

La réaction sulfatique interne (RSI) dans les bétons

Présentation du phénomène et Guide de prévention

***P.Dantec - Club OA Auvergne-Limousin - 22 mai 2008
(d'après exposé de L.Divet et B.Godart LCPC)***



Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées



N° 9915173



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)

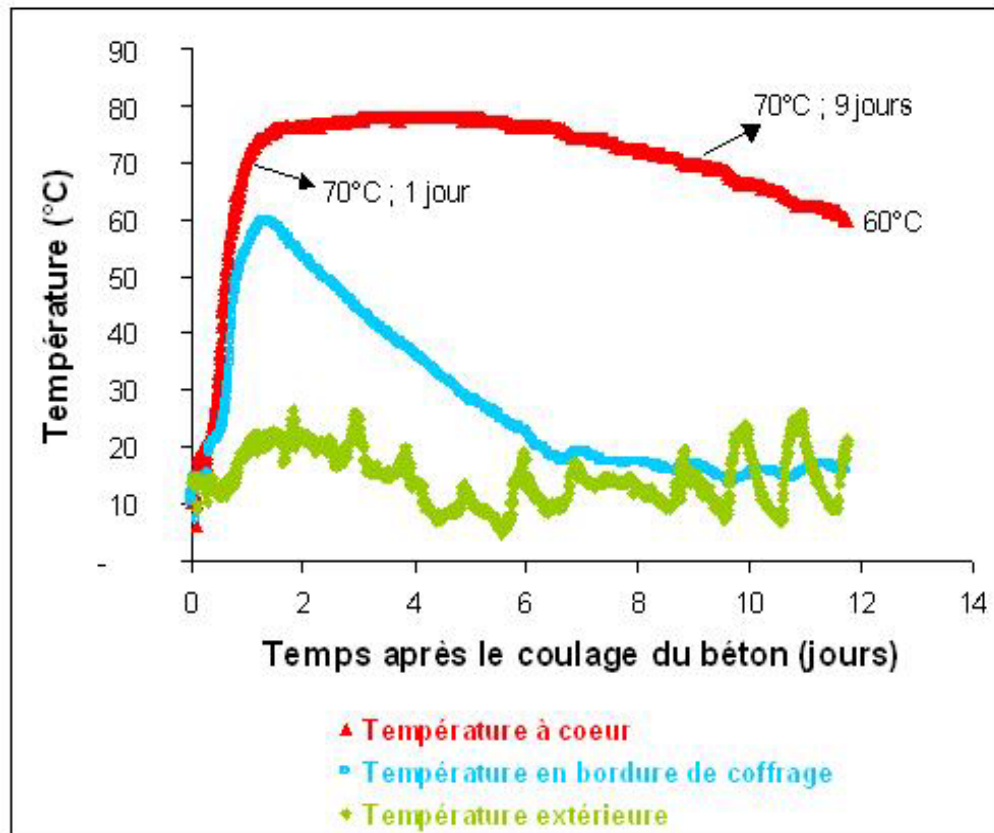
- ✓ une élévation de la température pendant la prise du béton **T > 65°C**

- ✓ 2 types de béton concernés : - bétons étuvés

- bétons de pièces massives (ou critiques)

L'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

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

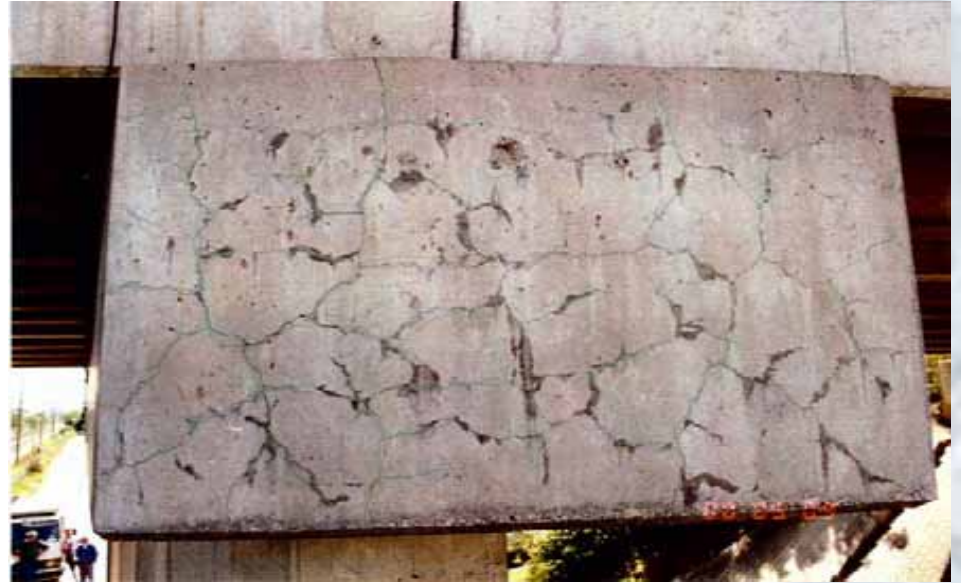
- ✓ **1997 – 1^{er} cas en France**

Chevêtre sur pile

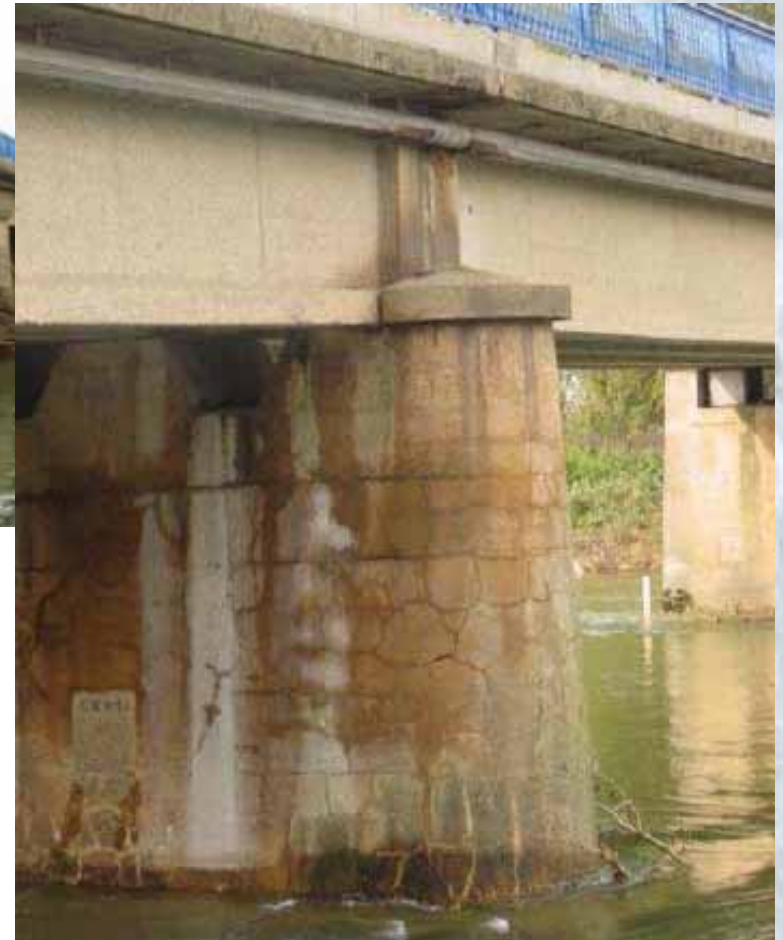
Pont d'ondes, Divet et al.



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 (Épaisseur 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 soumis 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-Éléments 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

✚ 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 $< 3 \text{ kg/m}^3$

✓ **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 $< 3 \text{ kg/m}^3$

✚ 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/m³

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**