

MODÉLISATION MÉSOSCOPIQUE ET SIMULATION DU FLUAGE DU BÉTON : APPLICATIONS AVEC MFRONT

B. BARY, F. BERNACHY (DPC/LECBA)

C. BOURCIER (DM2S/LGLS)

T. HELFER (DEC/LSC)

J. SANAHUJA (EDF/MMC)

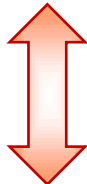
J.L. ADIAT (UPE)

Stratégie de modélisation multiéchelle**VER béton =
matériau hétérogène**

Interactions entre la matrice poreuse (pâte de ciment, mortier), les granulats (élastiques) et les interfaces (ITZ)

Modélisation analytique

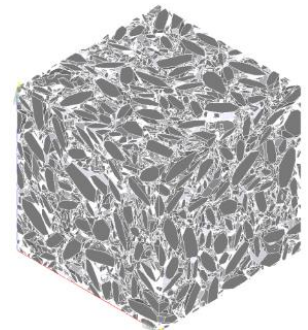
- **Intégration des propriétés et mécanismes à l'échelle des phases élémentaires**
 - méthodes de changement d'échelle, microstructures simplifiées
 - estimation des propriétés mécaniques, diffusives...
- **Caractérisation des lois de comportement macroscopique**
- **Prédiction du comportement du matériau**



- ☐ *Propriétés viscoélastiques (fluage), vieillissantes (jeune âge)*
- ☐ *Prise en compte d'interfaces (ITZ)*
- ☐ *Effets de la température, de l'humidité relative...*

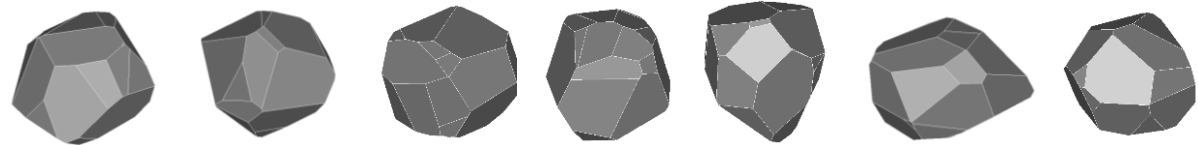
Simulations numériques : complémentaires des modèles analytiques

- **Simulations sur Volume Élémentaire Représentatif (VER)**
 - microstructures plus complexes et 'réalistes'
- **Calculs précis en champs complets**
 - validation d'approches analytiques
 - investigation des effets de la forme des granulats, ITZ
 - effets de la microfissuration...



- **COMBS** → Code de CAO Salome (C. Bourcier, E. Adam, DM2S/LGLS)
- Applications 'bétons' : génération de microstructures avec inclusions dispersées aléatoirement
→ Exemple de formes : agrégats de Voronoi (qhull) 'isotropes'

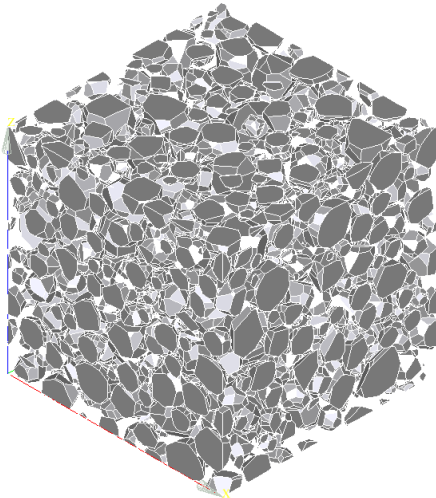
Catalogue
de formes



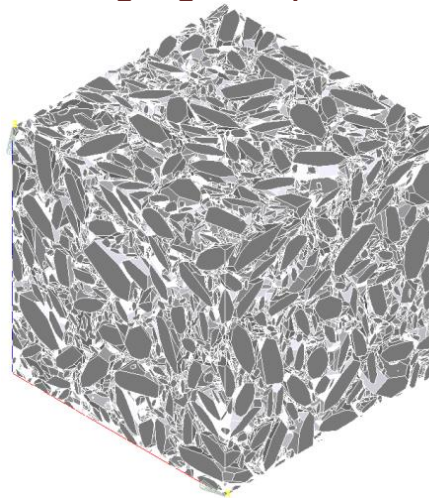
- Géométries + maillages EF périodiques → génération d'images voxellisées (vtk)

Illustrations :

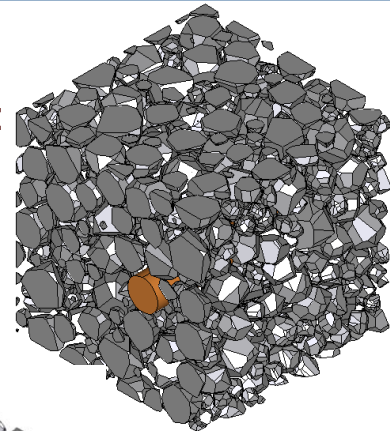
Agrégats 'isotropes'



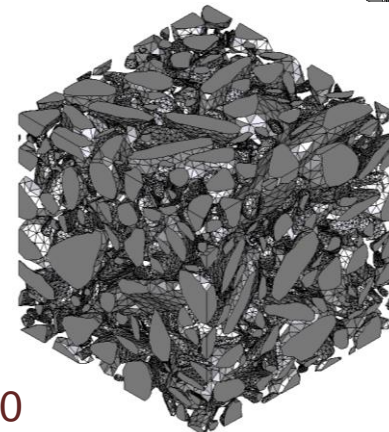
Agrégats aplatis



Mesostructure :
béton de
parement +
armature



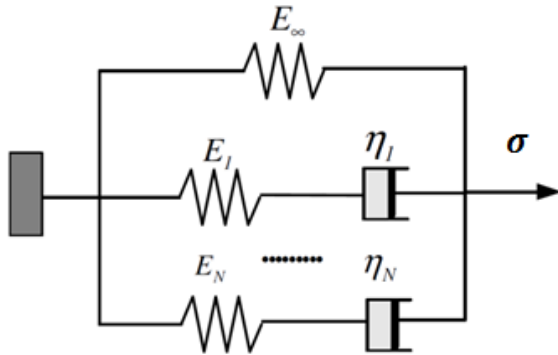
Granulats
réels issus de
tomographie



- **Amélioration du placement d'inclusions convexes :**
algorithme GJK (C. Bourcier, 2015), gain de temps facteur ≈ 10

Modèle de Maxwell généralisé

▪ **Comportement de la matrice** : viscoélastique linéaire



Hypothèse (isotropie) : les modules de compressibilité et de cisaillement évoluent indépendamment

$$\Rightarrow k^m(t) = k_0^m + \sum_{i=1}^N k_i^m e^{-t/\tau_i^m} \quad \mu^m(t) = \mu_0^m + \sum_{i=1}^N \mu_i^m e^{-t/\tau_i^m}$$

Comportement :

$$\sigma^m(t) = 3 \int_{0^-}^t k^m(t-\tau) \frac{d\epsilon^m}{d\tau} d\tau \mathbf{1} + 2 \int_{0^-}^t \mu^m(t-\tau) \frac{d\mathbf{e}^m}{d\tau} d\tau$$

sphérique déviatorique

Discrétisation : schéma explicite

Pour la partie sphérique :

$$\sigma(t_{i+1}) \cong \sum_j^N \left[\underbrace{\sigma_j(t_i)}_{\text{variable interne (tenseur)}} e^{-\Delta t_i/\tau_j} + 3k_j\tau_j(1 - e^{-\Delta t_i/\tau_j}) \frac{\Delta\epsilon_i}{\Delta t_i} \right] + 3k_0 \sum_{k=1}^{i+1} [\Delta\epsilon_k]$$

Prise en compte d'interfaces pâte/granulat

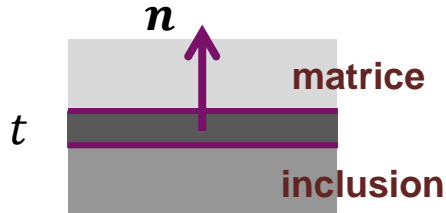
□ **Calculs EF : utilisation d'éléments joints dans Cast3M**

➔ **Modélisation des ITZ**

- **Éléments joints Cast3M** : épaisseur 'nulle', 2 rigidités (normale, tangentielle)

$$[\sigma] \cdot n = 0,$$

$$k \cdot [u] = \sigma \cdot n$$

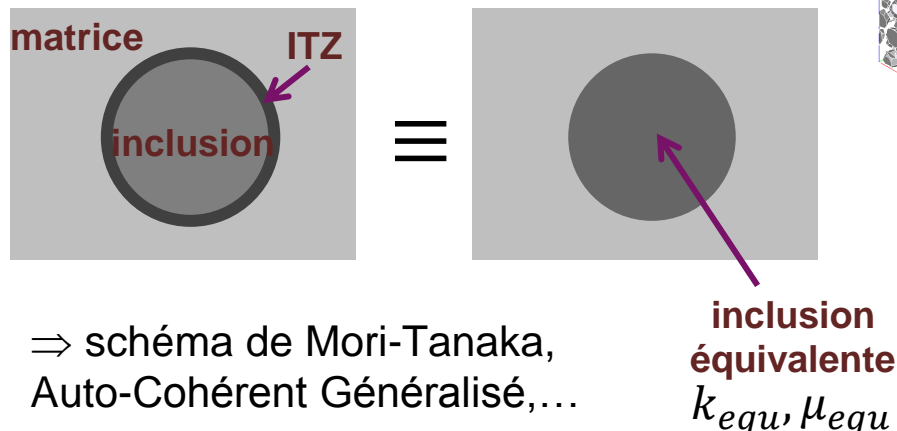


➔ Linear spring model (Hashin 91) :

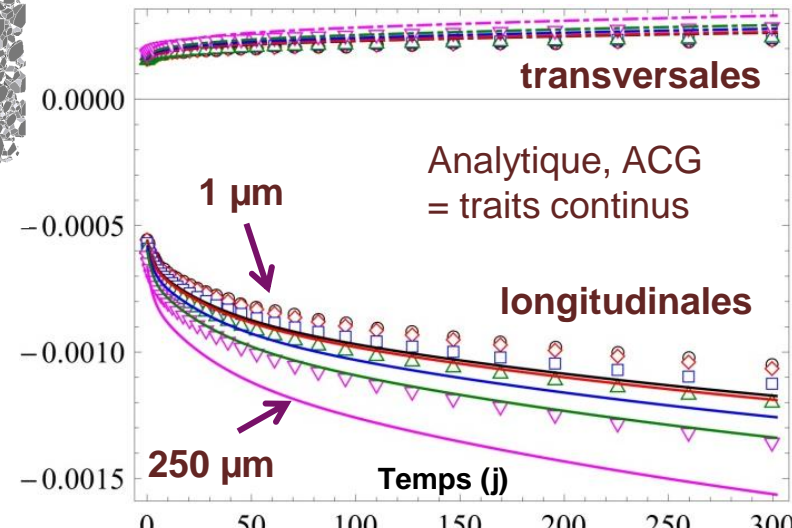
$$\rightarrow k_n = \frac{2\mu_c(1 - \nu_c)}{t(1 - 2\nu_c)} \quad k_t = \frac{\mu_c}{t}$$

- Éléments joints sur toutes les interfaces granulats/matrice
- Même comportement viscoélastique linéaire que la matrice ➔ implanté avec **MFront**

➔ **Homogénéisation analytique (Laplace-Carson)** : procédure de remplacement de l'inclusion composite (Duan et al., 2007)



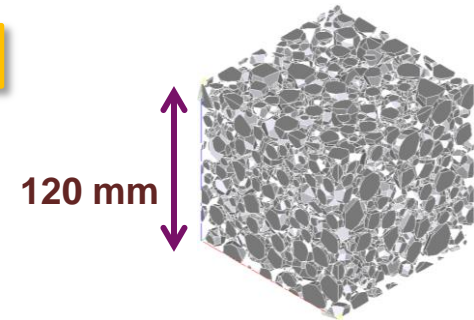
Déformations de fluage : différentes épaisseurs d'ITZ



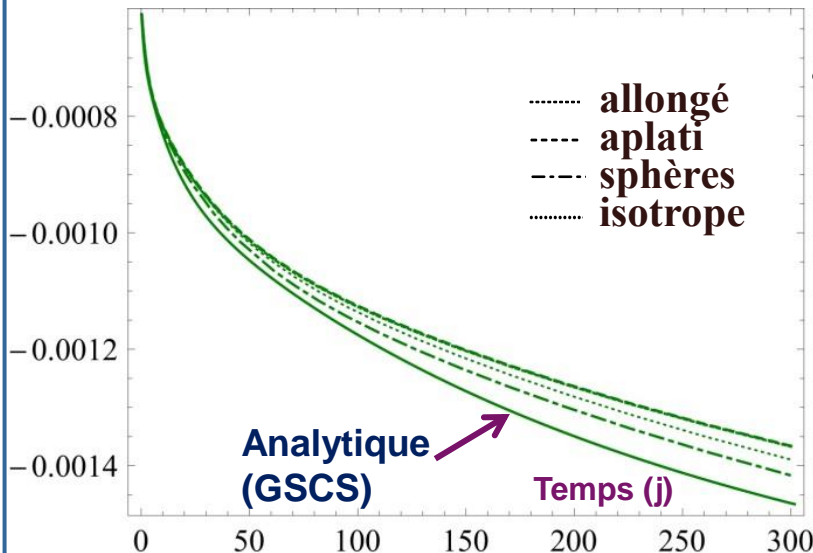
Interfaces : viscoélasticité linéaire

Résultats sur microstructures 4627 inclusions, 50%, fluage

- ITZ viscoélastique : modules \approx divisés par 2 / matrice
- Différentes épaisseurs : 1, 20, 100, 250 μm
- Rayon moyen équivalent des granulats : 3,55 mm



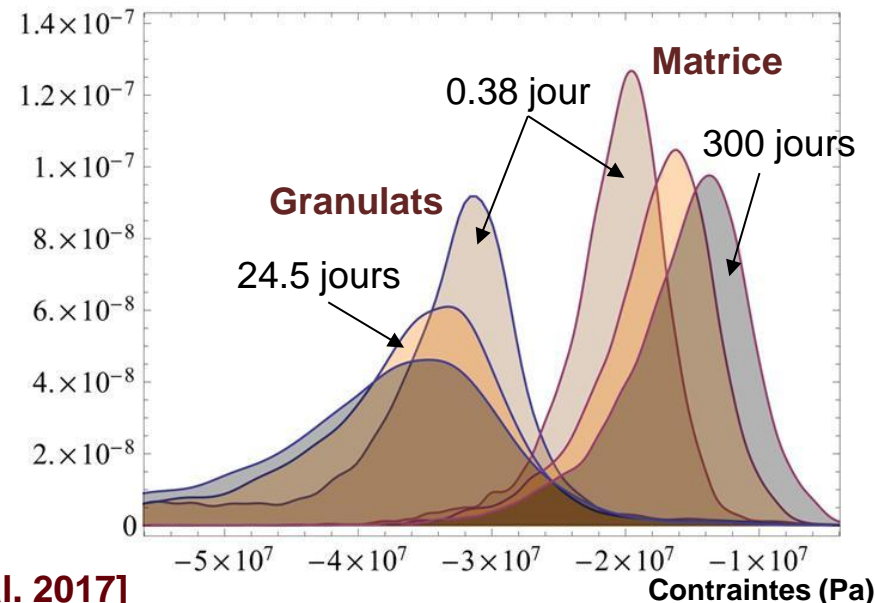
Effets de la forme des granulats (20 μm)



$\sigma = 24.8 \text{ MPa}$



Distribution des contraintes (20 μm)



[Bary et al. 2017]

- Pour des épaisseurs $< 50 \mu\text{m}$, peu d'influence d'après les calculs et la modélisation

→ **intérêt faible pour les bétons, non négligeable pour les mortiers**

- Résultats numériques et analytiques en relativement bon accord → **modèle satisfaisant**

❑ Extension aux effets thermiques :

⇒ Différents aspects à considérer :

▪ Dépendance sur le comportement viscoélastique (thermoactivation) :

→ Temps équivalent : $t_e(t) = \int_0^t \exp \left[-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_0} \right) \right] d\tau \quad \frac{Q}{R} = 6200 \text{ K}$

▪ Comportement : hypothèse : coefficient de dilatation constant

$$\sigma^m(t) = 3 \int_{0^-}^{t_e} k^m(t_e - \tau) \frac{d(\epsilon^m - \alpha^m \Delta T)}{d\tau} d\tau + 2 \int_{0^-}^{t_e} \mu^m(t_e - \tau) \frac{d\epsilon^m}{d\tau} d\tau$$

▪ Prise en compte des interfaces :

→ Estimation des déplacements thermiques à l'interface (Linear Spring Model)

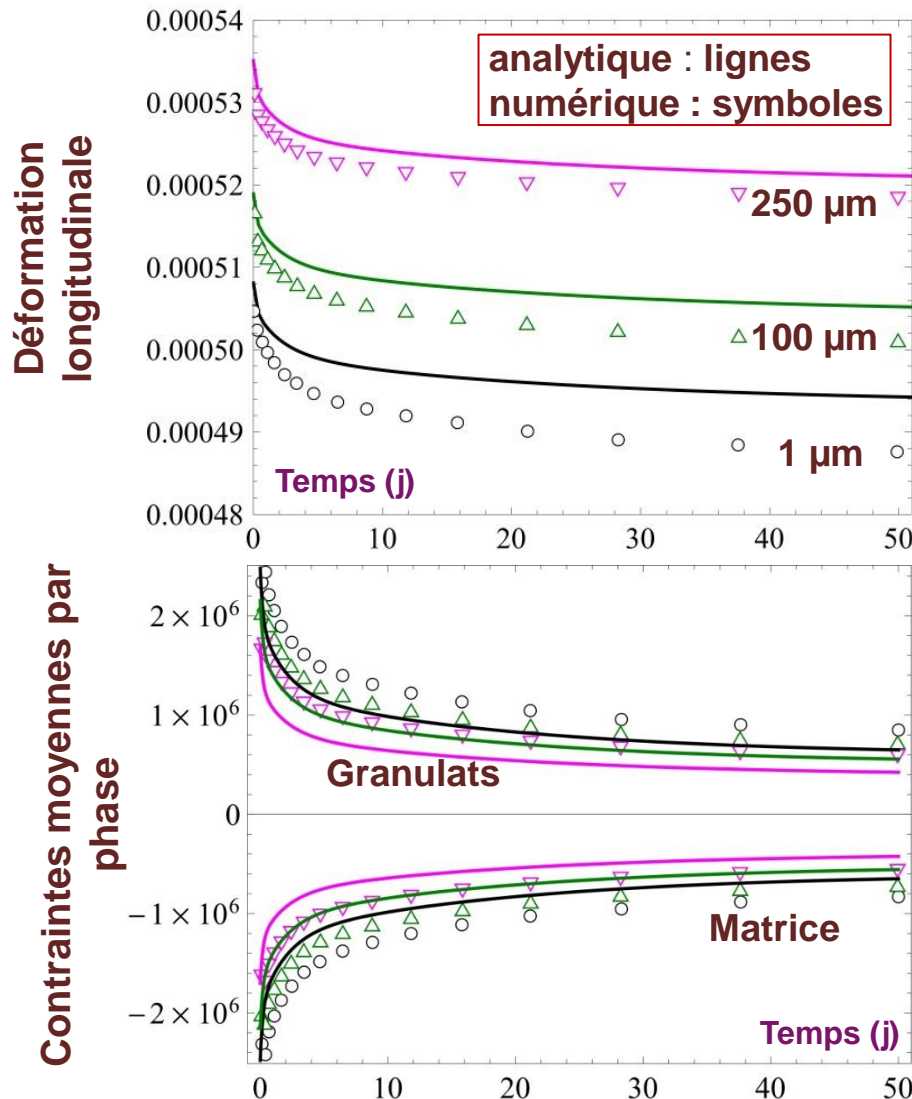
$$[[u]].n = \gamma \Delta T \quad \gamma = \frac{\alpha_c(1 + \nu_c) - 2\alpha_g \nu_c}{1 - \nu_c} t \quad (\text{Duan \& Karihaloo, 2007})$$

⇒ fonction de l'épaisseur et des propriétés des granulats et de l'interface

→ En pratique : $\gamma \approx C t$ $C = \text{constante}$

Effets de la température : résultats

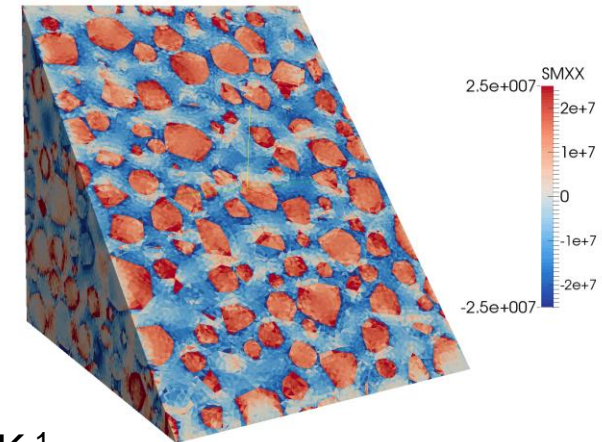
❑ Application : chargement thermique homogène de 40°C



- Relativement bon accord entre les résultats numériques et analytiques
- Diminution modérée des déformations macroscopiques
- L'augmentation de l'épaisseur de l'ITZ tend à faire décroître l'intensité des contraintes dans les granulats et la matrice

Relaxation des contraintes

40°C



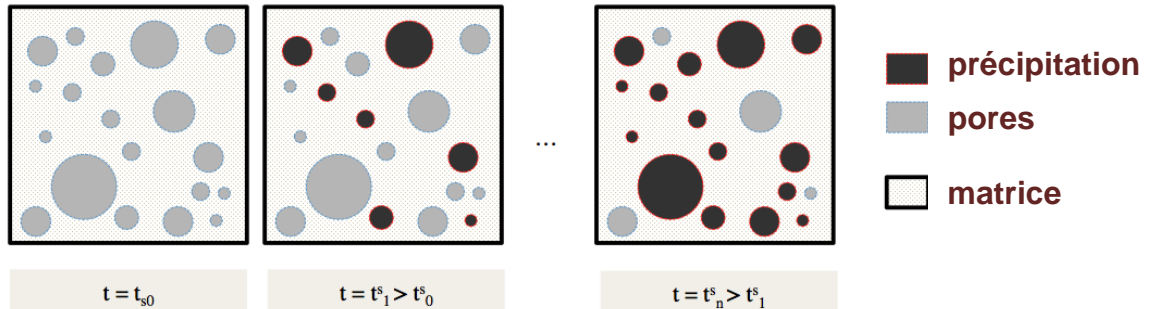
$$\alpha_g = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_m = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

■ Comportement viscoélastique lorsque la microstructure évolue ?

→ Hydratation du ciment = comportement spécifique 'au jeune âge'

Exemple : scénario simplifié de précipitation



■ Comportement constitutif en viscolélasticité linéaire vieillissante :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \int_{t'=-\infty}^t \mathbb{S}(t, t') : d\boldsymbol{\sigma}(t') \quad \boldsymbol{\sigma}(t) = \int_{t'=-\infty}^t \mathbb{R}(t, t') : d\boldsymbol{\varepsilon}(t')$$

- Vieillissement → la fonction de fluage (relaxation) dépend de l'instant de chargement t'
- Impossibilité d'appliquer la transformée de Laplace-Carson

■ Opérateur intégral de Volterra : $(f \circ g)(t, \tau) \equiv \int_{t'=-\infty}^t f(t, t') d_{t'} g(t', \tau)$ [Volterra 1887]

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbb{S}(t, \cdot) \overset{\circ}{\hat{=}} \boldsymbol{\sigma}(\cdot), \quad \boldsymbol{\sigma}(t) = \mathbb{R}(t, \cdot) \overset{\circ}{\hat{=}} \boldsymbol{\varepsilon}(\cdot),$$

■ Forme similaire à l'élasticité → **principe de correspondance**

■ Méthode numérique pour évaluer les intégrales de Volterra : **trapèzes** (Bazant 1972)

→ Schémas d'homogénéisation applicables en viscolélasticité linéaire vieillissante (Sanahuja 2013)

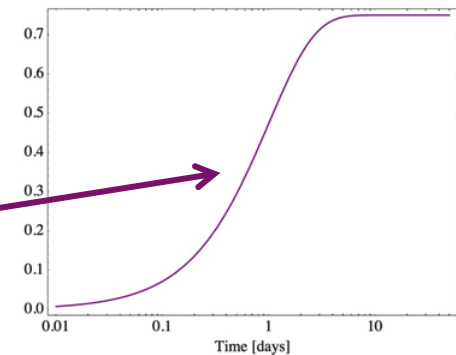
→ Implémentation → Cast3M

■ Définition d'un scénario d'hydratation

→ **Comportement vieillissant (densification)** : les propriétés mécaniques des phases évoluent continument

→ exemple de fonction de vieillissement : $F(t') = \frac{3}{4} (1 - \exp[-t'])$

$$\Rightarrow k_i(t, t') = \left(k_i^0 + \sum_{j=1}^m k_i^j e^{-\frac{t-t'}{\tau_j^i}} \right) F(t') = R_k(t - t') F(t')$$



Méthode des trapèzes (Bazant) : schéma explicite

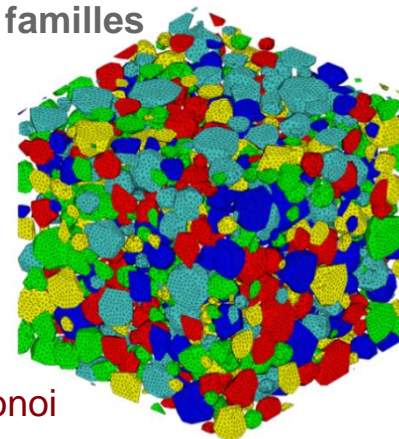
$$\Rightarrow \sigma(t_{i+1}) \cong \sum_j^N \left[\sigma_j(t_i) e^{-\Delta t_i / \tau_j} + \frac{3}{2} k_j (F_{k+1} + F_k e^{-\Delta t_i / \tau_j}) \Delta \epsilon_i \right] + \frac{3}{2} k_0 \sum_{k=1}^{i+1} [(F_{k+1} + F_k) \Delta \epsilon_k]$$

→ **Solidification** : les phases qui précipitent remplissent les pores

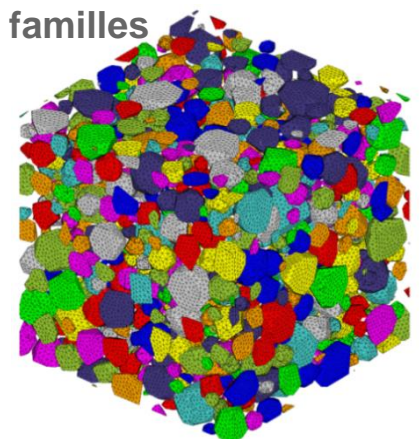
■ Solidification \approx discrétisation de la phase qui précipite

- Répartition aléatoire des inclusions en un nombre fixé de sous-familles
- Les propriétés mécaniques des inclusions changent lors de leur précipitation

5 familles



10 familles



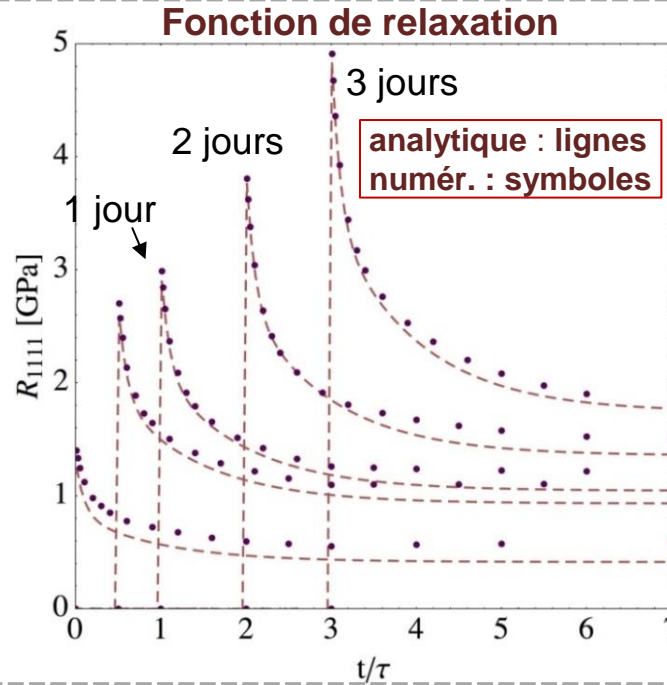
■ Etude de la solidification :

→ une phase précipite

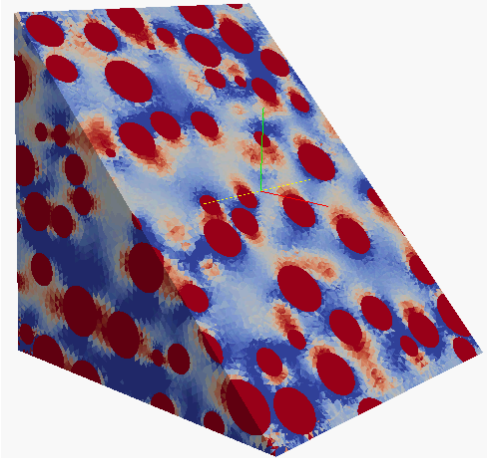
■ Comparaison analytique-numérique :

- Comportement des phases viscoélastique linéaire
→ vieillissement macroscopique
- Bonne concordance

→ **Validation de l'approche analytique**



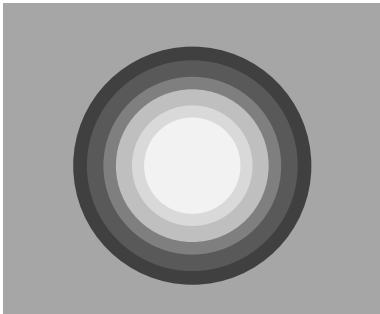
Contraintes



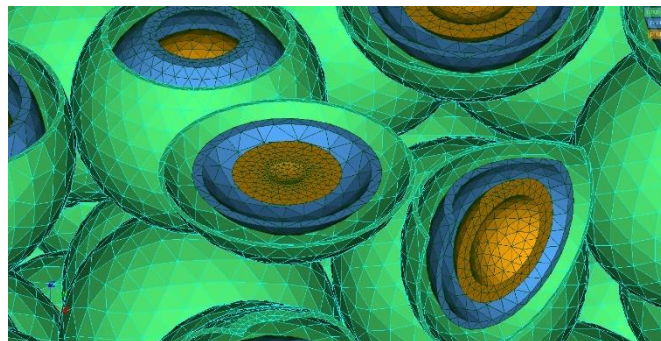
Age de chargement : 1 jour

■ Scénario de solidification alternatif : précipitation 'concentrique'

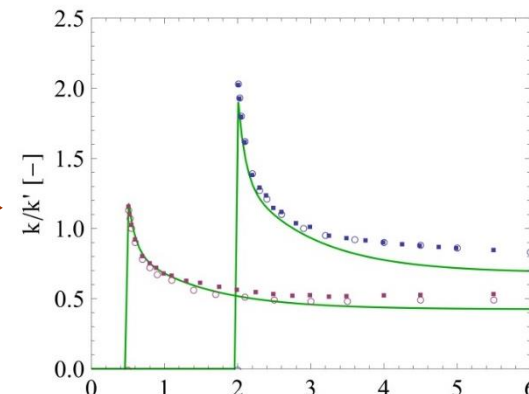
Précipitation de la surface
d'un pore vers l'intérieur



Détail d'un maillage



Bon accord



Viscoplasticité / viscoélasticité linéaire -- Microstructure réelle / générée -- EF / FFT

→ Réponse du modèle viscoplastique par rapport au modèle viscoélastique linéaire ?

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^T + \underline{\underline{\epsilon}}^h + \underline{\underline{\epsilon}}^{ve} + \underline{\underline{\epsilon}}^{vp}$$

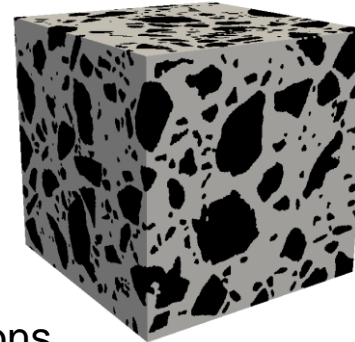
→ Effets de la forme des granulats ?

- microstructure réelle/numérique
- granulats réels (tomo) vs. numériques ?
- formes simples : sphères, agrégats de Voronoï isotropes et anisotropes

→ Comparaison :

- Échantillons 39,8% de granulats, 637 inclusions

Microstructure réelle
(tomographie)



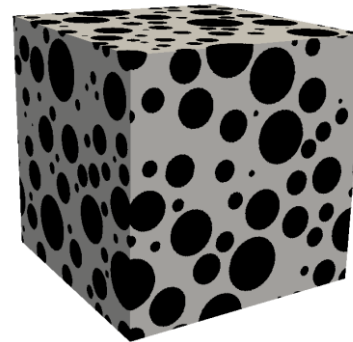
Microstructure générée
avec granulats réels



Voronoi isotrope



Voronoi anisotrope

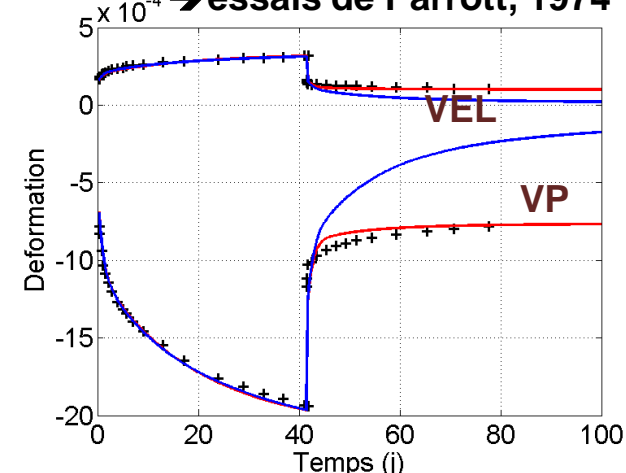


Sphères

[Bernachy et al. 2017]

Comportement matrice

→ essais de Parrott, 1974

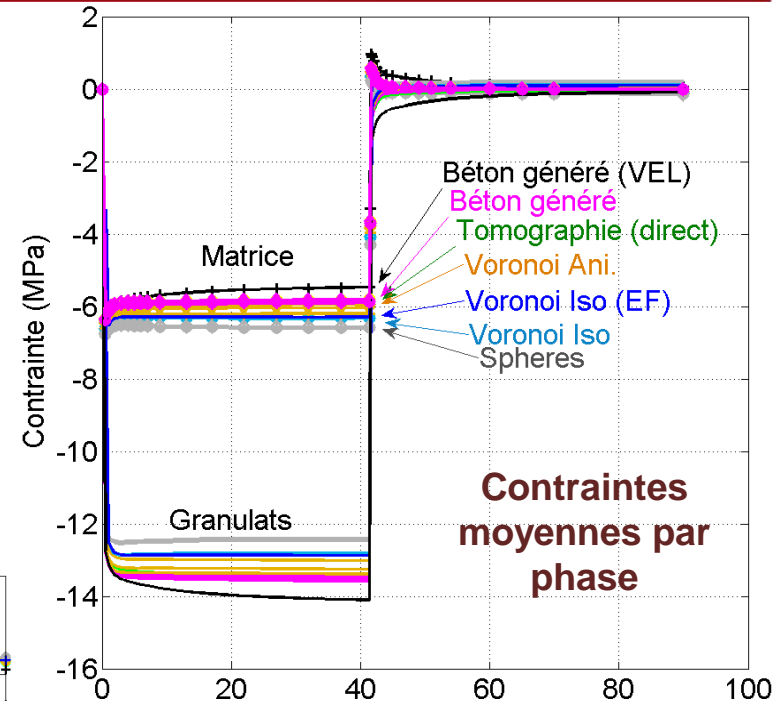
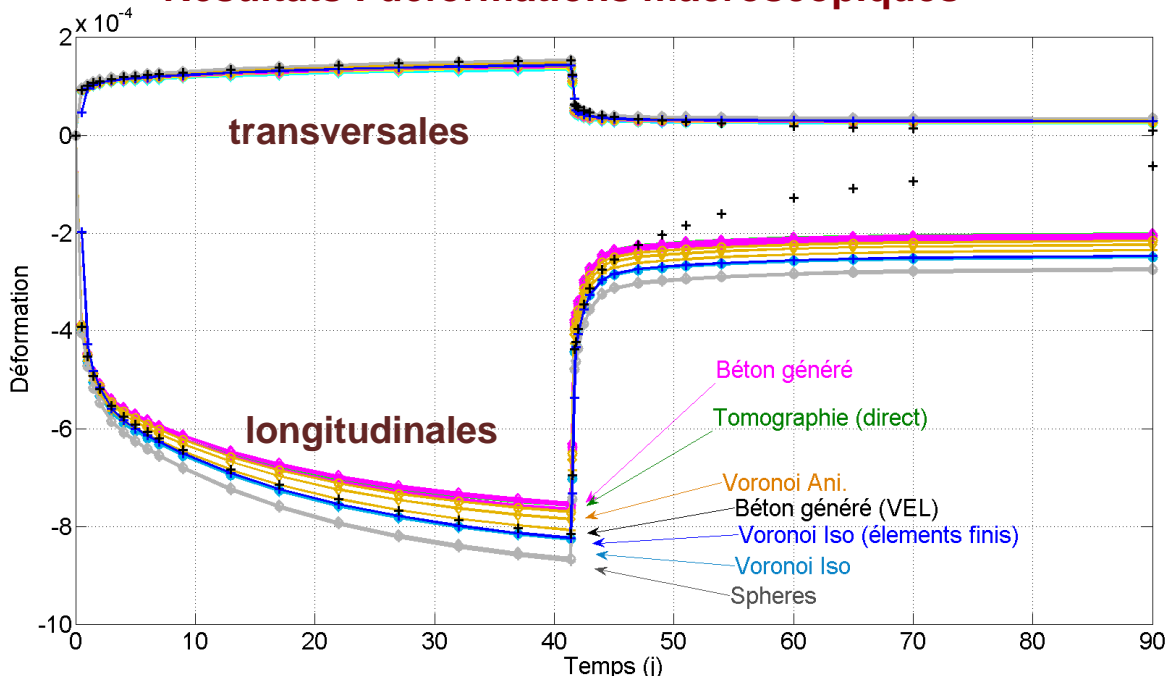


Comparaison EF-FFT : résultats

Application : fluage + décharge

- FE : CL contraintes homogènes
- Granulats : $E=70$ Gpa, $\nu=0,3$
- Matrice : identification à partir du comportement d'une pâte de ciment (Parrott, 1974)

Résultats : déformations macroscopiques



- EF très proches de FFT
- Effets importants de la forme des granulats : les formes les plus 'anisotropes' rigidifient le matériau
- Résultats avec granulats réels très proches de la microstructure issue de tomographie
- Différences VEL / VP

▪ Modélisation du fluage :

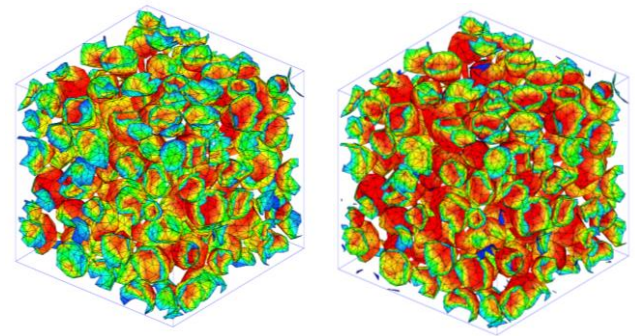
- Approche multiéchelle : matrice viscoélastique + granulats + interfaces
- Estimation des propriétés viscoélastiques
- Prise en compte des effets de la température, de l'humidité relative
- Vieillissement : hydratation

▪ Simulations numériques

- Génération d'échantillons 3D avec ITZ, granulats numériques/réels
- Validation des approches analytiques + vieillissement (viscoélasticité linéaire)
- Comparaison EF/FFT
- Etude des effets de la forme des granulats

▪ Perspectives :

- Fissuration : méthode par champ de phase, extension à la viscoélasticité



- Modélisation/simulations de phénomènes de dégradation différés :
 - gonflements internes (attaques sulfatiques, RAG, irradiation neutrons)
 - expansions de produits de corrosion (déchets cimentés, armatures)