



Approches directes en homogénéisation pour les
matériaux composites élasto-viscoplastiques.
Confrontation avec des résultats numériques EF et FFT

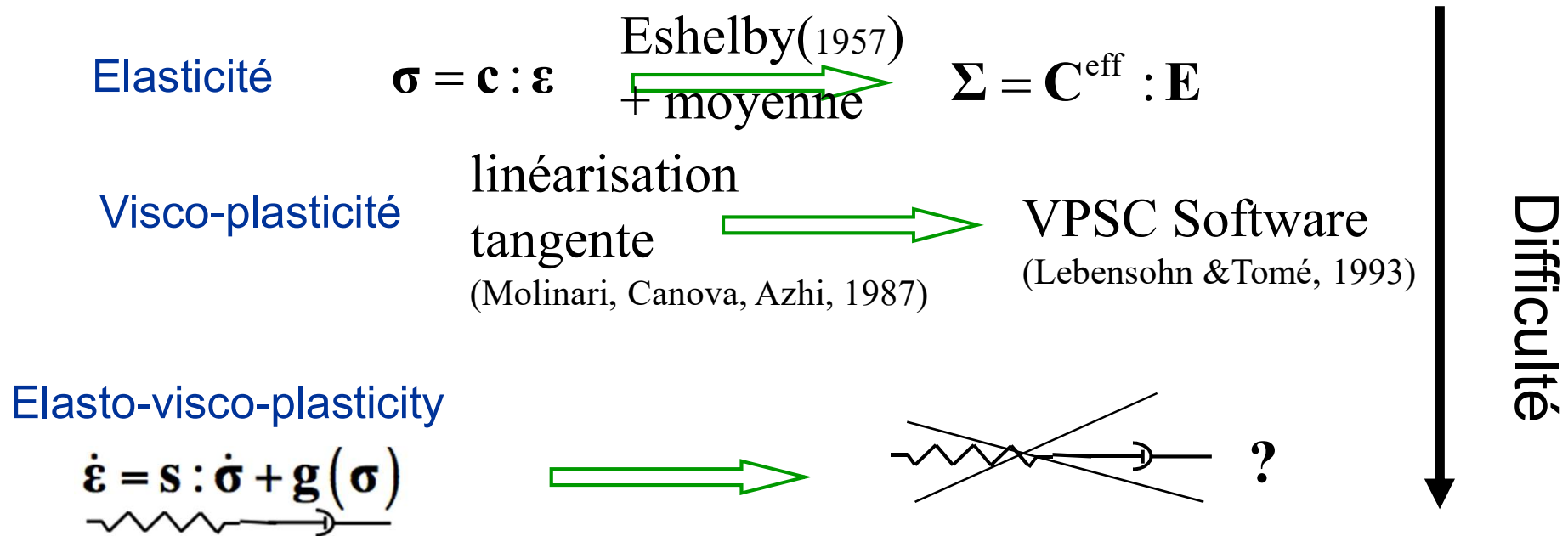
Stéphane Berbenni, Sébastien Mercier

Plan

- Contexte / approche en élasto-viscoplasticité
- Homogénéisation via la loi d'interaction tangente additive
 - Validation sur le problème de l'inclusion
 - Applications à des composites avec inclusions sphériques
 - Composite particulière avec arrangement spatial particulier
- Extensions avec prise en compte des moments d'ordre 2
- Conclusions

Motivation:

Homogénéisation pour les matériaux élasto-viscoplastiques



 Si chaque phase est de type Maxwell, le comportement homogénéisé ne l'est pas. Il est nécessaire de prendre en compte un effet de mémoire (Suquet, 1985)

Quelques références

Approches fondées sur la principe de correspondence (transformation de Laplace-Carson (LC): Mandel, 1966, Hashin, 1969, Laws-McLaughlin 1978, Rougier-Zaoui 1993-94, Li-Weng, 1994-97, Masson-Zaoui 1999...

Approches à variables internes

Méthodes directes : Loi additive (AI): Molinari et al. (1997), Molinari (2002), Mercier et al. (2005,2009), Kowalczyk-Gajewska & Petryk (2011), Czarnota et al (2015) (**1st order stress moments**, no LC, linear/ non-linear) + Wang Tomé (JMPS 2012) + Zecevic Lebensohn (IJSS 2020), β -model Pilvin Cailleateau (1994), Berbenni Forest (2024), **Méthodes affines incrémentales :** Doghri et al (2010), Jung et al (2022)

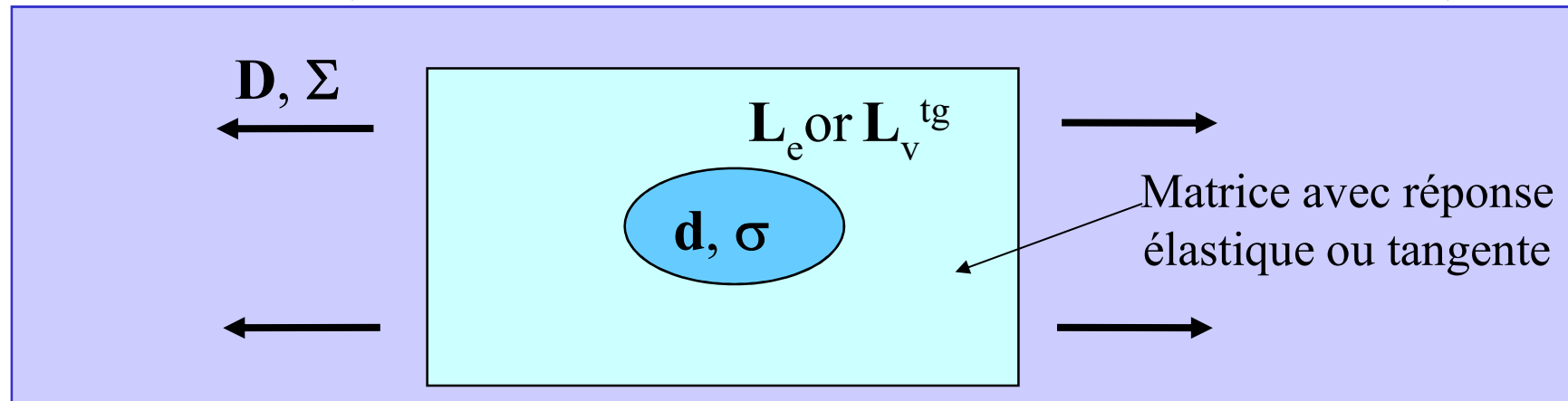
Méthode à champs translatés : Paquin et al. (1999), Berbenni-Capolungo (2015), Mareau et Berbenni (2015), Tsekpuia et al. (2023) (**1st order stress moments**, no LC, linear/ non-linear)

‘Internal variables’ approach from the collocation method: Ricaud-Masson 2009, Masson et al. 2012, Vu et al. 2012, Masson et al. 2020 (**2nd order stress moments**, LC, linear/ non-linear)

Méthodes variationnelles : Lahellec-Suquet (2007); Brassart et al. (2012), Lahellec -Suquet (2013): condensed dissipation potential in a “Rate Variational Principle (RVP)”, Agoras et al. (2016): condensed stress potential in an “Incremental Variational Procedure (IVP)”, Cotel et al. (2020), Das et al. (2021): differential form of the “IVP” (**2nd order stress moments**)

Approches NTFA : Michel Suquet, Largeton et al 2014

Loi d'Interaction pour le problème de l'inclusion. (Hill 1965, Kouddane Molinari Canova 1993, Molinari 2002)



➤ Elasticité (Hill, 1965)
Eshelby solution

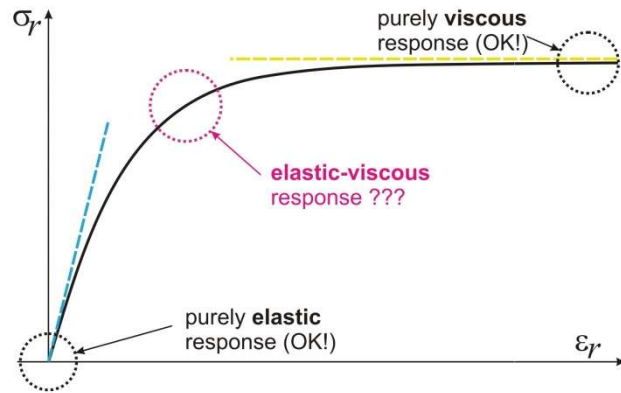
$$\mathbf{d}^e - \mathbf{D}^e = -\mathbf{M}_*^e \cdot (\dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{\boldsymbol{\Sigma}})$$

$$\mathbf{M}^* = (\mathbf{L}^*)^{-1} = (\mathbf{P}^{-1} - \mathbf{L})^{-1}$$

➤ Viscoplasticité avec
linéarisation tangente
(Molinari et al, 1987), approximate but
well validated, adopted in VPSC
software

$$\mathbf{d}^v - \mathbf{D}^v = -\mathbf{M}_*^{v(tg)} \cdot (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\Sigma})$$

$\mathbf{M}_*$ - inverse du tenseur de Hill, dépendant de la forme de
l'inclusion et des propriétés de la matrice.



Loi d'Interaction en élasto-viscoplasticité (Kouddane Molinari Canova 1993, Molinari 2002)

➤ Loi d'interaction tangente additive

$$\mathbf{d}_r - \mathbf{d}_0 = -\mathbf{M}_*^{e0} \cdot (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r - \dot{\boldsymbol{\sigma}}_0) - \mathbf{M}_*^{v0} \cdot (\boldsymbol{\sigma}_r - \boldsymbol{\sigma}_0)$$

Chargement lent, temps long



Approche viscoplastique suffit

Proposée par Molinari et al Acta Metall. 87, validation IJP, Molinari et al 2004,
adoptée dans le VPSC software

Chargement rapide



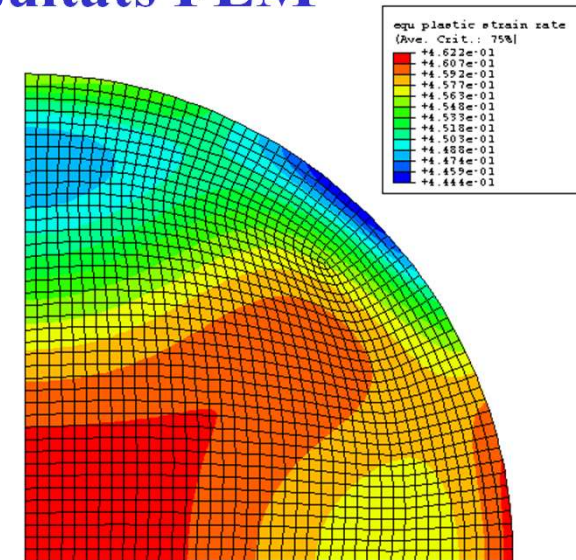
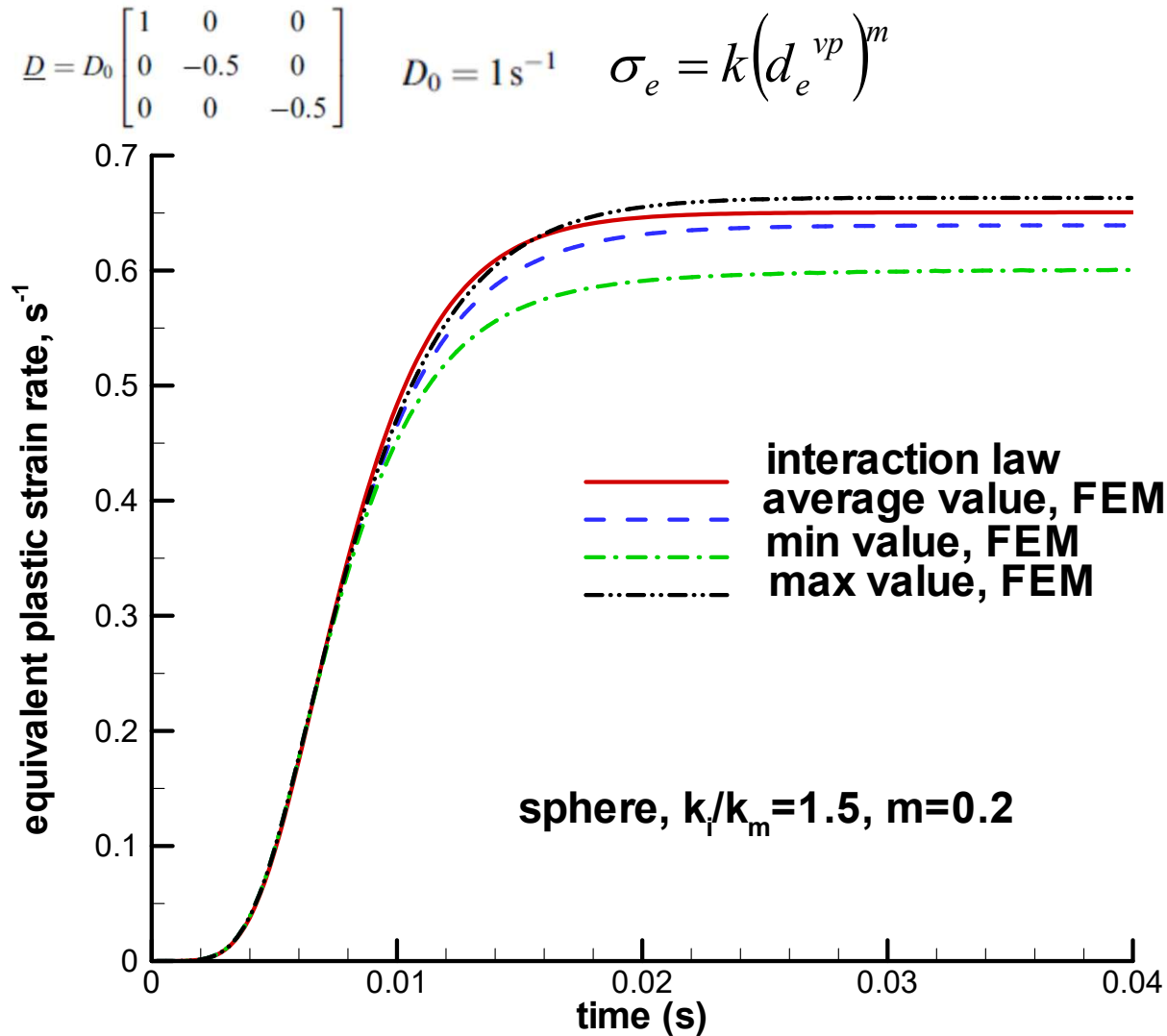
Loi d'interaction élastique

Solution d'Eshelby 1957

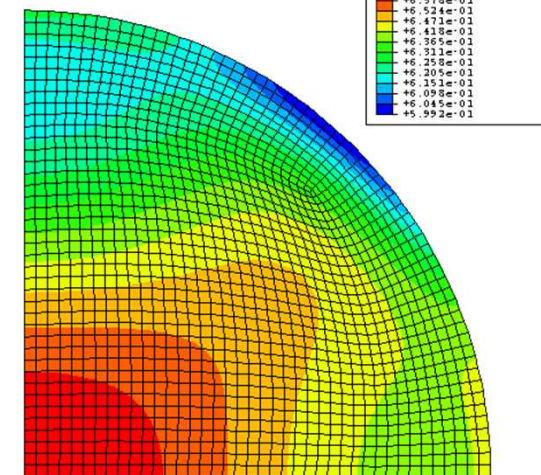
**Matériau incompressible visco-élastique : solution exacte pour des inclusions
sphériques (Hashin 69)**

Problème de l'inclusion

Comparaison loi d'interaction/ résultats FEM



t=0.01s

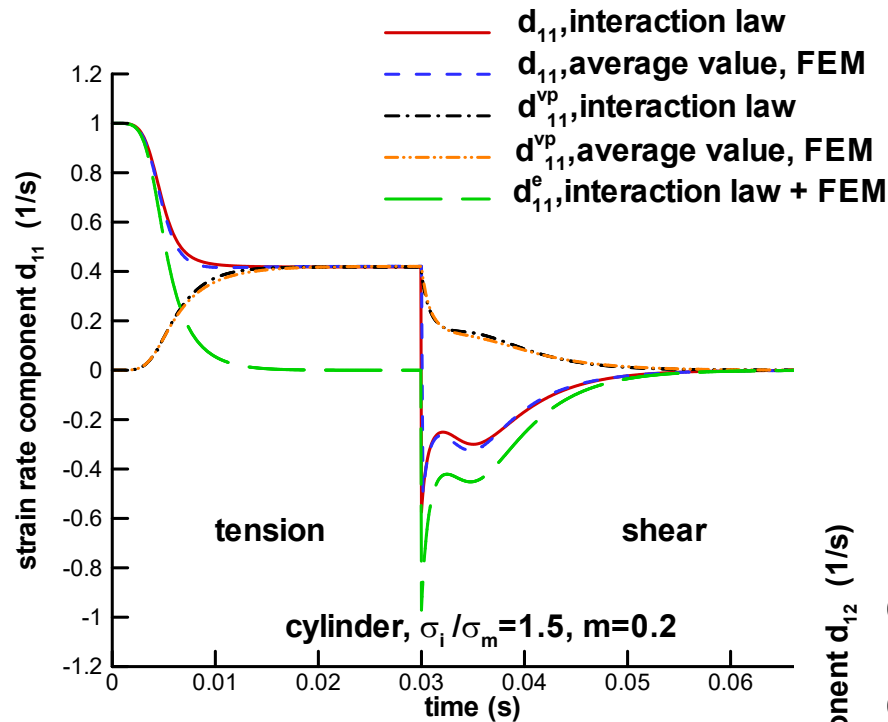


t=0.04s

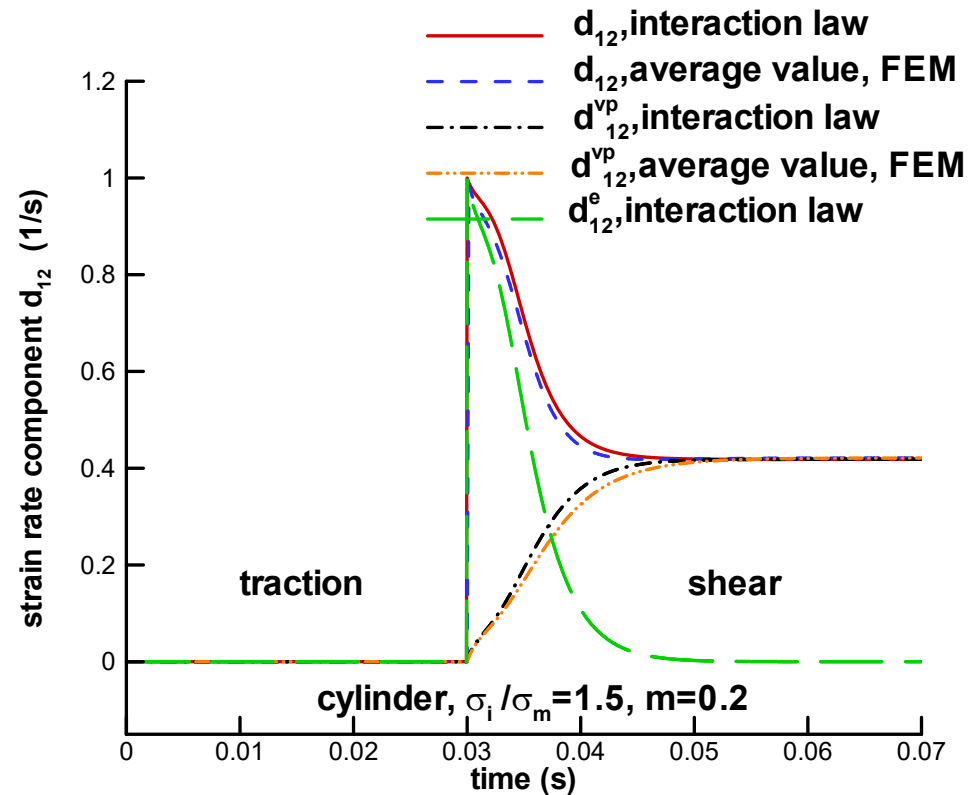
Problème de l'inclusion

Comparaison loi d'interaction/ résultats FEM

Chargement non monotone
Traction /cisaillement

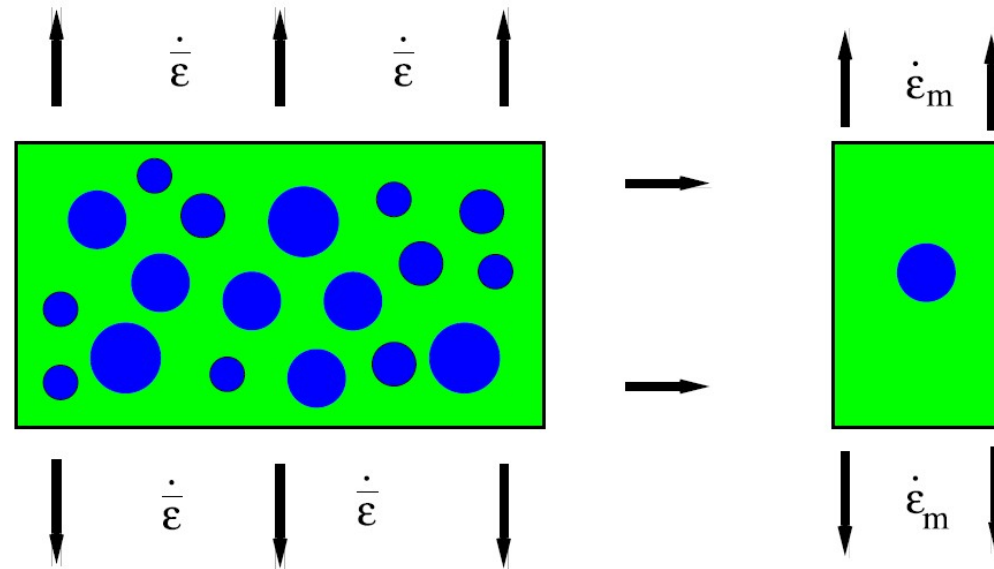


$$\underline{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (s^{-1}), \quad \underline{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (s^{-1})$$



Cylindre=ellipsoïde allongé $c/a=100$, $b=a$

Composite particulaire avec phases élasto-viscoplastique (Mercier and Molinari 2009, Kowalczyk-Gajewska and Petryk, 2011)



Loi additive

$$\mathbf{d}_r - \mathbf{d}_0 = -\mathbf{M}_*^{e0} \cdot (\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r - \dot{\boldsymbol{\sigma}}_0) - \mathbf{M}_*^{v0} \cdot (\boldsymbol{\sigma}_r - \boldsymbol{\sigma}_0)$$

Référence = matrice

Contrainte et déformations moyennes :

$$\boldsymbol{\Sigma} = \sum_{r=0}^N c_r \boldsymbol{\sigma}_r$$

$$\mathbf{D} = \sum_{r=0}^N c_r \mathbf{d}_r$$

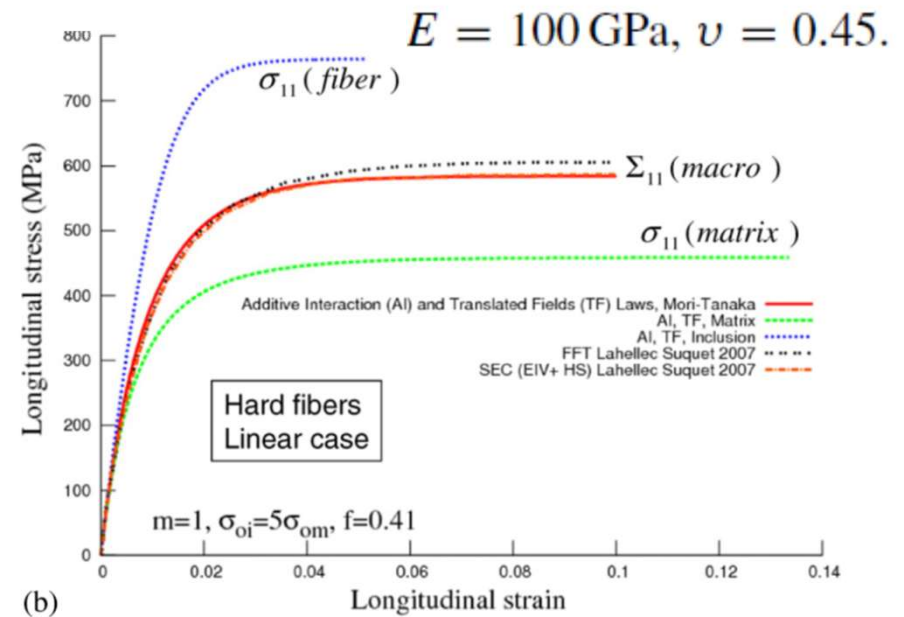
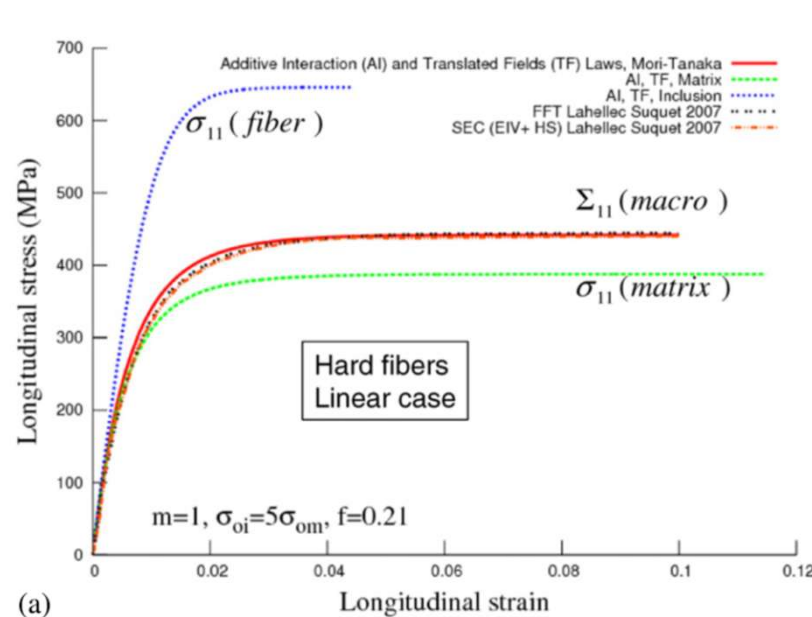
Pour les composites avec inclusions, le modèle de Mori-Tanaka est utilisé avec la loi additive

Pas de postulat sur la forme du comportement effectif

Cas viscoélastique linéaire / élasticité compressible

Fibres cylindriques / élasticité compressible

$$\sigma^{eq} = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}^{eq}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m$$



- Bon accord avec les calculs FFT (Lahellec Suquet 2007) $f < 0,25$
- Le schéma de MT peut être la cause de la différence à 41%
- Le schéma fonctionne aussi pour de la plasticité compressible

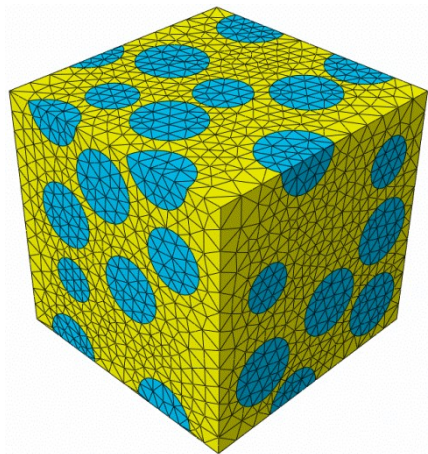
- Loi de type Perzyna-type
- incompressible , viscoplasticité
- Avec écrouissage

$$\sigma^{eq} = \left(\sigma_y + k (\varepsilon^{eq})^n \right) \left(1 + \left(\frac{d^{eq}}{\kappa} \right)^m \right)$$

Parameters: Pierard & Doghri, IJP 2006

Modèle numérique pour les microstructures composites

➤ 3D RVE avec 30 inclusions



$c=10\%, 25\%$

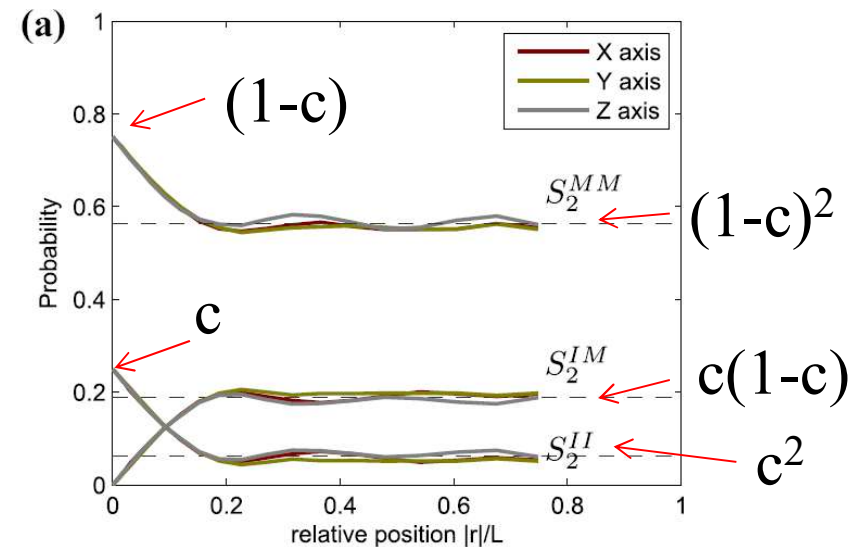
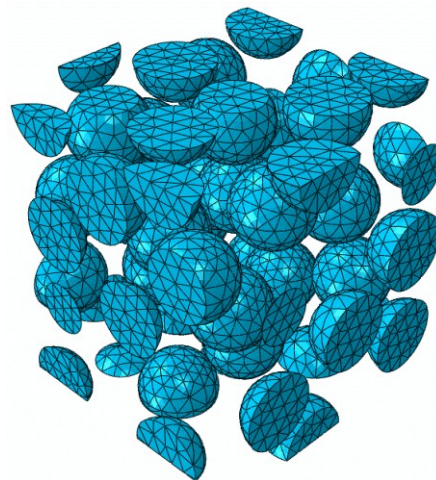


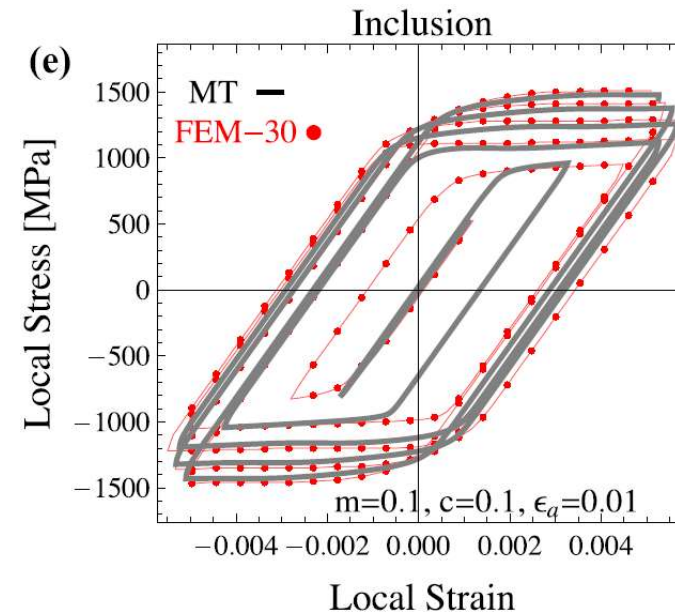
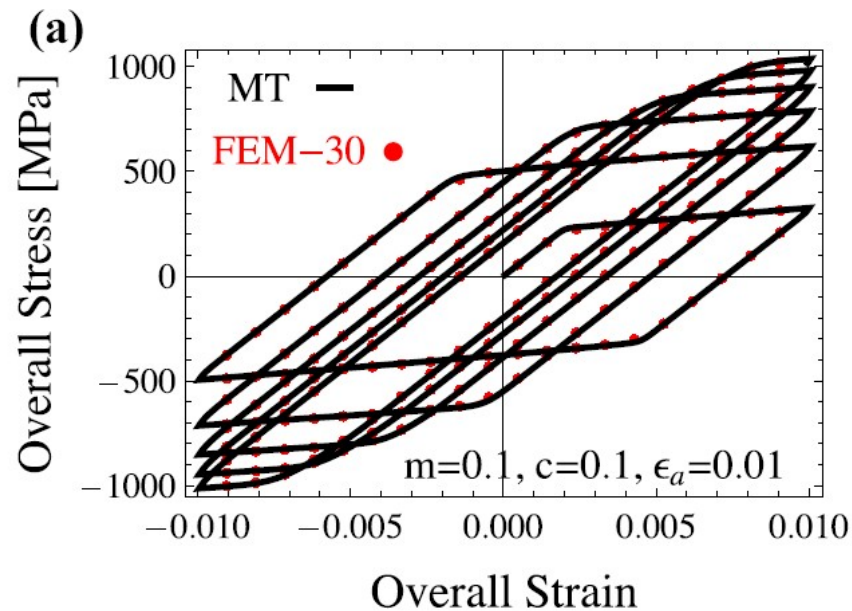
Schéma de Mori Tanaka en élasto viscoplasticité (Loi Perzyna) cycles

$f = 0.1$	E,GPa	ν	Σ_y ,MPa	k,GPa	n	κ , s ⁻¹	m
Matrix	100	0.3	100	5	1.0	$0.3 \cdot 10^{-3}$	0.1
Inclusion	500	0.3	500	5	1.0	$0.3 \cdot 10^{-3}$	0.1

Material parameters, Pierard & Doghri, IJP 2006

Czarnota et al, IJSS, 2015

uniaxial tension-compression **5 cycles** with $\epsilon_{\max} = 0.01$ at $D = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



→ Bon accord avec les calculs EF

Elasto-viscoplasticité avec écrouissage cinématique

» Loi du J2

overstress

$$d^{vp} = \phi \frac{3}{2} \frac{S - X}{\sigma^{eq}} \quad \sigma^{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} (S - X) : (S - X)}$$

$$\phi = \dot{\varepsilon}^o \left\langle \frac{f}{\sigma^y(\varepsilon^p)} \right\rangle^{1/m} \quad f = \sigma^{eq} - \sigma^y(\varepsilon^{eq})$$

» Loi de type Perzyna incompressible

avec $\sigma^y(\varepsilon^{eq}) = \sigma_y + k(\varepsilon^{eq})^n$

→ $\sigma^{eq}(d^{eq}, \varepsilon^{eq}) = \left(\sigma_y + k(\varepsilon^{eq})^n \right) \left(1 + \left(\frac{d^{eq}}{\kappa} \right)^m \right)$

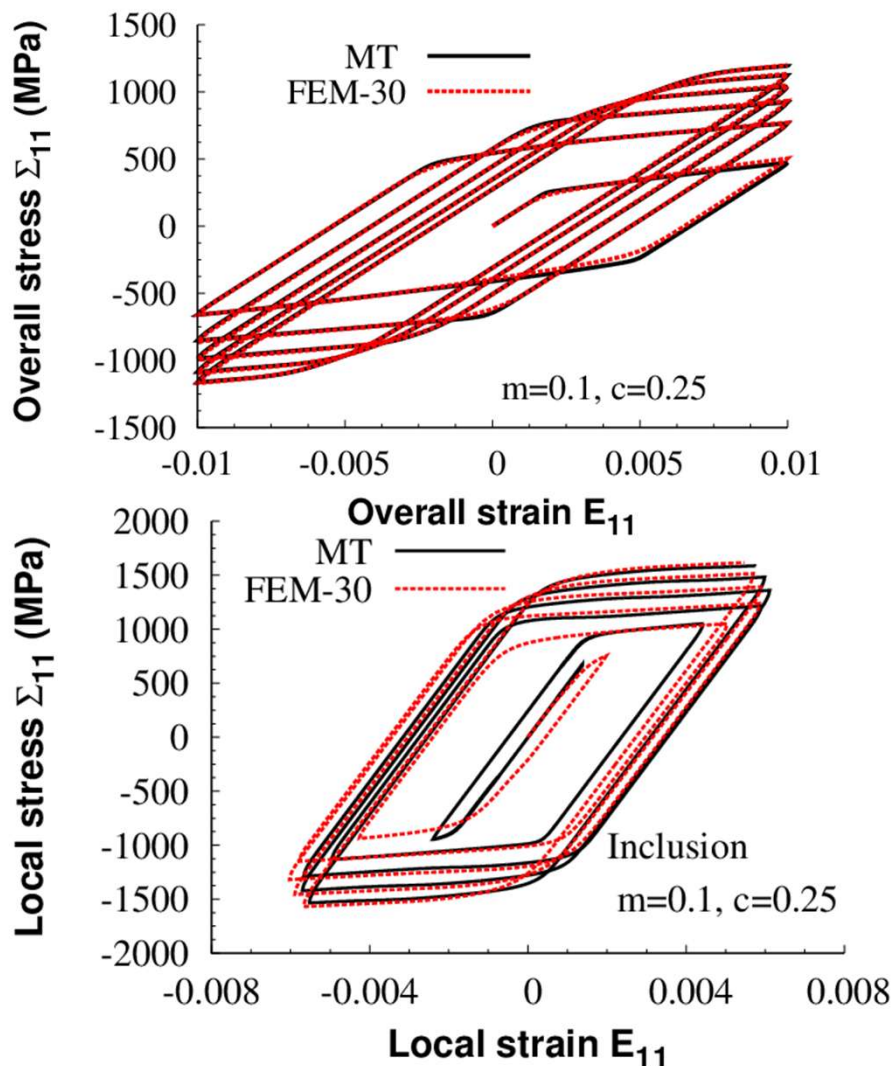
» Prager – Ziegler écrouissage cinématique linéaire

$$\dot{X} = \frac{2}{3} h d^{vp}$$

Avec écoulement combiné (2 phases)

Schéma de Mori Tanaka en élasto viscoplasticité (Perzyna)

Traction-compression uniaxiale **5 cycles** avec $\varepsilon_{\max}=0.01$ à $D=10^{-3} \text{ s}^{-1}$



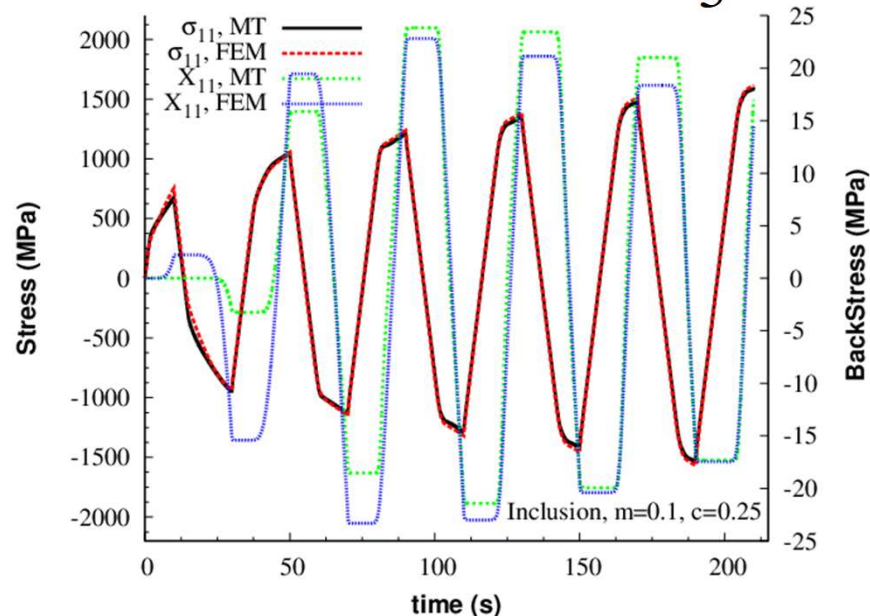
$$\Sigma_{11} = \langle \sigma_{11} \rangle$$

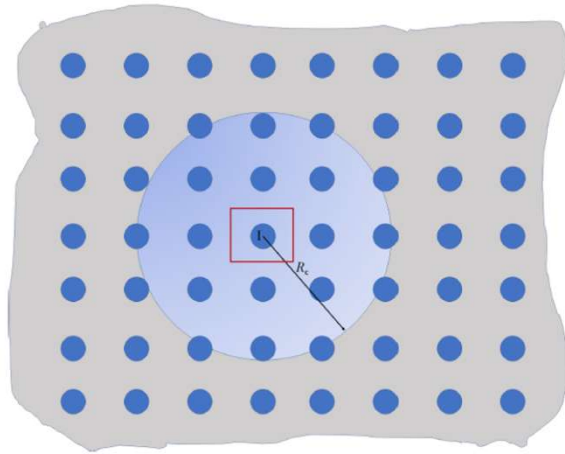
$$E_{11} = \langle e_{11} \rangle$$

$$X_{11} = \langle x_{11} \rangle$$

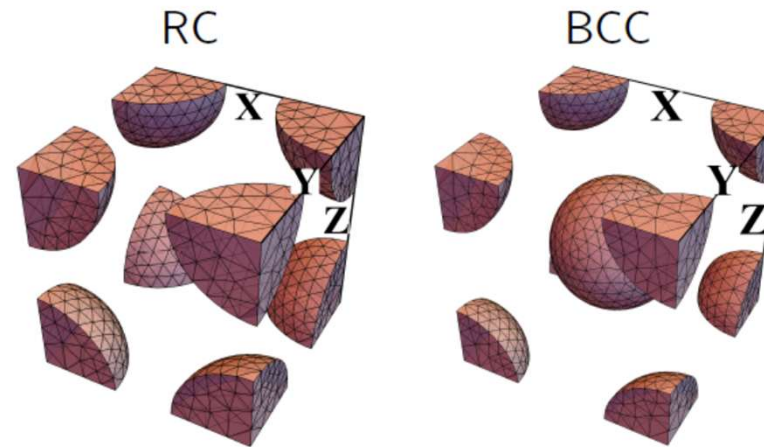
c= 0.25	h,GPa
Matrice	10
Inclusion	10

$$\dot{\mathbf{X}} = \frac{2}{3} h \mathbf{d}^{vp}$$





Extension du modèle du cluster en élasto-viscoplasticité



- material parameters

	E [GPa]	ν	σ_Y [MPa]	v_0 [1/s]
Visco-elastic matrix	70	0.3	480	0.01
Hard elastic inclusion (case 1)	400	0.2	—	—

Tenseurs de Hill pour les paires d'inclusions tirés de Berveiller et al 87

Ref for elasticity Molinari and El Mouden (1996, 2000)

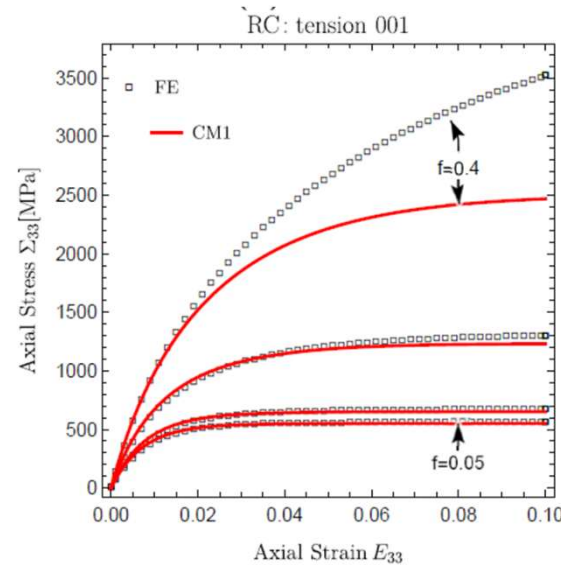
Ref : K. Kowalczyk-Gajewska et al IJSS 2021

Effet de l'agencement et de la direction de chargement

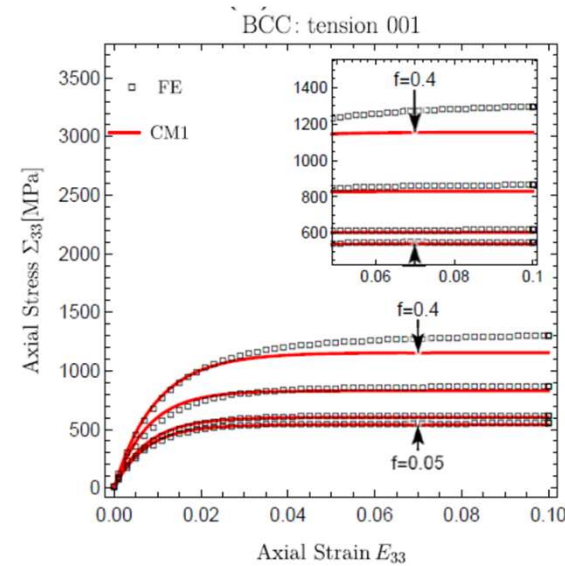
Fraction
volumique : 5%,
10%, 25%, 40%

Inclusion élastique
Matrice viscoélastique

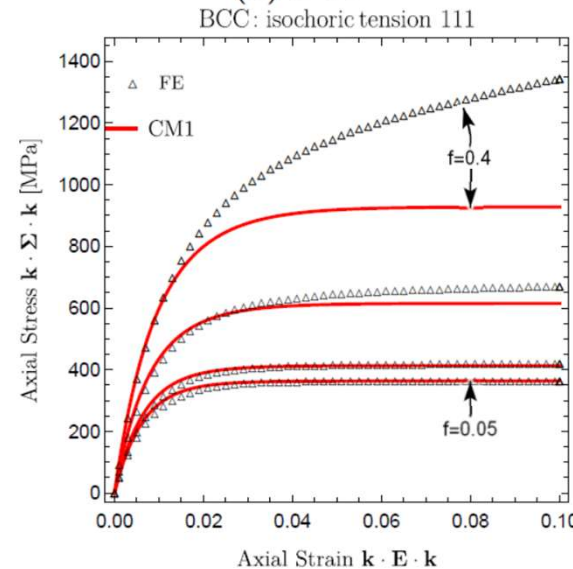
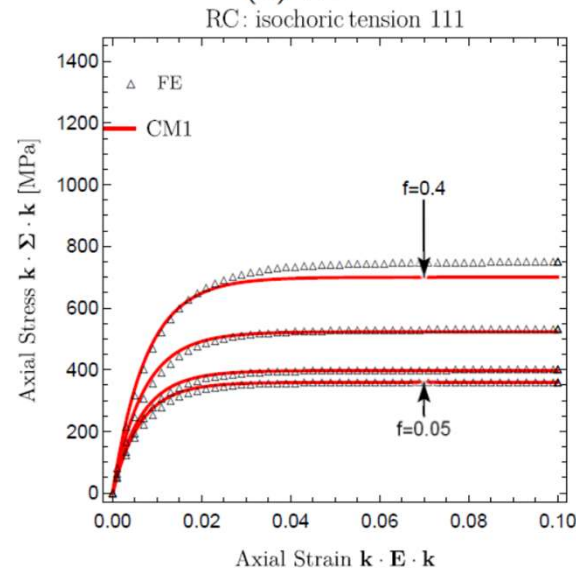
$$\dot{\epsilon}_0 = 10^{-2} s^{-1}$$



(a) RC



(b) BCC



001
Traction
uniaxiale

111
Traction
isochore

Extensions des méthodes directes aux moments d'ordre 2 en contraintes pour composites élastoviscoplastiques biphasés



Linéarisation sécante modifiée (*utilisée dans méthode exacte MT, Berbenni IJSS 2021*

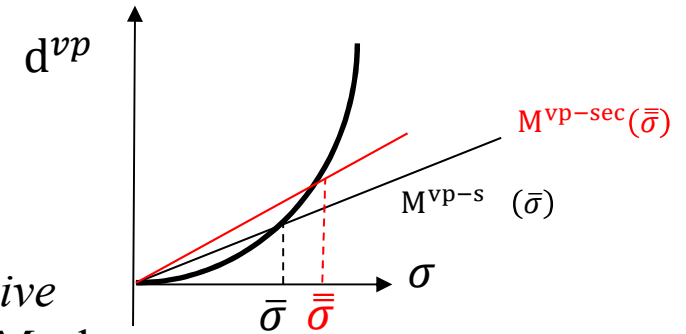
/ champs translatés MT, Berbenni & Forest, ISTE 2024)

$$\mathbf{d}^{vp} = \mathbf{M}^{vp-sec}(\boldsymbol{\sigma}) : \boldsymbol{\sigma} \longrightarrow \mathbf{M}^{vp-s}(\boldsymbol{\sigma}) \approx \mathbf{M}^{vp-s}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq}) = \frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} \mathbf{K}$$

Qiu & Weng (1991)
Suquet (1995), Hu (1996)
Ponte Castañeda & Suquet (1998)

avec

$$\begin{cases} \bar{\bar{\sigma}}_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{K} : (\boldsymbol{\sigma} \otimes \boldsymbol{\sigma})_m} = \sqrt{\frac{3}{2} (\mathbf{s} : \mathbf{s})_m} = \sqrt{\frac{3}{2} S_m} \\ 2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq}) = \frac{2\bar{\bar{\sigma}}_{eq}}{3\dot{\epsilon}_0} \left(\frac{\sigma_Y}{\langle \bar{\bar{\sigma}}_{eq} - \sigma_Y \rangle} \right)^{\frac{1}{M}} \end{cases} \quad \text{Loi de type Perzyna}$$



Linéarisation tangente modifiée (*utilisée dans loi additive tangente MT, Kowalczyk-Gajewska, Berbenni, Mercier, Mech Mater 2025*):

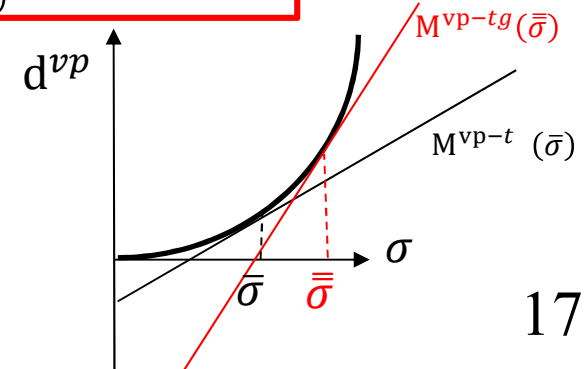
$$\mathbf{d}^{vp} = \mathbf{M}^{vp-tg}(\boldsymbol{\sigma}) : \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d}^{vp-ref}(\boldsymbol{\sigma})$$

Masson et al. (2000), Molinari (1997, 2002)
Brenner et al. (2001), Brenner & Masson (2005)

$$\mathbf{M}^{vp-tg}(\boldsymbol{\sigma}) \approx \mathbf{M}^{vp-tg}(\bar{\bar{\mathbf{N}}}_s, \bar{\bar{\sigma}}_{eq}) = \frac{1}{2\mu^{tg}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} \bar{\bar{\mathbf{N}}}_s \otimes \bar{\bar{\mathbf{N}}}_s + \frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} (\mathbf{K} - \bar{\bar{\mathbf{N}}}_s \otimes \bar{\bar{\mathbf{N}}}_s)$$

avec

$$\begin{cases} \bar{\bar{\mathbf{N}}}_s = \bar{\mathbf{s}}_m / \sqrt{\bar{\mathbf{s}}_m : \bar{\mathbf{s}}_m} \\ 2\mu^{tg}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq}) = \frac{2M\sigma_Y}{3\dot{\epsilon}_0} \left(\frac{\langle \bar{\bar{\sigma}}_{eq} - \sigma_Y \rangle}{\sigma_Y} \right)^{1-\frac{1}{M}} \end{cases} \quad \text{Loi de type Perzyna}$$



Prise en compte des Fluctuations intra-phase (dans matrice)

Tenseurs covariance des contraintes (ordre 4)

Inclusions: $\mathbf{C}_\sigma^i = 0$ (Propriété d'Eshelby)

Matrice: $\mathbf{C}_\sigma^m = \overline{(\boldsymbol{\sigma} - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_m) \otimes (\boldsymbol{\sigma} - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_m)}_m = \overline{\boldsymbol{\sigma} \otimes \boldsymbol{\sigma}}_m - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_m \otimes \bar{\boldsymbol{\sigma}}_m$

Hypothèses simplificatrices:

Ponte Castañeda (2002)

$$\delta_H^m = \mathbf{J} : \mathbf{C}_\sigma^m = \frac{1}{3} \left(\overline{(\text{tr} \boldsymbol{\sigma})^2}_m - (\text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}}_m)^2 \right) \approx 0$$

$$\delta_D^m = \mathbf{K} : \mathbf{C}_\sigma^m = \overline{(\mathbf{s} : \mathbf{s})}_m - \bar{\mathbf{s}}_m : \bar{\mathbf{s}}_m = \frac{2}{3} (\bar{\sigma}_{eq}^2 - \bar{\sigma}_{eq}^2)$$

$$\delta_D^{\parallel m} = (\bar{\mathbf{N}}_s \otimes \bar{\mathbf{N}}_s) : \mathbf{C}_\sigma^m = \overline{(\mathbf{s} : \bar{\mathbf{N}}_s)^2}_m - \bar{\mathbf{s}}_m : \bar{\mathbf{s}}_m \approx 0$$

$$\delta_D^{\perp m} = (\mathbf{K} - \bar{\mathbf{N}}_s \otimes \bar{\mathbf{N}}_s) : \mathbf{C}_\sigma^m = \overline{(\mathbf{s} : \mathbf{s})}_m - \overline{(\mathbf{s} : \bar{\mathbf{N}}_s)^2}_m = \delta_D^m \neq 0$$

Application du lemme de Hill-Mandel pour l'évolution des seconds moments de contraintes dans la matrice



Hill (1967), Mandel (1972)

Li & Weng (1997)

Badulescu et al. (2015)

Masson et al. (2020)

$$\Sigma : D = \overline{\sigma : d} = f_i (\overline{\sigma : d})_i + f_m (\overline{\sigma : d})_m = f_i \bar{\sigma}_i : \bar{d}_i + f_m (\overline{\sigma : d})_m$$

$$\text{avec: } (\overline{\sigma : d})_m = (\overline{\sigma : d^{vp}})_m + \frac{1}{9k_m^e} \underbrace{((\text{tr}\sigma)(\text{tr}\dot{\sigma}))}_m + \frac{1}{2\mu_m^e} (\mathbf{s} : \dot{\mathbf{s}})_m$$

$$\approx (\text{tr}\bar{\sigma}_m)(\text{tr}\dot{\bar{\sigma}}_m) \quad \text{en supposant: } \delta_H^m \approx 0$$

Linéarisation sécante modifiée: $(\overline{\sigma : d^{vp}})_m = \frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} \bar{\mathbf{s}} : \dot{\bar{\mathbf{s}}}_m = \frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} S_m$

Linéarisation tangente modifiée:

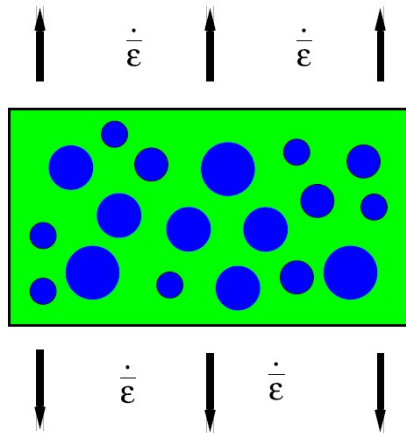
$$(\overline{\sigma : d^{vp}})_m = \frac{1}{2\mu^{tg}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} (\mathbf{s} : \bar{\mathbf{N}}_s)_m^2 + \frac{1}{2\mu^{seq}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} \left((\mathbf{s} : \mathbf{s})_m - (\mathbf{s} : \bar{\mathbf{N}}_s)_m^2 \right) + \left(\frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} - \frac{1}{2\mu^{tg}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} \right) \bar{\mathbf{s}}_m : \dot{\bar{\mathbf{s}}}_m$$

$$(\overline{\sigma : d^{vp}})_m \approx \frac{1}{2\mu^{seq}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} S_m \quad \text{en supposant } \delta_D^m \approx 0$$

Évolution du second moment de contraintes dans la phase matrice:

$$\frac{f_m}{4\mu_m^e} \dot{S}_m = \Sigma : D - f_i \bar{\sigma}_i : \bar{d}_i - f_m \frac{1}{9k_m^e} (\text{tr}\bar{\sigma}_m)(\text{tr}\dot{\bar{\sigma}}_m) - f_m \frac{1}{2\mu^{sec}(\bar{\bar{\sigma}}_{eq})} S_m$$

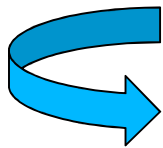
$$S_m(t + \Delta t) = S_m(t) + \dot{S}_m(t) \Delta t \quad (\text{Masson et al. JMPS2020; Berbenni IJSS 2021})$$



Particules élastiques ($f_i=17\%$)

Matrice elasto-viscoplastique avec loi viscoplastique de type Perzyna

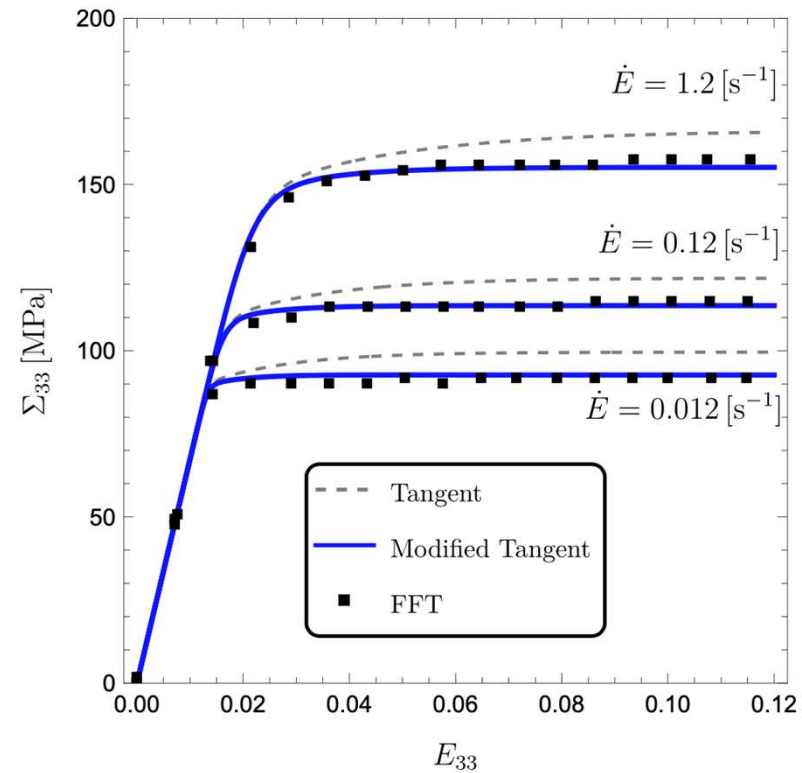
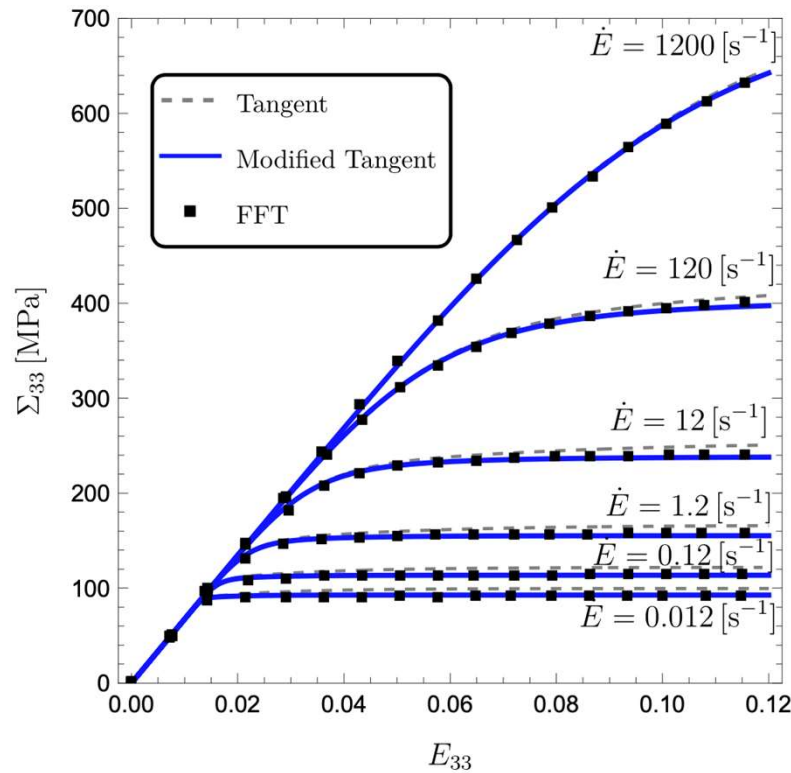
	K [GPa]	μ [GPa]	σ_Y [MPa]	$\dot{\epsilon}_o$ [s^{-1}]	M
elastic-viscoplastic matrix	10	3	100	1	0.3
elastic inclusion	20	6	—	—	—



Réponses en chargements monotones, cycliques et non-radiaux sont analysées

Résultats FFT de référence (VER avec 50 inclusions distribuées aléatoirement, Lahellec and Suquet (2013), Masson et al. (2020))

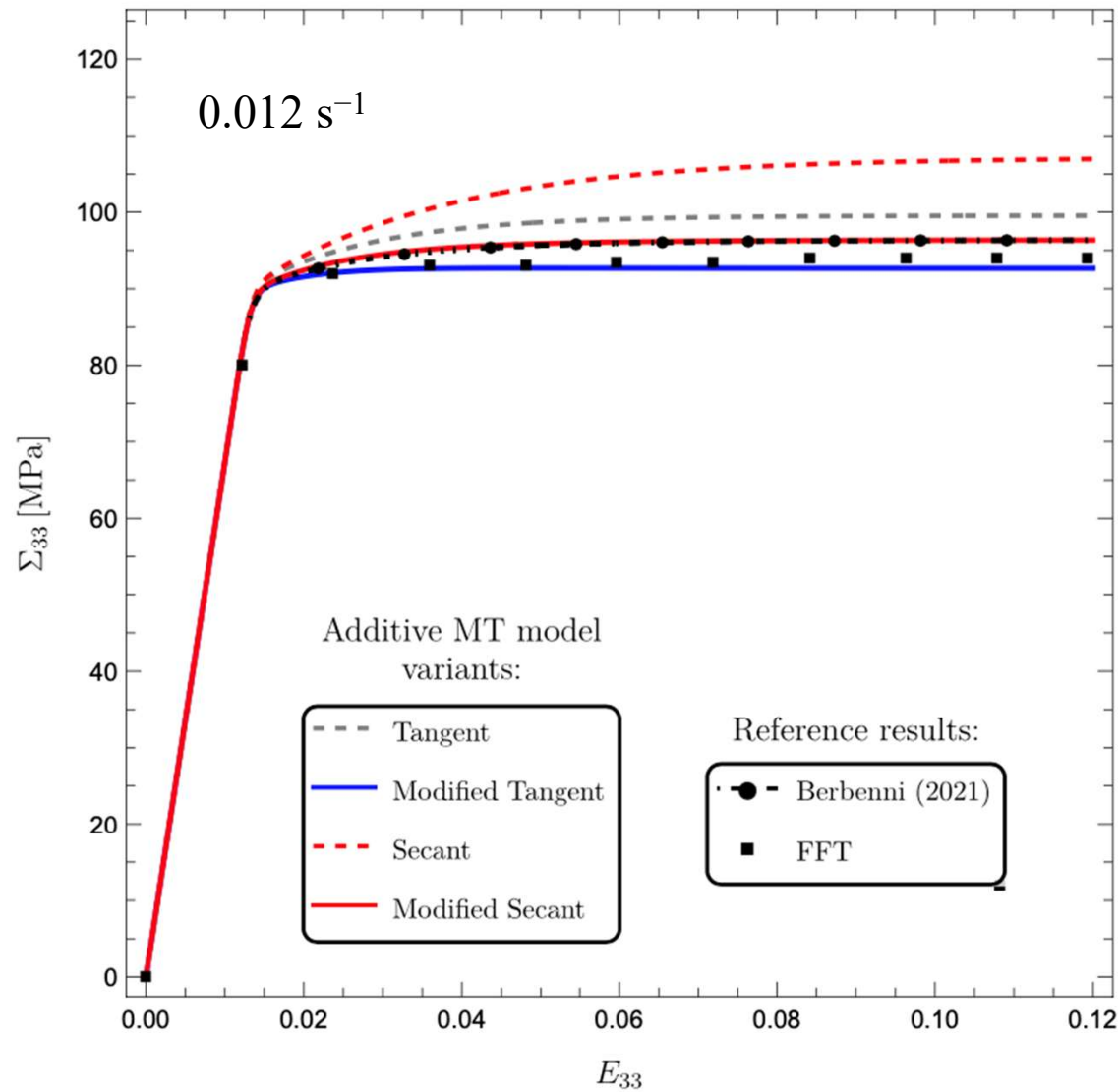
Traction monotone isochore



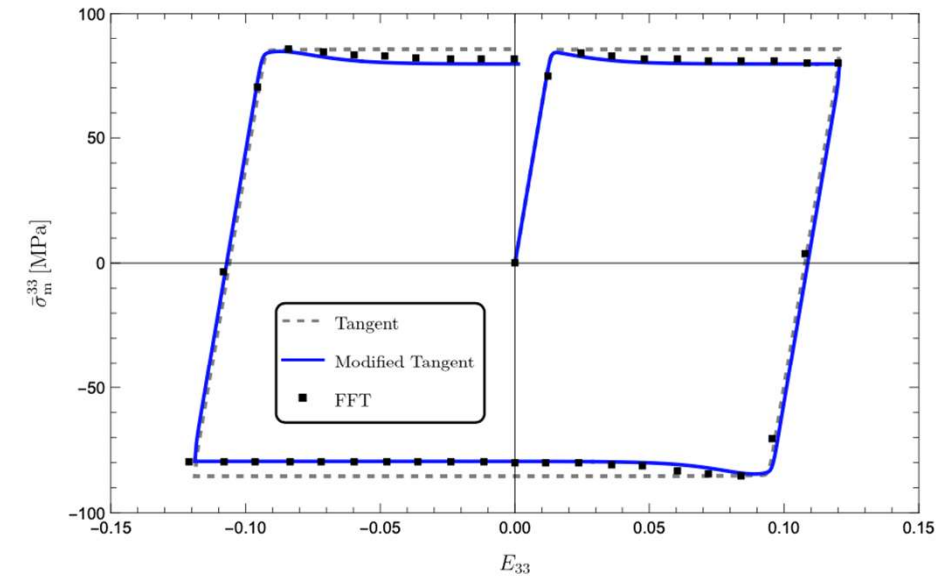
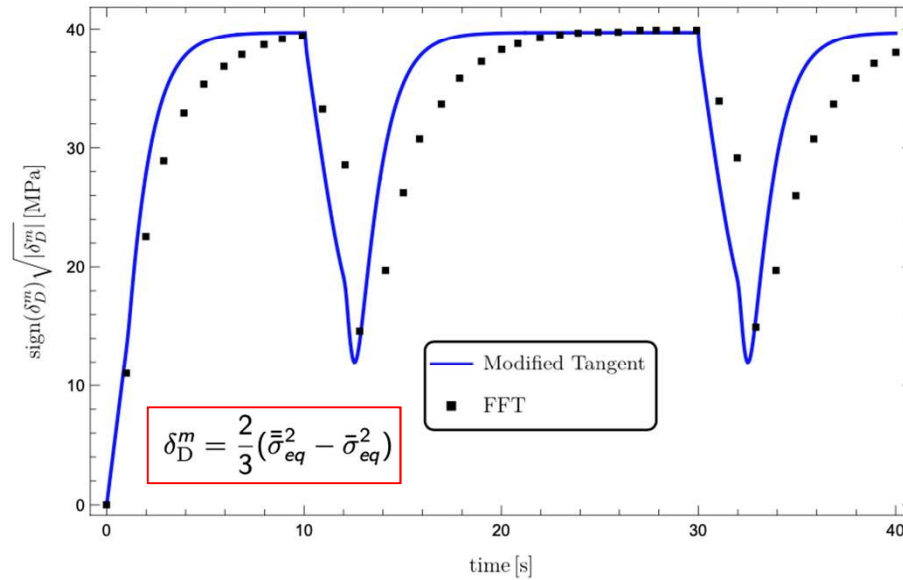
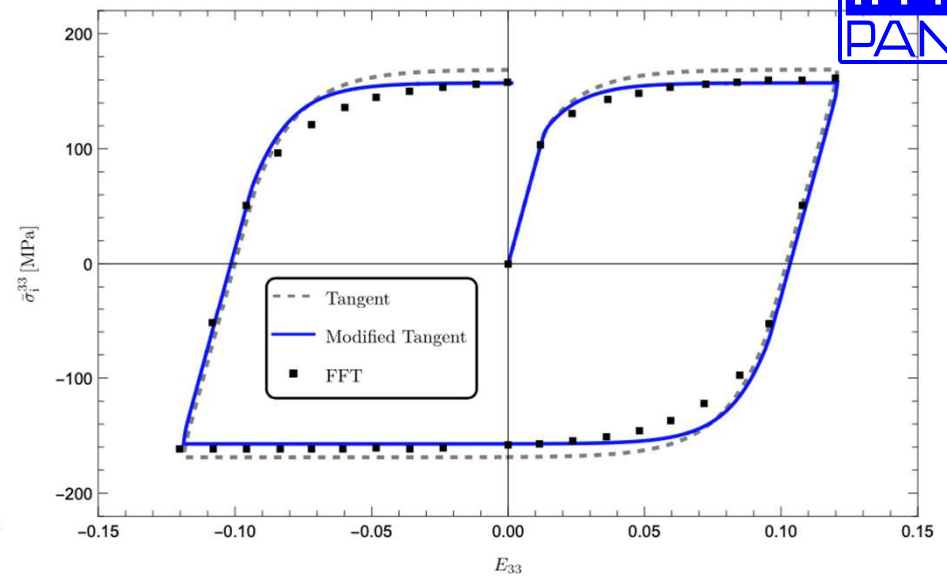
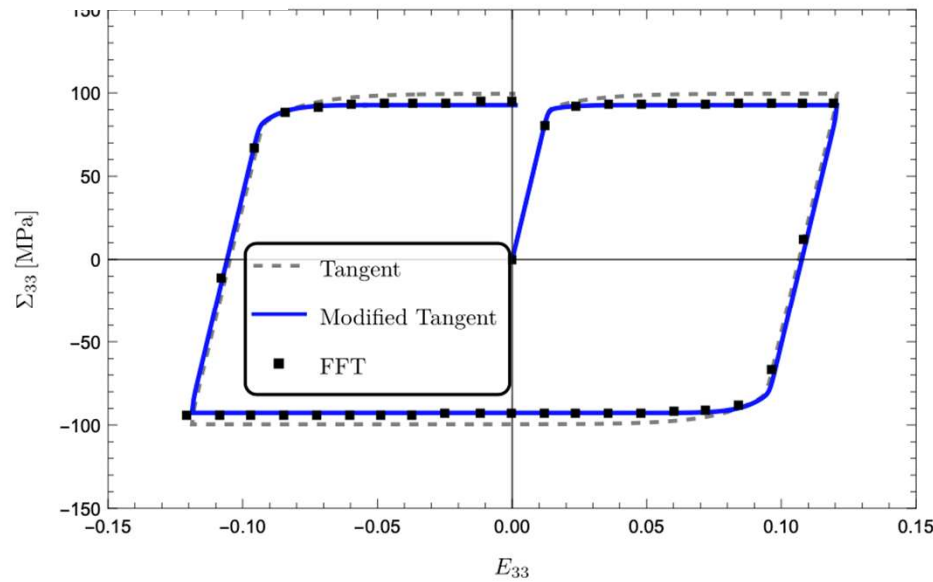
$$\mathbf{E}(t) = \frac{\dot{E} \cdot t}{2} (3\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_3 - \mathbf{I})$$

Contrainte macroscopique axiale Σ_{33} en fonction de déformation macroscopique axiale E_{33} pour des vitesses de déformation allant de 0.012 s^{-1} à 1200 s^{-1}
(Résultats FFT de Lahellec and Suquet, 2013)

Comparaisons entre les différents schémas de linéarisation et différents modèles



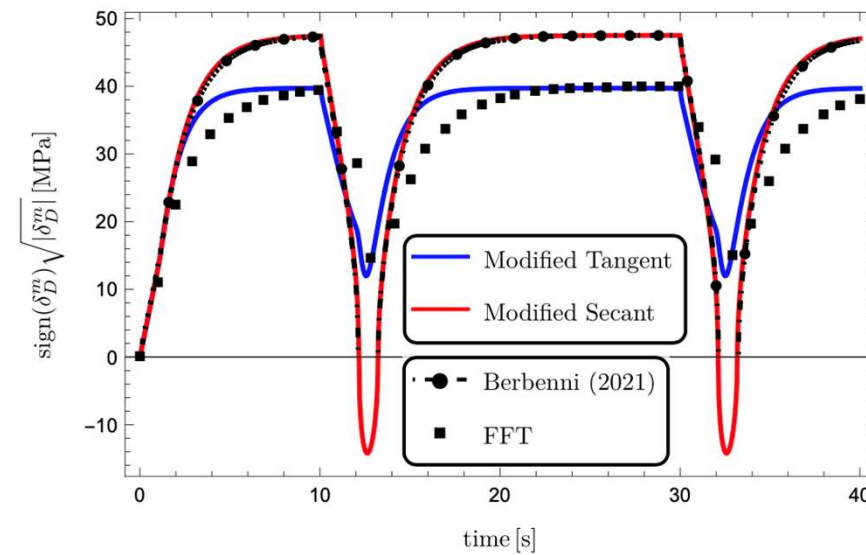
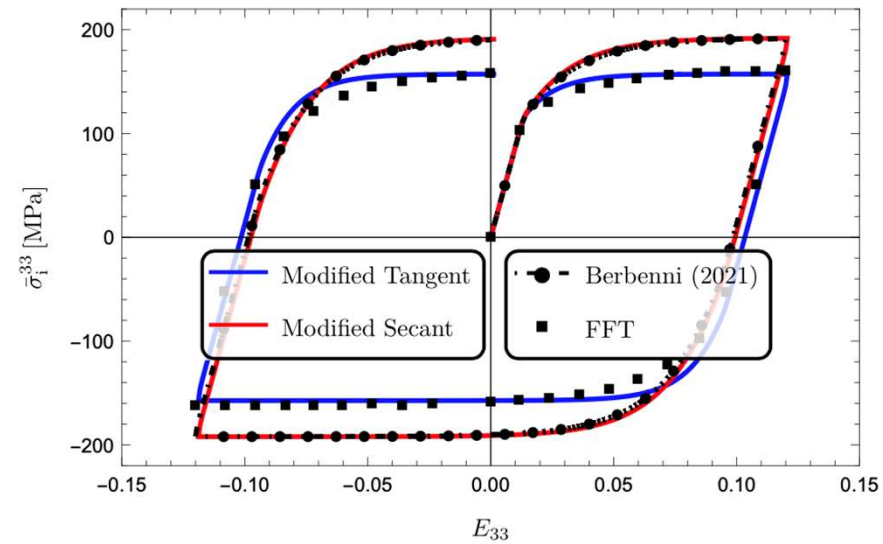
Traction-compression cyclique isochore

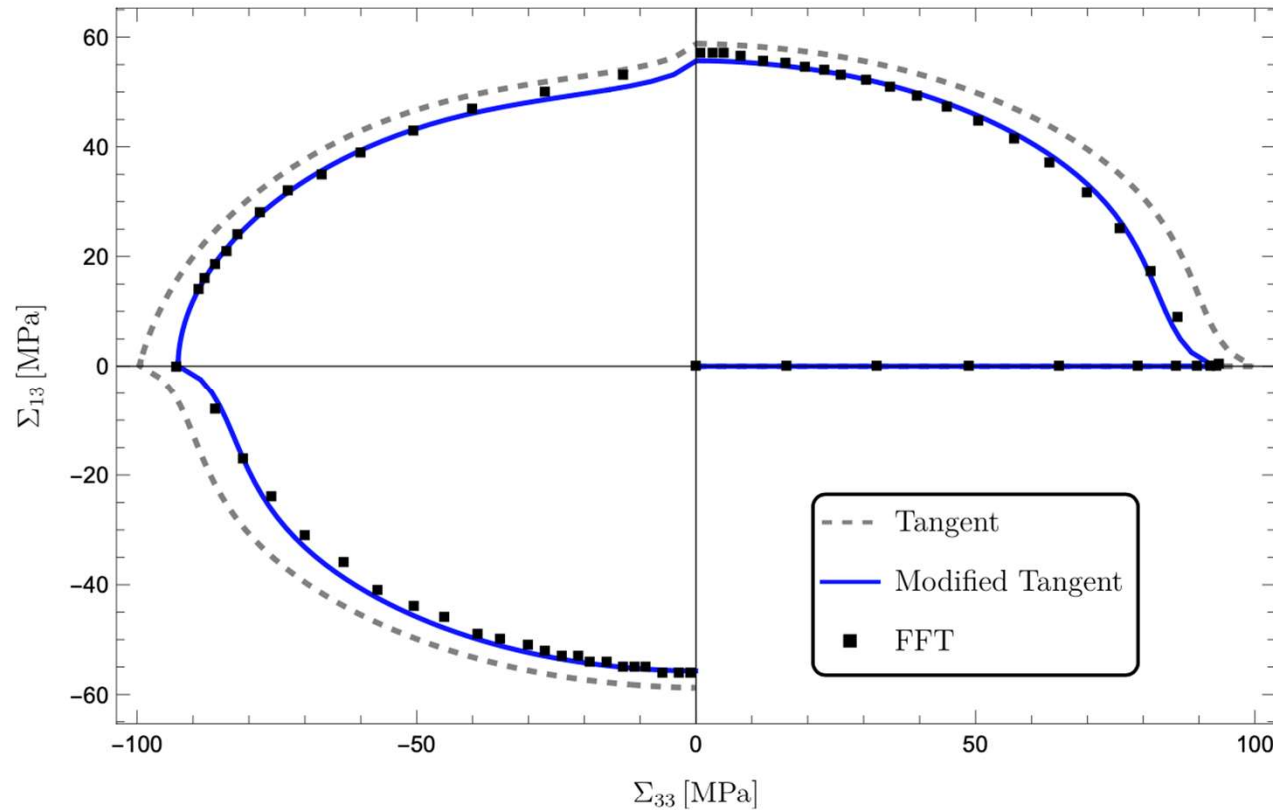


$$\dot{E}(t) = \begin{cases} 12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} & \text{if } t \leq 10 \text{ [s] or } t > 30 \text{ [s]} \\ -12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} & \text{if } 10 \text{ [s]} < t \leq 30 \text{ [s]} \end{cases}$$

Étude de l'évolution des fluctuations de contraintes dans la matrice (Résultats FFT de Lahellec and Suquet, 2013)

Comparaisons entre les différents schémas de linéarisation et différents modèles





Traction isochore
+ Cisaillement

(Résultats FFT de
référence par
Masson et al. 2020)

$$\mathbf{E}(t) = \frac{\dot{E}_{33}(t)t}{2}(3\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_3 - \mathbf{I}) + \dot{E}_{13}(t)t(\mathbf{e}_1 \otimes \mathbf{e}_3 + \mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_3 + \mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{e}_2)$$

$$\dot{E}_{33}(t) = \begin{cases} 12 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}] & \text{if } t \leq 10 [\text{s}] \\ 0 & \text{if } 10 < t \leq 20 [\text{s}] \text{ or } 30 < t \leq 40 [\text{s}] \\ -12 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}] & \text{if } 20 < t \leq 30 [\text{s}] \end{cases} \quad \dot{E}_{13}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 10 [\text{s}] \text{ or } 20 < t \leq 30 [\text{s}] \\ 7.5 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}] & \text{if } 10 < t \leq 20 [\text{s}] \\ -7.5 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}] & \text{if } 30 < t \leq 40 [\text{s}] \end{cases}$$

Conclusions

- Méthodes directes (« loi additive », « champs translats ») en élastoviscoplasticité basées sur une approximation du problème d'Eshelby en non linéaire avec lois d'interaction relativement simples
- Ces méthodes à variables internes ont donné de très bons résultats par rapport aux méthodes à champs complets (EF, FFT) et sont simples à coupler aux schémas classiques de Mori-Tanaka et autocohérents pour les composites ou les polycristaux
- Ces méthodes peuvent être facilement implémentés dans des approches EF pour le calcul de structure avec des lois de comportements viscoplastiques non linéaires de type Perzyna avec écrouissages cinématique et isotrope
- Les effets d'agencement spatial de particules ont été pris en compte par le modèle de cluster étendu en élastoviscoplasticité
- Ces méthodes ont été étendues à la prise en compte des effets de seconds moments de contraintes au travers de linéarisations « sécantes modifiées » et « tangentes modifiées » pour raffiner les estimations par rapport aux résultats en champs complets pour plusieurs types de chargement.
- De très bonnes prédictions sont obtenues avec la méthode tangente modifiée dans un schéma de Mori-Tanaka avec loi additive.

Merci pour votre attention

Remerciements



Collaborations:

K. Kowalczyk Gajewska, C. Czarnota, N. Jacques, L. Capolungo, C. Mareau, A. Molinari, M. Berveiller

Remerciements : Alain Molinari et Marcel Berveiller

S. Berbenni and S. Mercier acknowledge the support of the National Research Agency (ANR), France, under the project ANOHONA (ANR-23-CE51-0047).

Évènements à venir à Metz du 25 au 29 Août 2025



EUROPEAN
MECHANICS
SOCIETY

COLLOQUIUM 653

MECHANICS OF INTERFACES

26 August – 28 August 2025, Metz, France

Mechanics of Interfaces for Polycrystals and Composites: experimental methods, multiscale modelling methods including discrete (atomistics, etc.) and continuum-based models, classical and physics-informed machine-learning methods.

Liste de contributions sur le sujet

Berbenni, S., 2021. A time-incremental homogenization method for elasto-viscoplastic particulate composites based on a modified secant formulation. *Int. J. Solids Struct.* 229, 111136.

Berbenni, S., Capolungo, L., 2015. A Mori–Tanaka homogenization scheme for non- linear elasto-viscoplastic heterogeneous materials based on Translated Fields: An affine extension. *C. R. Méc.* 343, 95-106.

Berbenni, S., Forest, S., 2024. Analytical Micromechanical Methods for Elasto-Viscoplastic Composites and Polycrystals. In: *Digital Materials: Continuum Numerical Methods at the Mesoscopic Scale*, 113, ISTE, WILEY

Kowalczyk-Gajewska, K., Berbenni, S., Mercier, S., 2025. An additive Mori–Tanaka scheme for elastic–viscoplastic composites based on a modified tangent linearization. *Mechanics of Materials* 200, 105191

Mareau, C., Berbenni, S., 2015. An affine formulation for the self-consistent modeling of elasto-viscoplastic heterogeneous materials based on the Translated Field method. *Int. J. Plast.* 64, 134–150

Mercier, S., Jacques, N., Molinari, A., 2005. Validation of an interaction law for the Eshelby inclusion problem in elasto-viscoplasticity. *Int. J. Solids Struct.* 42, 1923–1941.

Mercier, S., Kowalczyk-Gajewska, K., Czarnota, C., 2019. Effective behavior of compos- ites with combined kinematic and isotropic hardening based on additive tangent Mori-Tanaka scheme. *Composites B* 174, 107052.

Mercier, S., Molinari, A., 2009. Homogenization of elastic–viscoplastic heterogeneous materials: Self-consistent and Mori-Tanaka schemes. *Int. J. Plast.* 25, 1024–1048.

Mercier, S., Molinari, A., Berbenni, S., Berveiller, M., 2012. Comparison of different homogenization approaches for elastic–viscoplastic materials. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 20, 024004.