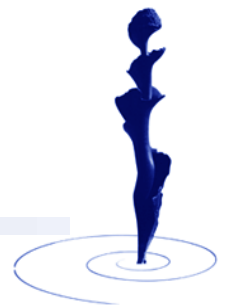


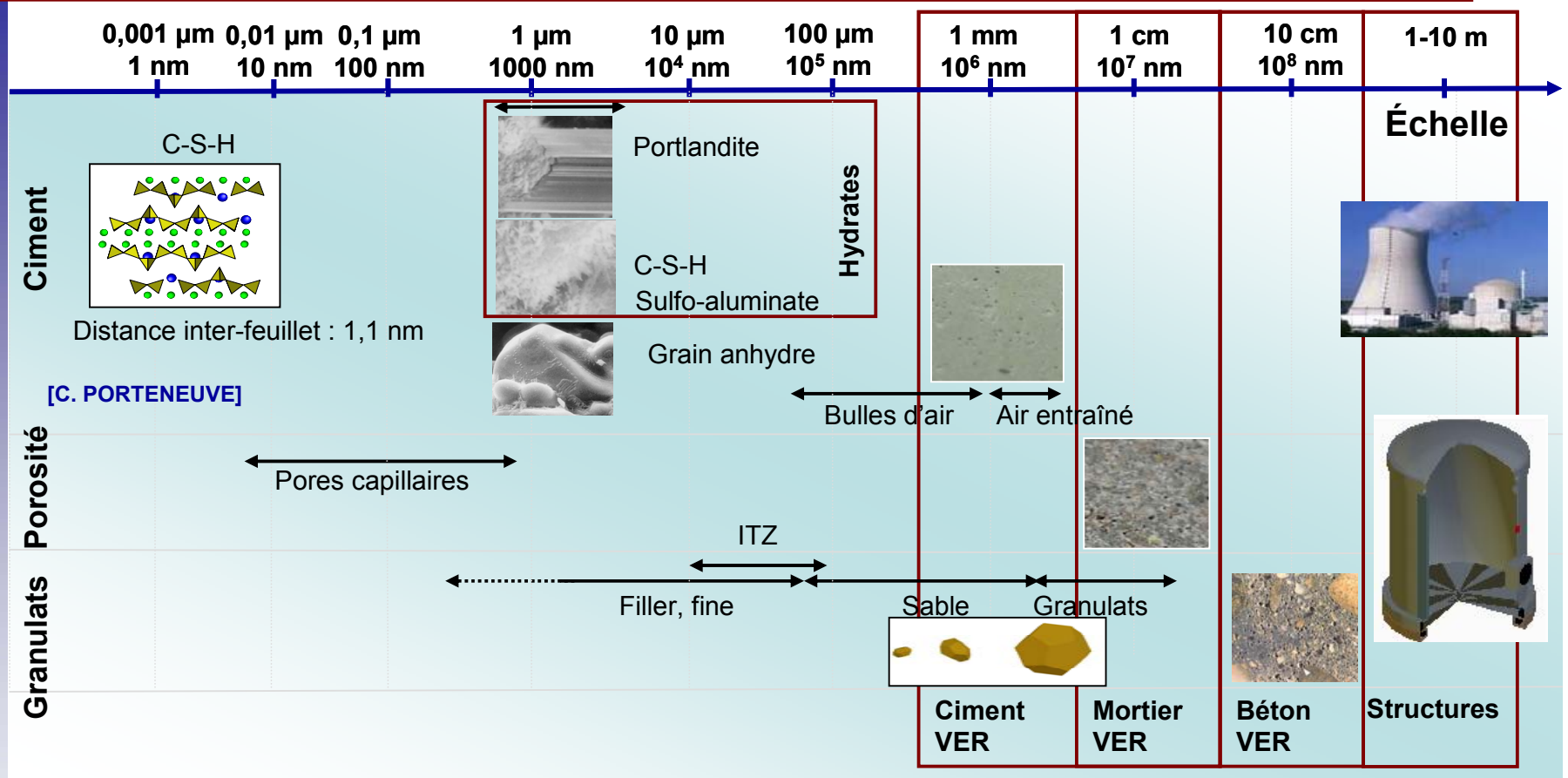
Modélisation du comportement thermo-mécanique non linéaire des bétons par un maillage explicite de leur mésostructure

C. De Sa, F. Benboudjema, J. Sicard

L.M.T. Laboratoire de Mécanique et de Technologie (Cachan)



Béton: matériau multi-échelles



Mécanismes de dégradation en température

Réactions chimiques
Déshydratation
Pression de pores...

Incompatibilité pâte de ciment / granulats

Gradient thermique

Échelle associée

MICRO

MESO

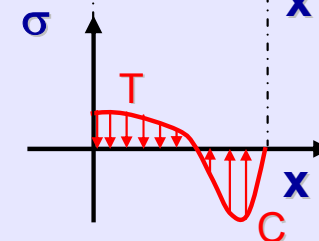
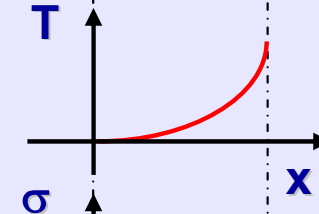
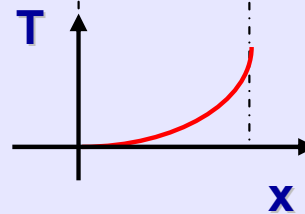
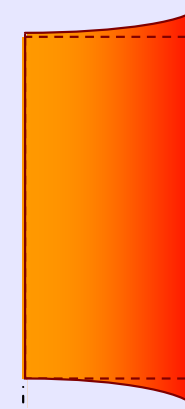
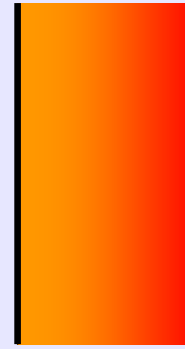
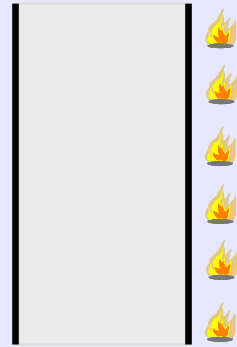
MACRO



Mécanismes de dégradation à hautes températures

▪ Échelle macroscopique: Gradient thermique

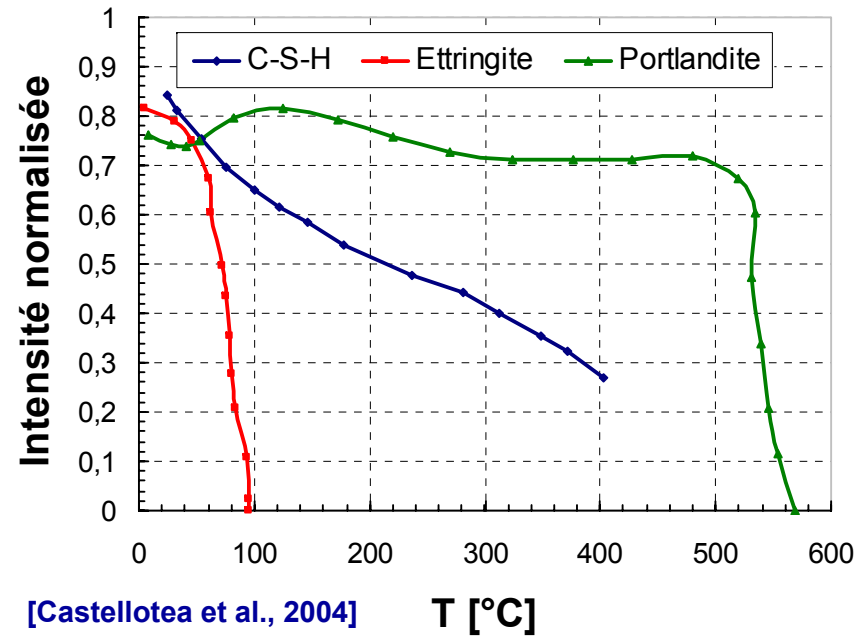
[Bažant, 1997]
[Ulm et al., 1999]



$$\sigma = \mathbf{E} (1 - D) (\varepsilon - \varepsilon^{th}) \quad [\text{Mazars, 1984}]$$

Mécanismes de dégradation à hautes températures

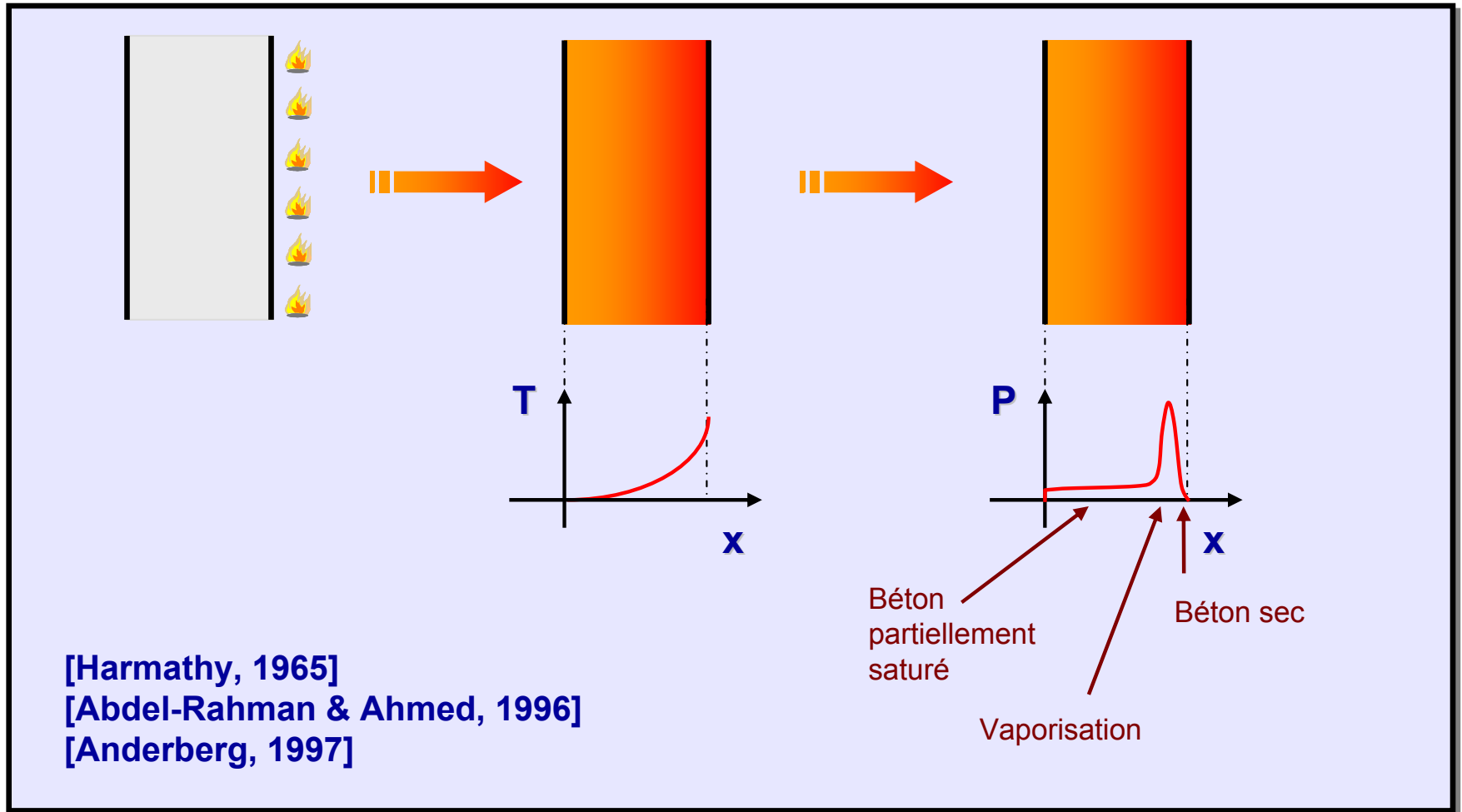
- Échelle microscopique: Réactions chimiques et déshydratation



$E(T), f_C(T), f_T(T), G_f(T)$

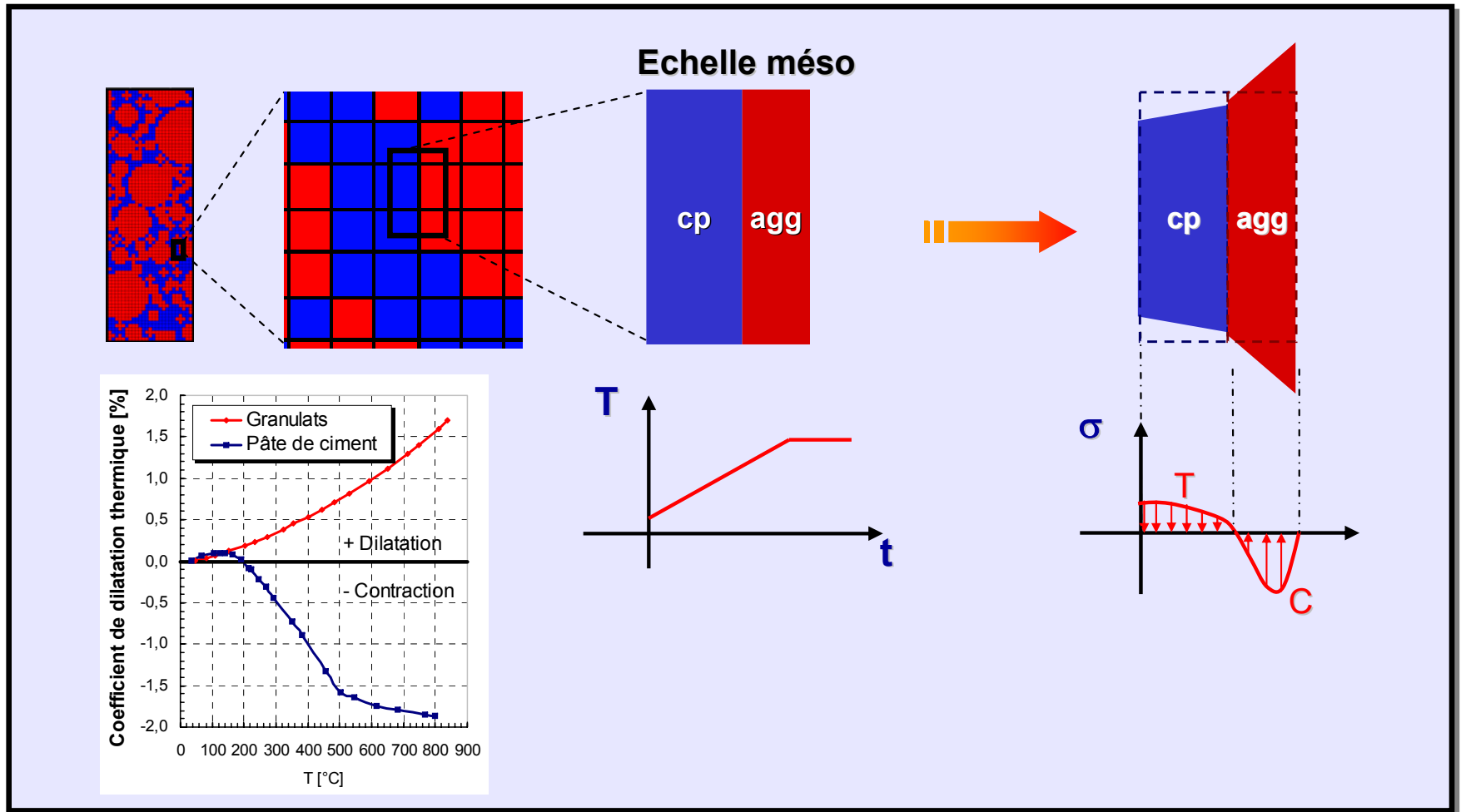
Mécanismes de dégradation à hautes températures

▪ Échelle microscopique: Pressions des pores



Mécanismes de dégradation à hautes températures

- Échelle mésoscopique: Incompatibilités pâte de ciment / granulats



Mécanismes de dégradation à hautes températures

MONT BLANC Tunnel,
FAURE & HEMOND




Channel tunnel,
FAURE & HEMOND



GOTHARD tunnel,
FAURE & HEMOND

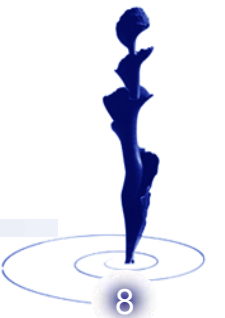


- Échelle macroscopique: Gradient thermique
- Échelle microscopique: Réactions chimiques et déshydratation
- Échelle microscopique: Pressions des pores
- Échelle mésoscopique: Incompatibilités pâte de ciment / granulats

- 
- Pertinence de la prise en compte de ce phénomène dans la modélisation du béton à hautes températures?
 - Comment le modéliser? Quelle stratégie de calcul?

Sommaire

- 1- Description du travail réalisé
- 2- Simulations pour le béton homogénéisé
- 3- Simulations pour le béton hétérogène
- 4- Conclusions & perspectives



Description du travail : *Objectifs*

Travail effectué

Objectifs

Maillages

Simulations

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions

- **Simuler le comportement du béton en utilisant des résultats expérimentaux [Hager,2004]**

- **Tester l'influence de différents paramètres et modèles sur la réponse à un chargement thermique ou thermo-mécanique**



Description du travail : *Simulations réalisées*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

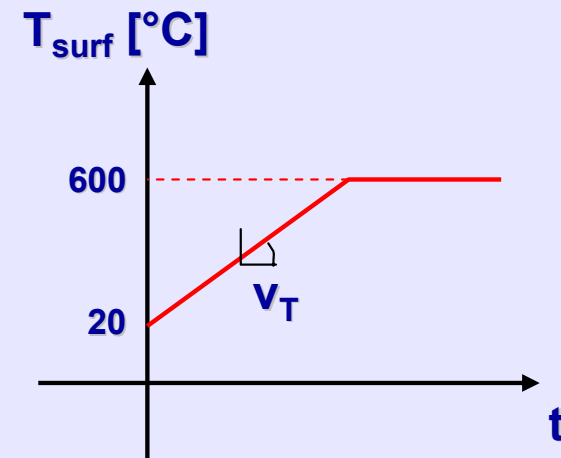
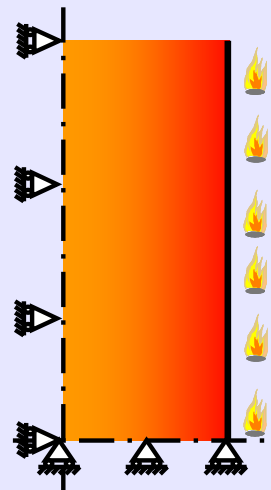
Béton hétérogène

Conclusions



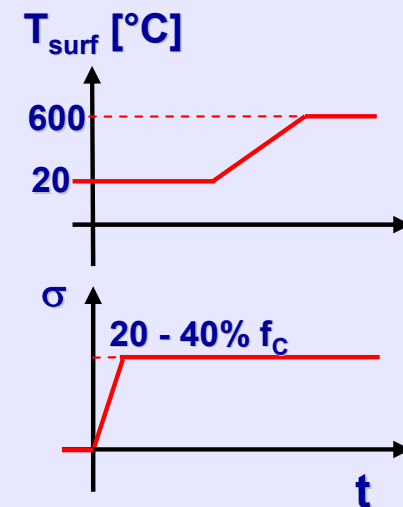
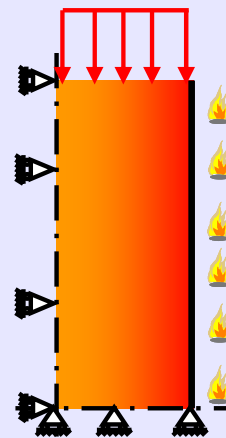
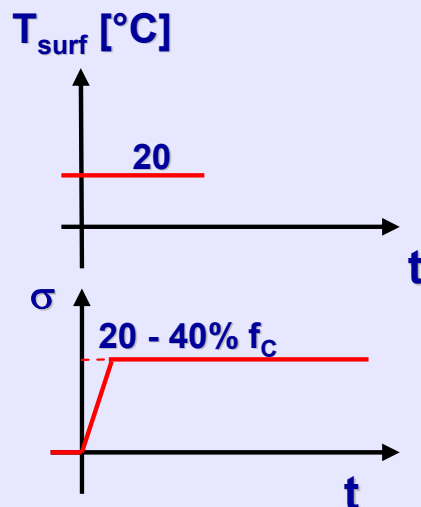
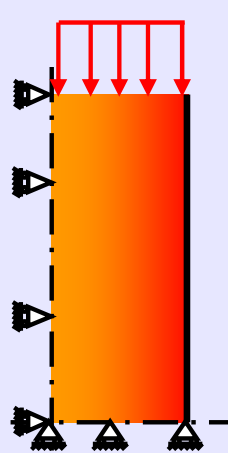
Chargement thermique

- T_{surf} : 20 to 600 [°C]
 - v_T : 0,1 - 0,5 - 1 [°C/min]
- [Hager, 2004]



Chargement thermo-mécanique

- σ : 20 - 40 % of f_c



Description du travail : *Maillages utilisés*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

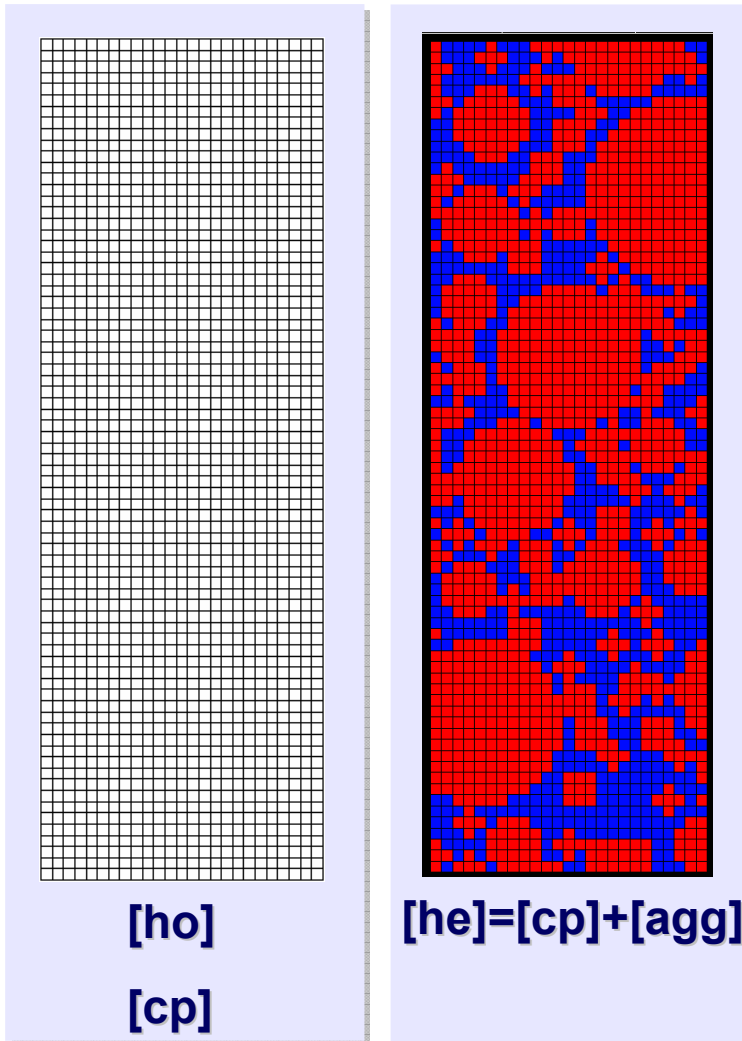
Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions



→ Maillage :

- BHP, $E/C=0,3$

(Pas d'auréole de transition)

- Béton homogénéisé [ho]
- Pâte de ciment [cp]
- Béton hétérogène [he]=[cp]+[agg]

Création du maillage: sur Matlab

→ Modèle utilisé

- Endommagement élastique isotropique
[Mazars, 1984]
- F.T.T. non linéaire
[Pearce et al, 2003]

→ Paramètres utilisés

- Propriétés thermiques $\rho_i, \lambda_{cp,ho}, C_{p,ho}$ fonctions de T
(+ changements de phase)
- E_i, α_i fonctions de T



Description du travail : *Modèle mécanique adopté*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions



▪ Granulats :

$$\sigma = (1 - \chi_{agg}(T)) E_0 \varepsilon^e$$

$$\chi_{agg} = 1 - \frac{E(T)}{E_0}$$

$$\varepsilon^{th} = \alpha_{agg}(T) \times (T - T_{ref}) \mathbf{1}$$

▪ Pâte de ciment :

[Mazars, 1984]

$$\sigma = (1 - \chi_{cp}(T))(1 - D) E_0 \varepsilon^e$$

$$\chi_{cp} = 1 - \frac{E(T)}{E_0}$$

$$\varepsilon^{th} = \alpha_{cp}(T) \times (T - T_{ref}) \mathbf{1}$$

$$\dot{\varepsilon}^{F.T.T.} = \frac{\beta_{cp}(T)}{f_{c\ pdc}^0} |\dot{T}| \tilde{\sigma}$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^{th} + \dot{\varepsilon}^{F.T.T.}$$

[Pearce et al, 2003]



Validation du modèle : *Validation mécanique*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

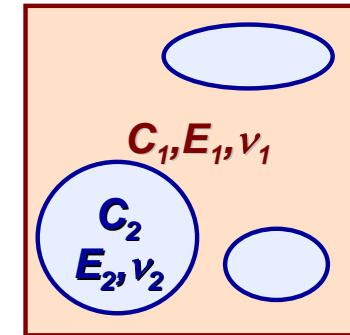
Béton hétérogène

Conclusions



Solution analytique :

- Matériau bi-phasique
- 2D, contraintes planes
- Mêmes modules de cisaillement G



$$E_{\text{homogénéisé}} = c_1 \times E_1 + c_2 \times E_2$$

$$v_{\text{homogénéisé}} = c_1 \times v_1 + c_2 \times v_2$$

[Hill, 1965]

Comparaison avec nos simulations :

$$\% \text{ Erreur } E_{\text{simulation numérique / solution analytique}} = 0,11$$

$$\% \text{ Erreur } v_{\text{simulation numérique / solution analytique}} = 0,45$$

- Résultats numériques en accord avec la solution analytique
⇒ Validation mécanique élastique

Validation du modèle : *Validation thermo-mécanique*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

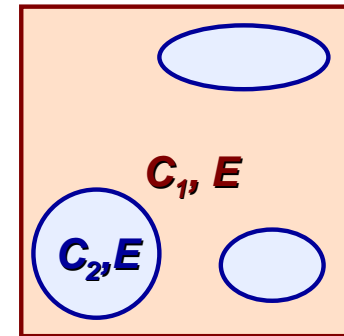
Conclusions



Solution analytique :

- Matériau bi-phasique
- Montée en température uniforme
- Même module d'Young

$$\varepsilon^{\text{th}}_{\text{homogénéisé}} = c_1 \times \varepsilon^{\text{th}}_1 + c_2 \times \varepsilon^{\text{th}}_2$$



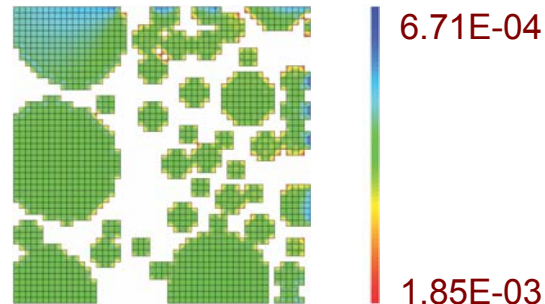
[Vegards, 1921; Goodier, 1937]

+ Trace de ε^{th} global uniforme dans les inclusions du maillage

Comparaison avec nos simulations :

$$\% \text{ Erreur } \varepsilon^{\text{th}}_{\text{simulation numérique} / \text{solution analytique}} = 0,27 - 1\%$$

Trace de ε^{th} global :



- Résultats numériques en accord avec la solution analytique
- Validation thermo-mécanique de l'approche mésoscopique

Identification des propriétés : *Thermiques*

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions



Procédure d'identification :

Résultats expérimentaux utilisés :

$$\Delta T_{\text{coeur-surface}} = f(T)$$

Propriétés identifiées :

Lois d'évolution de $(C_p, \lambda)_{\text{gr,pdc,b}}$

Stratégie d'identification :

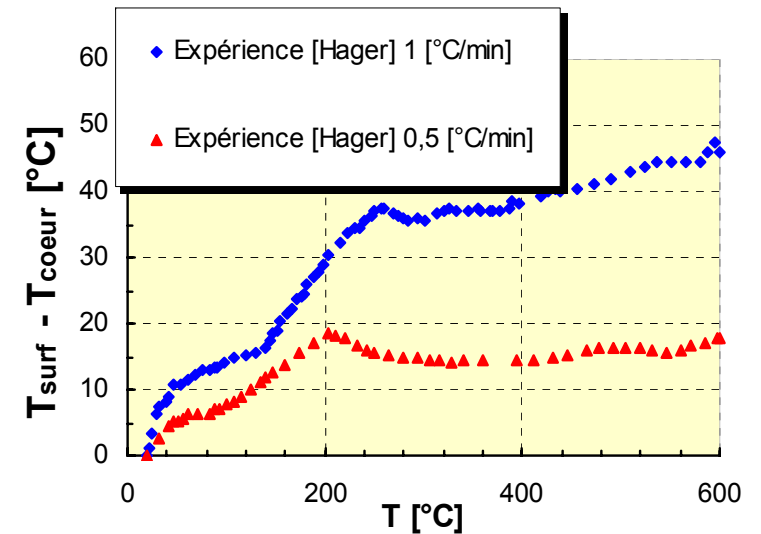
⇒ *Granulats et pâte de ciment :*

Algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt

⇒ *Béton homogénéisé :*

$$C_{p_{\text{homogénéisé}}} = c_{\text{gr}} \times C_{p_{\text{gr}}} + c_{\text{pdc}} \times C_{p_{\text{pdc}}}$$

$$\lambda_{\text{homogénéisé}} = \frac{1}{2} (c_{\text{gr}} \times \lambda_{\text{gr}} + c_{\text{pdc}} \times \lambda_{\text{pdc}}) + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_{\text{gr}} \lambda_{\text{pdc}}}{c_{\text{gr}} \lambda_{\text{pdc}} + c_{\text{pdc}} \lambda_{\text{gr}}} \right)$$



Identification des propriétés : *Thermiques*

Travail effectué

- Objectifs
- Simulations
- Maillages
- Modèle
- Propriétés T/TM

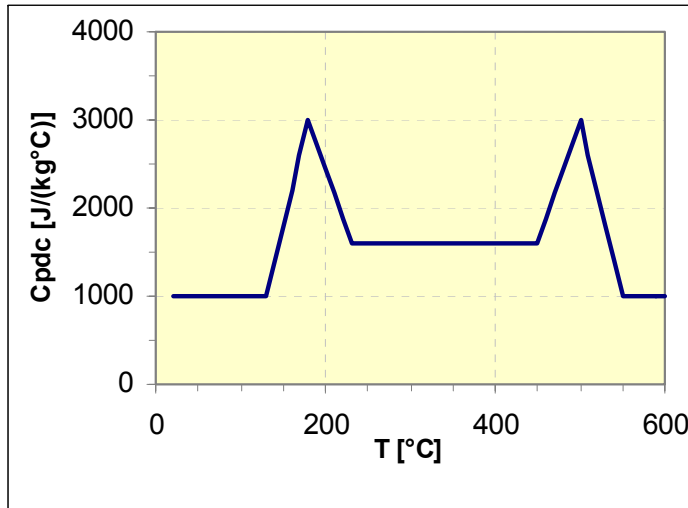
Béton homogène

Béton hétérogène

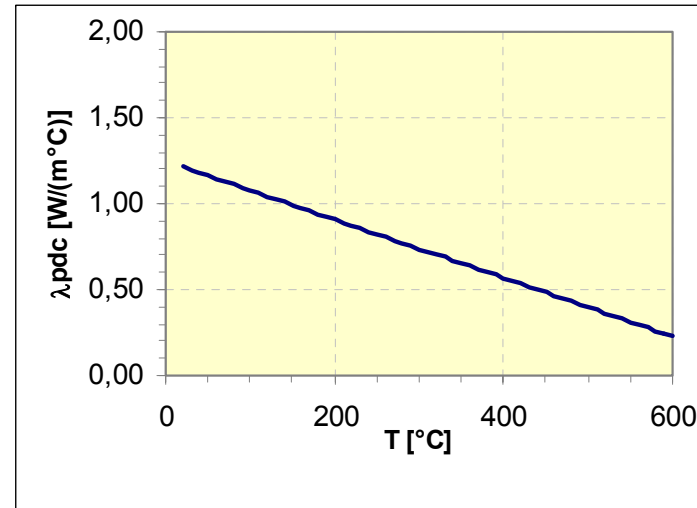
Conclusions



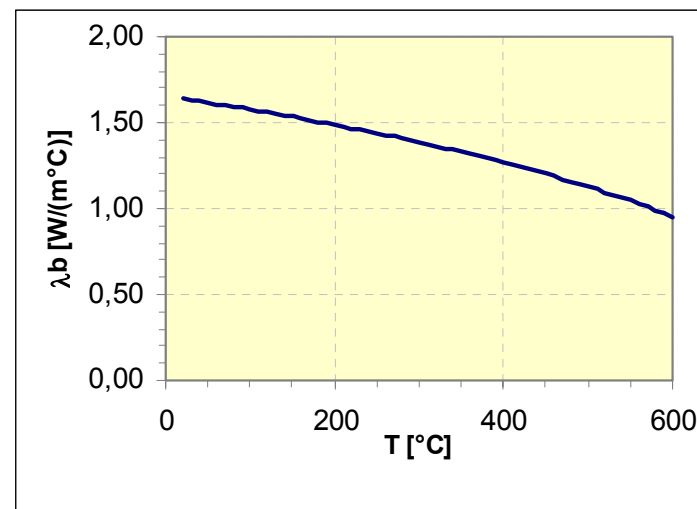
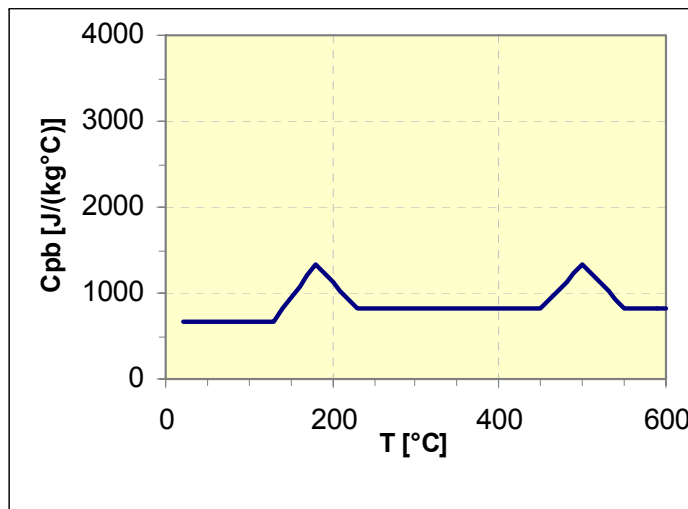
Évolutions des propriétés thermiques obtenues :



$$Cp_{gr} = 518,23 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C}) = \text{cte}$$



$$\lambda_{gr} = 1,9 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C}) = \text{cte}$$



Identification des propriétés : *Thermiques*

Travail effectué

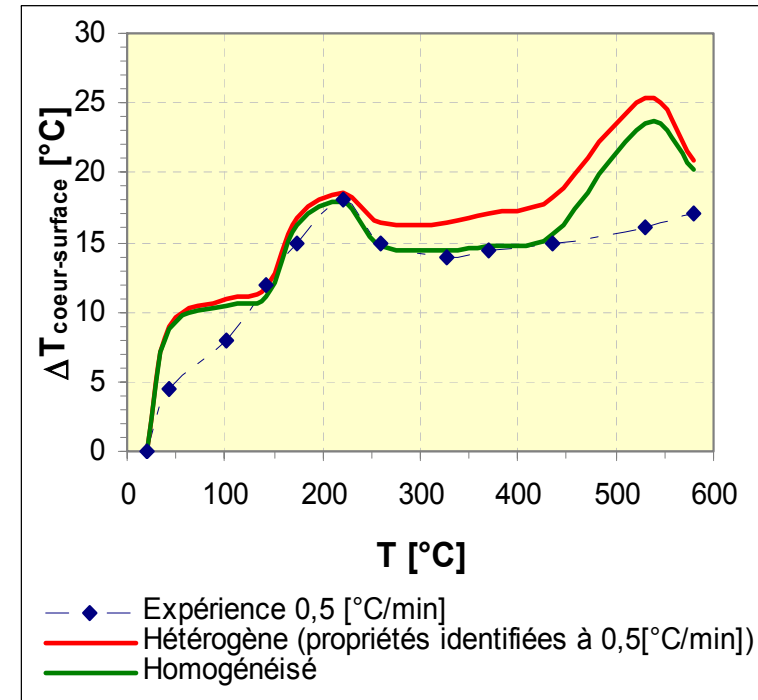
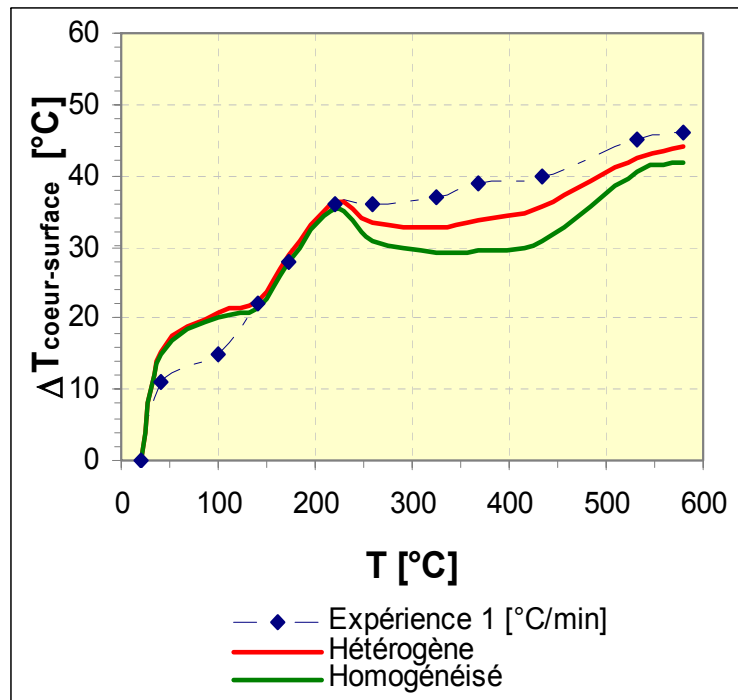
- Objectifs
- Simulations
- Maillages
- Modèle
- Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions

Évolution du gradient thermique dans l'éprouvette en fonction de T :



- Optimisation des paramètres C_p et λ pour le matériau hétérogène et homogénéisation pour le matériau hétérogène en accord avec les résultats expérimentaux



Identification des propriétés : *Thermiques*

Travail effectué

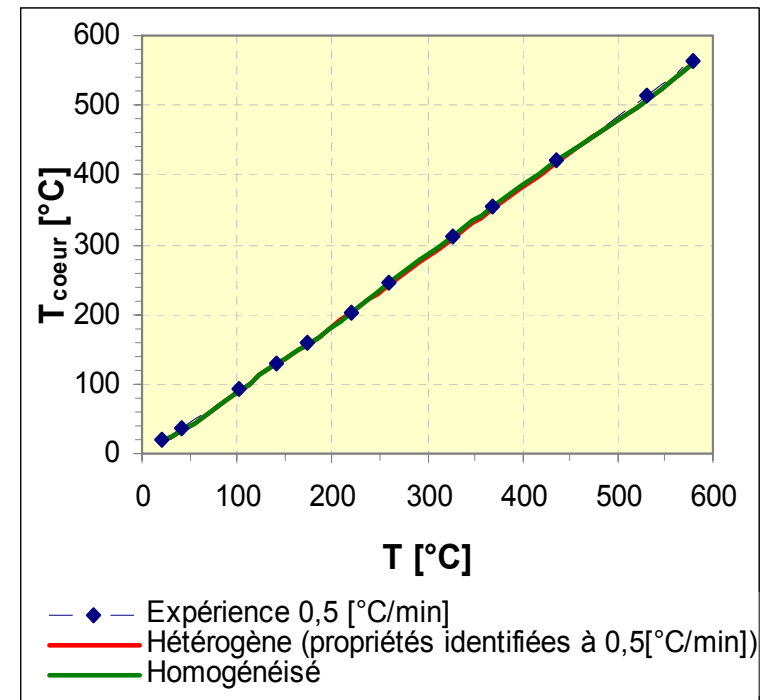
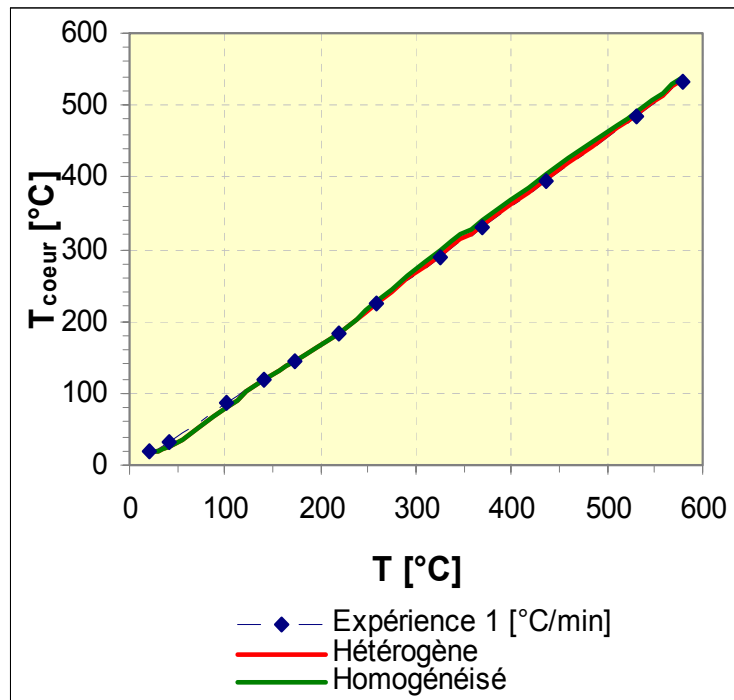
- Objectifs
- Simulations
- Maillages
- Modèle
- Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions

Évolution de la température de cœur en fonction de T :



- Écarts observés précédemment plus visibles
- Méthode d'identification adoptée classiquement



Identification des propriétés : Mécaniques

Travail effectué

Objectifs

Simulations

Maillages

Modèle

Propriétés T/TM

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions



Procédure d'identification :

- Résultats expérimentaux utilisés :

$$\sigma(T) = f(\varepsilon(T))$$

- Propriétés identifiées :

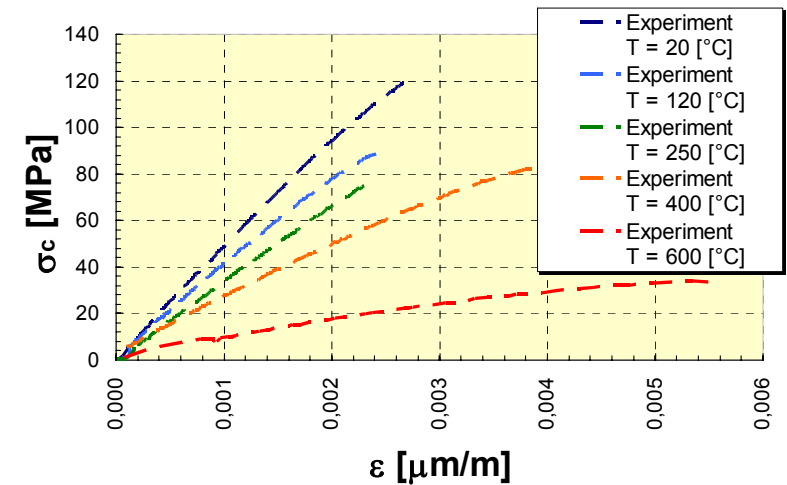
$$(\chi, K_0, A_c, B_c, A_t, B_t)_{gr,pdc,b}$$

- Stratégie d'identification :

⇒ *Béton homogénéisé* :

Algorithme d'optimisation de Levenberg-Marquardt

⇒ *Béton hétérogène*



Calculs en cours ...



Béton homogène : *Chargement T*

Travail effectué

Béton homogène

Chargement T

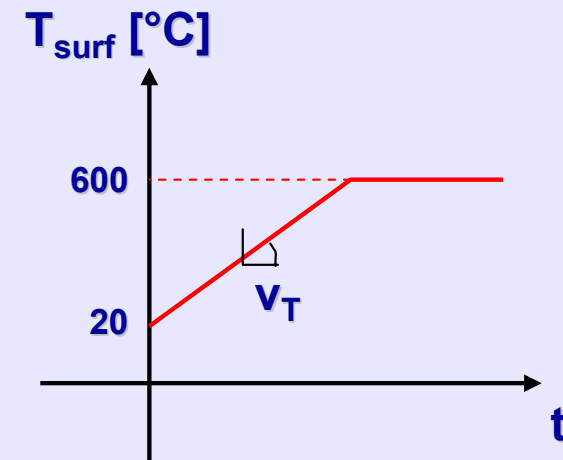
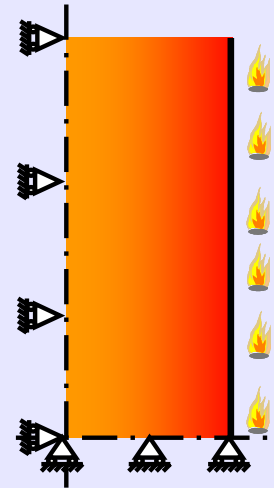
Chargement TM

Béton hétérogène

Conclusions

Chargement thermique

- T_{surf} : 20 to 600 [°C]
 - v_T : 0,1 - 0,5 - 1 [°C/min]
- [Hager, 2004]



Chargement T : *Endommagement mécanique*

Travail effectué

Béton homogène

Chargement T

Chargement TM

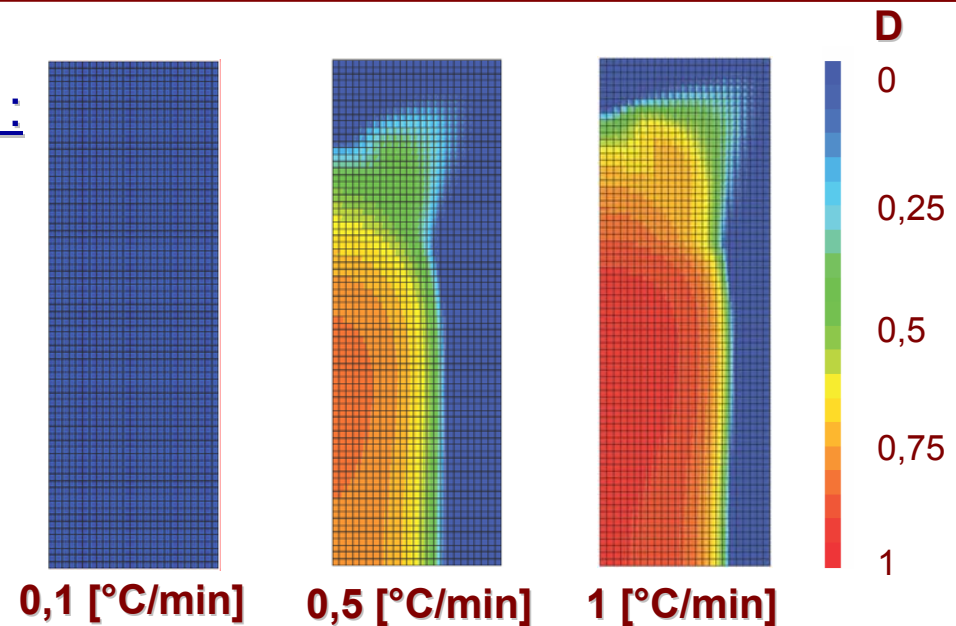
Béton hétérogène

Conclusions

Endommagement mécanique :

Mazars seul

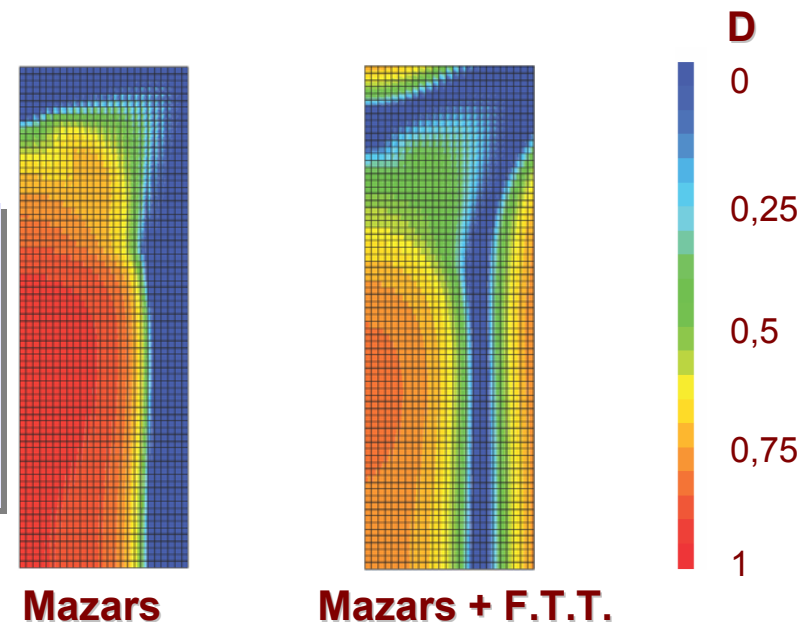
- Influence de la vitesse de montée en température



Influence du F.T.T. :

$v = 1$ [°C/min]

- Relaxation des contraintes avec le modèle Mazars + F.T.T. (D plus faible à coeur)
- D additionnel en surface (due au gradient de déformation de F.T.T.)



Béton homogène : *Chargement thermo-mécanique T-M*

Travail effectué

Béton homogène

Chargement T

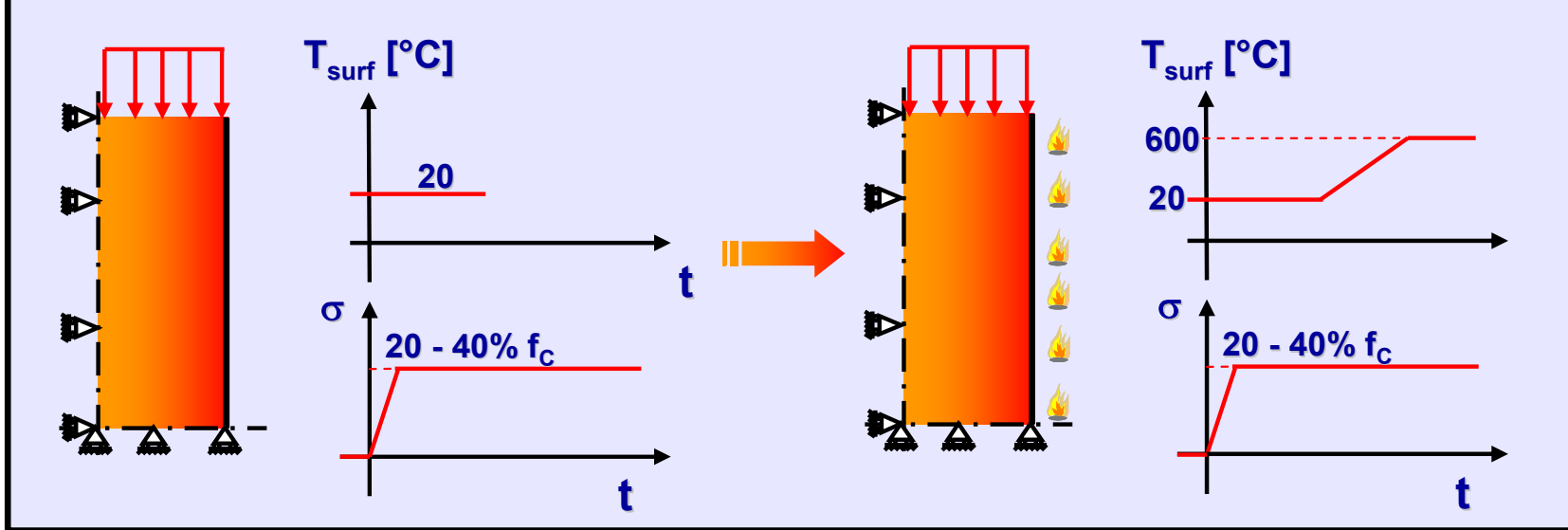
Chargement TM

Béton hétérogène

Conclusions

Chargement thermo-mécanique

- σ : 20 - 40 % of f_c



Chargement T-M : Identification des paramètres

Travail effectué

Béton homogène

Chargement T

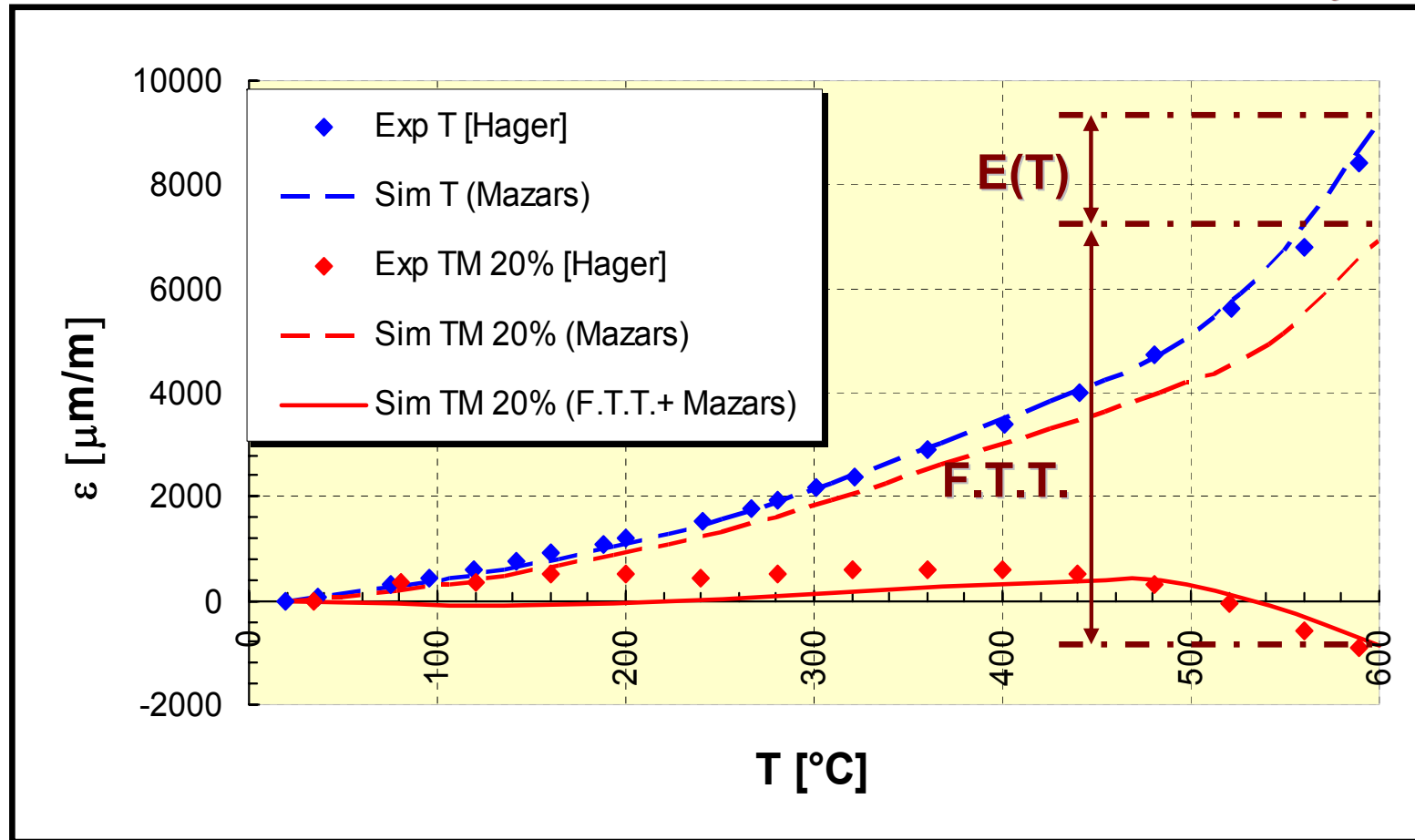
Chargement TM

Béton hétérogène

Conclusions

➔ Paramètres identifiés : $\beta(T)$

$v = 1 [^{\circ}\text{C}/\text{min}]$
 $\sigma = 20\% f_c$



- Part prépondérante du F.T.T. par rapport à $E(T)$



Béton hétérogène : *Chargement thermique T*

Travail effectué

Béton homogène

Béton hétérogène

Chargement T

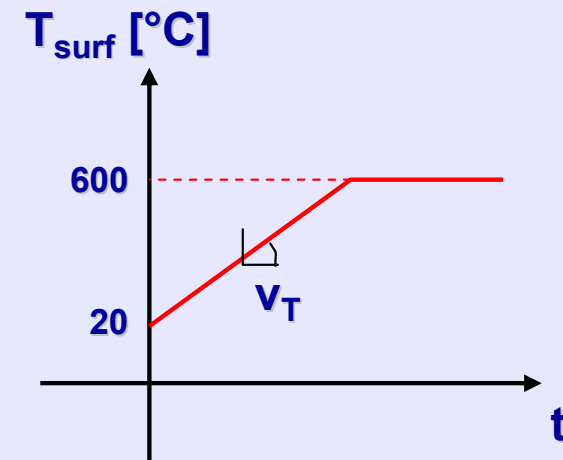
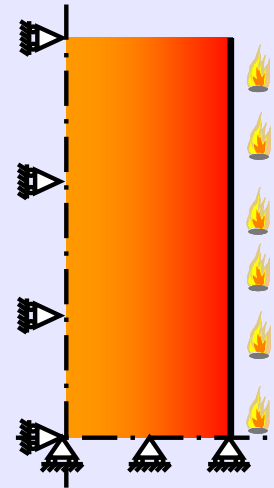
Chargement TM

Conclusions



Chargement thermique

- T_{surf} : 20 to 600 [°C]
 - v_T : 0,1 - 0,5 - 1 [°C/min]
- [Hager, 2004]



Chargement T : *Endommagement mécanique*

Travail effectué

Béton homogène

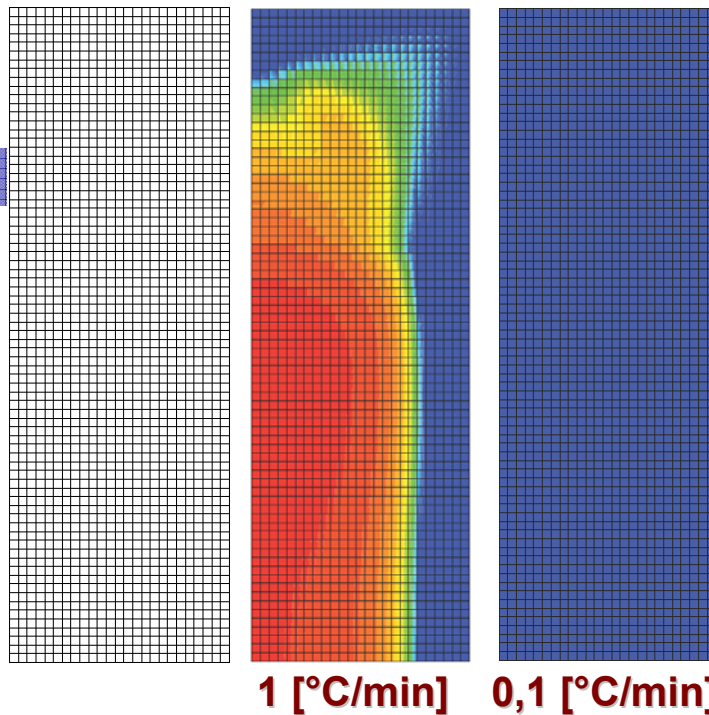
Béton hétérogène

Chargement T

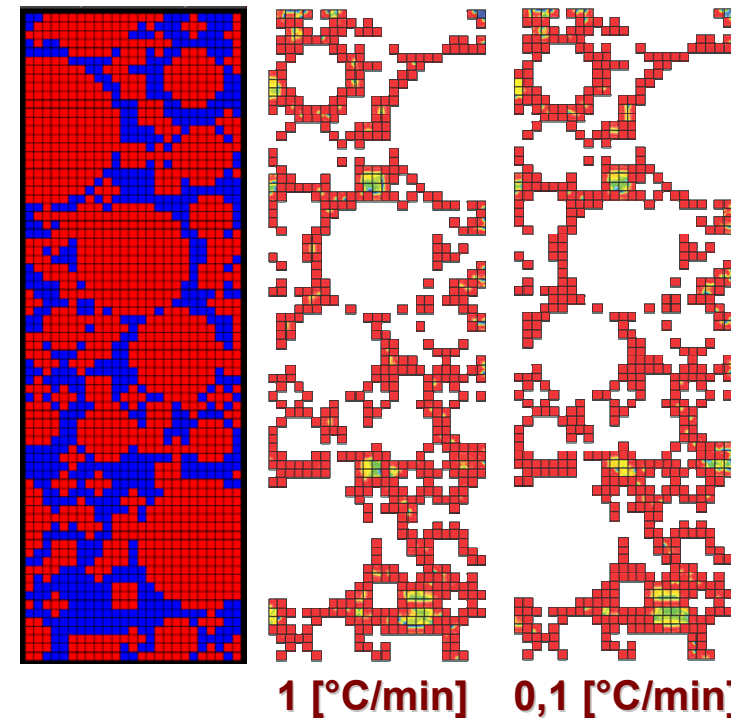
Chargement TM

Conclusions

Béton homogénéisé



Béton hétérogène



- Champs d'endommagement différents spécialement pour 0,1 [°C/min]
- Faible influence de la vitesse de montée en température pour le béton hétérogène
- Endommagement certainement surestimé (décohésions aux interfaces pâte de ciment / granulats non modélisées)

Chargement T : Contraintes

Travail effectué

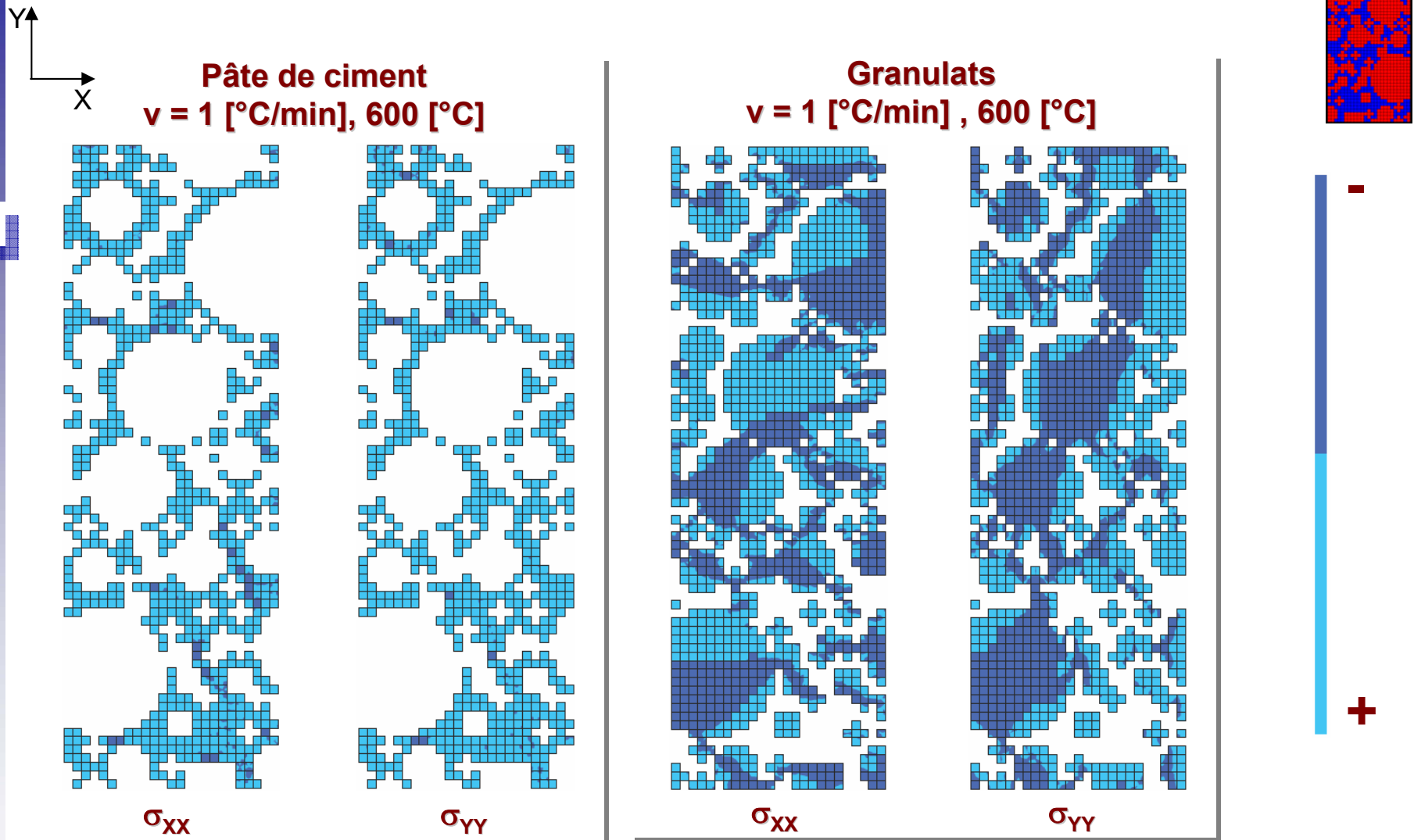
Béton homogène

Béton hétérogène

Chargement T

Chargement TM

Conclusions



- \approx Contraintes de traction dans la pâte
- \approx Contraintes de compression dans les granulats

Béton hétérogène : *Chargement thermo-mécanique T-M*

Travail effectué

Béton homogène

Béton hétérogène

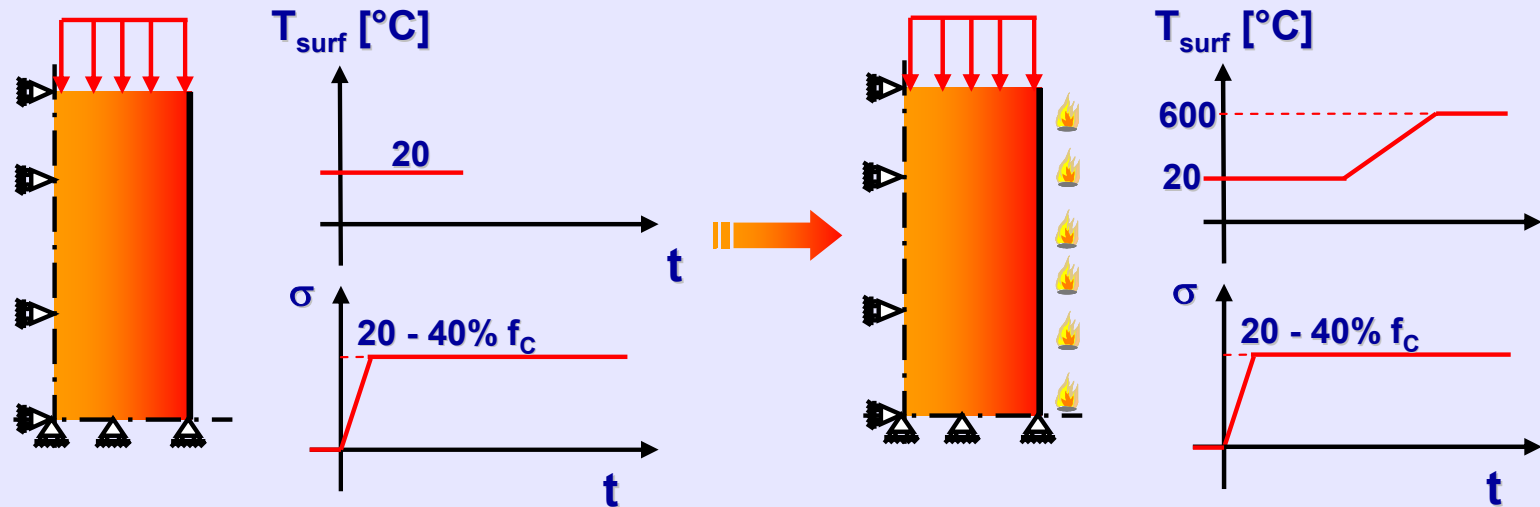
Chargement T

Chargement TM

Conclusions

Chargement thermo-mécanique

- σ : 20 - 40 % of f_c



Chargement T-M : Contraintes

Travail effectué

Béton homogène

Béton hétérogène

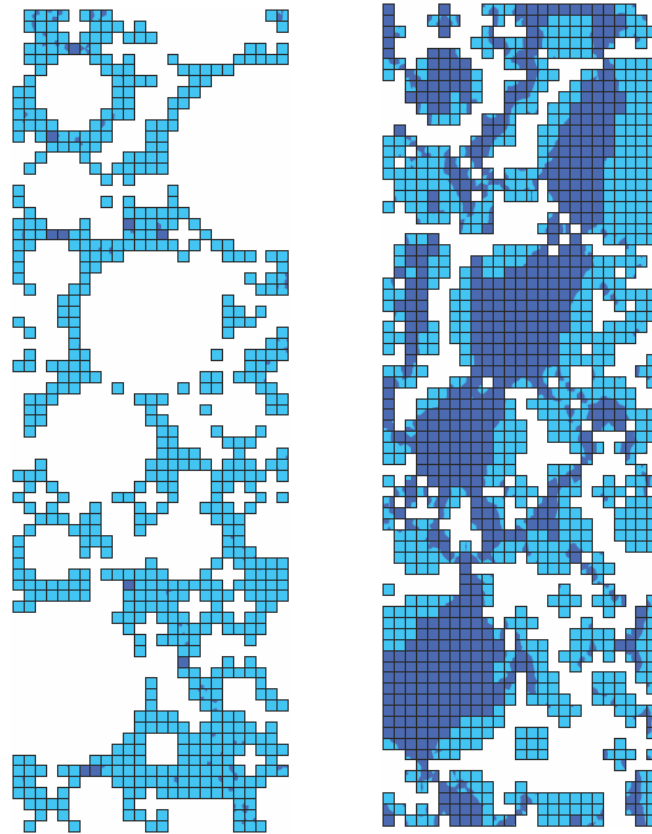
Chargement T

Chargement TM

Conclusions



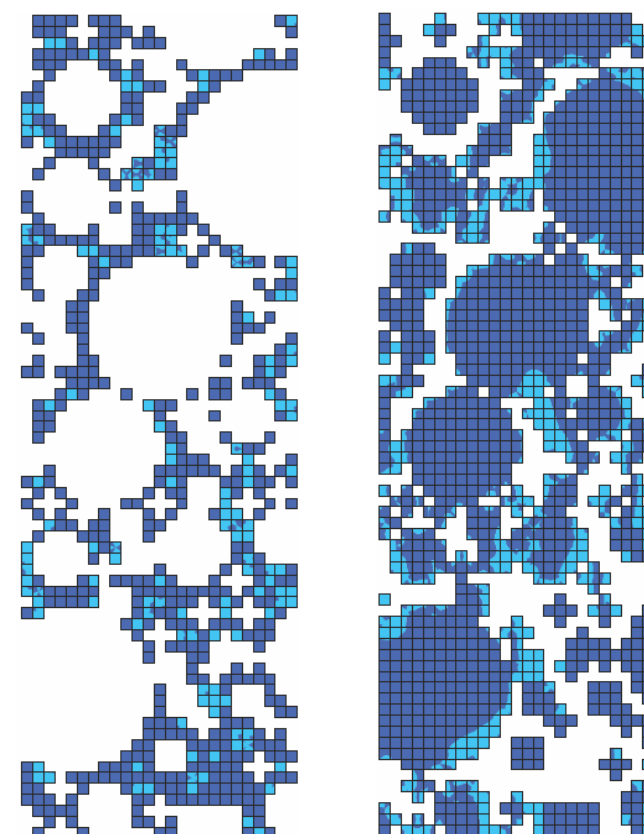
Chargement T
Pâte de ciment Granulats



$\sigma_{YY}, v = 1 [^{\circ}\text{C}/\text{min}], T = 600 [^{\circ}\text{C}]$

Mazars seul

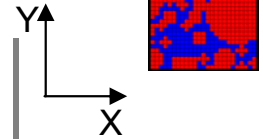
Chargement T-M
Pâte de ciment Granulats



$\sigma_{YY}, v = 1 [^{\circ}\text{C}/\text{min}], T = 600 [^{\circ}\text{C}]$

$\langle \sigma_{YY\text{pdc}} \rangle = 0,02 [\text{MPa}]$

$\langle \sigma_{YY\text{gr}} \rangle = -33 [\text{MPa}]$



Conclusions

Travail effectué

Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions

- Approche qualitative : Importance de prendre en compte l'hétérogénéité du matériau pour décrire l'endommagement mécanique

- Modèle possible :

$$\sigma = \mathbf{E} (1 - D) (1 - \chi) (1 - \gamma) (\varepsilon - \varepsilon^{th})$$

Où γ représente l'incompatibilité des déformations entre pâte de ciment et les granulats (dépendant de la température, des propriétés mécaniques de chaque phases, de la forme et de la distribution des granulats)

- F.T.T. dans le béton probablement pas du au F.T.T. dans la pâte de ciment mais plutôt aux incompatibilités entre granulats et pâte de ciment ([Khoury, 1985])



Perspectives

Travail effectué

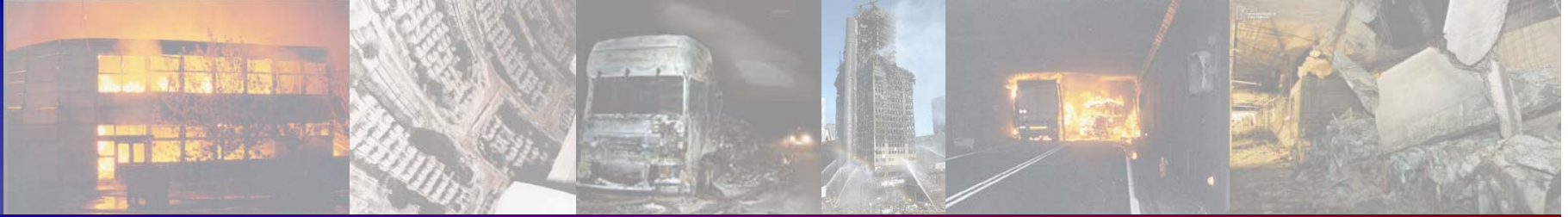
Béton homogène

Béton hétérogène

Conclusions

- Modèle endommageable pour les granulats pour prendre en compte la fissuration
- Méthode de régularisation énergétique $G_f \propto L_{EF}$ [Hillerborg, 1976]
- Éléments d'interfaces pour décrire la décohesion observée à l'interface pâte de ciment / granulats
- Tester l'influence des propriétés mécaniques, de la morphologie, de la distribution des granulats





Merci de votre attention...

