

Webinaire



PIÈCES MASSIVES EN BÉTON ARMÉ ANTICIPER LES FISSURATIONS ET LES TRAITER DEUX EXEMPLES RÉCENTS

Claude ROSPARS et Paul ACKER
06/02/2025

Les pièces massives en béton armé: Spécificité du comportement au jeune âge et désordres ou pathologies à anticiper

Les Eurocodes sont des normes européennes de conception et de calcul des bâtiments et des structures de GC classiques

⇒ harmonisation des règles et pratiques de conception

<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2010/02/AFGC-Paul-Acker-27-06-2013.pdf>



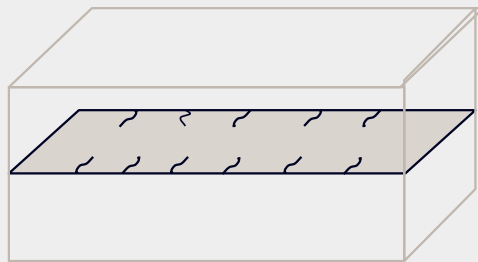
**Toute pièce en béton armé massive (>80 cm à 1m et plus d'épaisseur)
Ouvrages spéciaux**

Ces pièces massives sont partiellement traitées par l'Eurocode, notamment sur les aspects:

- **Thermo-Hydro-Mécanique au jeune âge**
- **Effets d'échelle**
- **Interprétation des fissurations**

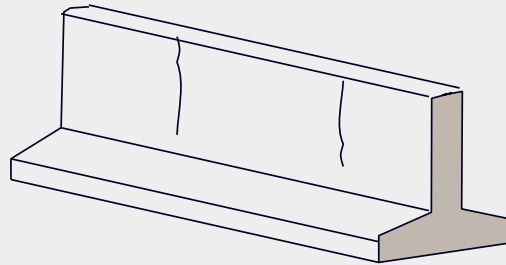
Distance entre deux fissures : une grandeur très variable !

Façonnage : $d \cong 0,3 \times \text{ép}$

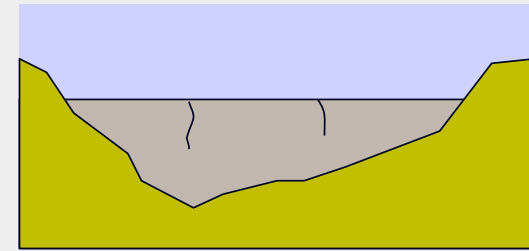


1 à 10 cm

Mur, barrages : $d \cong 1,5 \times h$

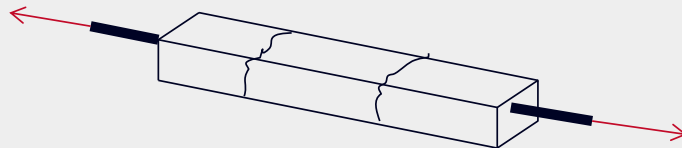


1 à 10 m



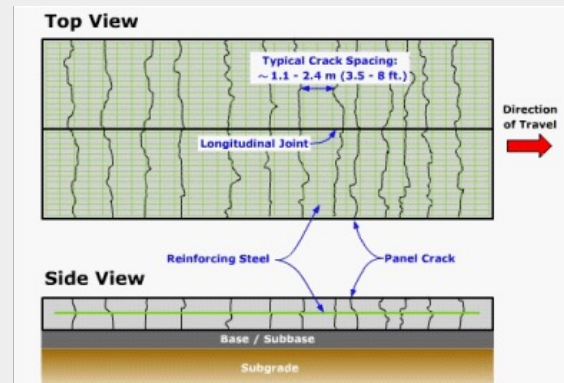
10 à 90 m

Tirant BA en traction : $1,6 \times L_{\text{anc}}$



$d = 10 \text{ à } 50 \text{ cm}$

Route en béton : $2 \times L_{\text{fr}}$



$d = 1 \text{ à } 60 \text{ m}$

Retour d'expériences d'expertises

REX, sed LEX

- **Deux exemples de dalles épaisses**
 - La dalle de couverture d'une station de métro :
 - 2 polygones **concaves** de 350 et de 400 m² d'épaisseur **80 cm**
 - La dalle de couverture de l'impluvium d'Austerlitz :
 - 4 quartiers de cercle de 500 m² d'épaisseur **100 cm**

- **Les enseignements**

REX, sed LEX

- **Deux exemples de dalles épaisses**
 - La dalle de couverture d'une station de métro :
 - 2 polygones **concaves** de 350 et de 400 m² d'épaisseur **80 cm**
 - ▶ **3 fissures rectilignes et traversantes**
 - La dalle de couverture de l'impluvium d'Austerlitz :
 - 4 quartiers de cercle de 500 m² d'épaisseur **100 cm**
 - ▶ **des fissures de surface, erratiques et peu profondes**
 - ▶ **une fissure périphérique, fine et non traversante**
- **Les enseignements**

REX, sed LEX

▪ Deux exemples de dalles épaisses

- La dalle de couverture d'une station de métro :
 - 2 polygones **concaves** de 350 et de 400 m² d'épaisseur **80 cm**
 - ▶ **3 fissures rectilignes et traversantes**
- La dalle de couverture de l'impluvium d'Austerlitz :
 - 4 quartiers de cercle de 500 m² d'épaisseur **100 cm**
 - ▶ **des fissures de surface, erratiques et peu profondes**
 - ▶ **une fissure périphérique, fine et non traversante**

▪ Les enseignements

- *Le plus facile* : **estimer** la valeur du retrait thermique
- *Très facile* : **localiser** les fissures et en estimer les ouvertures
- *Facile* : **traiter** les fissures
- *Moins facile* : **réduire** les contraintes thermiques
- *Les solutions modernes* : préfabrication et BFUP

REX, sed LEX

▪ Deux exemples de dalles épaisses

- La dalle de couverture d'une station de métro :
 - 2 polygones **concaves** de 350 et de 400 m² d'épaisseur **80 cm**
 - ▶ **3 fissures rectilignes et traversantes**
- La dalle de couverture de l'impluvium d'Austerlitz :
 - 4 quartiers de cercle de 500 m² d'épaisseur **100 cm**
 - ▶ **des fissures de surface, erratiques et peu profondes**
 - ▶ **une fissure périphérique, fine et non traversante**

▪ Les enseignements

- *Le plus facile* : **estimer** la valeur du retrait thermique
- *Très facile* : **localiser** les fissures et en estimer les ouvertures
- *Facile* : **traiter** les fissures
- *Moins facile* : **réduire** les contraintes thermiques
- *Les solutions modernes* : préfabrication et BFUP

**et les risques
de RSI ...**

1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

Coulage en trois zones :

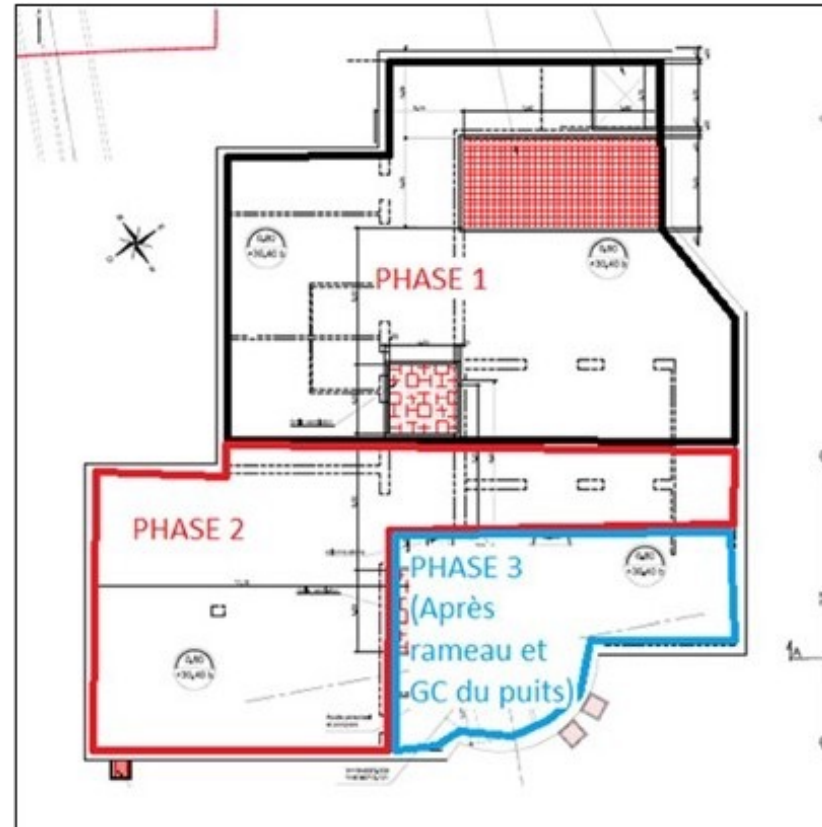
- décembre 2019
- janvier 2020
- ...

sur **coffrage bois**

un béton **C40 excellent**

des **parois moulées de 62 cm** et des **voiles porteurs de 60 cm**

des angles **rentrants !**



1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

Coulage en trois zones :

sur coffrage bois

un béton C40 excellent

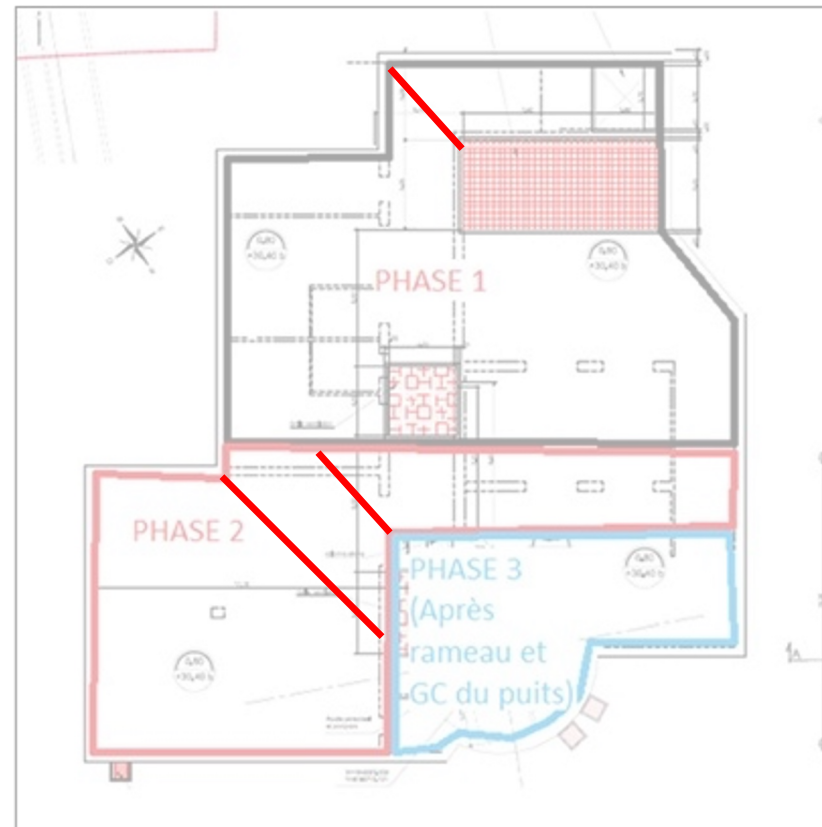
des parois moulées et des voiles porteurs d'ép. 60 cm

des angles rentrants !

et au décoffrage, à 15 et à 20 jours :

➤ 3 FISSURES

- très droites
- traversantes
- plus ouvertes en face inférieure



1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

**Un peu plus ouvertes en face inférieure
avec suintement d'eau et des traces de calcite :**



1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

les trois fissures partent
toutes d'un **angle rentrant**

Elles sont **fines** et
 rectilignes en face
 supérieure :

MAIS :

un peu **plus ouvertes** en
face **inférieure**

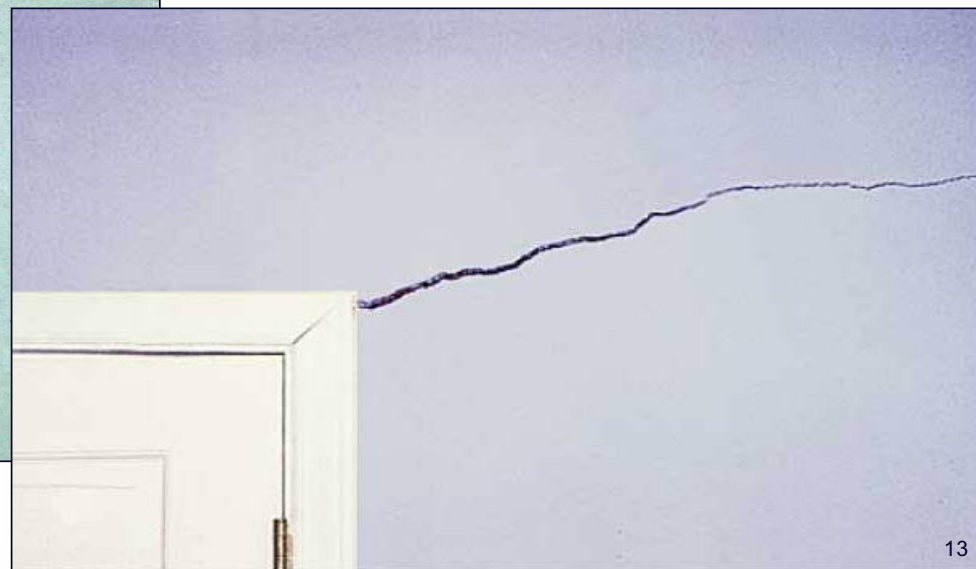
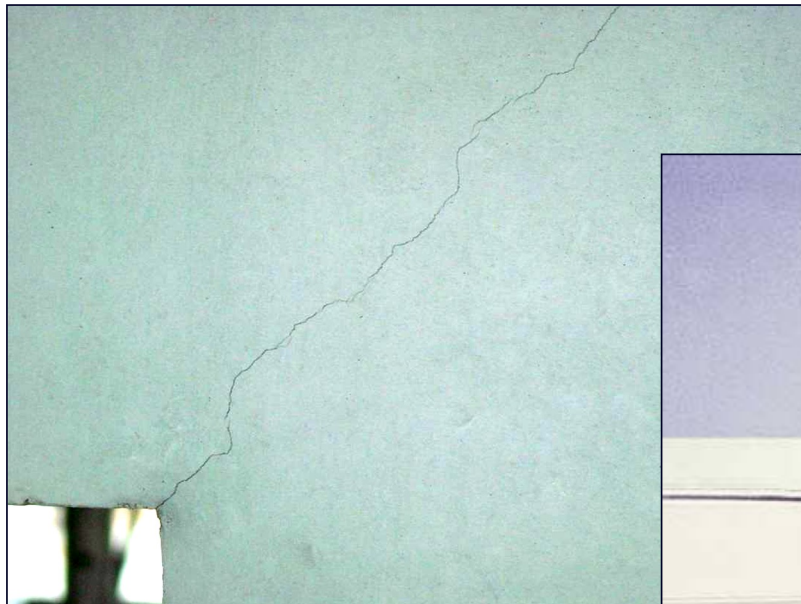
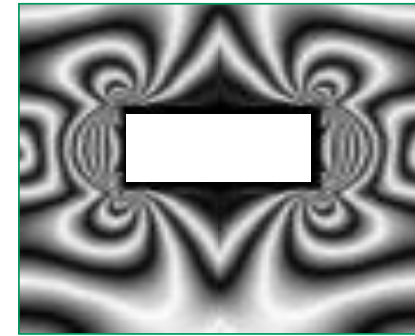
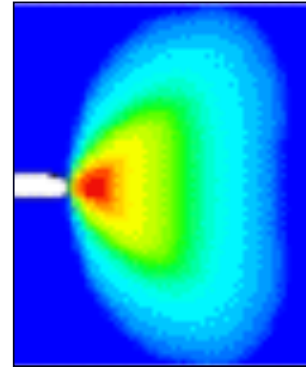
avec **suintement d'eau**

et des **traces de calcite**



Dans tout angle rentrant : une concentration de contrainte !

$$\sigma_{xy} \approx \left(\frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{xy}(\theta)$$



1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

Estimation de la déformation imposée

A – par le calcul

- CEM III A de Gargenville dosé à **360 kg/m³**
- Chaleur d'hydratation (fournie par le cimentier) : **226 J/g** à 40h
- Soit 81 000 kJ/m³, ou 36 kJ/kg de béton (**2350 kg/m³**)
- Capacité calorifique du béton : **900 J/K/kg**
- Delta température = 36 / 0,9 = **40 K**
- CDT du béton = **11.10⁻⁶ x 40° = 440.10⁻⁶**

➤ **à vos calculs (de structure) !**

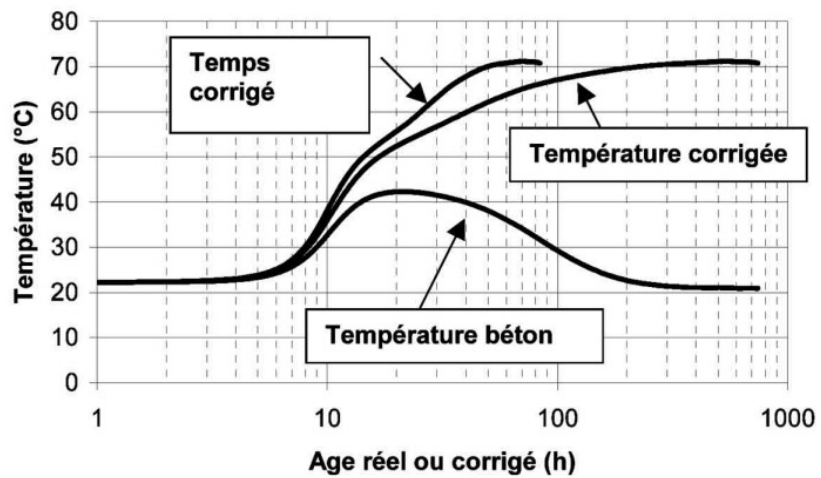
1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

Estimation de la déformation imposée

B – par la mesure

avec l'essai **QAB** de l'IFSTTAR
(*quasi-adiabatique du béton*)

[Boulay, BLPC 278, Oct. 2010]

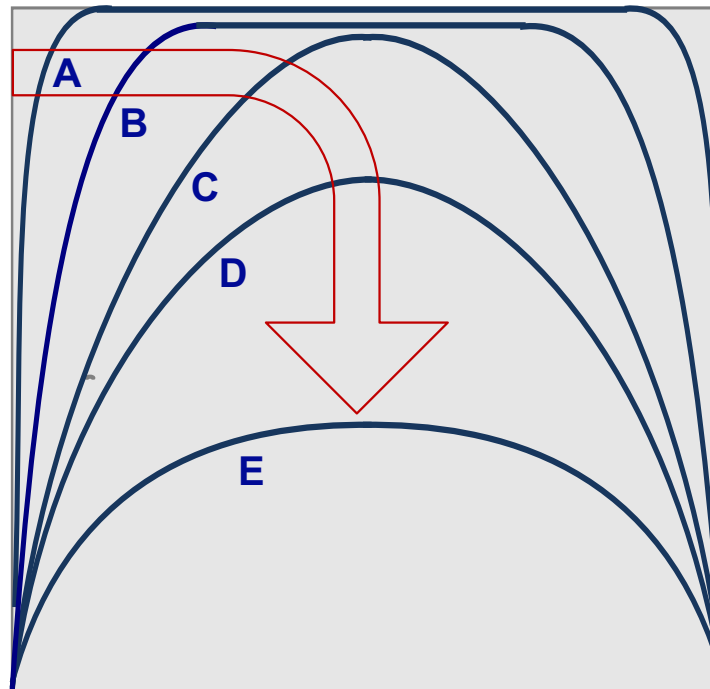


La cinétique du refroidissement : un processus lent, en deux phases, invariant en T/L^2

Phase A-B-C :

un effet de surface

- 1 cm à 15 secondes
- 2 cm à 1 minute
- 4 cm à 4 minute
- 8 cm à 15 minutes
- 16 cm à 1 heures
- 50 cm à 10 heures
- ...



Phase C-D-E :

ré-équilibrage en volume

- 16 cm : 15' → 6 heures
- 32 cm : 1h → 24 heures
- 1 m : 10 h → 10 jours
- etc.

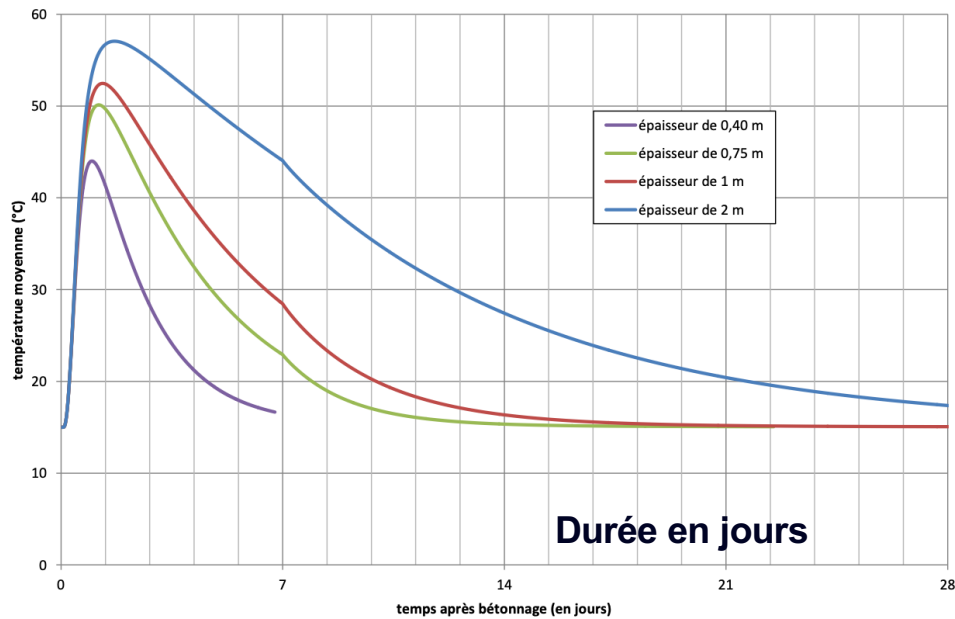
P. ACKER, "La fissuration des ouvrages en béton : Les fissures inévitables / Le diagnostic / La prévention",
Revue BÉTON[S] LE MAGAZINE, n°46 / 47 / 48, Janvier à Juin 2013.

1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

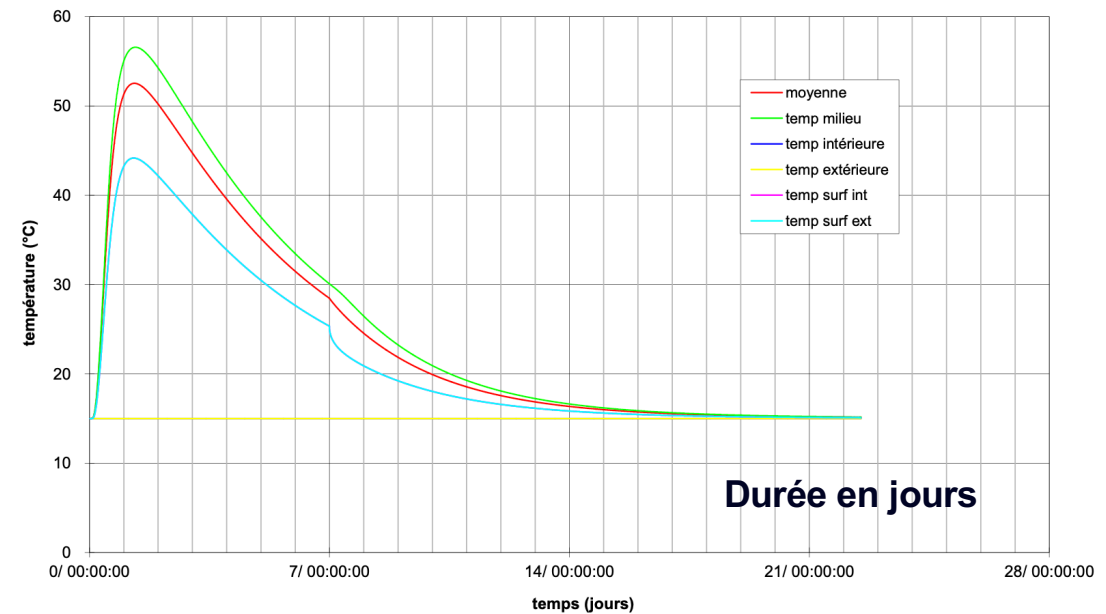
Et avec quelle cinétique ?

[Rapport CEOS - 2017]

refroidissement après bétonnage pour différentes épaisseurs de voiles



évolution de la température après bétonnage (paroi de 1 m)

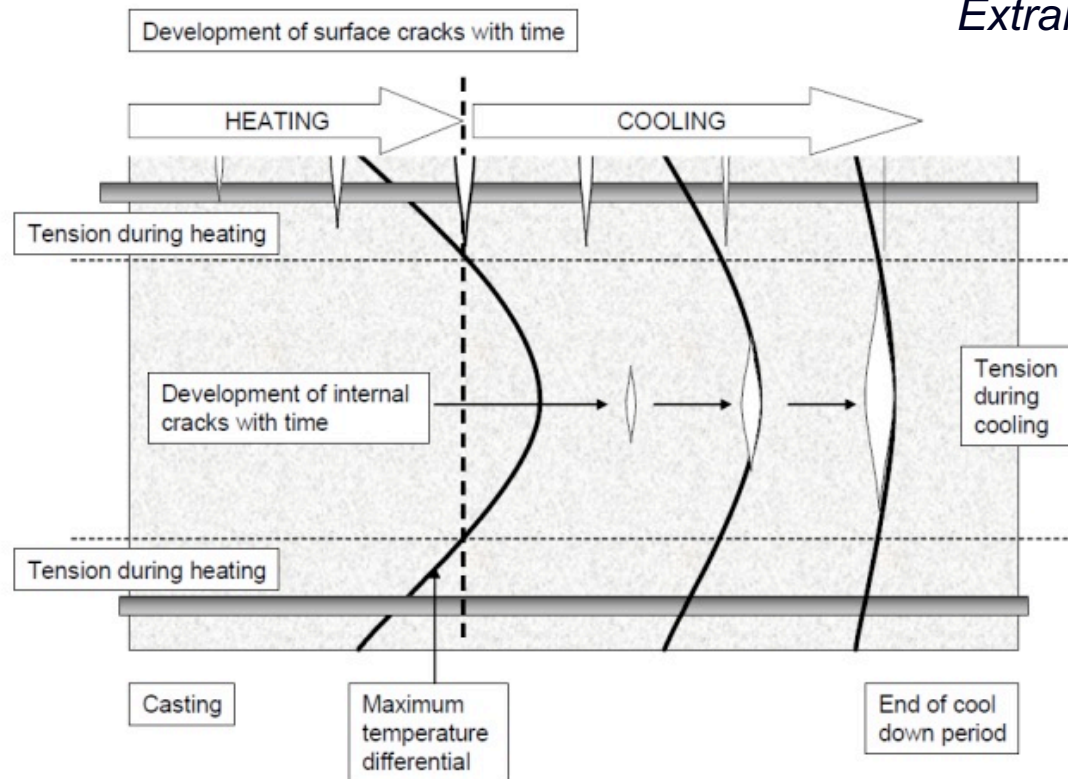


Dans l'exemple suivant en supposant un dosage en ciment de 400 kg/m³, une chaleur d'hydratation de $Q_{\infty} = 332$ KJ/kg, une température du béton de 15 ° C et une température extérieure de 15 ° C, avec un décoffrage à 7 jours (coefficients d'échange avant décoffrage de 4 W/m²° C et de 8 W/m²° C après décoffrage)

1^{er} exemple : la couverture d'une station de métro

Pourquoi la fissure est-elle plus ouverte en face inférieure et à coeur ?
[Rapport CEOS - 2017]

Extrait Code CIRIA



Dans cet exemple : QUEL(s) TRAITEMENT(s) ?

1. **Vérification de la stabilité de la structure par le BET**
2. **Protection des armatures par un rail de lait de chaux**



2^{ème} exemple : la couverture de l'impluvium d'Austerlitz



2^{ème} exemple : la couverture de l'impluvium d'Austerlitz



**Vue de l'intrados,
après excavation partielle et décoffrage**

Vue de l'intrados :
aucune trace d'eau ni de fissure

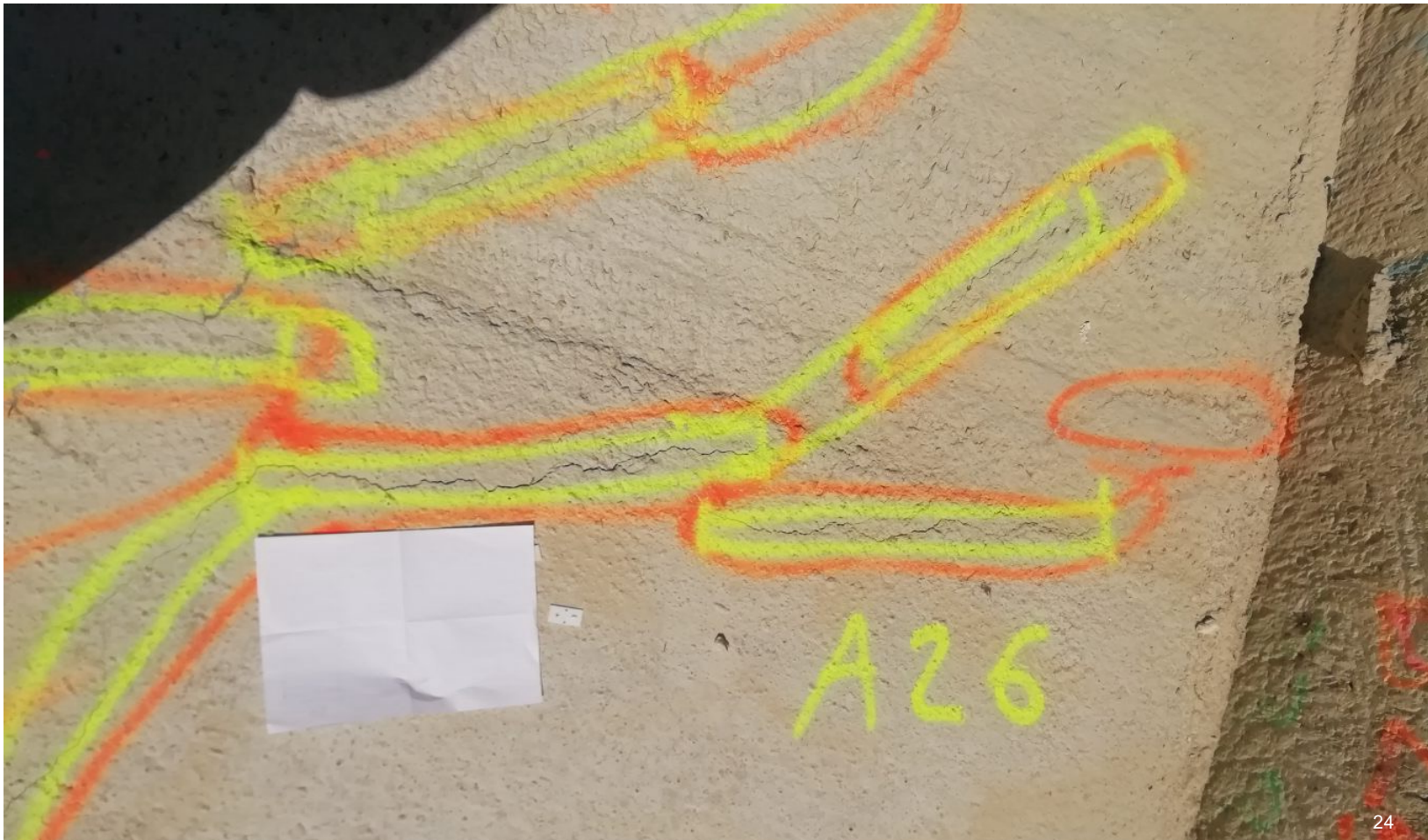


2^{ème} exemple : la couverture de l'imptivium d'Austerlitz



2^{ème} exemple : la couverture de l'impluvium d'Austerlitz

Des “cassures de béton frais” : erratiques, discontinues, ouvertes, peu profondes



2^{ème} exemple : la couverture de l'impluvium d'Austerlitz

Traitements proposés

Les fissures ayant été observées dès le lendemain du coulage, on a compris qu'elles étaient dues au mode de coulage **en trois couches** :

En effet, les opérations de coulage de la veille ont duré presque 20h, donc, quand on coule la troisième couche, la première a au moins 12h, donc en pleine période de prise et de montée en température.

On a donc décidé de couler en une seule couche, et ce désordre a disparu dans le trois coulages suivants.

2^{ème} exemple : la couverture de l'impluvium d'Austerlitz

Estimation de la déformation imposée

A – par le calcul

- CEM III A de Gargenville dosé à **360 kg/m³**
- Chaleur d'hydratation (fournie par le cimentier) : **257 J/g** à 40h
- Soit 92000 kJ/m³, ou 40 kJ/kg de béton (**2350 kg/m³**)
- Capacité calorifique du béton : **900 J/K/kg**
- Delta température = 40 / 0,9 = **44 K**
- CDT du béton = **11.10⁻⁶ x 40° = 480.10⁻⁶**

➤ **à vos calculs (de structure) !**

Approfondissement théorique et numérique

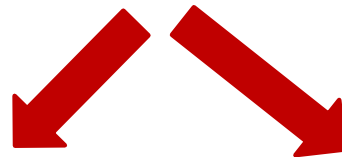
Maitrise de la fissuration des pièces massives

- Comment contrôler la stabilité structurelle et la durabilité ?
 - ✓ Contrôle de la fissuration du béton massif
 - ✓ Contrôle des déformations au jeune âge
 - ✓ Contrôle des déformations différées à long terme

Prévision du comportement Thermo-Hydro-Mécanique

Comportement au jeune âge

- ✓ Retrait Libre
- ✓ Retrait gêné



Déformations diférées

- ✓ Fluage long terme
- ✓ Eventuelles pathologies (RAG, RSI..)

Maitrise de la fissuration des pièces massives

- **Comportement mécanique (cinématique)**

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^e}_{\text{déformation élastique}} + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^{fp}}_{\text{fluage propre}} + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^{fd}}_{\text{fluage de dessiccation}} + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^{re}}_{\text{retrait endogène}} + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^{rd}}_{\text{retrait de dessiccation}} + \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}^{th}}_{\text{déformation thermique}}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^e$$

$$\mathbf{C} = (1 - d) \mathbf{C}_0$$

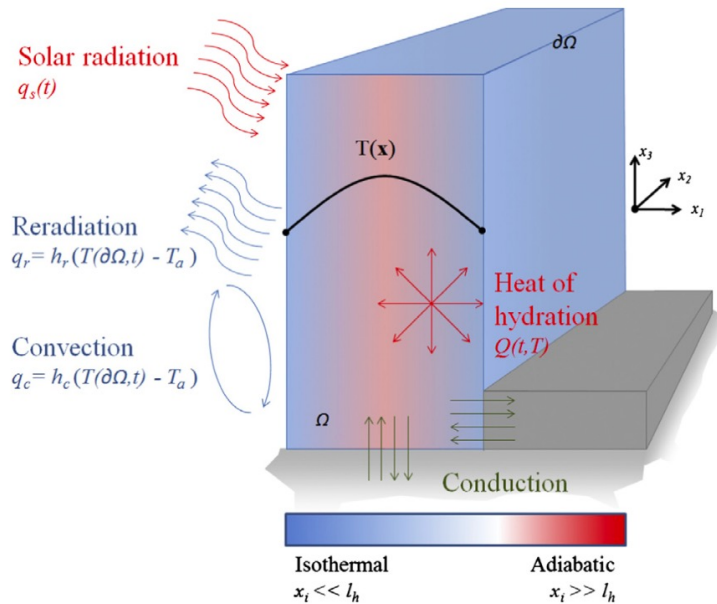
Comportement au jeune âge

+ Déformations différées

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha (T - T_0) \mathbf{1}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{hyd} = \beta (S_r - S_{r0}) \mathbf{1}$$

Maitrise de la fissuration des pièces massives



L'hydratation du béton est une réaction **exothermique**
 Pour les structures massives, les températures
 obtenues doivent être évaluées.

$$\dot{\xi} = A(\xi) \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right]$$

La cinétique d'hydratation définit le taux :

$$l_h = \sqrt{\frac{D}{A(\xi)} \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right]}$$

$$\dot{Q} = \frac{L}{C} \dot{\xi} = \Delta T_{ad} \dot{\xi}$$

Ulm & Coussy (2001) définissent l_h : dimension à partir
 de laquelle la structure est considérée comme massive
 = l'hydratation affecte le comportement THM.

Pour $l > l_h$ une partie significative de la structure est
 gouvernée par les **conditions adiabatique**.

Fig. 1. Schematic representation of the phenomena involved in the chemo-thermal analysis of a concrete structure.

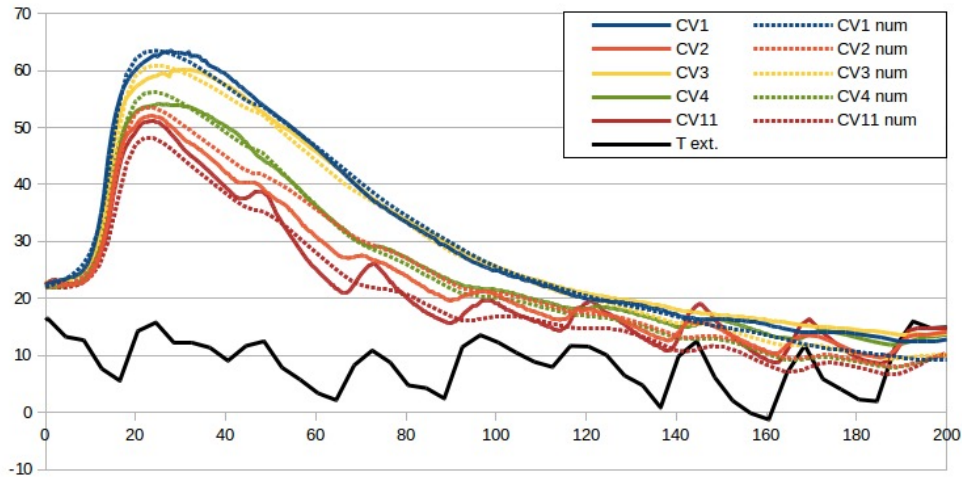
Engineering Structures 80 (2014) 173–188

Tulio Honorio^{a,b,*}, Benoit Bary^a, Farid Benboudjema^b

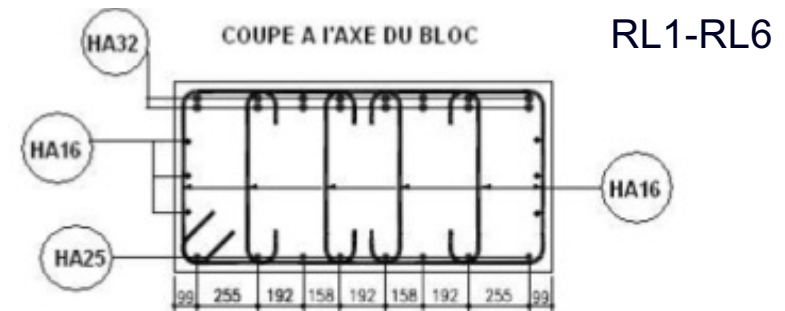
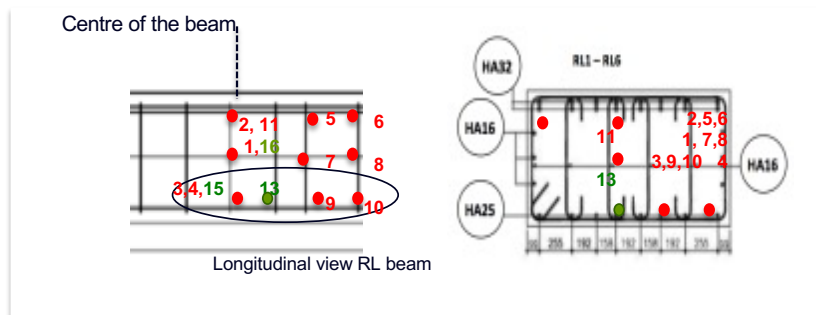
^aCEA, DEN, DPC, SECR, Laboratoire d'Etude du Comportement des Bétons et des Argiles, F-91191 Gif-sur-Yvette, France
^bLMT-ENS Cachan, CNRS/UPMC/PRES Universud Paris, Cachan Cedex, France

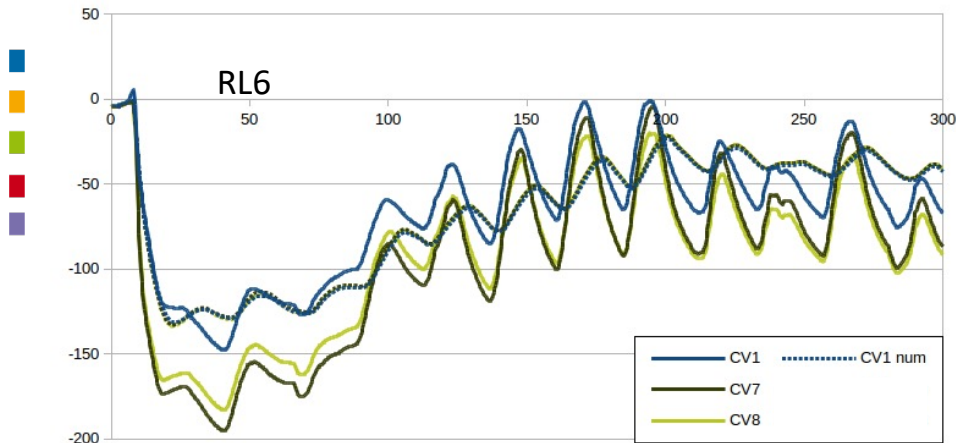
Maitrise de la fissuration des pièces massives

Exemple Bloc RL, CEOS



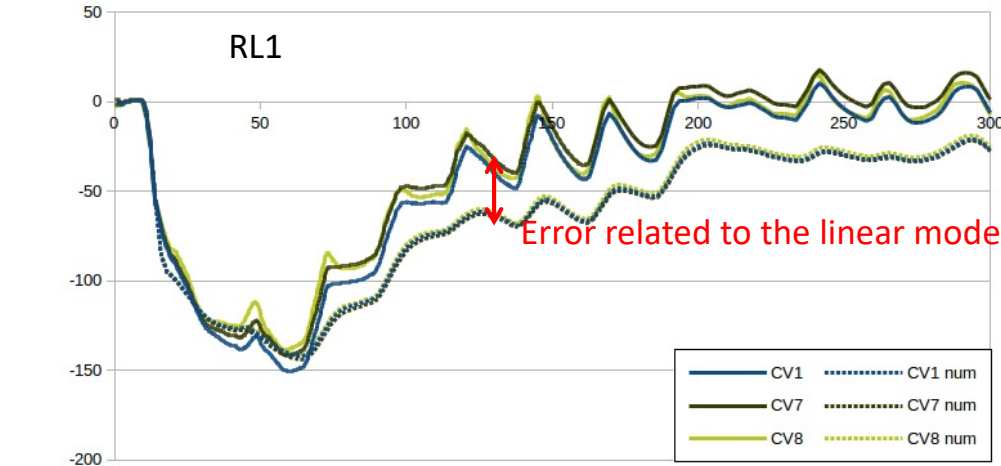
RL testing body





Micro-strains evolution
Core line of RL6

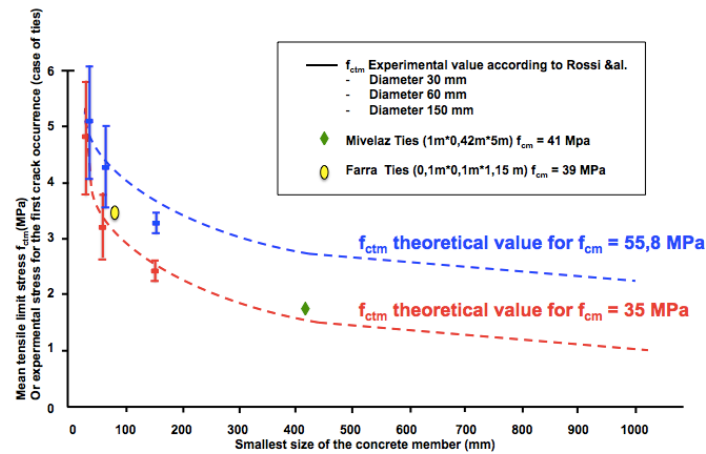
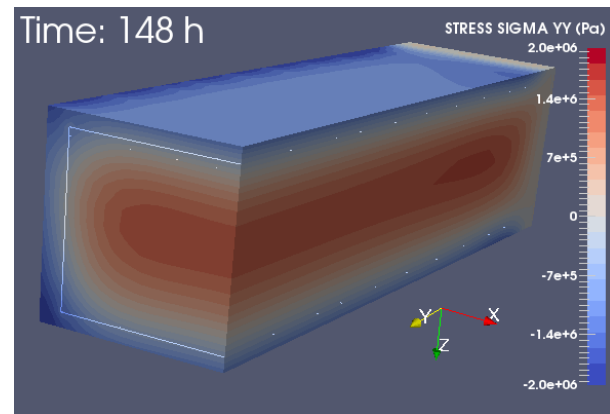
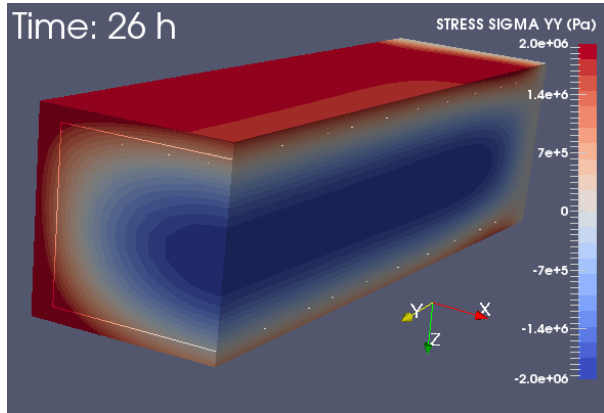
Consistent results for all sensors
with final shrinkage of 70 $\mu\text{m/m}$



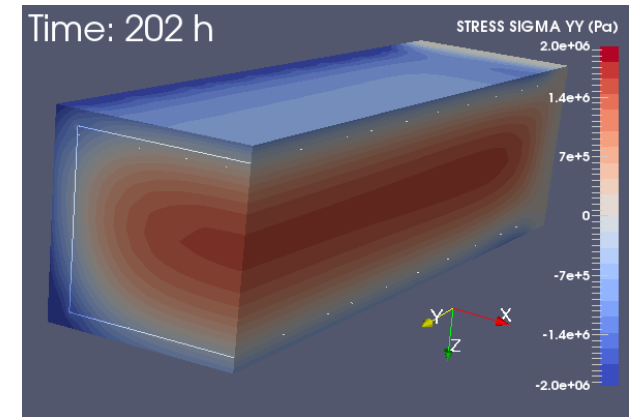
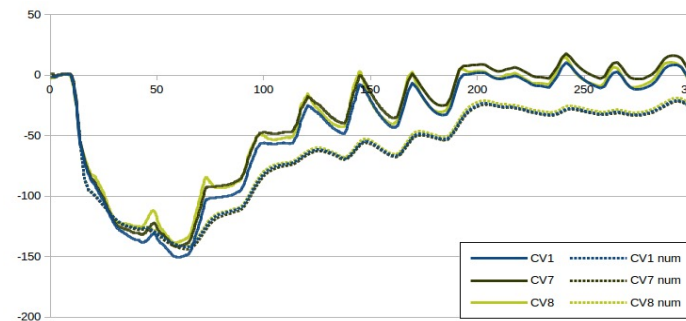
Micro-strains evolution
Core line of RL1

Error related to the linear model used for concrete

Maitrise de la fissuration des pièces massives



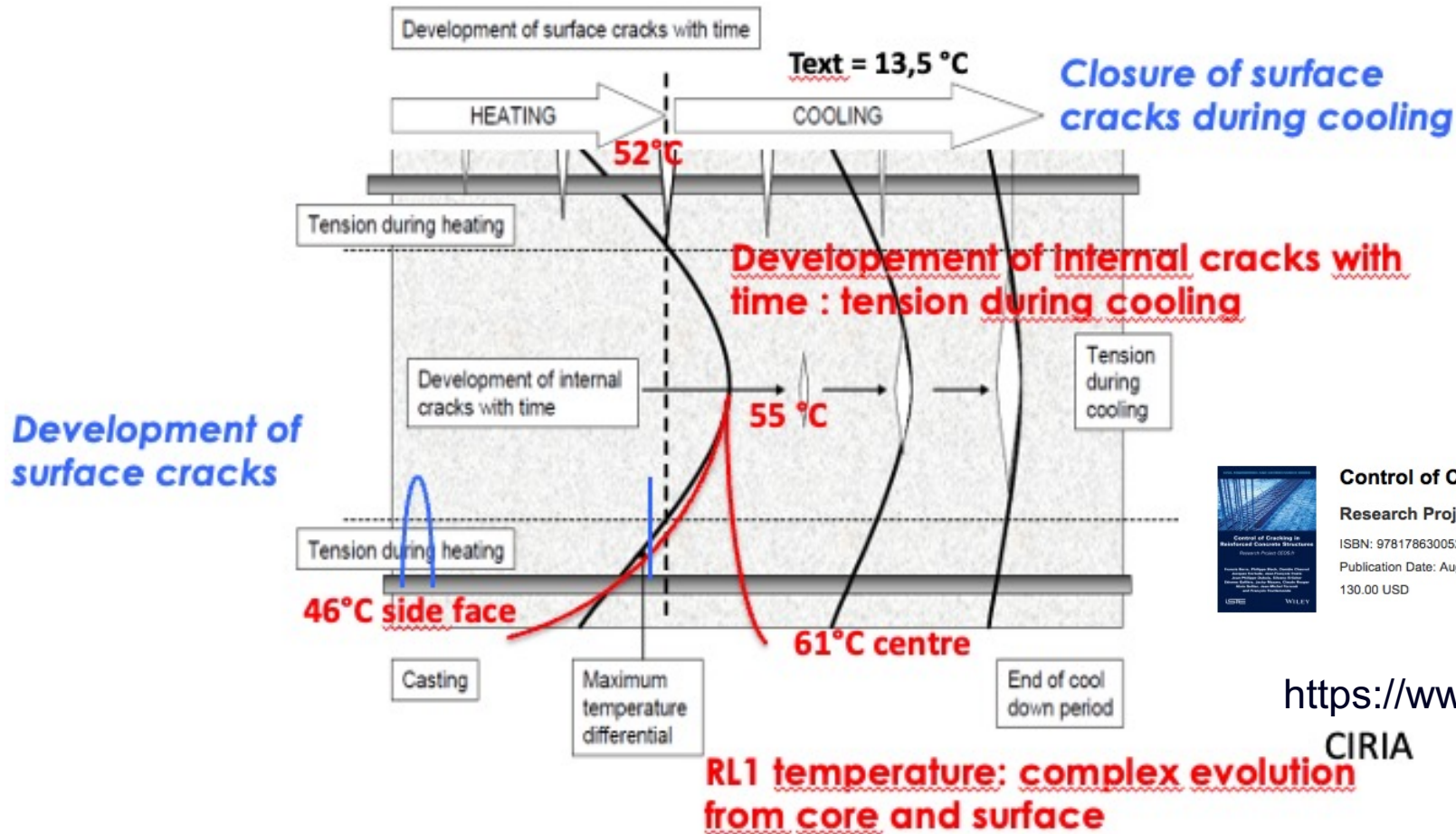
Strain at core ($\mu\text{m}/\text{m}$)



Calcul EF - THM (*Code_Aster*)

- Hydration (De Schutter)
 - Drying (Granger)
 - Endogenous shrinkage,
 - Basic Creep
 - Estimation of total strain
 - Estimation of mechanical stress
- $F_t = 1,7$ MPa

Maitrise de la fissuration des pièces massives



Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures
 Research Project CEOS.fr
 ISBN: 9781786300522
 Publication Date: August 2016 Hardback 256 pp.
 130.00 USD

<https://www.ciria.org/>

CIRIA

Conclusions - Recommandation

Les effets thermiques doivent être anticipés sur les pièces complexes

Les ordres de grandeur sont faciles à obtenir :

- Par le calcul à partir de la chaleur d'hydratation du ciment (fournie)
- Par l'essai QAB qui fournit une propriété intrinsèque du béton et la cinétique

La déformation thermique imposée => contraintes internes sur béton "jeune"

Pour chaque situation un calcul aux éléments finis est facile à mettre en oeuvre pour déterminer le champ de température sur le volume et donc de réaliser un calcul mécanique.

Les élévations de température sont rapidement de plus de 50°C et donc le risque de RSI est important et doit être contrôlé.

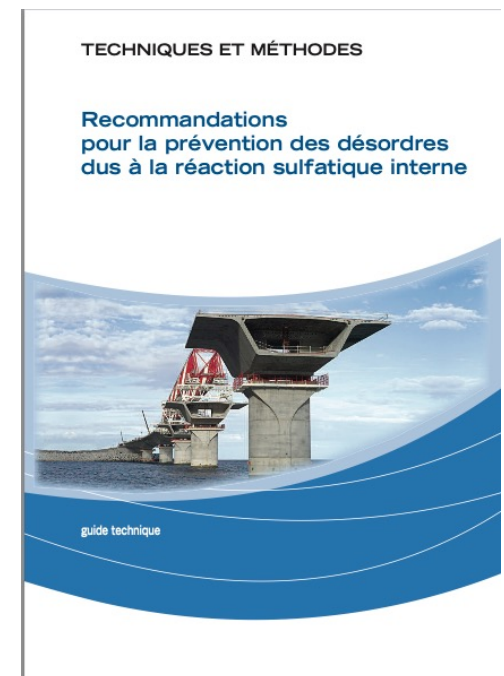
Conclusions - Recommandations

Guide IFSTTAR (2017) : Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne.
Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2017. Techniques et méthodes, GTI5. 70 pages.
Numéro ISBN 978-2-85782-738-2

Repris dans la norme béton NF EN 206/CN et le fascicule 65 du CCTG
<https://www.afgc.asso.fr/ressources/fiches-bien-prescrire-les-betons/>

RILEM TC-ISR 259 benchmark

- ✓ Prévion des températures à coeur et controle des conditions environnementales
- ✓ Prévoir une mesure de béton "libre" aux conditions de coulage (16*32)
- ✓ Prévoir une mesure en condition quasi-adiabatique



Références

1. *Recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration*, IREX (Projet CEOS), Presses de l'Ecole des Ponts ParisTech, Juillet 2017.
2. F. BARRÉ, *Crack control at an early age and long term operation*, Conférence CONCRACK4, Ispra, Mars 2014.
3. P. ACKER, "La fissuration des ouvrages en béton : Les fissures inévitables / Le diagnostic / La prévention", Revue BÉTON[S] LE MAGAZINE, n°46 / 47 / 48, Janvier à Juin 2013.
4. C. BOULAY, J.M. TORRENTI, *Calorimétrie quasi-adiabatique pour bétons : facteurs d'influence*, BLPC n° 278, Oct. 2010.
5. P. ACKER, G. GUERIN, "Chaussées en béton armé continu : réflexions sur le comportement mécanique et l'origine de la fissuration", Bulletin de Liaison des LPC, n°191, p.3-14, 1994.
6. L. FERRARA *et al.*, *Experimental characterization of the self-healing capacity of cement-based materials and its effects on the material performance : A state-of-the-art report by COST Action Sarcos WG2*, Construction and Building Materials 167 (2018) 115–142.
7. M.R. DE ROOIJ, E. SCHLANGEN, *Self-healing phenomena in cement-based materials*, *State-of-the-Art Report* of Rilem Technical Committee 221-SHC, 2011.

Remerciements à :

- **Samuel SOROKA**, *Sade*
- **Frédéric GLUZICKI**, rédac' chef de **Béton[s] le Magazine**
- **Laurent XERCAVINS**, *Euroconcept*

Paul ACKER
06.71.90.37.86
paulacker6@gmail.com

Claude ROSPARS
Université Gustave Eiffel
claude.rospars@univ-eiffel.fr