivant le bétonnage.

Le principe de la démarche préventive , qui viseà limiter l'échauffement du béton (caractérisé par la température Tmax susceptible d'été atteinte au sein de l'ouvrage) au cours des premières heures et jours après le bétonnage, pour les « pièces critiques » ,consiste à identifier les parties d'ouvrages susceptibles d'être soumises au phénomène de RSI (produits préfabriqués subissant un traitement thermique ou parties d'ouvrages coulées en place : semelles épaisses , chevêtres , voiles épais ...) puis à définir un niveau de prévention nécessaire en fonction de la catégorie de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage (catégories I à III), traduisant le niveau de risque que le maitre d'ouvrage est prêt à accepter et des classes d'exposition spécifiques à la RSI , (intégrant l'importance des paramètres eau et humidité) traduisant l'environnement dans lequel se trouve le béton.

A chaque niveau de prévention (As,Bs, Cs, Ds) correspond un niveau de précautions à appliquer.

Nota : Une pièce critique est une pièce 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 (épaisseur d'au moins 0,25m).

Nota : le choix de la catégorie d'ouvrage ou de la partie d'ouvrage, I, II ou III, relève de la responsabilité du maître d'ouvrage.

Le guide propose des dispositions pour limiter les risques potentiels de Réaction Sulfatique Interne.

- Au niveau de la conception et du dimensionnement des ouvrages, en évitant les zones de stagnation d'eau, en protégeant le béton par une étanchéité, en privilégiant les pièces creuses.
- Au niveau de la formulation et des constituants du béton : il est préférable de choisir des ciments à faible chaleur d'hydratation.

Ces dispositions doivent permettre :

- de limiter la température atteinte au sein du béton
- d'éviter les contacts prolongés du béton avec l'eau.

Nota : la norme NF EN 206/CN garantit la durabilité de la structure vis-à-vis des agressions extérieures, des réactions sulfatiques externes en particulier, via le choix des classes d'exposition, mais pas de la RSI.

Document de référence

Guide IFSTTAR 2017 « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne »

Sommaire du guide :

- Chapitre 1 Généralités sur la réaction sulfatique interne
- Chapitre 2 Détermination du niveau de prévention nécessaire
- Chapitre 3 Précautions en fonction des niveaux de prévention
- 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 oeuvre
- Annexe 1 Quelques précisions sur la réaction sulfatique interne
- Annexe 2 Rappel sur l'exothermie des bétons
- Annexe 3 Estimation des températures atteintes dans les structures à construire
- Annexe 4 Essai performantiel
- Annexe 5 Méthodologie de qualification des ciments SR3 et SR5 conformes à la marque NF liants hydrauliques

Nota : ces recommandations constituent une actualisation des recommandations de 2007 auxquelles elles se substituent. Elles intègrent les nouvelles connaissances et les évolutions normatives et sont le fruit de la recherche de ces dernières années sur le phénomène de RSI

Détermination du niveau de prévention

Catégorie d'ouvrage ou de partie d'ouvrage

Les ouvrages (ou partie d'ouvrages) sont classés en 3 catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de la RSI que le maitre d'ouvrage est prêt à accepter.

Le choix de la catégorie d'ouvrage est de la responsabilité du maitre d'ouvrage.

Nota : la catégorie d'ouvrage dépend de la nature de l'ouvrage, de son utilisation, de son entretien ultérieur et du niveau de conséquences en termes de sécurité que le maitre d'ouvrage est prêt à accepter.

Catégorie d'ouvrage	Niveau de conséquences d'apparition des désordres	Exemples d'ouvrage ou de partie d'ouvrage
I	Faibles ou acceptables	-Ouvrage en béton de classe de résistance inférieure à C 16/20 -Eléments non porteur de bâtiment -Eléments aisément remplaçables -Ouvrages provisoires -La plupart des produits préfabriquées non structurels
II	Peu tolérables	-Eléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de Génie Civil -La plupart des produits préfabriqués structurels
III	Inacceptables ou quasi inacceptables	-Bâtiments réacteurs de centrales nucléaires -Barrages, tunnels -Ponts et viaducs exceptionnels -Monuments ou bâtiments de prestige -Traverses de chemin de fer

Classes d'exposition vis-à-vis la RSI

Classes d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs

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 moy -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 -Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumise à des condensations fréquentes
XH3	• En contact 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 -Eléments de structure marine -Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau -Un grand nombre de fondations

Nota : Ces classes d'expositions spécifiques à la RSI sont complémentaires des 18 classes d'expositions de la norme NF EN 206/CN.

Les classes d'exposition relatives à la RSI doivent être spécifiées dans le CCTP pour chaque partie d'ouvrage susceptible d'être soumis à un risque de RSI.

Le choix de ces classes d'exposition est aussi de la responsabilité du maitre d'ouvrage.

Niveaux de prévention

On distingue 4 niveaux de prévention As,Bs,Cs et Ds. Le niveau de prévention est obtenu en croisant la catégorie d'ouvrage et la classe d'exposition vis-à-vis de la RSI à laquelle est soumise l'ouvrage ou la partie d'ouvrage considérée. A chaque niveau de prévention correspond un type de précaution à appliquer et des vérifications à effectuer.

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

Précautions à appliquer vis-à-vis du risque de RSI

Le principe de prévention repose essentiellement sur la limitation de l'échauffement du béton, représentée par la température Tmax susceptible d'être atteinte au sein du béton de la partie d'ouvrage concernée.

Il convient de mettre en œuvre pour chaque partie d'ouvrage concernée les précautions adaptées à chaque niveau de prévention, obtenu par croisement des classes d'exposition spécifiques à la RSI et des catégories d'ouvrages.

Le niveau de prévention doit être spécifié dans le CCTP. Au sein d'un même ouvrage les différentes parties susceptibles d'être soumises au phénomène de RSI peuvent faire l'objet de niveaux de prévention différents.

Les précautions sont modulées en fonction du niveau de prévention. Elles portent sur la formulation, la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton.

Les précautions à appliquer sont fonction de chaque niveau de prévention par ordre croissant d'exigences de As à Ds. Elles visent essentiellement à limiter la température maximale susceptible d'être atteinte au cœur de chaque pièce critique.

A titre d'exemples :

- Les précautions à appliquer pour le cas le plus courant, soit le niveau de prévention As, est la suivante :
- la température T_{max} susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage doit rester inférieure à 85°C.

Si la température atteinte dans le béton ne peut rester inférieure à 85°C, elle doit rester inférieure à 90°C avec la condition suivante à respecter :

le traitement thermique est maitrisé et la durée de maintien de la température au-delà de 85°C ne doit pas excéder 4 heures.

- Pour le niveau de prévention Bs, l'une des deux précautions suivantes doit être mise en œuvre :
- la température T_{max} doit rester inférieure à 75°C

Si T_{max} ne peut rester inférieure à 75°C, elle doit rester inférieure à 85°C et une des conditions suivantes doit être respectée

- Maitrise du traitement thermique (durée du maintien de la température au-delà de 75°C limitée à 4 heures)
- Utilisation d'un ciment adapté : ES, SR...avec des spécifications particulières
- Vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance

Nota : Pour le détail des précautions à mettre en œuvre pour chaque niveau de prévention, voir le Guide IFSTTAR RSI (pages 21 à 24) en particulier pour le choix du type de ciment adapté.

Limitation de la température maximale susceptible d'être atteinte au cœur du béton

Niveau de prévention	Température maximale du béton Tmax	Température limite du béton Tlimite	Conditions à respecter si température comprise entre
As	85°C	90°C	- Maîtrise du traitement thermique
Bs	75°C	85°C	-Maîtrise du traitement thermique Ou -Ciment adapté Ou -Essai de performance
Cs	70°C	80°C	-Maîtrise du traitement thermique Ou -Ciment adapté Ou -Essai de performance
Ds	65°C	75°C	-Ciment adapté -Essai de performance

Choix du ciment adapte

Exemple du niveau de prévention Bs

Niveau de prévention	Ciment Adapté
Bs	Ciment conforme à la norme NF P 15-319 (ES) (1) Ciment SR conforme à la norme NF EN 197-1 (2) CEM II/B-V , CEM II/B-Q , CEM II/B-M(S-V) avec moins de 20% de cendres volantes CEM III/A,CEM V (3) CEM I ou CEM II A en combinaison avec cendres volantes, laitiers de haut fourneau, fumée de silice ou métakaolins avec des conditions sur les proportions d'additions (4)

Recommandation sur le choix des ciments vis-à-vis de la RSI pour le niveau de prévention Bs

(1)Dans le cas de CEM I et CEM II/A .Teneur en alcalins équivalents actifs du béton limité à 3 kg/m3

(2) Avec des ciments CEM I SR3 et SR5 sous condition

(3) Ciment avec teneur en SO3 inférieur à 3% et dont le C3A du clinker est inférieur à 8%

Un compromis peut s'avérer nécessaire sur le choix du ciment adapté par exemple dans le cas de pièces critiques soumises à un gel sévère associé à des sels de déverglaçage (BETON G+S) et qui seraient susceptibles d'être aussi soumises à un risque de réaction sulfatique interne. En effet les recommandations relatives au gel imposent des dosages élevés en ciment , solution pas favorable pour limiter la température du béton au jeune âge.

La détermination du ciment adapté doit donc faire l'objet très souvent d'une analyse multicritère privilégiant en priorité la durabilité de l'ensemble de l'ouvrage, en respectant les spécifications liées aux classes d'exposition, tout en prenant en compte de manière pertinente les exigences de mise en œuvre.

- Lors de la fabrication (refroidissement des granulats, eau de gâchage froide…) et du transport du béton (réduction du temps de transport et d'attente des toupies).
- Au cours de la mise en œuvre : il convient en particulier d'éviter le coulage des ouvrages en période de fortes chaleurs ou de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour réduire la température du béton, par exemple en incorporant des serpentins dans le béton, dans lesquels on fait circuler de l'eau fraiche) et/ou de privilégier des coffrages non isolants.

Estimation de la température atteinte dans la structure

La prise et le durcissement du béton s'accompagne d'un dégagement de chaleur généré par l'éxothermie des réactions d'hydratation.La quantité de chaleur et la cinétique de dégagement de chaleur varient en fonction en particulier du type de ciment et de son dosage.

Le guide IFSTTAR RSI rappelle (annexe 2) les principes de l'exothermie des réactions d'hydratation et l'incidence du dosage en liant et de sa nature.

L'annexe 3 du guide propose une méthode simplifiée pour estimer l'élévation maximale de température au cœur d'une pièce en béton à partir de quelques paramètres, en particulier :

- l'épaisseur de la pièce
- le dosage en ciment et en addition minérale
- la chaleur d'hydratation du ciment
- les résistances en compression du ciment à 2 jours et à 28 jours
- le dosage en eau efficace du béton
- la température du béton frais …..

L'élévation de température au sein d'une partie d'ouvrage en béton est fonction :

- de l'exothermie en béton
- de la géométrie de la partie d'ouvrage
- de la température initiale du béton lors de sa mise en œuvre dans le coffrage
- de déperditions thermiques liées en particulier au type de coffrage

Ce calcul permet d'évaluer si la partie d'ouvrage doit être considérée comme une pièce critique vis-à-vis des risques de RSI.

Il comprend une succession d'étapes :

- Détermination du dégagement de chaleur induit par le ciment à partir de données propres en particulier à son dosage et sa chaleur d'hydratation
- Prise en compte de la présence éventuelle d'additions minérales
- Intégration des déperditions thermiques

Essai de performance

L'IFSTTAR a développé un essai de performance accéléré sur**béton** permettant d'évaluer la durabilité des couples « Formule de béton et échauffement du béton » vis-à-vis de la formation d'ettringite différée suivie d'expansion, qui soit représentatif des phénomènes observés dans des cas réels et adaptés aux conditions d'exécution, tels que le cycle de traitement thermique appliqué au béton lors de l'étuvage en usine de **préfabrication** et l'échauffement d'une pièce massive, de taille critique, coulée en place sur chantier.

Cet essai consiste à caractériser le risque de gonflement d'un béton vis-à-vis de la RSI. Il permet de valider une**formulation** de béton en déterminant sa réactivité potentielle à la formation différée d'ettringite. Il est définit dans un projet de mode opératoire (réf : LPC n°59 - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne).

Principales recommandations des préventions vis-à-vis du risque de RSI

Pour la conception des ouvrages

Les recommandations de prévention vis-à-vis du risque de RSI visent principalement :

- A limiter la température maximale atteinte au sein du béton à l'état jeune (lors de sa mise en place et dans les premiers jours qui suivent)
- A éviter le contact de la partie d'ouvrage avec l'eau pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage et donc de minimiser la pénétration de l'eau dans la structure

L'ouvrage doit être conçu pour éviter de créer des zones de stagnation d'eau ou des ruissellements .La géométrie de chaque partie d'ouvrage doit permettre grâce à des formes de pentes, d'évacuer rapidement les eaux.

Pour éviter la pénétration de l'eau, il et aussi recommandé de mettre en œuvre des dispositifs d'étanchéité.

Pour limiter la valeur de la température du béton au jeune âge, il est conseillé de concevoir dans la mesure du possible des pièces creuses ou élégies.

Pour la formulation des bétons

Pour réduire l'élévation de température du béton au jeune âge, il convient de le formuler avec un**ciment** le moins exothermique possible et d'en minimiser le dosage. Il est possible aussi d'incorporer des additions en substitution du ciment.

Il est nécessaire d'adapter une optimisation multicritère pour aboutir à une formulation adéquate du béton.

Pour la fabrication et le transport du béton

L'une des solutions pour baisser la température du béton à l'état frais est d'utiliser des**granulats** refroidis et de l'eau froide voire de la glace pour fabriquer le béton.

IL convient aussi de minimiser le temps de transport du béton et d'attente des camions malaxeurs sur le chantier.

Pour la mise en oeuvre du béton

La mise en œuvre du béton est conseillée lors d'une période favorable vis-à-vis de la température ambiante par exemple en fin de journée ou la nuit.

Il est possible aussi de refroidir le béton après sa mise en œuvre en incorporant dans la masse du béton des serpentins constituant un circuit de refroidissement en y faisant circuler de l'eau fraiche.

Il est judicieux d'utiliser des coffrages favorisant les échanges thermiques pour limiter la température dans le béton.

Auteur

Patrick Guiraud

Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes nos archives
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr