

La réaction sulfatique interne (RSI) dans les bétons

**Présentation du phénomène
et
Guide de prévention**

D. Germain - Club OA Rhône Alpes - 16 mai 2008



Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées



N° 9915173



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Introduction

✓ Les sulfates

- ✓ un **risque majeur** d'agression chimique pour le béton
- ✓ un phénomène d'expansion en relation avec la formation d'**ettringite**

✓ Les sources en sulfates peuvent être d'origine :

- ✓ **externe** (sol, liquide, gaz)

dégradation progressive depuis la surface vers le cœur de la pièce en béton

- ✓ **interne : RSI** (formation différée de l'ettringite)

remobilisation des sulfates du ciment

dégradation généralisée de la pièce en béton

✓ La principale cause (indispensable mais pas suffisante)

- ✓ une élévation de la température pendant la prise du béton **T > 65°C**

- ✓ 2 types de béton concernés : - bétons étuvés

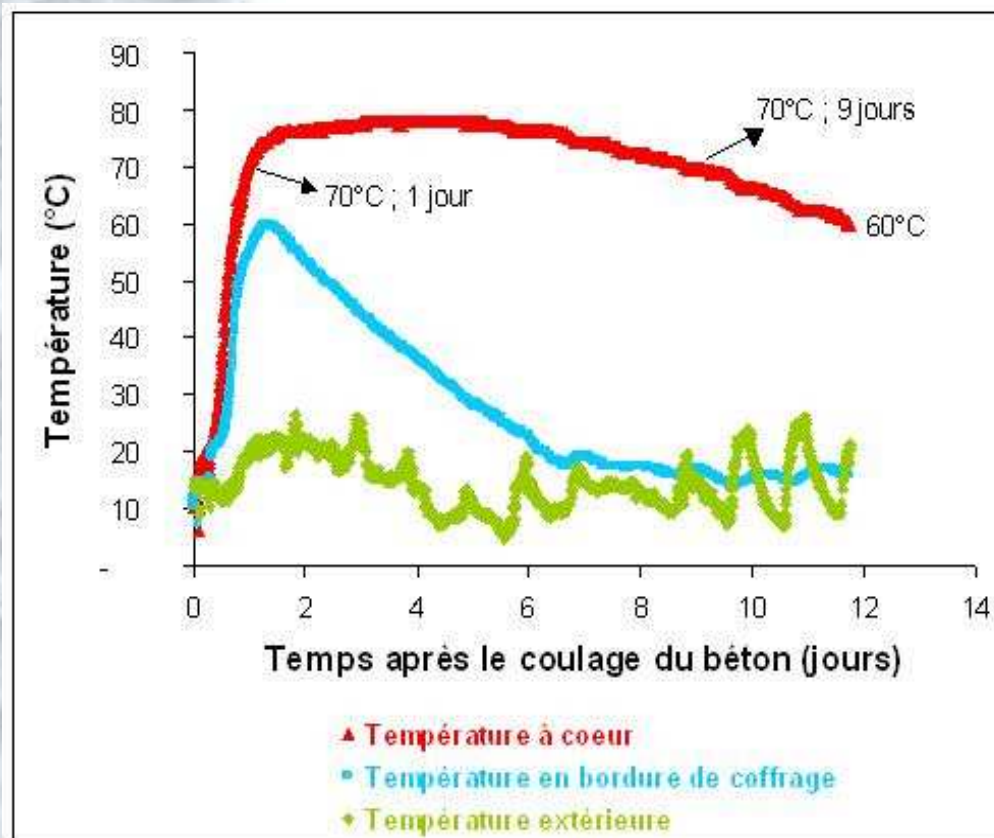
- bétons de pièces massives (ou critiques)

L'esprit de recherche au cœur des réseaux



L'échauffement des bétons de grande masse

- ✓ Exemple d'enregistrements des températures du béton d'une pièce massive (4x5x6 m)



Comparaison béton étuvé / béton massif

- durée de la période de latence
0 à 4 h / 10 à 12 h
- durée de maintien à haute temp.
4 à 10 h / plusieurs jours

L'esprit de recherche au cœur des réseaux



Historique

- ✓ **1987 – 1^{er} cas identifié en préfabrication**

Traverses de chemin de fer

Finlande, Tepponen et Eriksson

- ✓ **1996 – 1^{er} cas dans les bétons coulés en place**

Fondation de pylônes de lignes électriques

Etats Unis, Hime

- ✓ **1997 – 1^{er} cas en France**

Chevêtre sur pile

Pont d'ondes, Divet et al.



Ouvrages atteints





Ouvrages atteints



de recherche au cœur des réseaux

Recommandations (guide 2007)

- ✓ Ces recommandations reprennent certains concepts de base qui ont tendance à être négligés, voire oubliés
- ✓ **structures coulées en place :**
 - ✓ **éviter** des rythmes de construction soutenus au détriment de la durabilité des structures
 - ✓ **optimisation** multicritères du choix du ciment et de la formulation du béton (éviter CEM I 52,5 R dans une pièce massive)
 - ✓ **éviter** le coulage de pièces massives lors des fortes chaleurs si aucune disposition pour limiter l'échauffement
- ✓ **structures constituées de produits préfabriqués :**
 - ✓ **éviter** des T_{max} élevées avec des durées de palier longues



Les principes des recommandations

- ✓ **Nécessité d'une démarche préventive...**
- ✓ **Viser une durabilité à l'échelle de 100 ans...**
- ✓ **Éviter de bouleverser les pratiques de formulation des bétons**
- ✓ **Éviter de bouleverser les pratiques de construction**
- ✓ **En tant que réaction de gonflement interne, essayer de suivre une démarche proche de celle suivie pour l'alcali-réaction...**



La démarche préventive

✓ Les bases de la méthode

- ✓ Identifier les parties d'ouvrages susceptibles de développer une RSI
- ✓ Choisir la catégorie dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie)
- ✓ Caractériser l'environnement



Implique le niveau de prévention qui détermine alors les précautions à prendre



Identifier les parties d'ouvrage

- ✓ **Les produits préfabriqués en béton subissant un traitement thermique**
- ✓ **Les parties d'ouvrages définies comme étant des pièces critiques**
 - ✓ **La notion de pièce massive n'est pas pertinente** ⇨ annexe 3
 - Semelle de 1,5 m d'épaisseur :
C30/37 dosé à 370 kg/m³ de CEM III/A 42,5 N ⇨ **T_{max} = 49°C**
 - Voile de 0,6 m d'épaisseur :
C40/50 dosé à 400 kg/m³ de CEM I 42,5 R ⇨ **T_{max} = 65°C**
 - ✓ **Définition d'une pièce critique** : Pièce de 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 (Epaisseur au moins supérieure à 0,25 m)

Catégoriser l'ouvrage ou la pièce

- ✓ **3 catégories représentatives du niveau de risque vis-à-vis de la RSI que l'on est prêt à accepter pour un ouvrage :**

⇒ **Choix décidé par le maître d'ouvrage**

- ✓ **Ce choix est fonction :**
 - ✓ **de la nature de l'ouvrage**
 - ✓ **de sa destination**
 - ✓ **des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée**
 - ✓ **de son entretien ultérieur**

Catégoriser l'ouvrage ou la pièce

Catégorie	Exemples d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrage
Catégorie I conséquences faibles ou acceptables	<ul style="list-style-type: none">-Ouvrages de classe de résistance inférieure à C 16/20-Éléments non porteurs des bâtiments-Éléments aisément remplaçables-Ouvrages provisoires-La plupart des produits préfabriqués non structurels
Catégorie II conséquences peu tolérables	<ul style="list-style-type: none">-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	<ul style="list-style-type: none">-Bâtiments réacteurs des centrales nucléaires et aéroréfrigérants-Barrages-Tunnels-Ponts ou viaducs exceptionnels-Monuments ou bâtiments de prestige-Traverses de chemin de fer



Classes d'exposition

- ✓ **La norme NF EN-206-1 ne définit pas de classe d'exposition adaptée à la RSI**
- ✓ **3 classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont créées**
 - ✓ prennent en compte le fait que l'eau ou une hygrométrie ambiante élevée sont des facteurs nécessaires à la RSI
- ✓ Ces 3 classes viennent en complément des 18 classes d'exposition définies dans la norme NF EN 206-1
- ✓ Elles doivent être spécifiées au CCTP pour chaque partie d'ouvrage

Classes d'exposition

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

✚ Choix du niveau de prévention

➔ de la responsabilité du maître d'ouvrage

Classe d'exposition Catégorie d'ouvrage	XH1	XH2	XH3
I Risque faible ou acceptable	As	As	As
II Risque peu tolérable	As	Bs	Cs
III Risque inacceptable	As	Cs	Ds

L'esprit de recherche au cœur des réseaux



Choix du niveau de prévention

- ✓ Exemple d'application à un pont classé en catégorie II
 - ✓ Pieux et semelles de fondation : **niveau Cs**
 - ✓ Piles et tablier : **niveau Bs**
 - ✓ Chevêtre sur pile et sommiers sur culée : **niveau Bs ou Cs**
 - fonction des dispositions prises pour assurer l'évacuation des eaux

Principe de la prévention

- ✓ **Le principe de prévention repose essentiellement**
 - ✓ sur la **limitation de l'échauffement du béton** caractérisé par **Tmax** susceptible d'être atteinte au sein de l'ouvrage
- ✓ **Les recommandations donnent des outils de calcul de l'échauffement du béton**
 - ✓ **méthode simplifiée** permettant d'estimer si les pièces sont considérées comme critiques → **outil d'alerte**
 - ✓ **étude plus fine** en utilisant un **code de calcul aux éléments finis** qui prend en compte la chaleur dégagée par le béton lors d'un essai spécifique

Principe de la prévention

- ✓ **Pour éviter tout dégagement de chaleur excessif non maîtrisé du béton**

➔ **Il convient de mettre en œuvre les moyens possibles :**

- ✓ choix de la formulation et des constituants du béton
- ✓ choix de la période de bétonnage
- ✓ refroidissement du béton frais
- ✓ dispositions constructives adaptées
- ✓ ...

➔ **Méthode de calcul simplifiée dans le guide**



Niveau de prévention As

✓ **Soit** $T_{max} < 85^{\circ}\text{C}$

✓ **Soit** $85^{\circ}\text{C} < T_{max} < 90^{\circ}\text{C}$

et **durée** ($T_{max} > 85^{\circ}\text{C}$) **< 4 heures**

Dans le cas d'un traitement thermique maîtrisé
(en usine de préfabrication ou installations sur chantier)

✚ Niveau de prévention Bs

- ✓ **Soit** $T_{\max} < 75^{\circ}\text{C}$
- ✓ **Soit** $75^{\circ}\text{C} < T_{\max} < 85^{\circ}\text{C}$

Dans ce cas, une des 6 conditions suivantes doit être respectée :

- ✓ **soit (1)** durée < 4 heures
et $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ actifs du béton < 3 kg/m^3
- ✓ **soit (2)** utilisation d'un ciment conforme à la norme **NF P15-319 (ES) avec** pour les CEM I et CEM II/A :
 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ actifs du béton < 3 kg/m^3

✚ Niveau de prévention Bs (suite)

✓ Suite

Une des 6 conditions suivantes doit être respectée :

✓ **soit (3)** utilisation de ciments non conformes à la norme NF P15-319 (ES)

de type CEM II/B-V, CEM II/B-S, CEM II/B-Q, CEM II/B-M (S-V), CEM III/A ou CEM V

et SO_3 du ciment < 3% et C_3A du clinker < 8%

✓ **soit (4)** vérification de la durabilité du béton vis-à-vis de la RSI à l'aide de l'essai de performance

✚ Niveau de prévention Bs (suite)

✓ Suite....

Une des 6 conditions suivantes doit être respectée :

✓ **soit (5)** utilisation en combinaison avec du CEM I, de cendres volantes, de laitiers de haut fourneau et de pouzzolanes

et proportion d'addition > 20 %

et ciment CEM I : $C_3A < 8 \%$ et $SO_3 < 3\%$

✓ **soit (6)** pour les éléments préfabriqués : 5 conditions de références d'emploi



Niveau de prévention Cs

- ✓ **Soit** $T_{\max} < 70^{\circ}\text{C}$
- ✓ **Soit** $70^{\circ}\text{C} < T_{\max} < 80^{\circ}\text{C}$

Dans ce cas, une des 6 conditions suivantes doit être respectée :

- ✓ **les conditions sont les mêmes que pour le niveau Bs**

Niveau de prévention Ds

2 précautions proposées, la première étant prioritaire

✓ **Soit** $T_{\max} < 65^{\circ}\text{C}$

✓ **Soit** $65^{\circ}\text{C} < T_{\max} < 75^{\circ}\text{C}$

et utilisation d'un ciment conforme à la norme NF P15-319 (ES) **avec** pour les CEM I et CEM II/A :
 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{équivalent}}$ actifs du béton < 3
 kg/m^3

et validation de la formulation du béton par un laboratoire indépendant expert en RSI

Conclusions

- ✓ Avec l'évolution des matériaux et des techniques de construction, les températures augmentent dans les éléments de structures, et cette pathologie va se développer si rien n'est fait....
- ✓ Comme pour l'alcali-réaction, il n'existe pas de traitement efficace et fiable pour les ouvrages atteints de la réaction sulfatique interne par formation différée d'ettringite
- ✓ Pour s'en prémunir, **une démarche préventive est donc nécessaire**