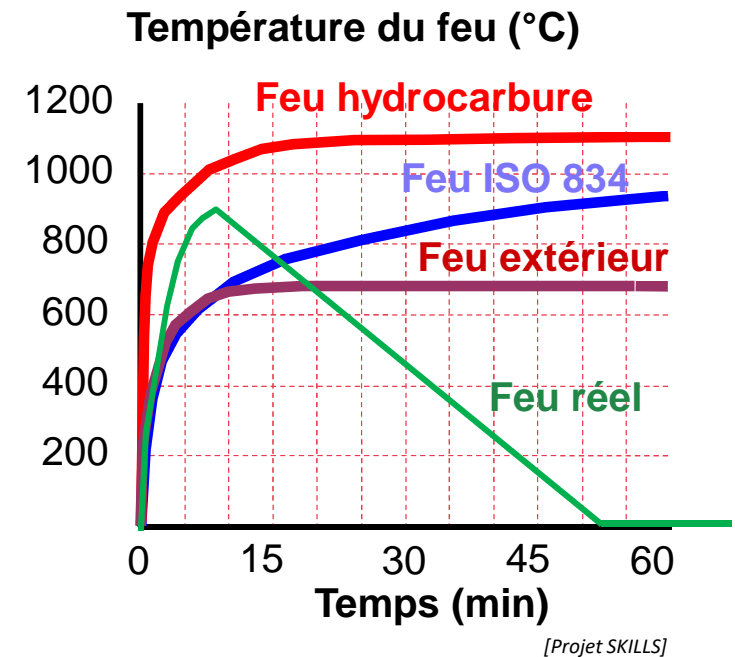


CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION DU COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ EN SITUATION D'INCENDIE RÉEL

Mohsen ROUSEFID
IRSN

Problématique et contexte de l'étude

- Courbes de feu normalisées (EN1991-1-2) :
 - Température des gaz chaud en fonction du temps (ne tenant compte d'aucun paramètre physique) ;
 - Ces courbes ne reflètent pas l'effet réel d'un incendie (phase d'échauffement suivie par une phase de refroidissement).
- Besoins de connaissance identifiés :
 - Modélisation du comportement au feu des structures en béton armé pendant la phase de refroidissement ;
 - Effets de l'interaction thermomécanique sur le comportement des structures en béton (*déformation thermique transitoire*).



Comportement mécanique des ouvrages pendant la phase de refroidissement

- Incendie d'un parking souterrain à Gretzenbach en Suisse (2004)* :

Ruine (par poinçonnement du plancher)
en phase de refroidissement, 7 pompiers tués



- Incendie d'un immeuble de 6 étages (usine textile) à Alexandria en Egypte (2000)** :

Ruine soudaine 9h après incendie, bilan 27 morts

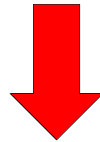


*A. Muttoni, A.A. Furst, F. Hunkeler (2005), November, Medieninformation vom15, Deckeneinsturzder Tiefgarageam Staldenacker in Gretzenbach, vol. 11, Solothurn, Switzerland

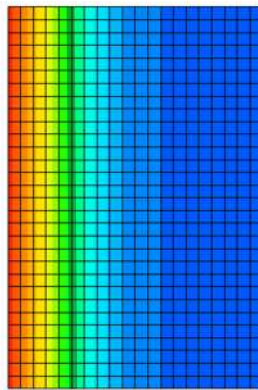
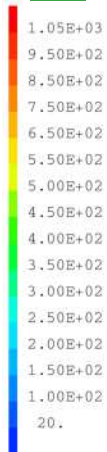
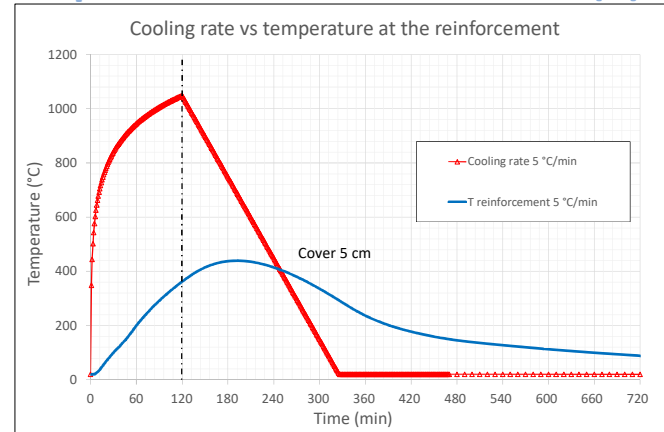
**H. Mostafaei, M. A. Sultan, N. Bénichou (2009), Recent Developments on Structural Fire Performance Engineering - a State-of-the-Art Report, Research Report, NRC, Canada

Comportement thermomécanique du béton pendant la phase de refroidissement (1)

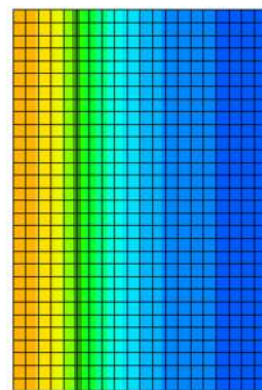
- Conductivité thermique relativement basse du béton



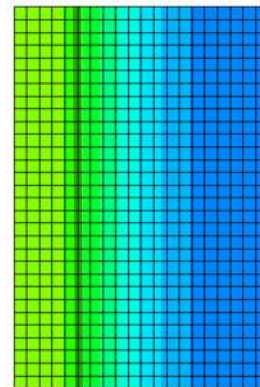
LA STRUCTURE EN BÉTON CONTINUE À TRANSFÉRER DE LA CHALEUR PENDANT PLUSIEURS HEURES APRÈS L'EXTINCTION DU FEU



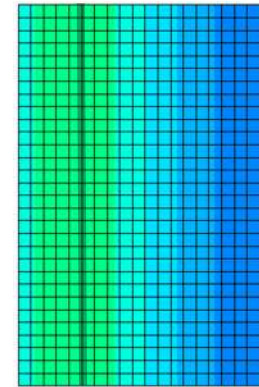
**120 min
feu ISO**



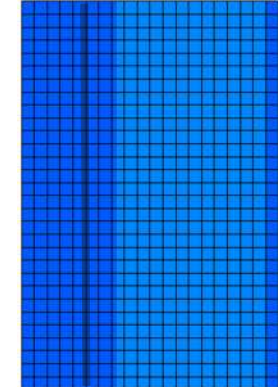
**180 min
1h du refroidissement
5°C/min**



**240 min
2h du refroidissement
5°C/min**

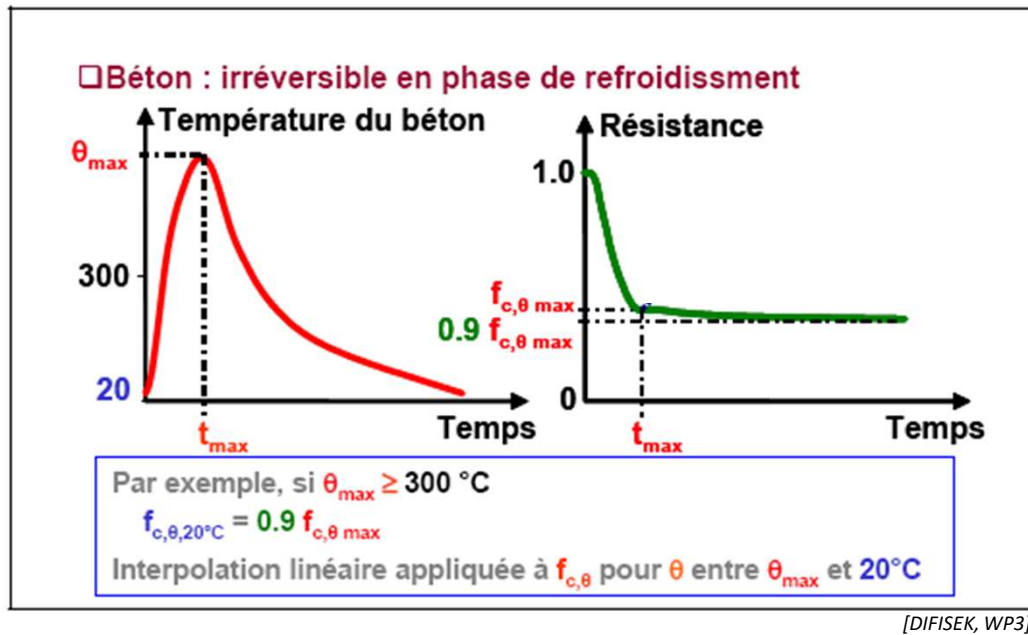


**300 min
3h du refroidissement
5°C/min**



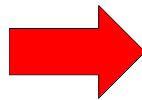
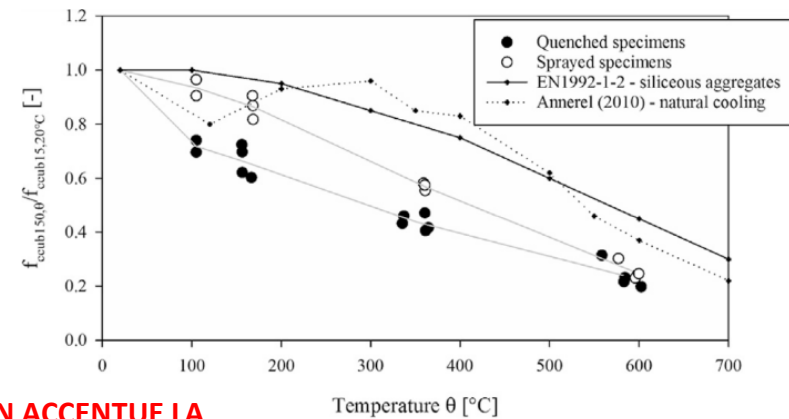
**720 min
10h du refroidissement
5°C/min**

Comportement thermomécanique du béton pendant la phase de refroidissement (2)



Etude expérimentale : ruine des éprouvettes en béton refroidies par différentes méthodes de refroidissement* :

- submergées dans l'eau ;
- aspergées d'eau pendant 5 minutes.

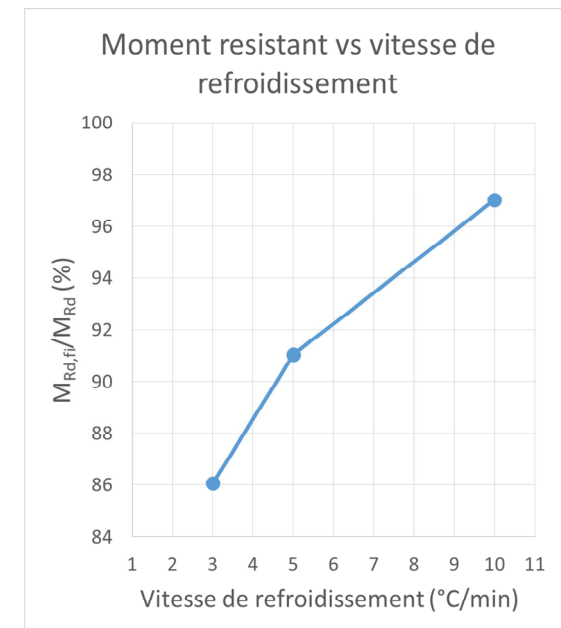
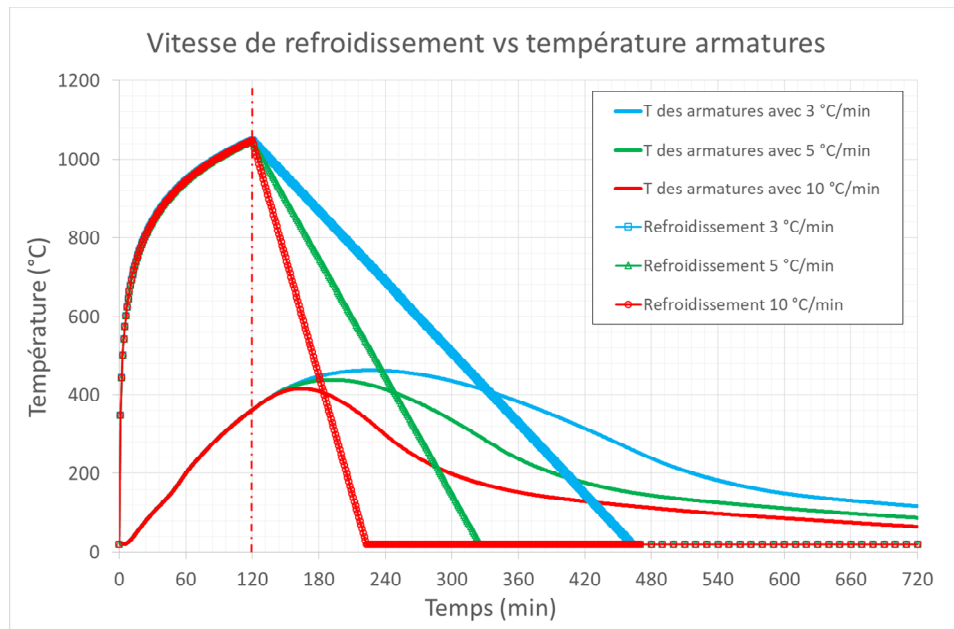
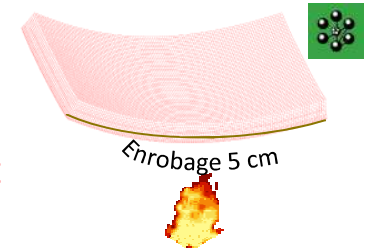


REFROIDISSEMENT FORCÉ DU BÉTON ACCENTUE LA DIMINUTION DE SA RÉSISTANCE

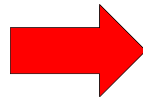
*Botte & Caspeele (2017), Post-cooling properties of concrete exposed to fire.

Effet de la vitesse de refroidissement

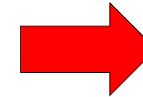
RÉSISTANCE RÉSIDUELLE EN FLEXION DES PAROIS EN BÉTON ARMÉ EXPOSÉES À UN FEU RÉEL SUR UNE FACE



REFROIDISSEMENT LENT



ECHAUFFEMENT PLUS IMPORTANT
DES ARMATURES



RÉDUCTION DE LA
RÉSISTANCE

Modélisation du comportement thermomécanique du béton (développements numériques sous CAST3M)

Modèle d'endommagement de Mazars - Formulation

$$\sigma = (1 - D) \cdot \tilde{\sigma} = E(T) \cdot (1 - D) \cdot \varepsilon^e \text{ où } \varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^{th}$$

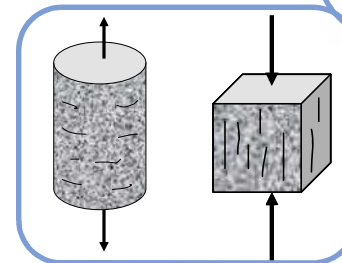
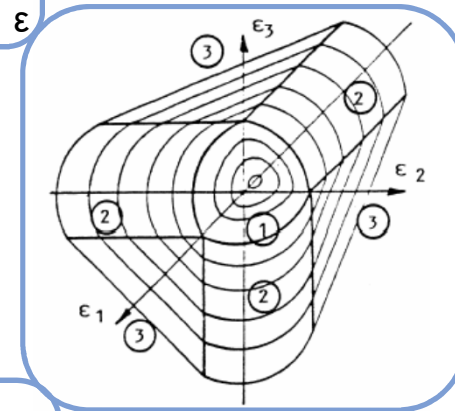
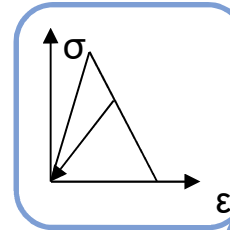
$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_2 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_3 \rangle_+^2} \quad \begin{cases} \langle \varepsilon_i \rangle_+ = \varepsilon_i & \varepsilon_i > 0 \\ \langle \varepsilon_i \rangle_+ = 0 & \varepsilon_i \leq 0 \end{cases}$$

$$f(\varepsilon, D) = \tilde{\varepsilon} - K(D) = 0$$

$$K(D) = \varepsilon_{D0} \text{ if } D = 0 \text{ où } \varepsilon_{D0} \text{ est le seuil d'endommagement } (\varepsilon_{D0} = \frac{f_t}{E})$$

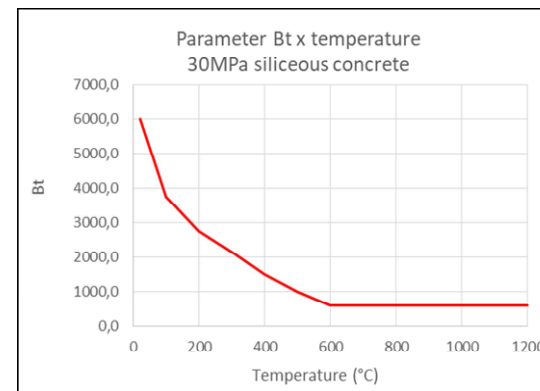
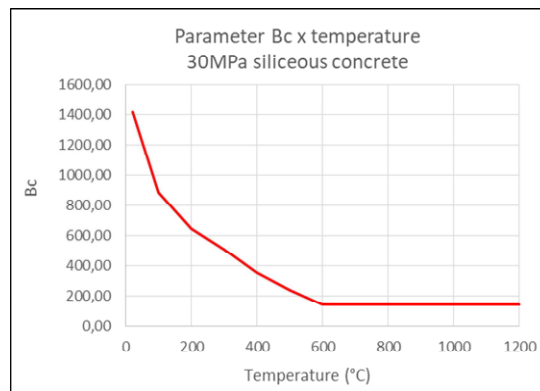
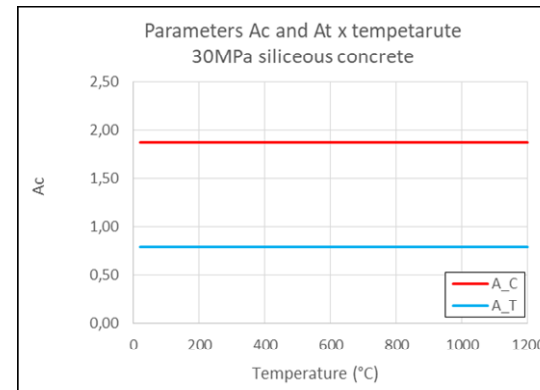
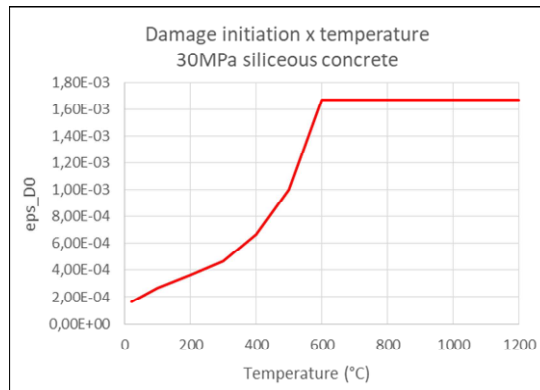
$$D_t = 1 - \frac{\varepsilon_{D0}(1 - A_t)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{D0})]}$$

$$D_c = 1 - \frac{\varepsilon_{D0}(1 - A_c)}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{D0})]}$$



Modèle de Mazars - Identification des paramètres (formulation nonlocale*)

Conformément aux caractéristiques thermomécaniques recommandées dans l'EN 1992-1-2 (béton siliceux)



*Roosefid et al. (2020), Modeling the structural behavior of reinforced concrete walls under iso fire exposure

Formulation de la déformation thermique transitoire

Modèle Anderberg & Thelandersson

$$\dot{\epsilon}_{tr} = k_2 \frac{\sigma}{f_{c,20}} \dot{\epsilon}_{th} \quad T \leq 500^\circ C$$

$$\dot{\epsilon}_{tr} = 0.1 \times 10^{-3} \frac{\sigma}{f_{c,20}} \dot{T} \quad 500^\circ C \leq T \leq 800^\circ C$$

Paramètre k_2 dépend du béton utilisé ($k_2 = 1,8 - 2,35$) :

Comparaison du modèle de déformation thermique transitoire avec les données expérimentales

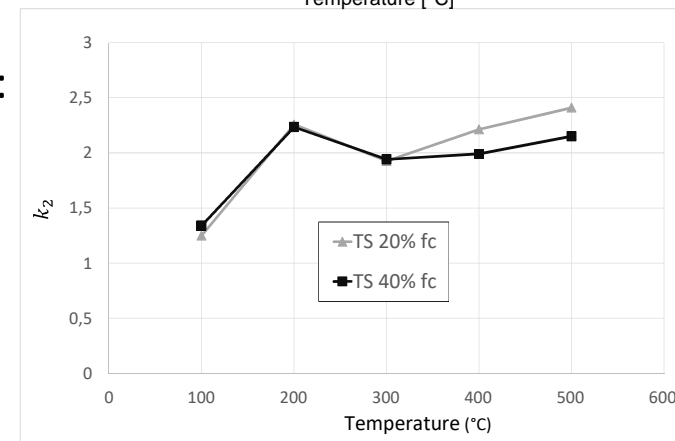
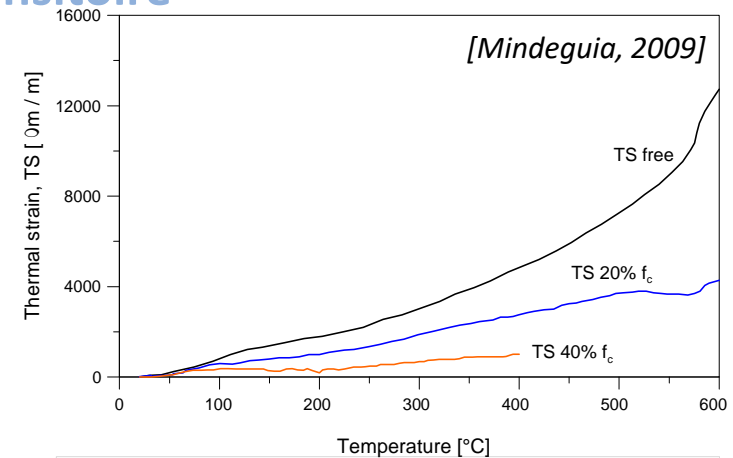
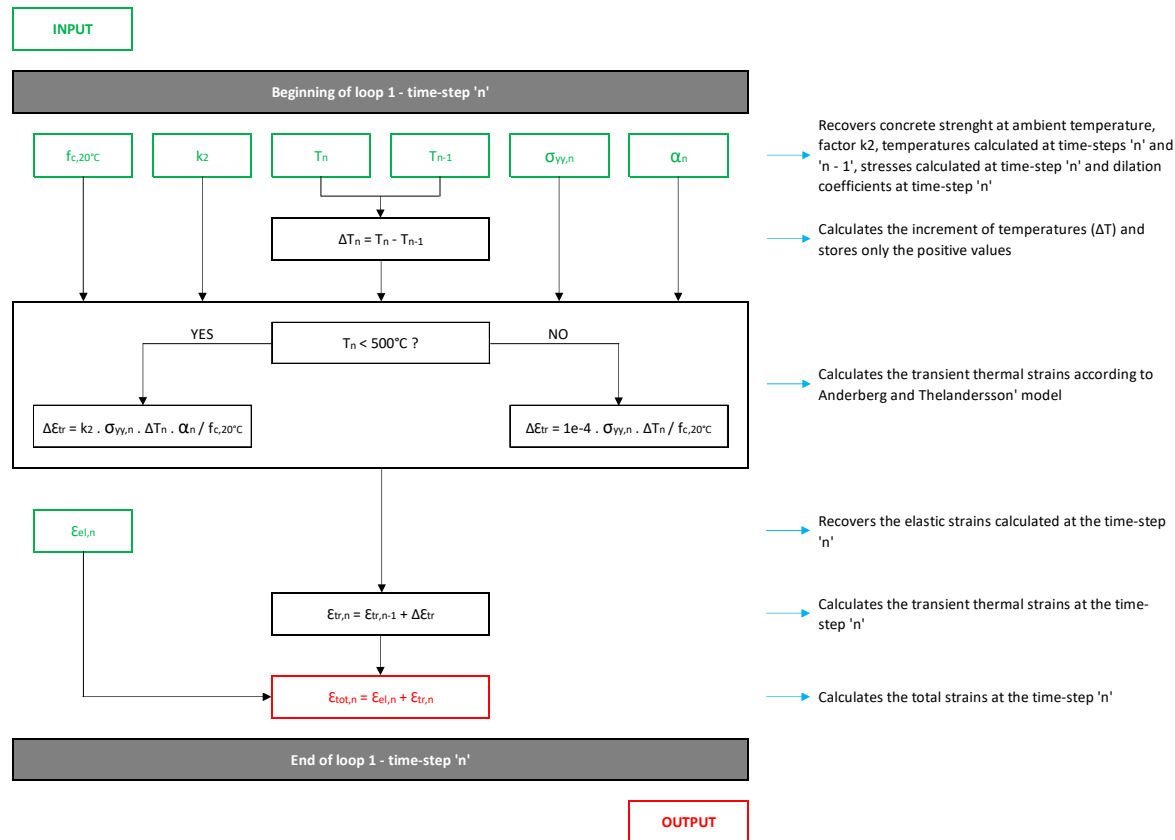
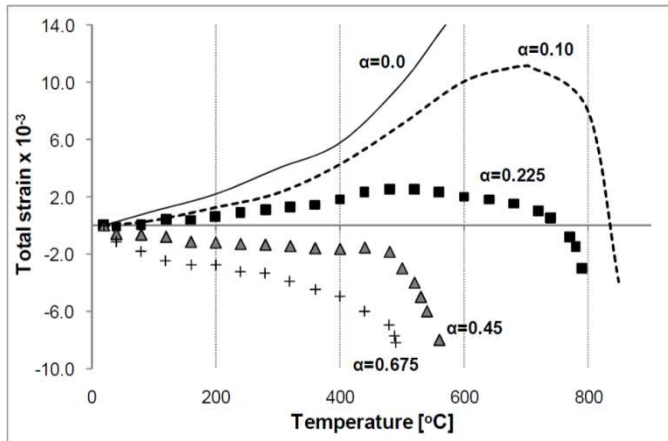
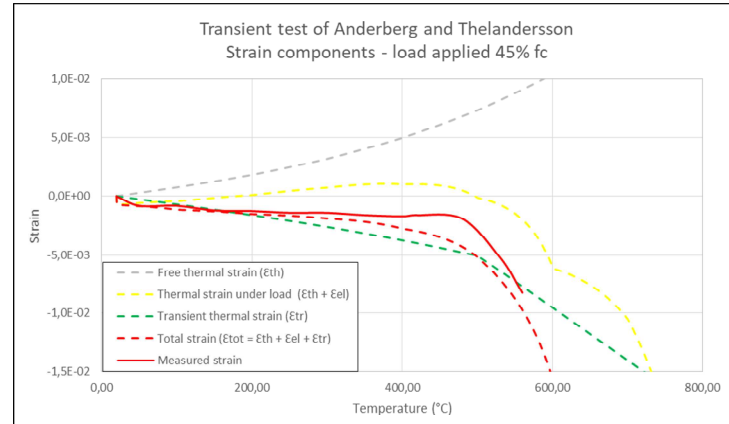
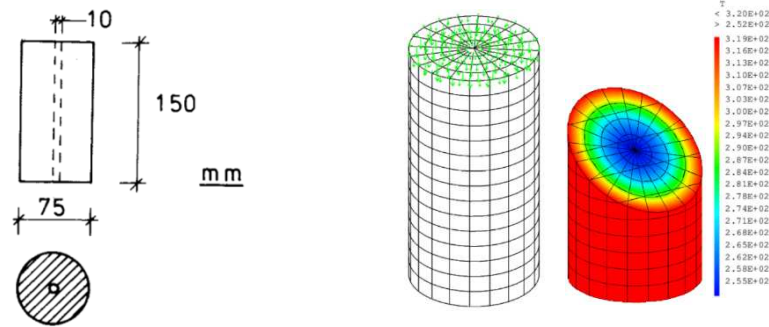


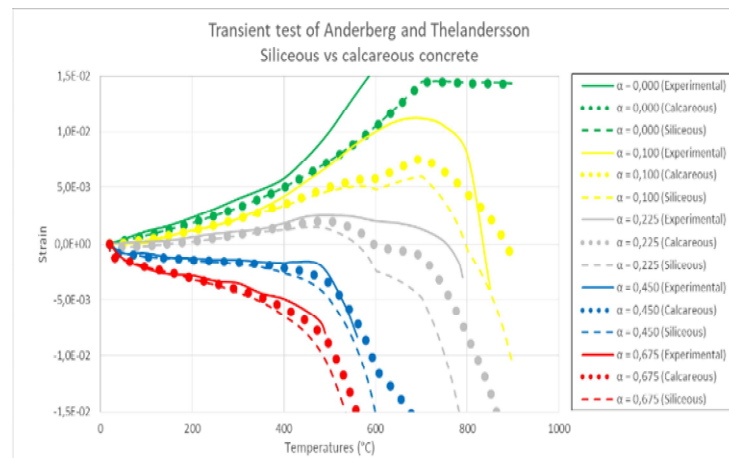
Schéma de la modélisation de la déformation thermique transitoire



Validation du modèle - modélisation des essais Anderberg & Thelandersson*

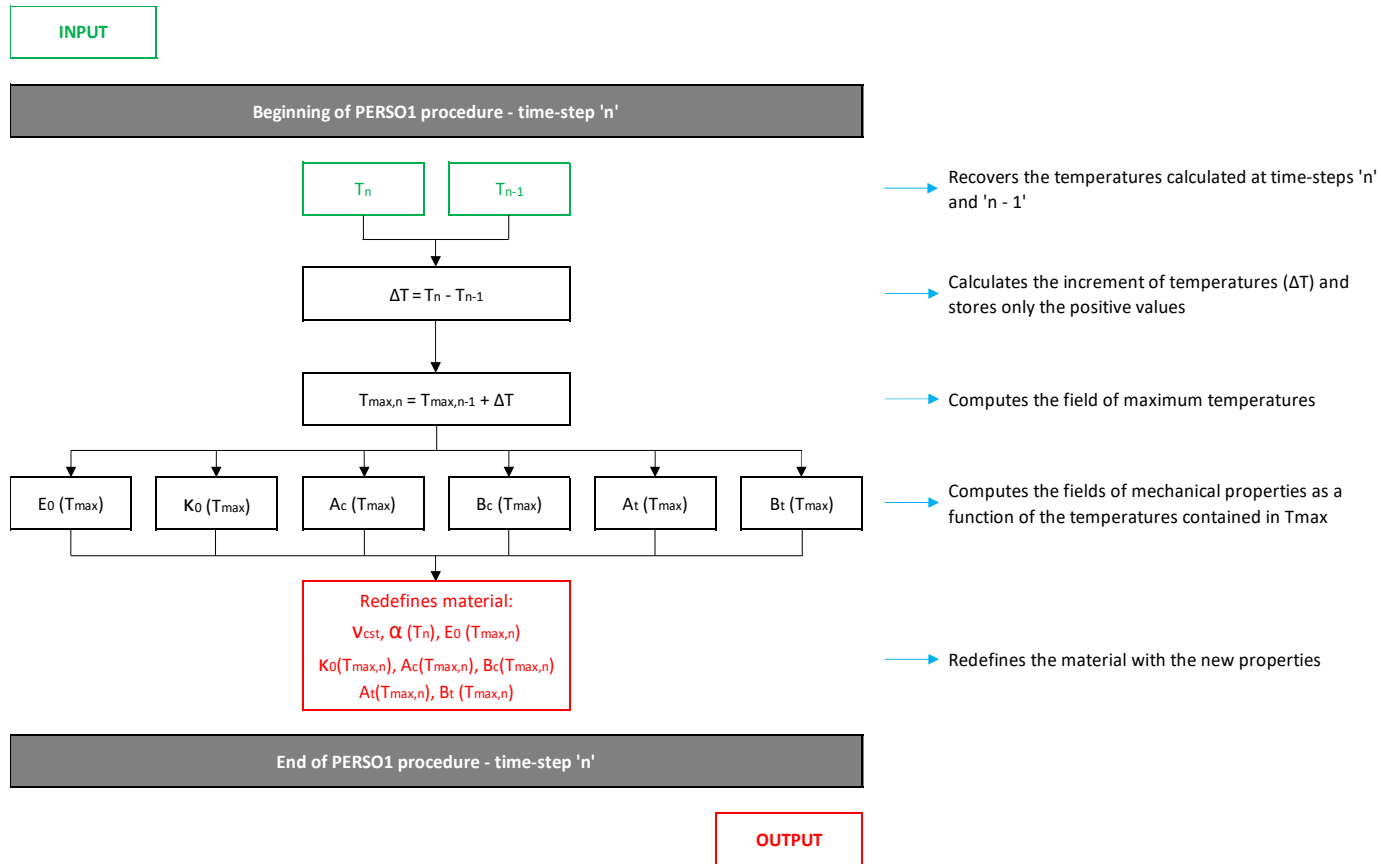


Résultats des essais Anderberg & Thelandersson (1976)* en fonction de T sous différentes charges



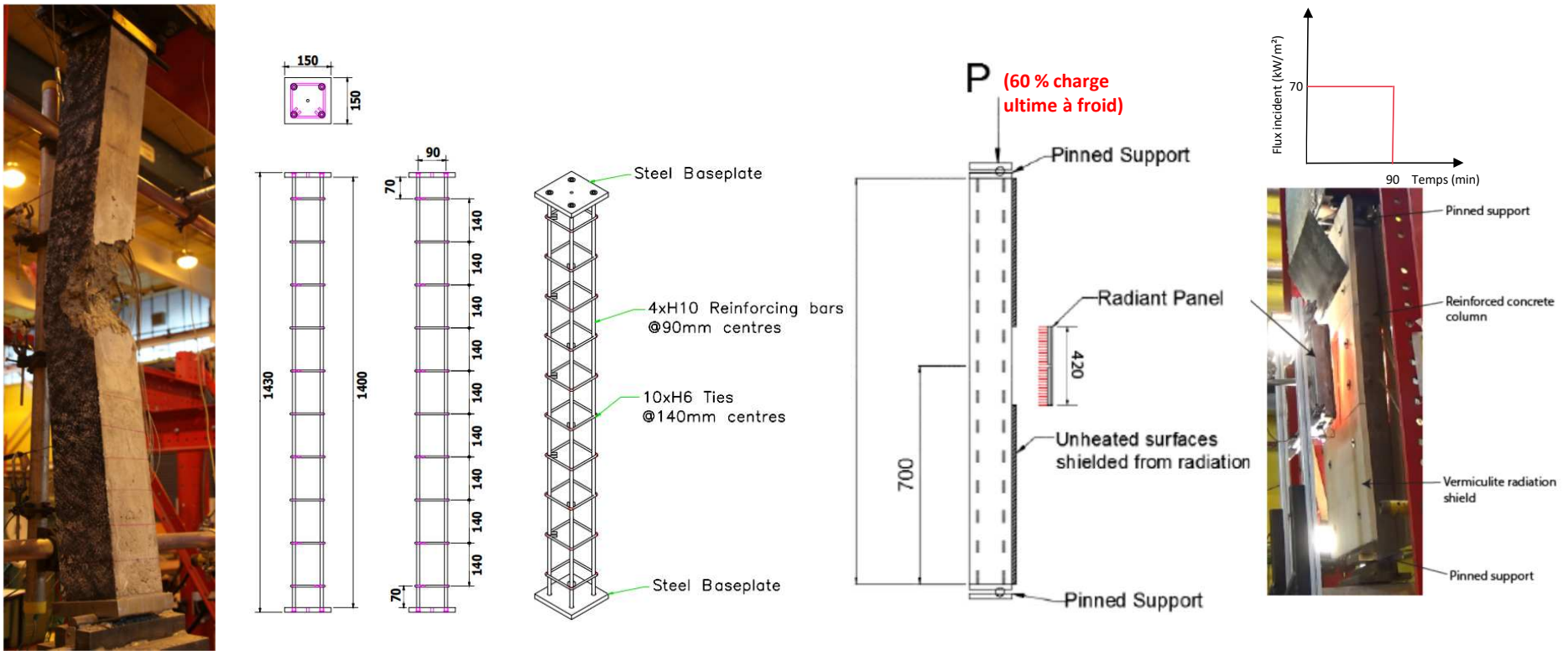
*Anderberg & Thelandersson (1976), Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures: 2 Experimental Investigation and Material Behavior Model, Bulletin 54, Lund Institute of Technology, Sweden

Schéma de la modélisation du béton pendant la phase de refroidissement



Validation du modèle - modélisation des essais MacLean* (1)

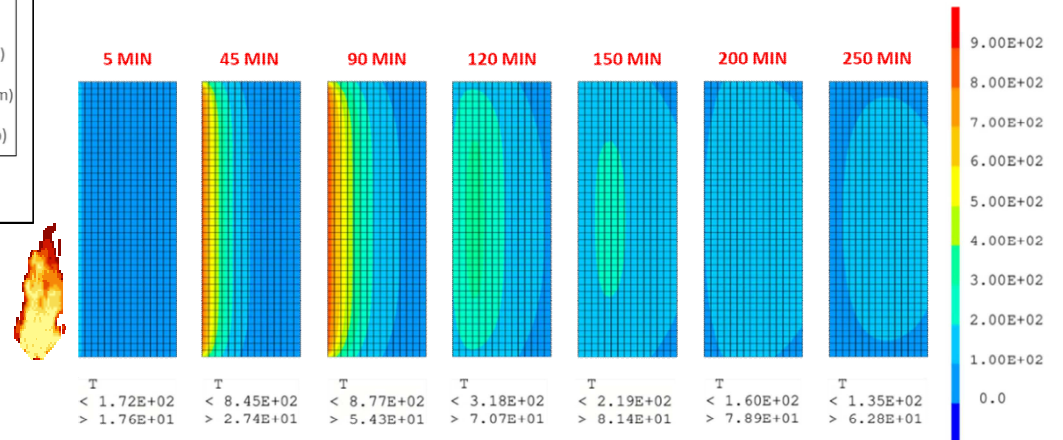
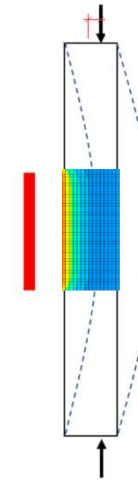
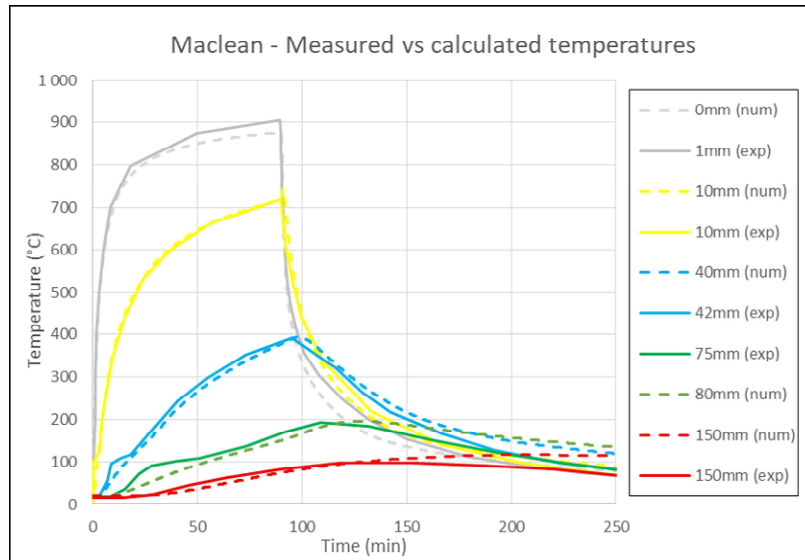
POTEAUX SOUMIS À UNE FORCE DE COMPRESSION EXCENTRÉE ET EXPOSÉS À UN FEU RÉEL (ÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT)



*Maclean (2018), *The structural response of reinforced concrete columns during and after exposure to non-uniform heating and cooling regimes* (doctoral dissertation), The University of Edinburgh, Scotland.

Validation du modèle - modélisation des essais MacLean (2)

Caractéristiques thermomécaniques du béton siliceux de l'EN 1992-1-2 et son annexe nationale française
Coefficients d'échanges thermiques conformément à l'EN1991-1-2



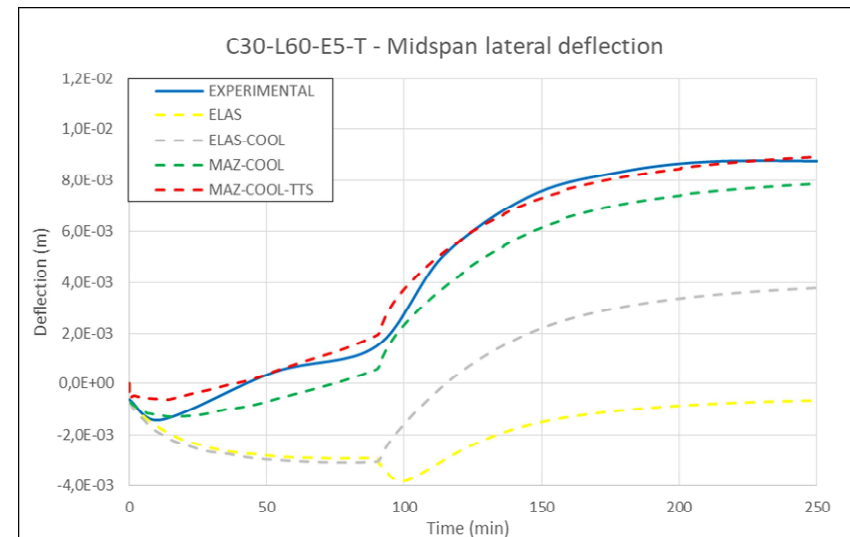
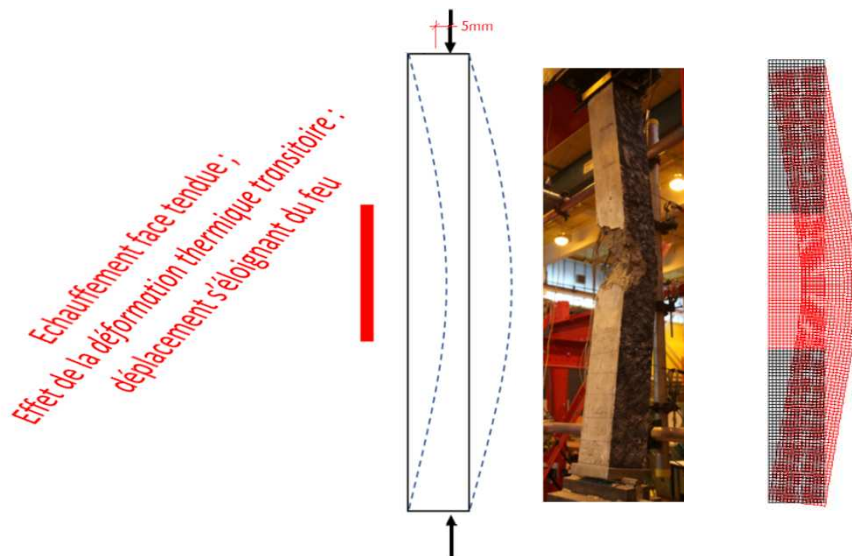
Validation du modèle - modélisation des essais MacLean (3)

Béton :

- ELAS : Modèle élastique
- ELAS-COOL : Modèle élastique avec la prise en compte de l'effet du refroidissement
- MAZ-COOL : Modèle de Mazars avec la prise en compte de l'effet du refroidissement
- MAZ-COOL-TTS : Modèle de Mazars avec la prise en compte du refroidissement et de la déformation thermique transitoire

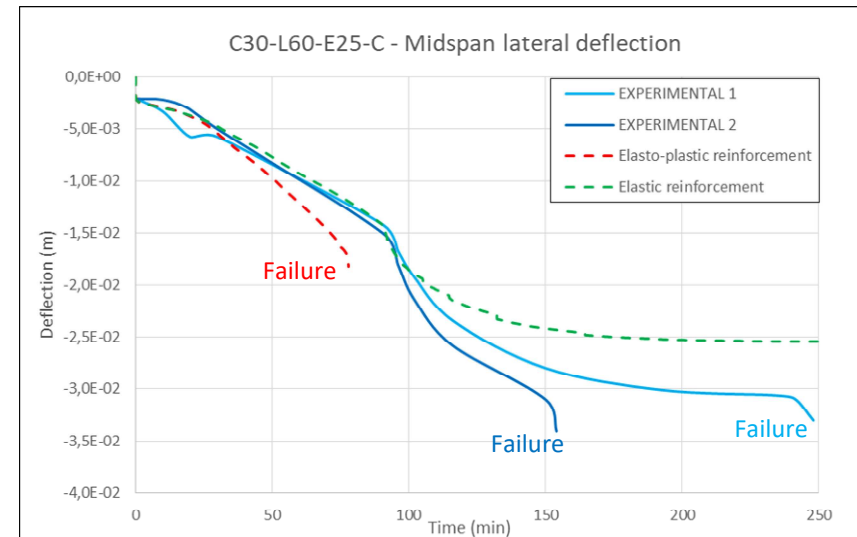
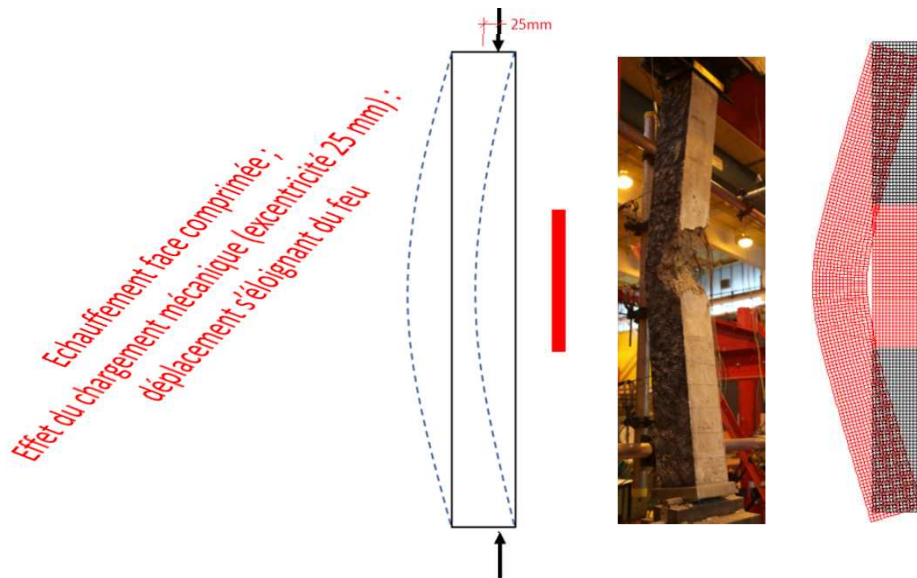
Armatures : modèle plastique parfait (caractéristiques selon NF EN 1992-1-2)

Liaison acier-béton parfaite



Validation du modèle - modélisation des essais MacLean (4)

- Béton :
 - Modèle de Mazars avec la prise en compte du refroidissement et de la déformation thermique transitoire
- Armatures (caractéristiques selon NF EN 1992-1-2) :
 - Modèle élastique
 - Modèle plastique parfait
- Liaison acier-béton parfaite



CONCLUSIONS

- Modélisation du comportement thermomécanique non linéaire du béton à haute température en tenant compte de la déformation thermique transitoire ;
- Développement d'une approche numérique pour prendre en compte l'effet du refroidissement du béton après l'incendie (irréversibilité des caractéristiques thermomécaniques) ;
- Evaluer l'impact d'actions thermiques différentes (vitesses de descente en température) en phase de refroidissement (travaux en cours).