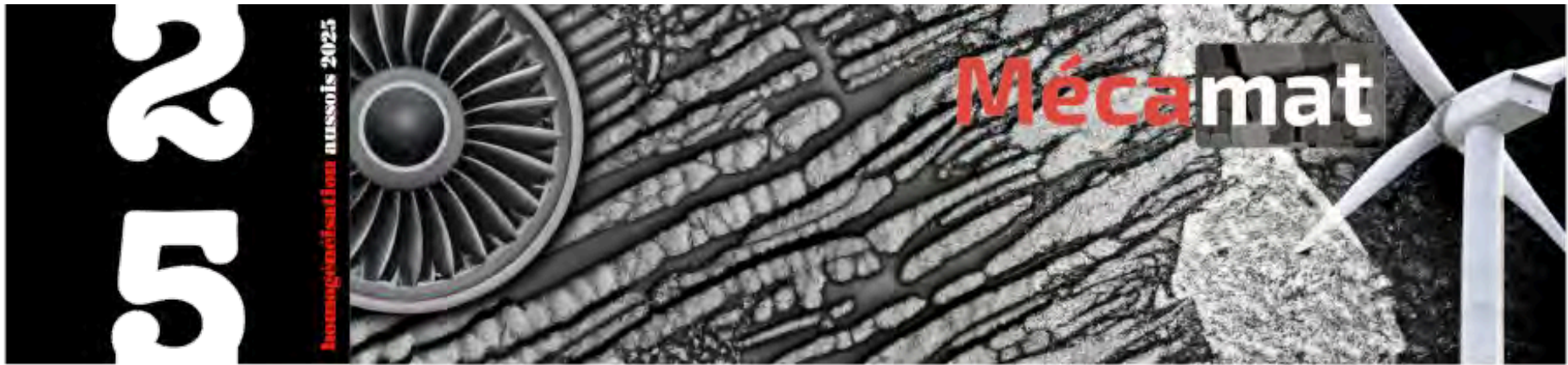


MECAMAT – colloque Aussois 2025

Synthèse



Olivier Castelnau



homogénéisation du comportement mécanique des matériaux hétérogènes

27-31 janvier 2025

COMITÉ D'ORGANISATION

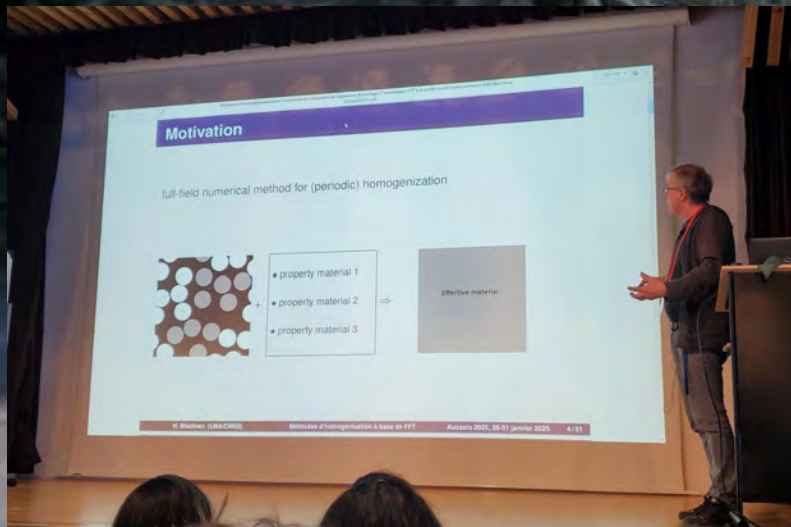
Comité scientifique

- Renald BRENNER (D'Alembert, Sorbonne Université) - renald.brenner@sorbonne-universite.fr
- Noël LAHELLEC (LMA, Université Aix-Marseille) - lahellec@lma.cnrs-mrs.fr
- Yann MONERIE (LMGC, Université Montpellier) - yann.monerie@umontpellier.fr
- Carole NADOT-MARTIN (Institut Pprime, ISAE-ENSMA) - carole.nadot@ensma.fr

Aussois, c'est ...

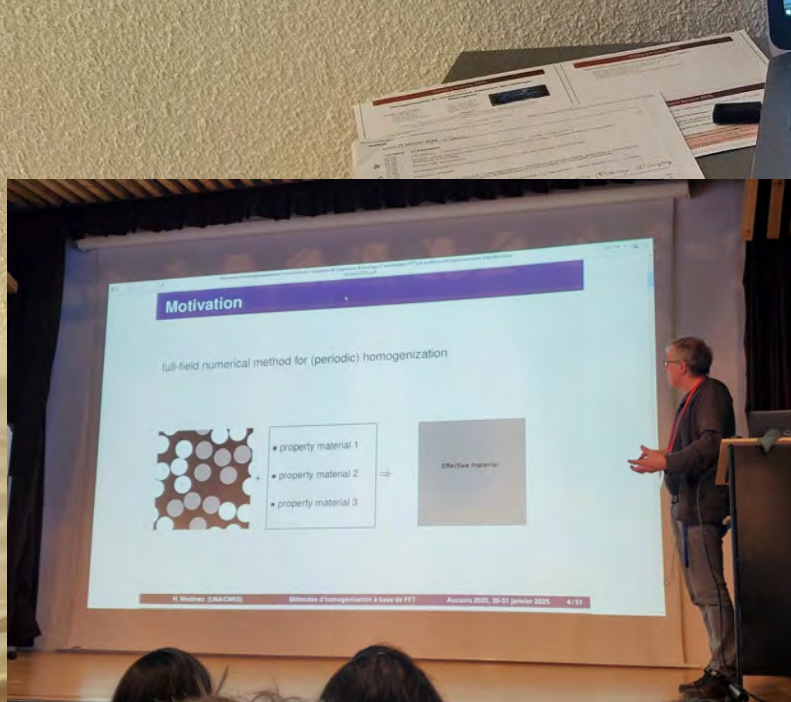
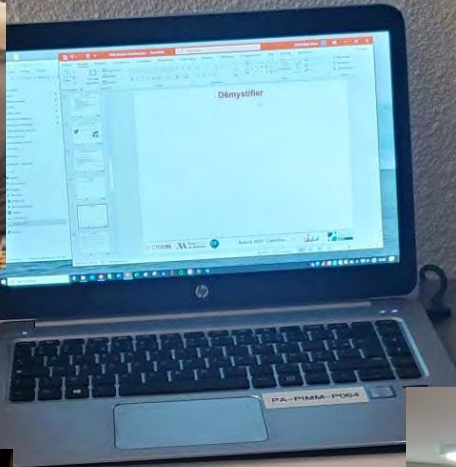


... une « chance »



$$w^{(r)}(\varepsilon) = \text{stat}_{\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)}} \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \mathbb{C}^{(r)} \varepsilon + \tau^{(r)} \cdot \varepsilon + \alpha^{(r)} \check{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) + (1 - \alpha^{(r)}) \hat{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) \right\}$$

Aussois, c'est ...



$$w^{(r)}(\varepsilon) = \text{stat}_{\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)}} \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \mathbb{C}^{(r)} \varepsilon + \tau^{(r)} \cdot \varepsilon + \alpha^{(r)} \check{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) + (1 - \alpha^{(r)}) \hat{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) \right\}$$

MECAMAT – colloque Aussois 2025

Tentative de synthèse...

Outline

Les 23 problèmes d'Aussois....regroupés

- 1 : les microstructures aléatoires et évolutives
- 2 : Le Nonlinéaire
- 3 : Le rapprochement avec les mesures de champs
- 4 : Les couplages multiphysiques
- 5 : Vers un mariage d'intérêt entre la physique des milieux hétérogènes et l'IA ?
- 6 : Instabilités dans les milieux hétérogènes
- 7 : Obtention de milieux continus généralisés
- 8 : L'enjeu des milieux architecturés
- 9 : Le *computational* Micromechanics
- 10 : Ponts avec les très petites échelles

et bien d'autres..

Djim'

Outline: Key Items

1. Continuum des approches
2. Révolution du Machine Learning
3. Ne pas oublier les mécanismes physiques
4. Démystifier, toujours et encore
5. Les bienfaits de l'interdisciplinarité
6. Données expérimentales, données numériques, où investir ?
7. Homogénéisation@MECAMAT

... et quelques Key Points personnels

NON-EXHAUSTIF

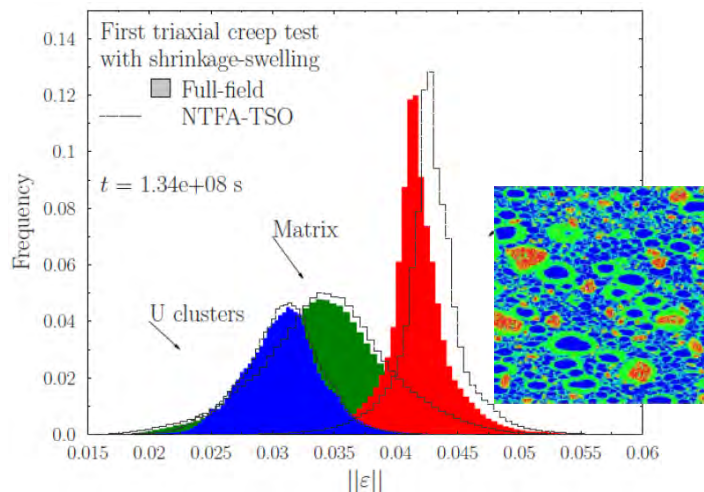
Continuum des approches

$$w^{(r)}(\varepsilon) = \underset{\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)}}{\text{stat}} \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \mathbb{C}^{(r)} \varepsilon + \tau^{(r)} \cdot \varepsilon + \alpha^{(r)} \check{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) + (1 - \alpha^{(r)}) \hat{v}^{(r)} \left(\tau^{(r)}, \mathbb{C}^{(r)} \right) \right\}$$

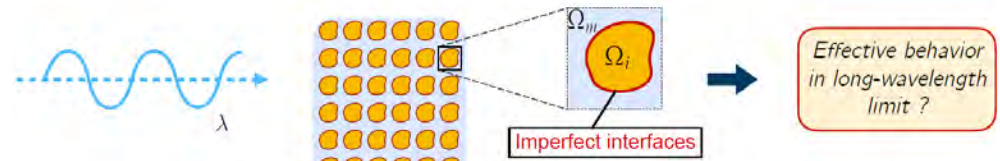
SO estimates, M. Idiart

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^*(\mathbf{x}) = \Psi_0 \cdot \mathbf{E}(\mathbf{x}) + \eta \Psi_1 : \nabla \mathbf{E}(\mathbf{x}) \\ \Phi^*[U] = \frac{1}{2} \int [\mathbf{E} \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{E} + \eta \mathbf{E} \cdot \mathbf{A} : \nabla \mathbf{E} + \eta^2 (\mathbf{B} :: (\nabla \mathbf{E} \otimes \nabla \mathbf{E}) + 2 \mathbf{E} : \mathbf{C} :: \nabla^2 \mathbf{E})] d\mathbf{x} \end{cases}$$

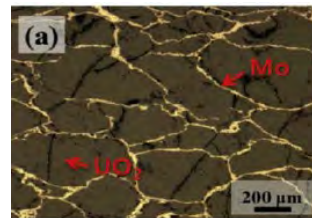
Higher order homogenization, C. Lestringant



MOX (NTFA vs. FFT: gain 5000),
R. Largeton

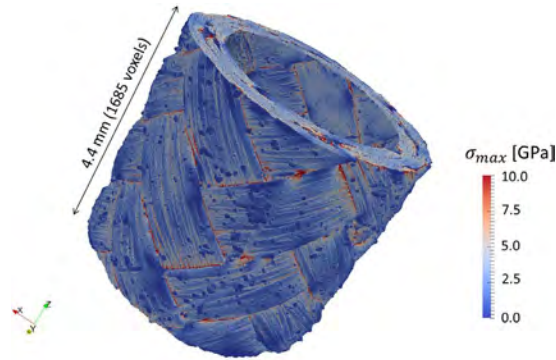


Waves, C. Bellis



Gaine combustible, R. Masson

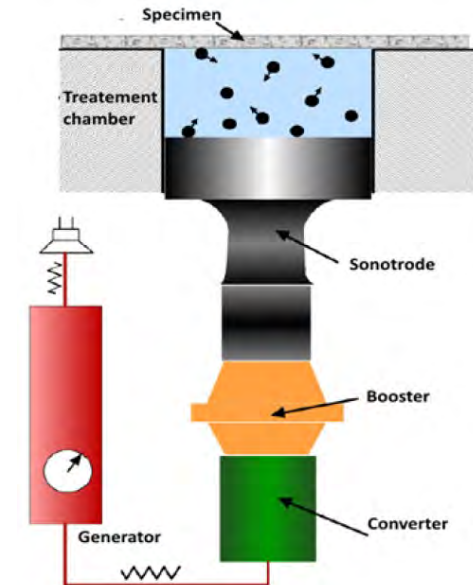
Continuum des approches



SiC-SiC, L. Gélébart



Magnéto-mécanique, L. Daniel



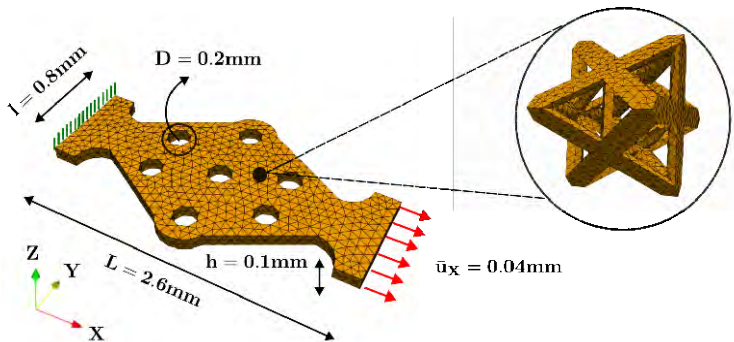
Procédé SMAT, B. Panicaud

- Mélange des approches ++
- On a besoin de tous les savoirs, théoriques / numériques / matériaux / applications / ...
- On a besoin de se connaître, de se rencontrer (et pas en visio), de discuter,
- On a besoin de tous / toutes,
- La recherche est une activité très largement collective !

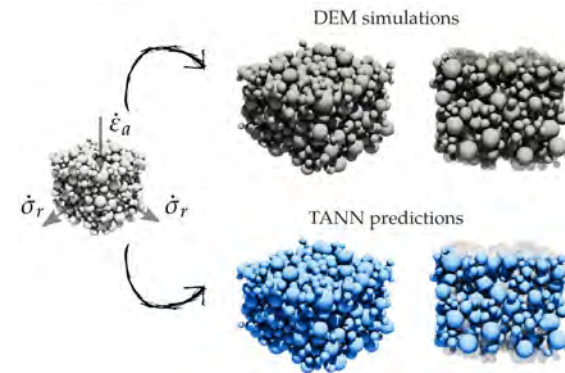
Révolution du Machine Learning

- Très forte poussée !!
- F. Rabelais (1483) via C. Stolz : « *Science sans conscience n'est que ruine de l'âme* »
- Y. Chemisky (2025): « *L'IA n'apporte rien de plus que la réduction du temps de calcul* »
- F. Masi (2025): « *l'apprentissage automatique n'est pas suffisant, ne pas oublier la physique apprise à l'école* »
- L. Stainier (2025): « *L'intelligence est dans les utilisateurs et non dans les méthodes* »

Mais quand même... speed-up jusqu'à 10^3



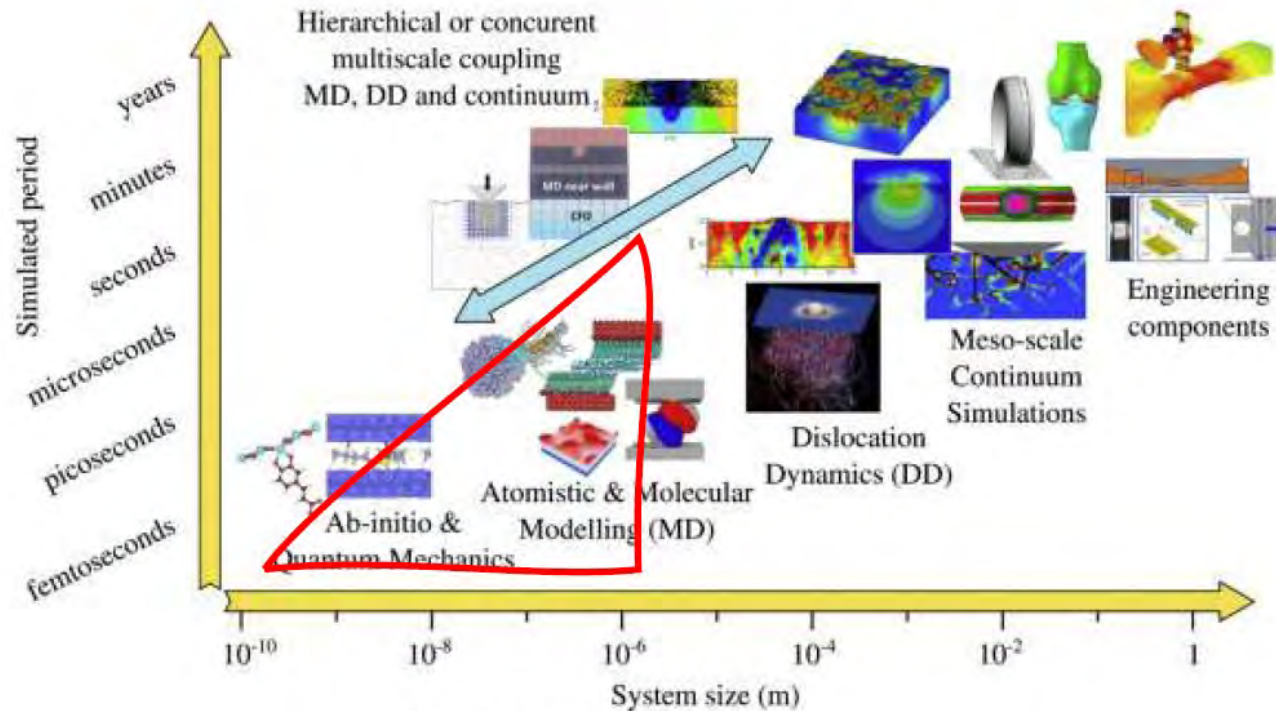
FE² (5 days, 1.1Tb) → FE+IA (102s, 120Mb),
Y. Chemisky



DEM, Filippo Masi, $\times 10^3$

- Calcul des champs locaux via un graph neural network (Y. Chemisky) ?
- IA pour sélectionner les modes de la NTFA (R. Largenton) ?
- ...

Révolution du Machine Learning



S. Goel et al., Materials Today Chemistry,
<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100356>.

F. Ribeiro

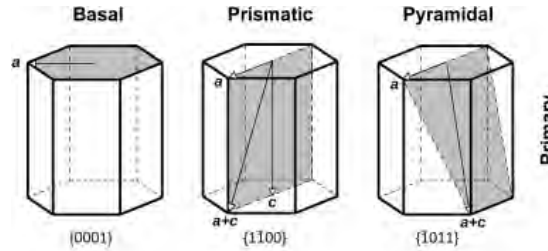
Aussois 20XX => transition de combien d'échelles ?

Quels mécanismes considérer ?

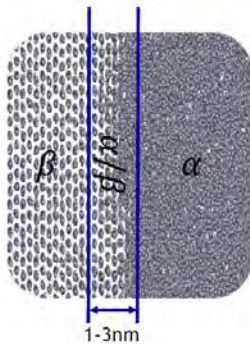
Les modèles doivent donner **de bons résultats pour les bonnes raisons**
(formulation de la transition d'échelle ET lois physiques aux échelles fines)

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_0} = \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} \right)^m$$

Power law, M. Idiart

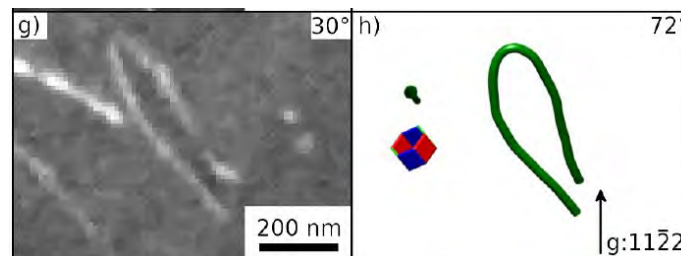


+ écoulement



Interfaces, F. Ribeiro & A. Jelaie

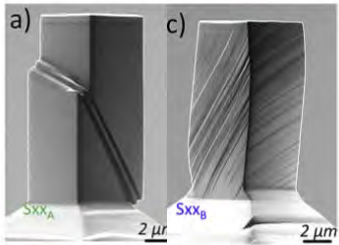
Slip transmission & disloc structure (A. Oudriss).



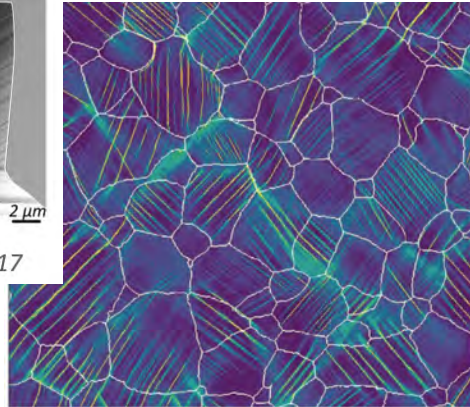
Déformation par montée, Quartz, Mussi et al. JGR 2024

Quels mécanismes considérer ?

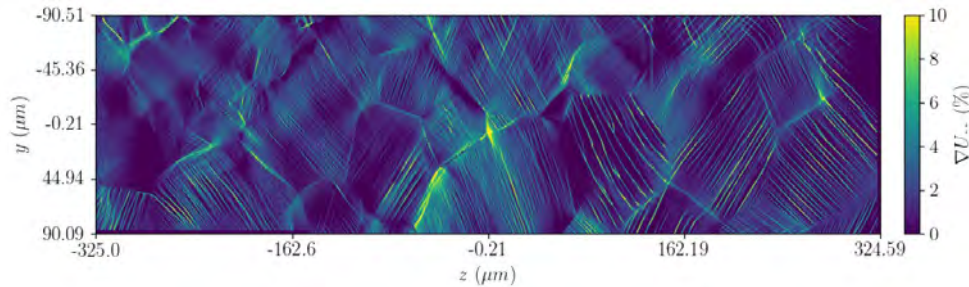
Cu single crystal



Malyar, Acta Materialia 2017



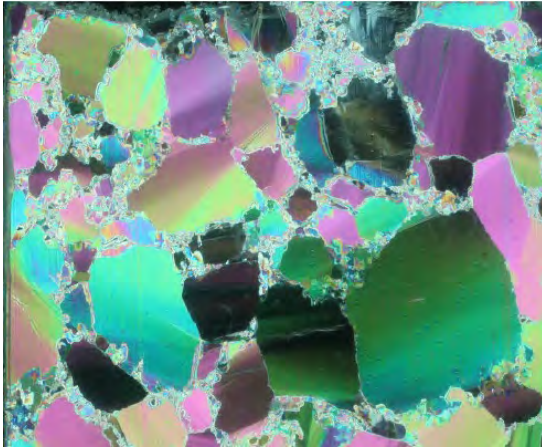
DIC Zr irradié, L. Gélébart
Cf poster J.M. Scherrer



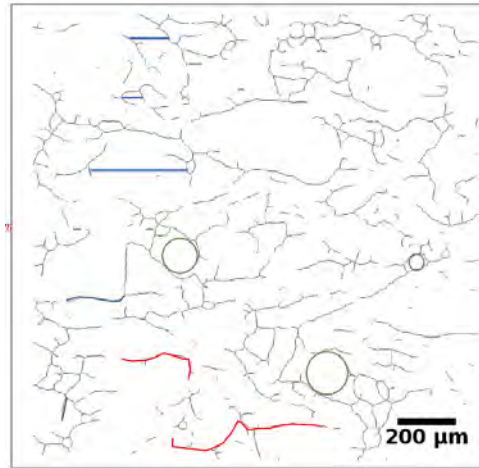
DIC, Glissement aux joints de grains, Ti- α ,
Mesbah, Ryckelynck, Proudhon et al.

Déformation twinning, Moraviec et al. Met. Trans. 2004

Quels mécanismes considérer ?



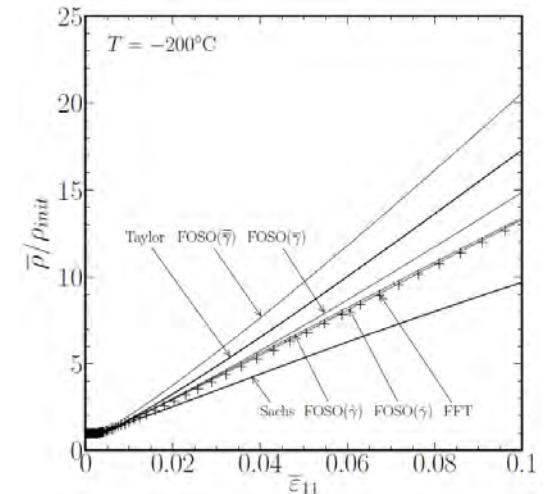
Recristallisation dynamique,
M. Montagnat



Caractérisation morphologique
des fissures, M. Bornert

- Compréhension des mécanismes physiques
- Formulation (avec peu de paramètres ! Identifiabilité ?). Aide possible de l'IA ?
- Intégration dans les approches en champs complets / moyens

Champ des contraintes
résiduelles initiales
(Aussois 2020) ??



Évolution microstructurales en
présence d'hétérogénéités
(Mean Field), M. Idiart

Démystifier

- Les voies de l'homogénéisation restent difficilement pénétrables par les non-spécialistes (ex. le/la voisin(e) de bureau). Thématiques mécamat larges.
- Approches en champs moyens notamment (pas d'images)...
- Des différences subtiles dans la formulation peuvent avoir un gros impact sur le résultat
- Rendre accessible => cours de D. Kondo, L. Gélébart, S. Brisard, M. Idiart, + les autres exposés
- Il faut continuer...!!! A l'oral et à l'écrit.

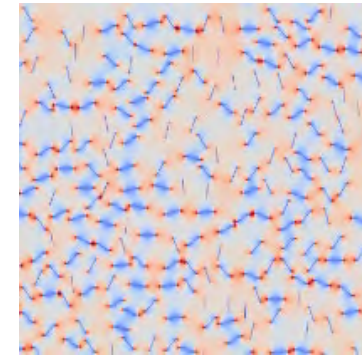
Interdisciplinarité

Diversité des points de vue souvent très riche d'enseignement et de débouchés

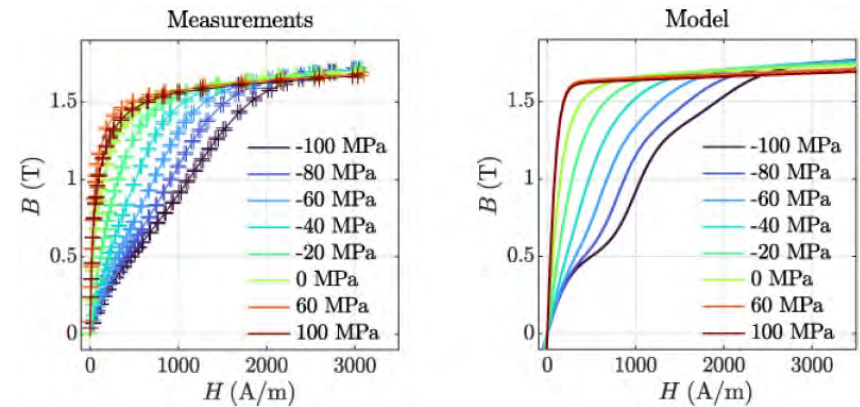
H. Moulinec : « *Je viens du traitement d'images* »

Problem	j	e	σ
Electrical conduction	Electrical current j	Electric field e	Electrical conductivity σ
Dielectrics	Displacement field d	Electric field e	Electric permittivity ϵ
Magnetism	Magnetic induction b	Magnetic field h	Magnetic permeability μ
Thermal conduction	Heat current q	Temperature gradient $-\nabla T$	Thermal conductivity κ
Diffusion	Particle current	Concentration gradient $-\nabla c$	Diffusivity D
Flow in porous media	Weighted fluid velocity $\eta_\mu v$	Pressure gradient ∇P	Fluid permeability k
Antiplane elasticity	Stress Vector (τ_{13}, τ_{23})	Vertical Displacement gradient ∇u_3	Shear matrix μ

D. Kondo, L. Stainier, ...



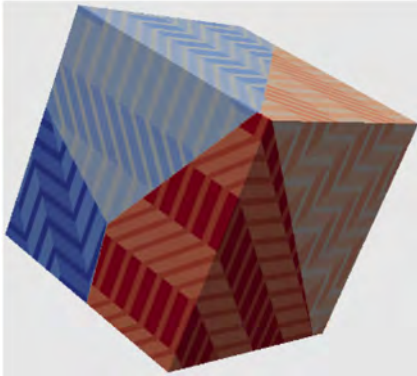
Flux thermique, M. Bornert



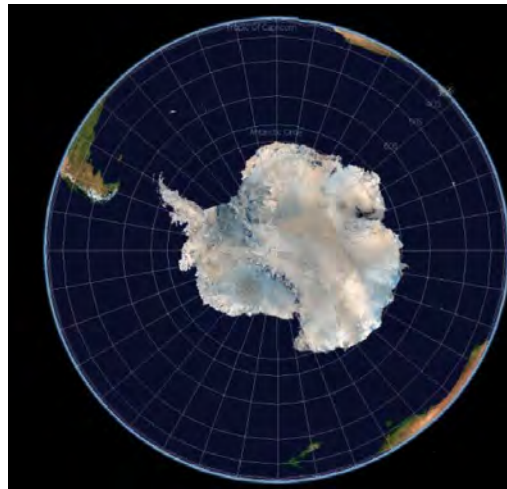
Magnétomécanique, L. Daniel

Interdisciplinarité

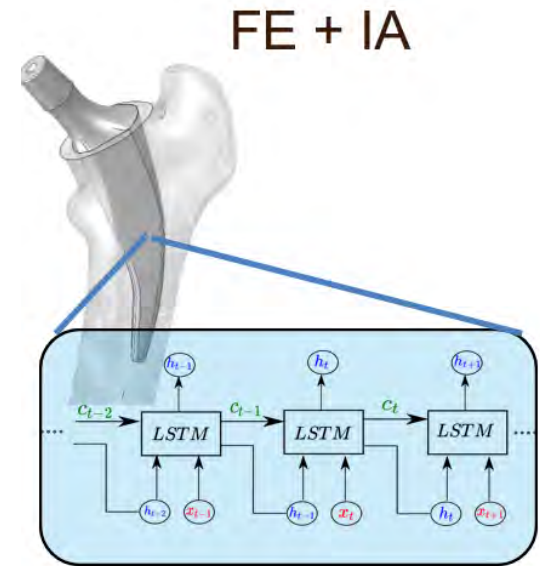
Quelques illustrations ...



$c \rightarrow t$ phase transition, ZrO₂, Petrich et al. 2025

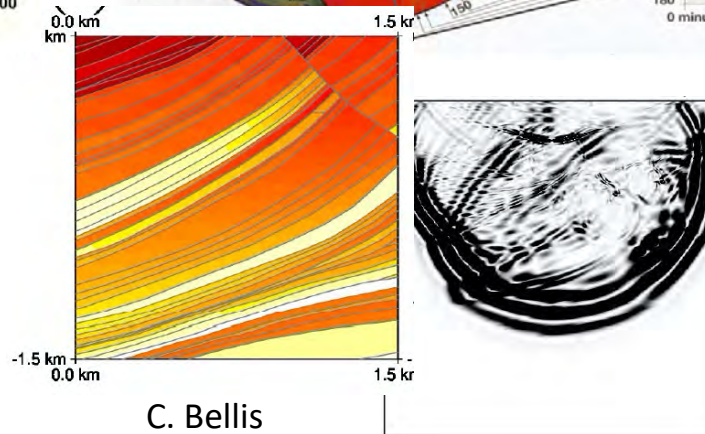
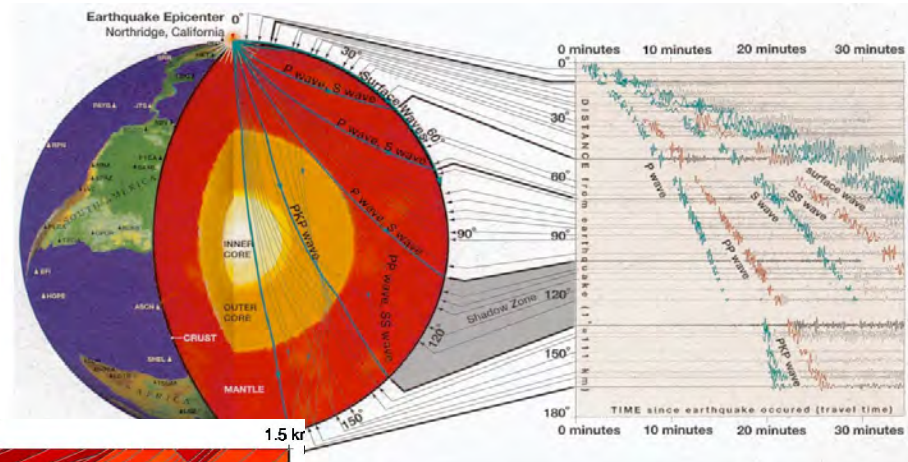
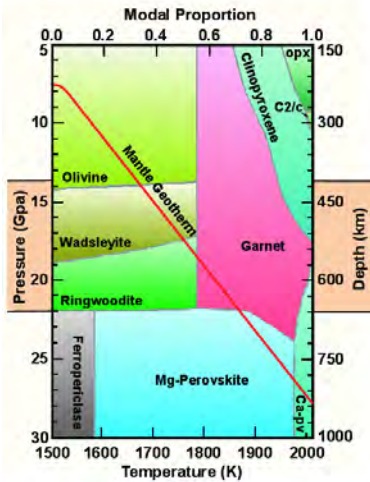


Ice sheets, M. Montagnat



Bioméca, Y. Chemisky

Interdisciplinarité



C. Bellis

- De vraies problématiques « cœur de métier » ...
- ... qu'il faut aller chercher (J. Diani : « *la nervosité des polymères* » ?)
- L. Daniel : « *des mondes qui vivent en parallèle* »
- Une surprise peut arriver...?

Quelles données ?

Techniques expérimentales de mesures de champ :

- DIC ou HR-DIC
- MEB : imagerie, EDS, ECCI, EBSD, 2d/3d ($100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3 \sim 24\text{h}$)
- Thermographie
- Tomographie de laboratoire (CT)
- Synchrotron : CT (absorption, phase), DCT, 3d-XRD, DFM, BCDI, ... mais aussi XRD, RSM, ou encore SAXS, réfraction, ...
- XFEL
- US
- Ex- ou in-situ (mécanique, thermique, magnétique, hydrique, gazeux, ...)

Calculs de champs :

- Spatialement résolu (full-field)
- Statistiques (mean-field)
- Quelles échelles spatiale / temporelle
- Quelle physique ?

Des To et des To ...

L. Stainier (2025) : « *Qu'est ce qu'on fait maintenant ?* »

Quelles données ?

- Quels sont les champs mécaniques / microstructuraux que l'on peut mesurer ?
- Quels sont les champs mécaniques que l'on peut calculer ?
- Avec quelles incertitudes / erreurs ?
- A quel coût (humain, financier, environnemental, ...) ?
- Etant donnés les possibilités expérimentales et numériques, et leur coût, quels sont les champs / le modèle dont j'ai réellement besoin ? Quelle est la base de données minimale ?
- Sur quelle taille de VER num/exp ? Quelle résolution est nécessaire ?
- Les modèles et les données expérimentales doivent-ils être à la même échelle ?
- Jusqu'où complexifier la loi de comportement ? Identifiabilité des paramètres ?

Homogénéisation @ MECAMAT



jfbarthelémy / echoes

Une communauté très active et reconnue

Continuer à échanger (enrichissements mutuels)



Capitaliser, mise en commun (plateforme nationale ?)

- Les codes numériques => répertorier, rationaliser
- Les résultats théoriques (exacts), numériques => répertorier, diffuser, benchmark ?

- Les données expérimentales ?

Quel format de données ? Comment ?



MFront
pyMFH

'git/shoal'

MechMater-project / Material_Homogeneization_Jupyter_notebook

❖ Stockage
& partage des
données

S. Joannes

No need for 500B\$...

Homogénéisation@MECAMAT

Problème de l'inclusion d'Eshelby

$$\begin{aligned} u(x) &= 0 \quad (|x| \rightarrow \infty) \\ \sigma(x) &= C_0 : \varepsilon(x) + P \end{aligned}$$

$$\sigma(x) = C_0 : \varepsilon(x)$$

La déformation moyenne
est homogénéité
du champ de la
contrainte (constante) !

$$\int_{\Omega} \varepsilon(x) dV_x = -P : \tau$$

$P = P(C_0, \Omega)$

- dépend de la forme
- ne dépend pas de la taille
- dépend de la raideur de la matrice

1. Inclusion de forme quelconque

Pas de solution analytique $\Rightarrow$ Calcul numérique

2. Inclusion ellipsoïdale

Expressions analytiques ou quasi-analytiques

Cofreque Mecamat 2025 - Sébastien Gilard

Un grand merci aux organisateurs/trices

Rénald BRENNER, Noël LAHELLEC,
Yann MONERIE, Carole NADOT-MARTIN

