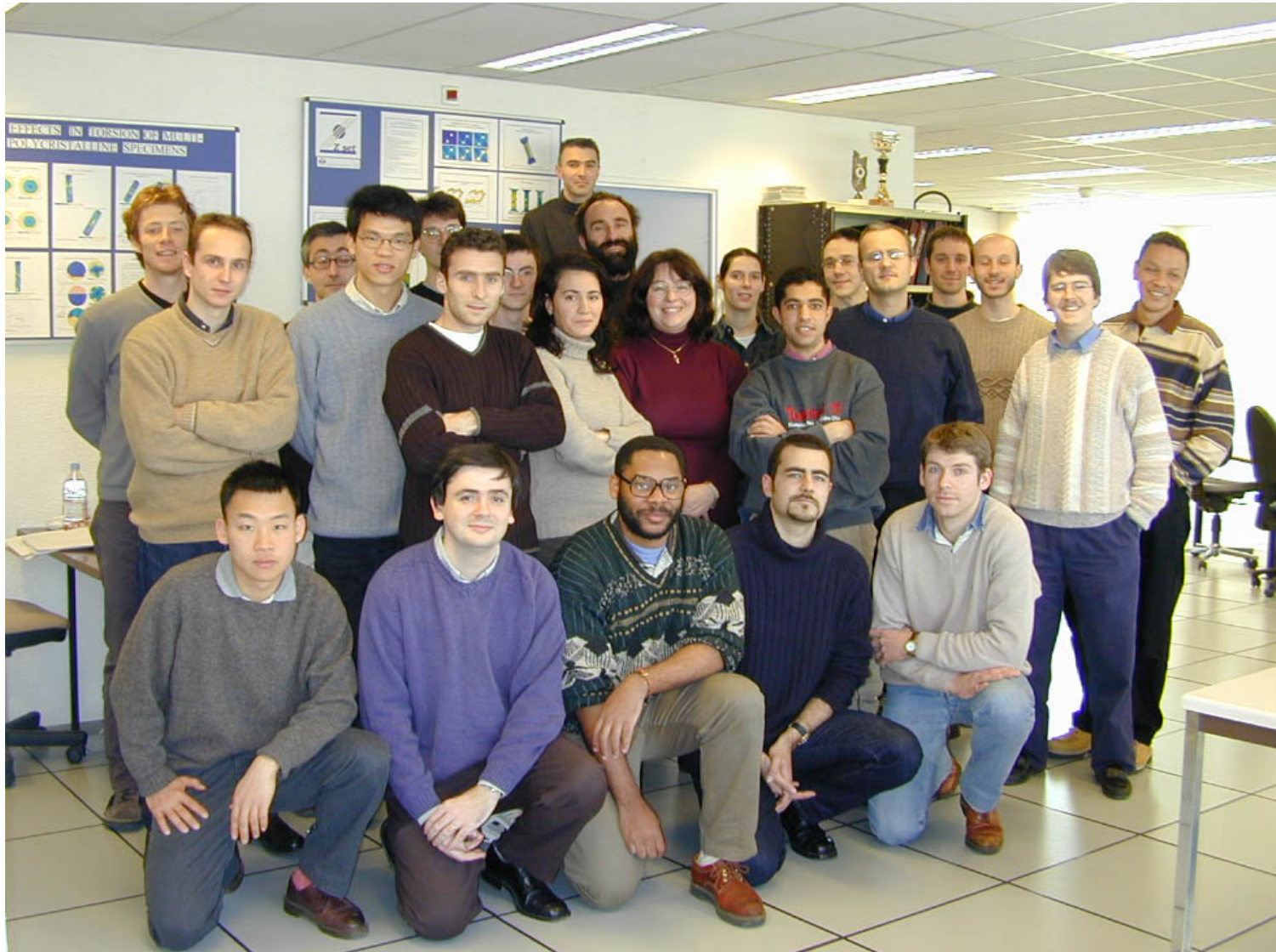


# Comportement Calculs de Structures

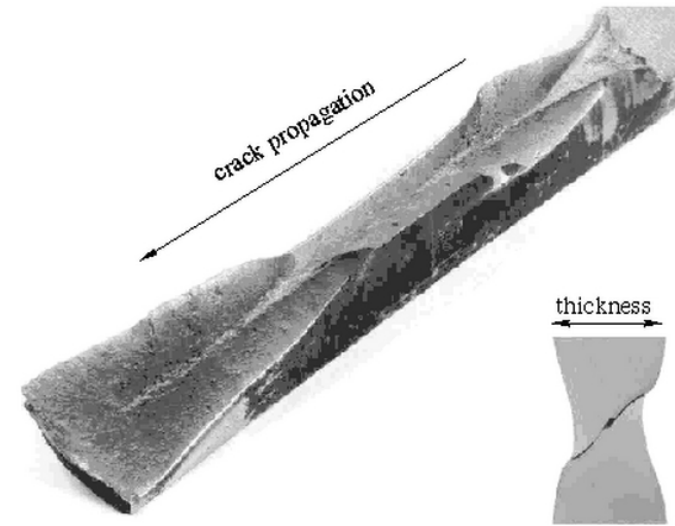
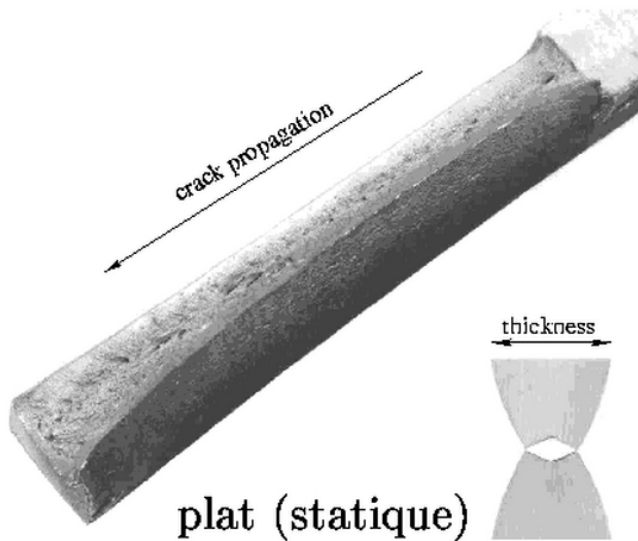


interaction forte avec les équipes HT, MM et Procédés, Calcul, Microscopie, D. Jeulin

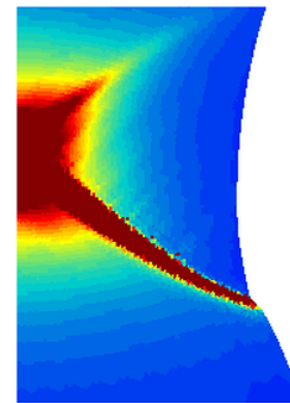
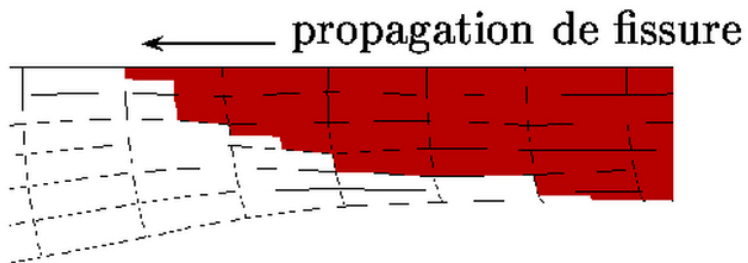
# Thèmes de Recherches

- Lois de comportement : fatigue thermomécanique, endommagement
- Calcul de structures : éprouvettes, aube de turbine, culasse automobile
- Calcul de microstructures
- Développement de code Z-set : Z-Sim, Z-Optim, Z-Mat, Z-Front

## Simulation : déchirure ductile des pipelines



en biseau (dynamique)



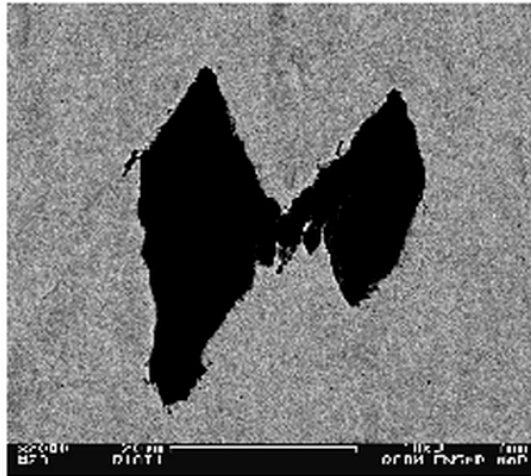
• 2D puis 3D

- simulation 3D  
→ application :  
Résistance =  $f(\text{épaisseur})$

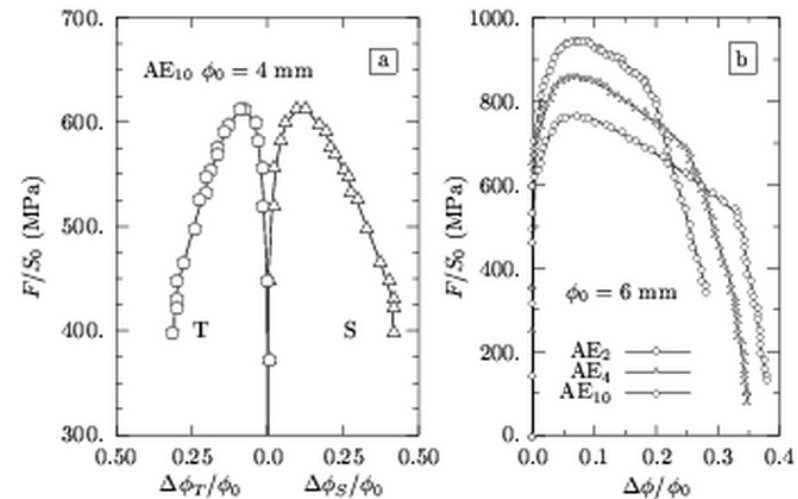
*thèmes de recherches*

## Lois de comportement pour la rupture ductile

Observation



Expérimentation

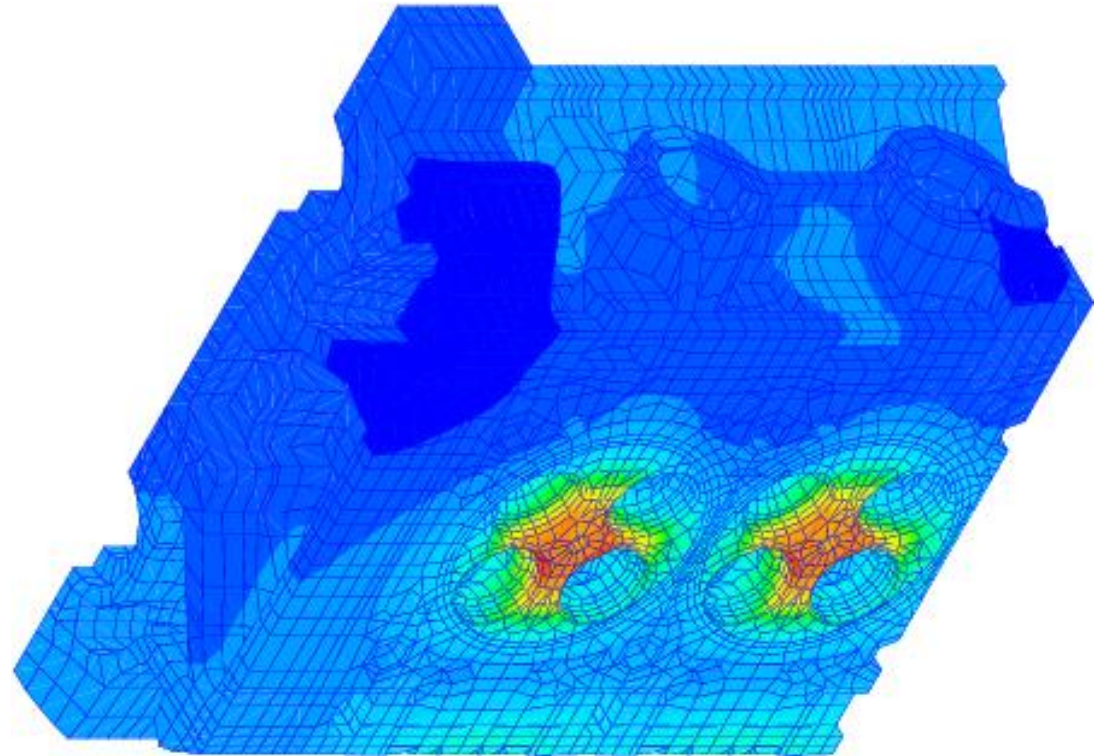


## Définition de lois de comportement

- Lois de type Gurson, Rousselier
- Extensions pour plus de physique
- viscoplasticité, écrouissage cinématique, forme des cavités, mécanismes de coalescence, mécanismes de germination, rôle des hétérogénéités, ...

## Culasse automobile

- Calculs dans la zone  $10^5$ – $10^6$  degrés de liberté en non-linéaire
- Calculs cycliques, durée de vie...



*Culasse diesel*

# Objectifs du calcul de microstructures

## Comportement mécanique des matériaux hétérogènes

- compréhension de mécanismes locaux de déformation ou rupture
- influence de la morphologie : calcul de VERs
- lien avec les méthodes d'homogénéisation :
  - tester les estimations disponibles
  - prédiction avec le minimum d'approximations, respectant les bornes!
  - cas des forts contrastes de propriétés
- informations supplémentaires : variance des champs, dispersion, hétérogénéités locales

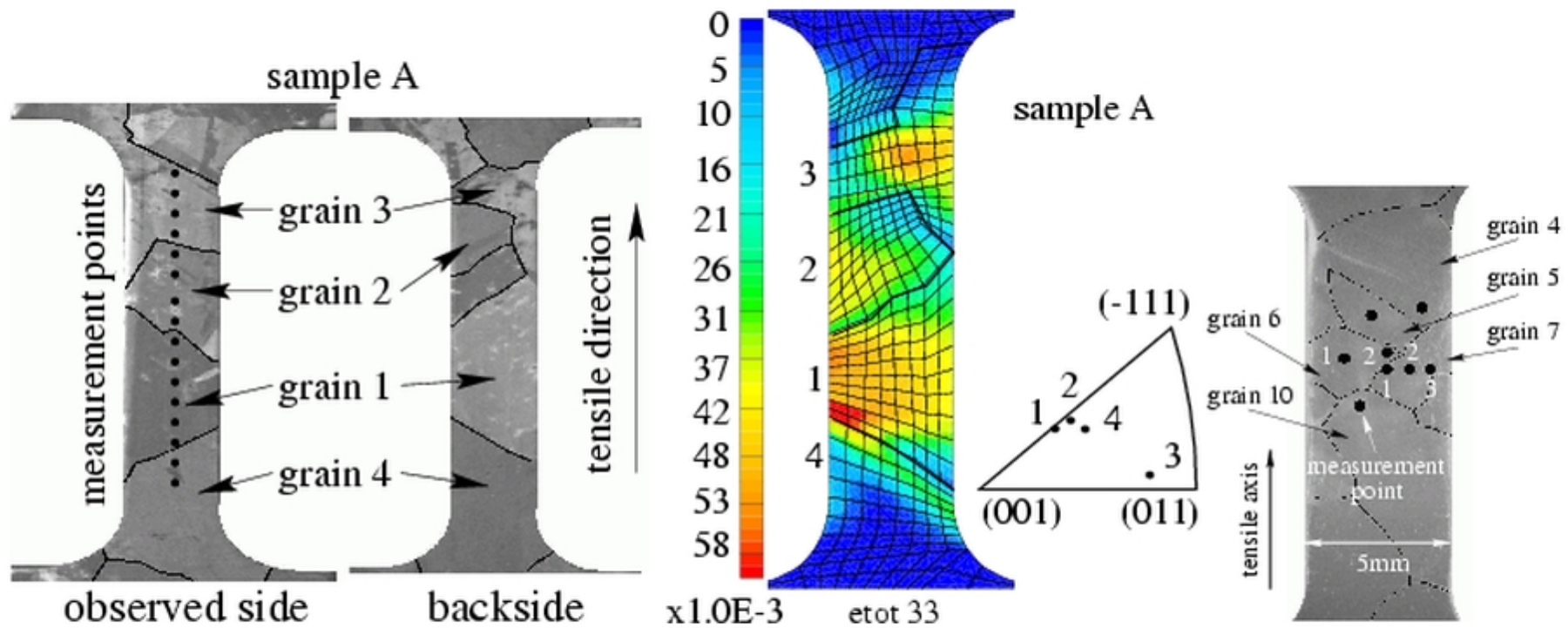
## Calculs de petites structures

- mini-éprouvettes, couches minces, matériaux "à gros grains"
- zones de concentration de contraintes

## Endommagement des matériaux

l'endommagement est piloté par les valeurs extrêmes et non par les valeurs moyennes...

# Eprouvettes multicristallines



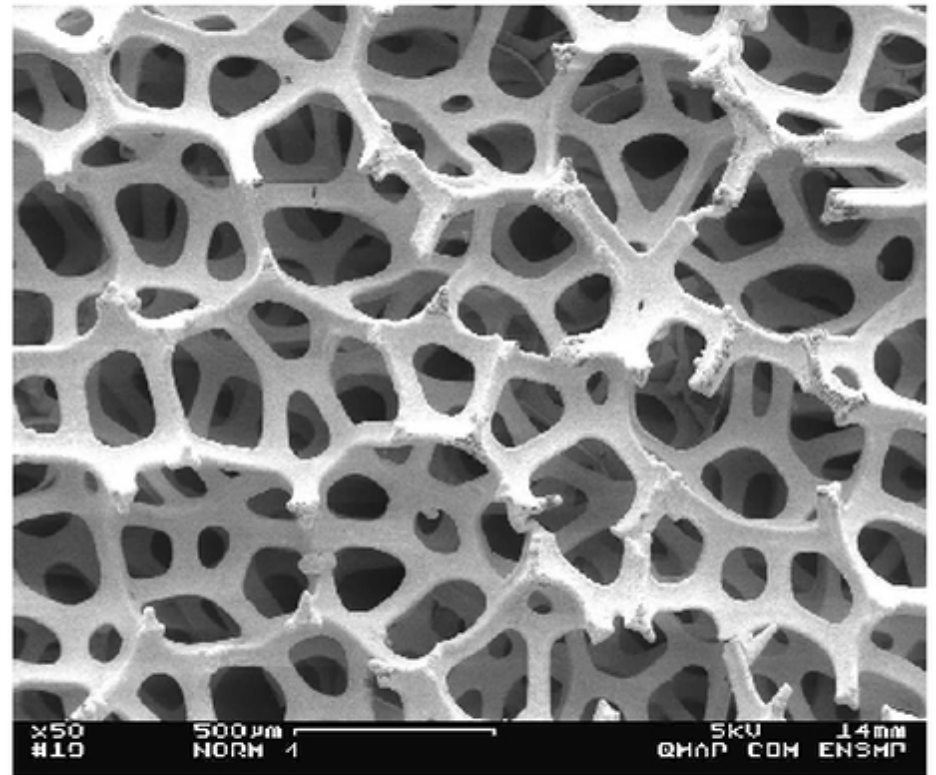
F. Eberl (2000, ENSAM-Paris)

# Mousses métalliques



**mousse d'aluminium**

J.-S. Blazy



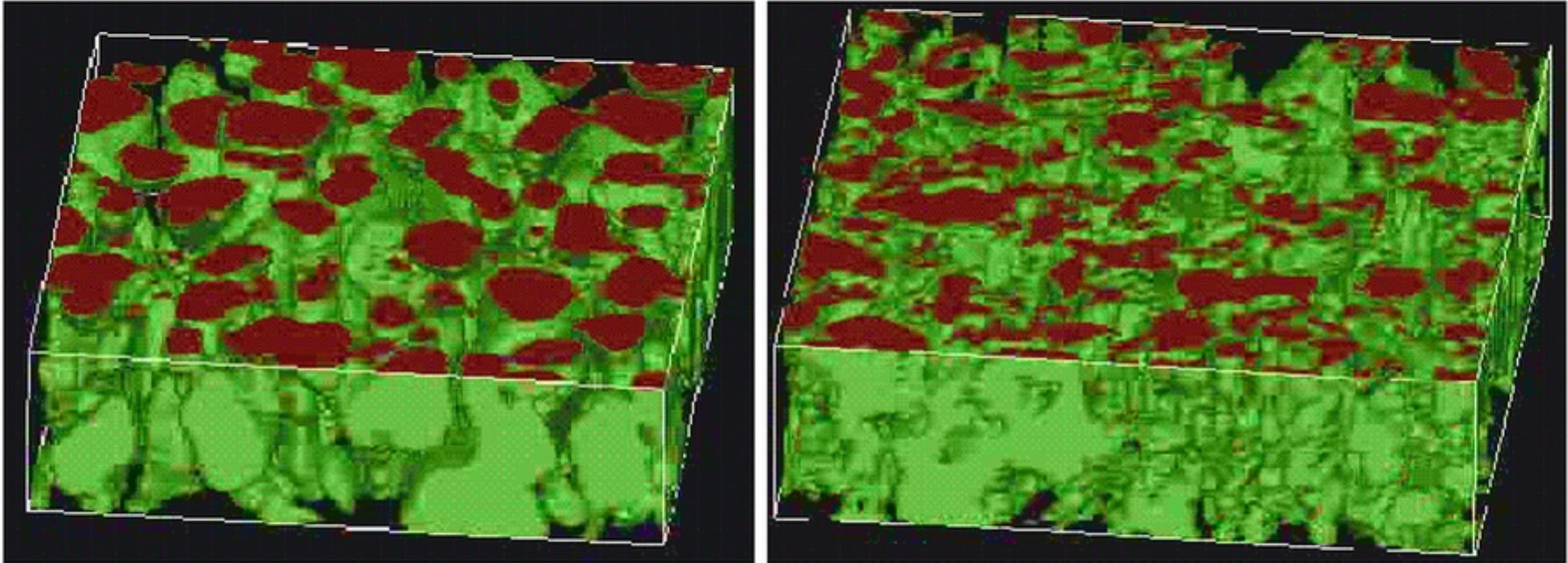
**mousse de nickel**

Th. Dillard

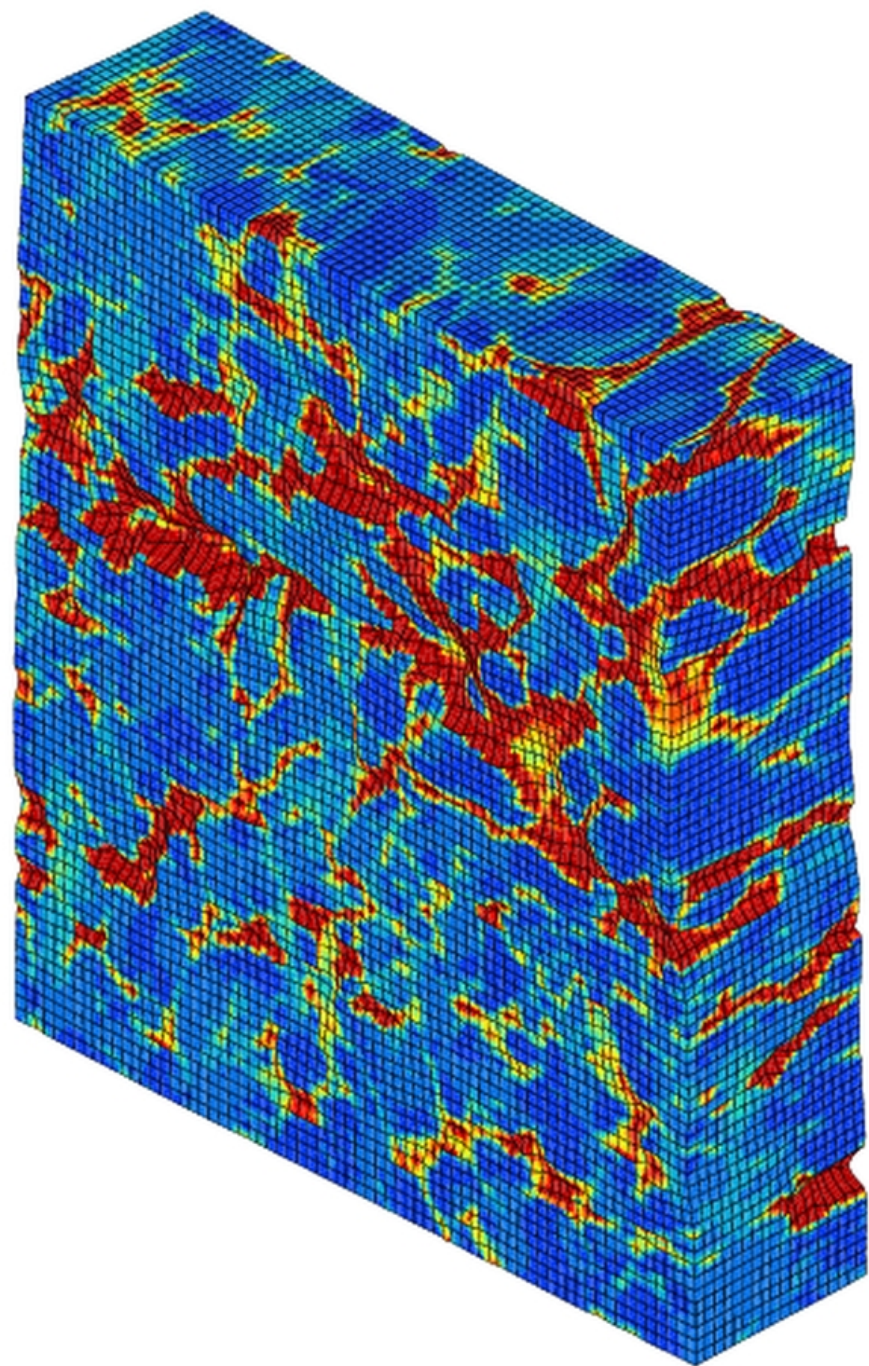
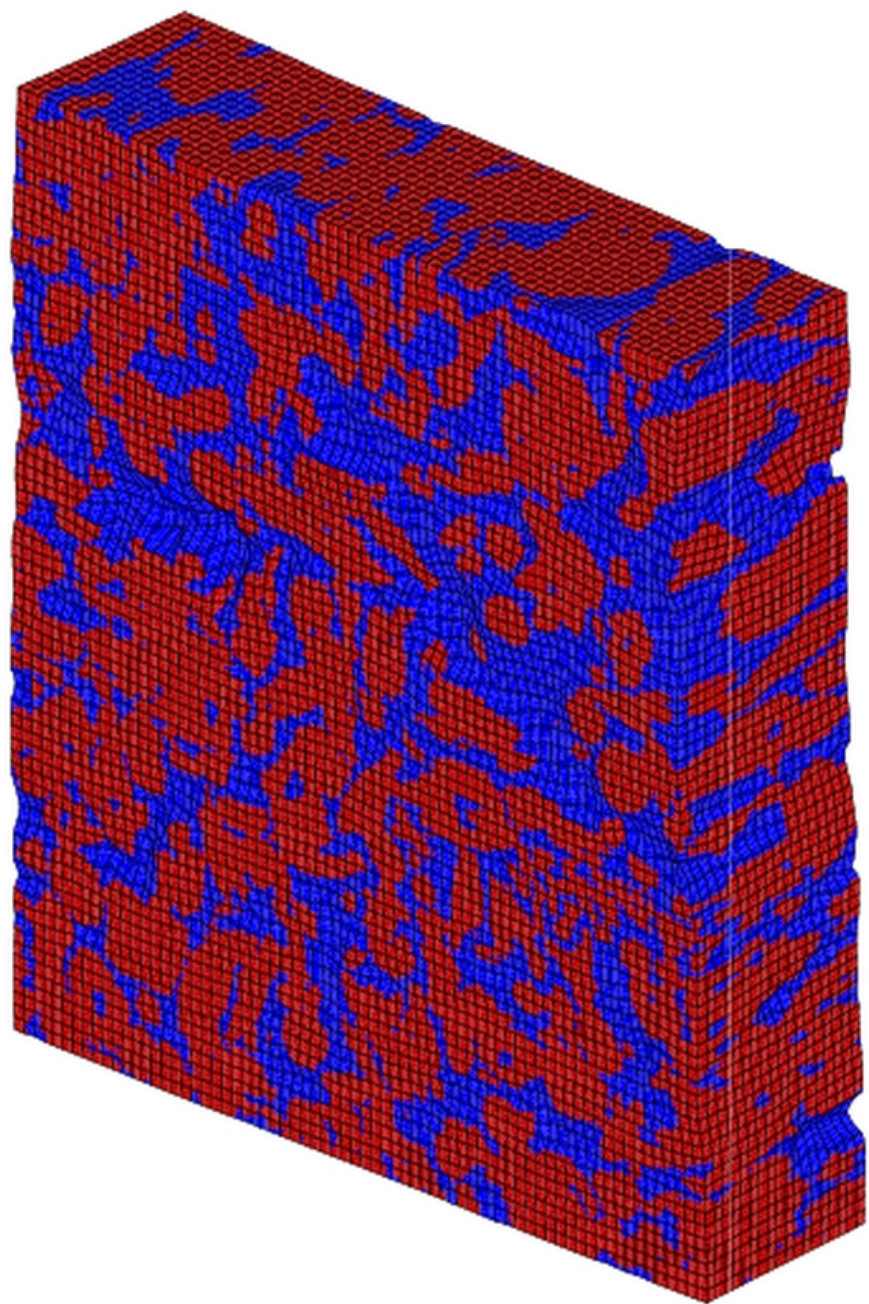
→ tomographie X



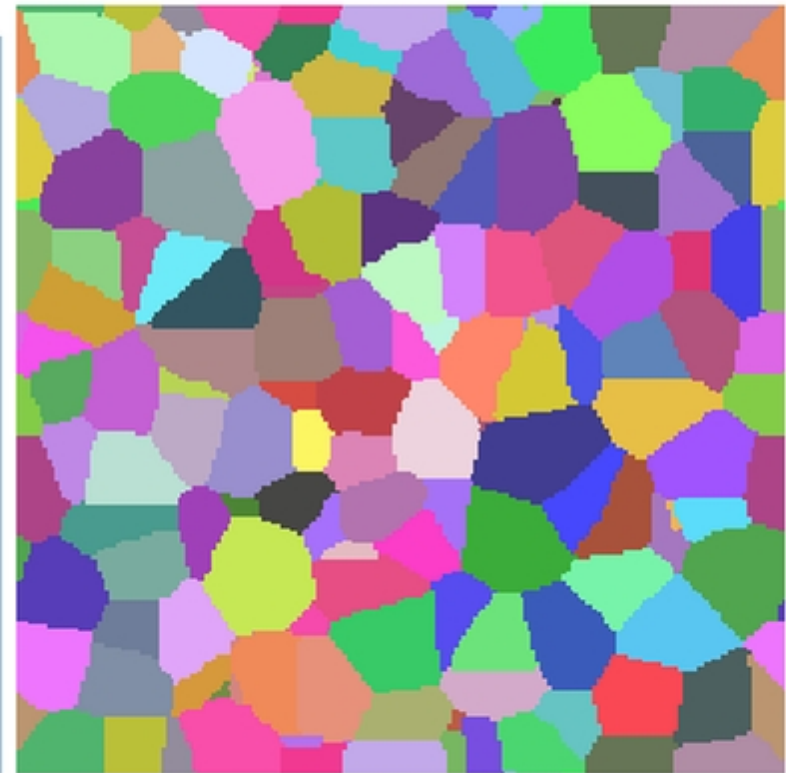
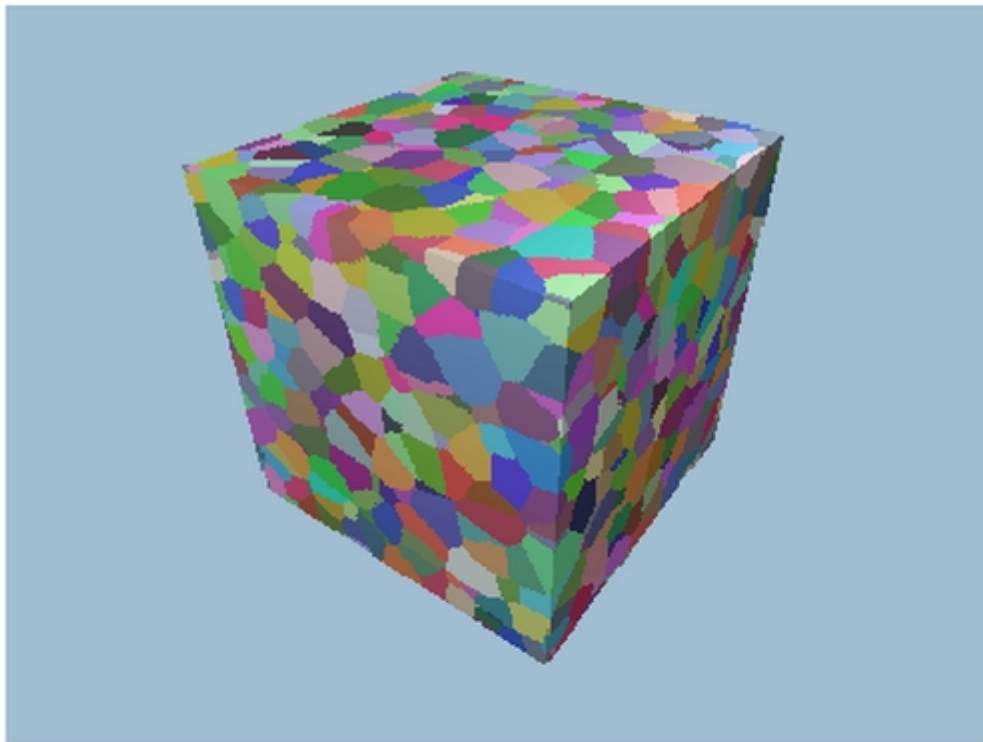
## Matériaux quasi-transparents



→ microscopie confocale

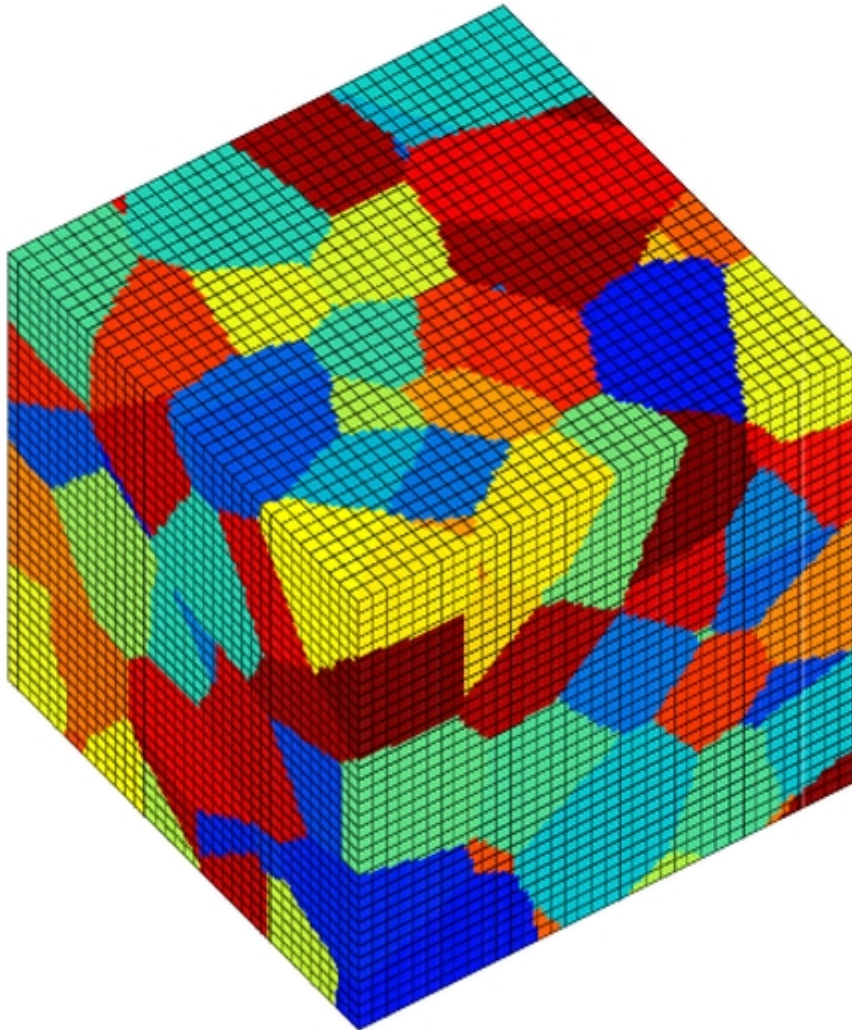


## Modèles de milieux aléatoires : le polycrystal

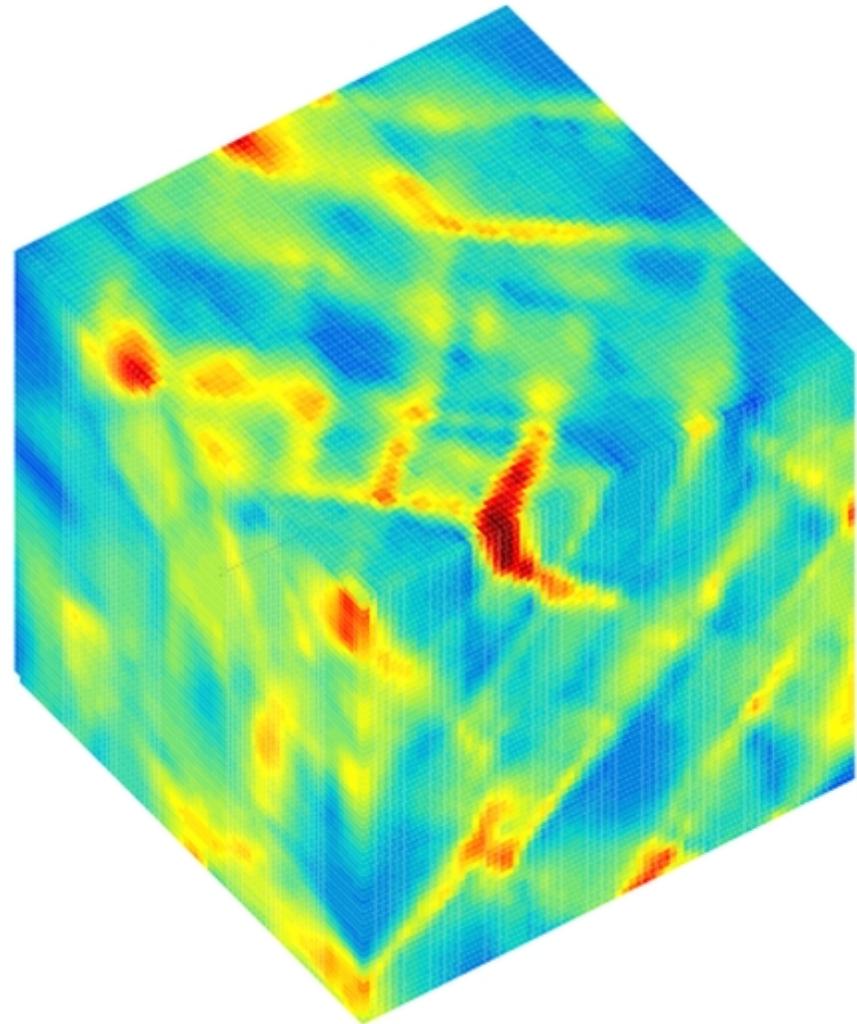


cellules de Voronoi 3D (Decker, Jeulin 1998)

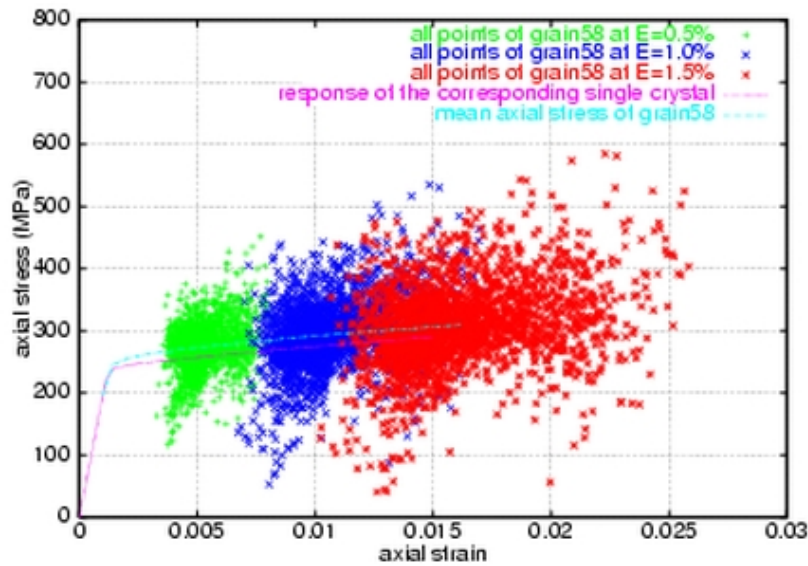
# Calcul d'agrégats polycristallins



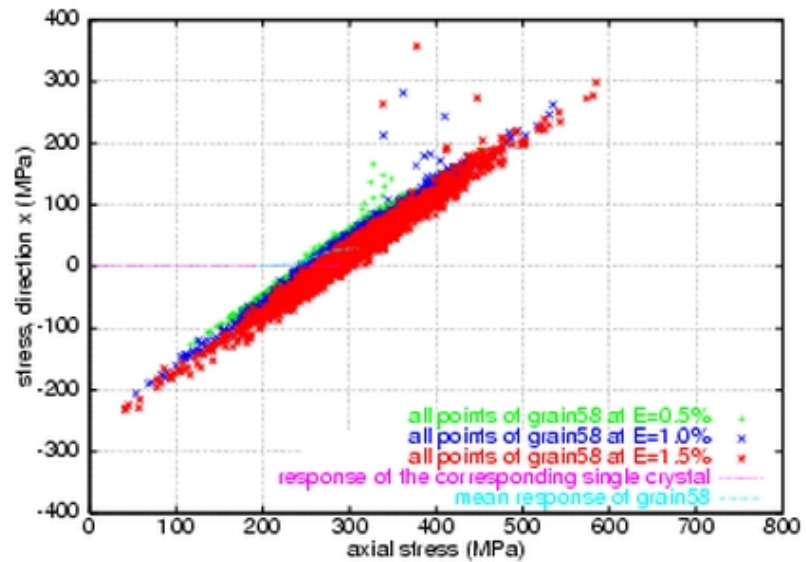
VER du polycristal



déformation plastique cumulée



Courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  axiales



$\sigma_{xx}$  versus  $\sigma_{zz}$

**CL Homogènes en déformation**

*Traction à  $\varepsilon_{zz} = 0.015$*

## Un code fédérateur : Zébulon

- Développé depuis 1981 au centre des matériaux
- Version C++ développée depuis 1991
- Code dédié au calcul de structure (dont calcul parallèle) et aux lois de comportement
- Un développement réparti sur plusieurs sites : Centre des Matériaux, Onera, NW-Numerics, Mines St Etienne
- Le code est employé lors de très nombreuses thèses au CdM (hors de l'équipe CoCaS)
- La structure permet de garder la "mémoire" des différentes études.
- Valorisation via Armines/Transvalor (40 Licences)
- Code utilisé en bureau d'étude (SNECMA)

# Enseignement

- Participation active à la réflexion en cours sur l'évolution du cycle IC de l'Ecole des Mines de Paris : Mécanique, Matériaux
- Cycle IC : Mécanique des Matériaux Solides, Mécanique des Structures Inélastiques
- DEA : Mécanique et Matériaux, Modélisation et Simulation en Sciences des Matériaux
- Thèses : 10 thèses en cours
- Formation continue : IPSI

## Liens nationaux

- Ecoles des Mines : Albi, [Alès](#), Saint–Etienne
- Laboratoires : Chimie Toulouse, Paris VI, Ponts et Chaussées, INPG–GPM2, Orsay
- ONERA
- Association MECAMAT



## Liens internationaux

- Professeurs invités : L. Blaj (Roumanie), E. Busso (Imperial College)
- Séjours : BAM–Berlin, GKSS–Hamburg, MIT–USA
- Organisations de congrès internationaux : EMMC2 (Magdeburg), EMMC3 (Londres), EMMC5 (Delft)
- Projets européens : SIEMENS, MTU, EGT
- Normalisation : ESIS

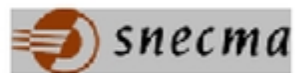
## Valorisation

- Publications : 20 en 2001 *Int. J. Solids Structures, Eng. Fracture Mechanics, Computational Materials Science, Acta/Scripta Materialia, Metall. and Mat. Transactions, Materials Science and Engng...*  
ouvrage : *Mécanique non linéaire des matériaux*
- Code Z-set : 40 licences
- Partenaires industriels : CEA, EDF, GDF, EADS, Péchiney, Framatome, Renault, Snecma, Usinor, Montupet  
Unilever, Nitech

**Comportement et durée de vie  
des pièces multiperforées :  
application aux aubes de turbine.**



**Jean-Marc Cardona**



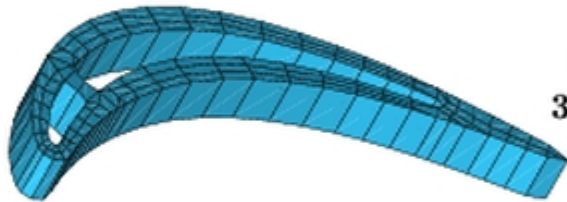
**F. Caruel  
V. Gros**



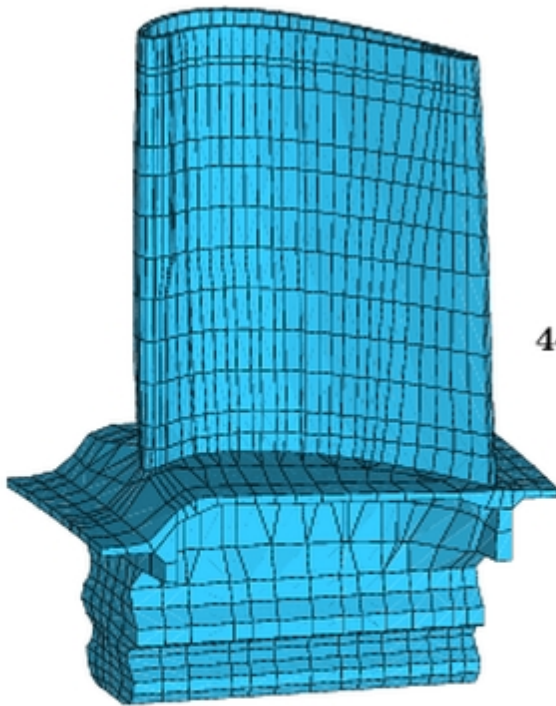
**G. Cailletaud  
S. Forest  
S. Quilici**



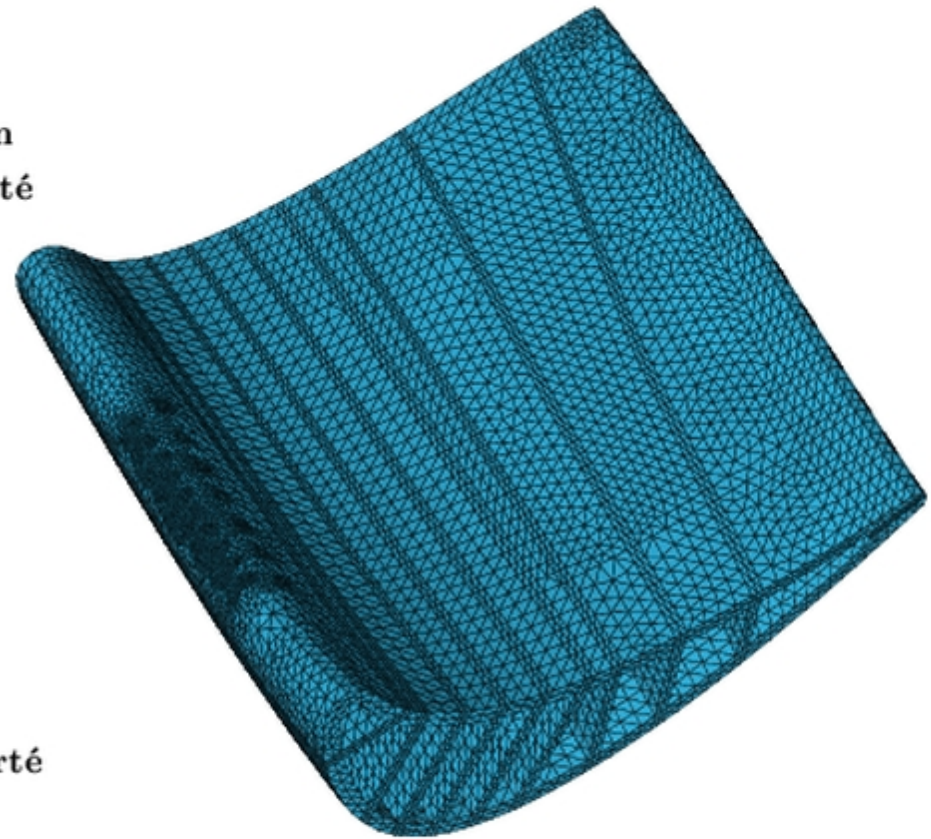
**S. Kruch  
F. Gallerneau  
D. Pacou**



1992  
première simulation  
3500 degrés de liberté



1997  
aube entière  
44000 degrés de liberté



2000  
maillage sans le pied  
560000 degrés de liberté

**Utilisation  
d'un ordinateur parallèle**

## Résolution en parallèle

parallélisation du code ZéBuLoN  
méthode FETI développée à l'ONERA

- Découpage en sous-structures
- Equilibre sur la structure

=

Equilibre local sur chaque sous-structure

sur des tâches différentes

+

Continuité sur l'interface

grâce à des communications  
entre les différents processeurs

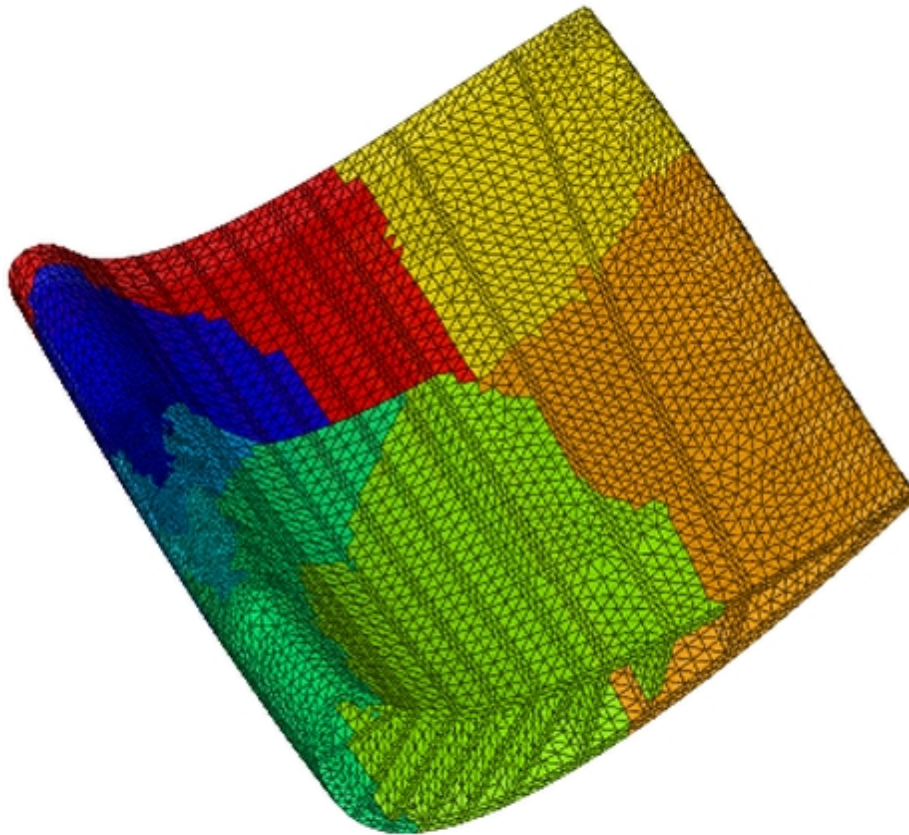
- Résultats sur la structure réelle

## Calculs réalisés

L'IBM SP2 de L'Ecole des Mines

L'ORIGIN 2000 à Cachan

Un cluster de PC au Centre des Matériaux



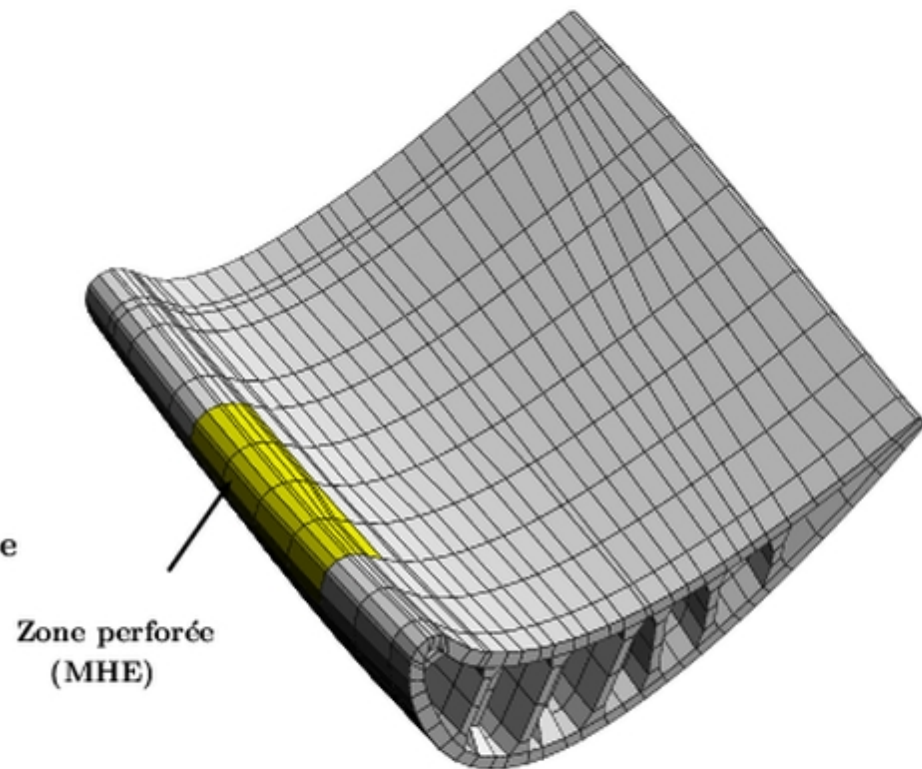
découpage en 8 sous-domaines

**Idée :** Prendre en compte l'influence de la perforation sans avoir à mailler individuellement chacun des trous

Les différentes approches possibles

- Remplacer la perforation par un coefficient de concentration de contrainte
- Méthode de sous-structuration
- Méthode d'homogénéisation

Objectif : Remplacer la zone perforée par un Milieu Homogène Equivalent ayant un comportement effectif

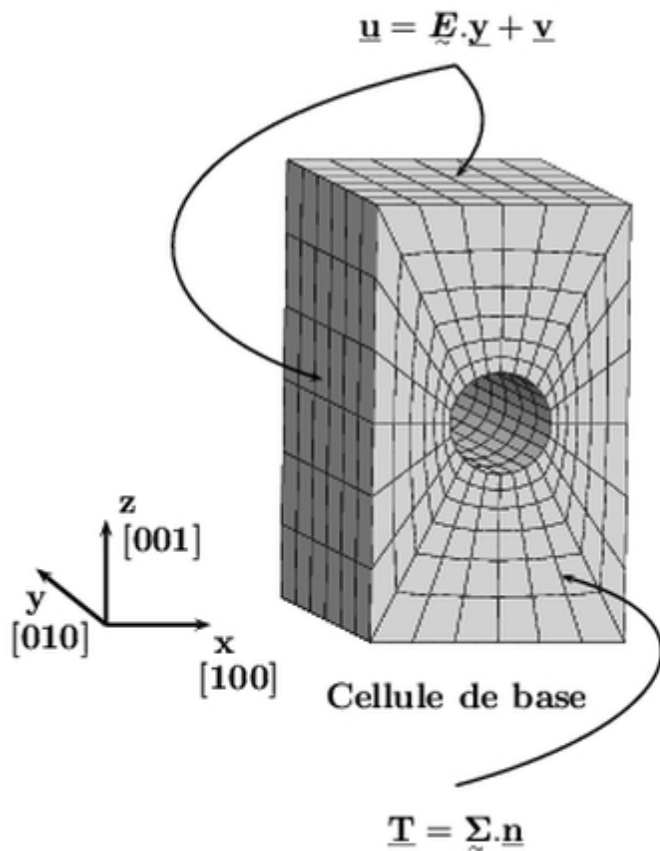


Maillage homogénéisé

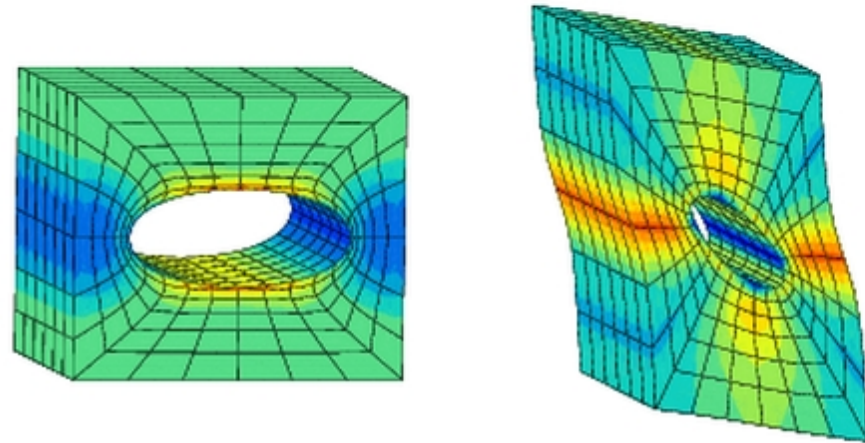
**Déterminer un milieu homogène de substitution**

Représentation du matériau hétérogène

Conditions aux limites mixtes



On simule différents chargements



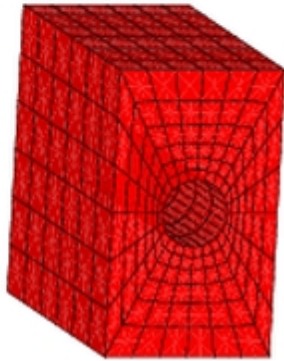
Extension

Cisaillement

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{3131} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix}$$

**Milieu homogène  
de substitution orthotrope**

Modèle de plasticité compressible du monocristal



Symétrie cubique

$$\tau^s = \underline{\sigma} : \underline{\underline{m}}^s = \frac{1}{2} \underline{\sigma} : (\underline{\underline{n}}^s \otimes \underline{\underline{m}}^s + \underline{\underline{m}}^s \otimes \underline{\underline{n}}^s)$$

$$x^s = c\alpha^s \quad r^s = R_0 + Q_1 \sum_r h_{rs} (1 - e^{-b_1 v^r}) + Q_2 (1 - e^{-b_2 v^s})$$

$$\dot{\gamma}^s = \dot{v}^s \text{sign}(\tau^s - x^s) \quad \dot{\underline{\underline{\epsilon}}}_p = \sum_s \dot{\gamma}^s \underline{\underline{m}}^s$$

$$\dot{v}^s = \left\langle \frac{|\tau^s - x^s| - r^s}{K} \right\rangle^n \text{ avec } \langle i \rangle = \text{Max}(i, 0)$$

$$\dot{\alpha}^s = \dot{\gamma}^s - d\alpha^s \dot{v}^s$$

$$\tau_{gliss}^s = \underline{\sigma} : (\underline{\underline{n}}^s \otimes \underline{\underline{m}}^s)$$

$$\dot{\gamma}^s = \left\langle \frac{|\tau_{gliss}^s - x_{gliss}^s| - r_{gliss}^s}{K_{gliss}} \right\rangle^{n_{gliss}} \text{sign}(\tau_{gliss}^s - x_{gliss}^s)$$

$$\sigma_{dil}^n = \underline{\sigma} : (\underline{\underline{n}}^s \otimes \underline{\underline{n}}^s)$$

$$\dot{\delta}^s = \left\langle \frac{|\sigma_{dil}^n - x_{dil}^s| - r_{dil}^s}{K_{dil}} \right\rangle^{n_{dil}} \text{sign}(\sigma_{dil}^n - x_{dil}^s)$$

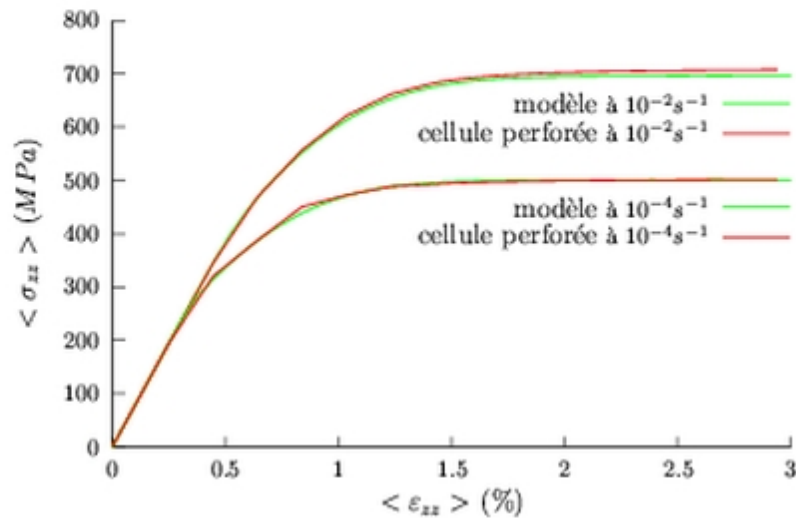
$$\dot{\underline{\underline{\epsilon}}}_p = \sum_s \dot{\gamma}^s \underline{\underline{m}}^s + \sum_s \dot{\delta}^s \underline{\underline{n}}^s$$



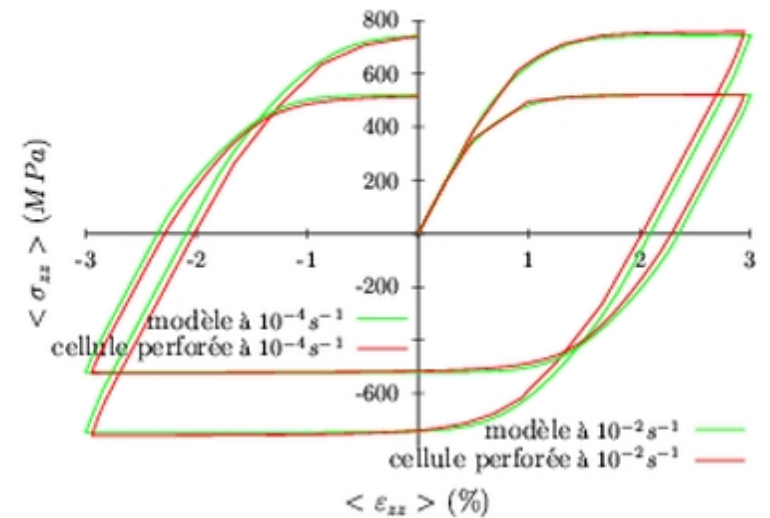
Pseudo-systèmes de dilatation suivant [100] et [001]

Symétrie orthotrope

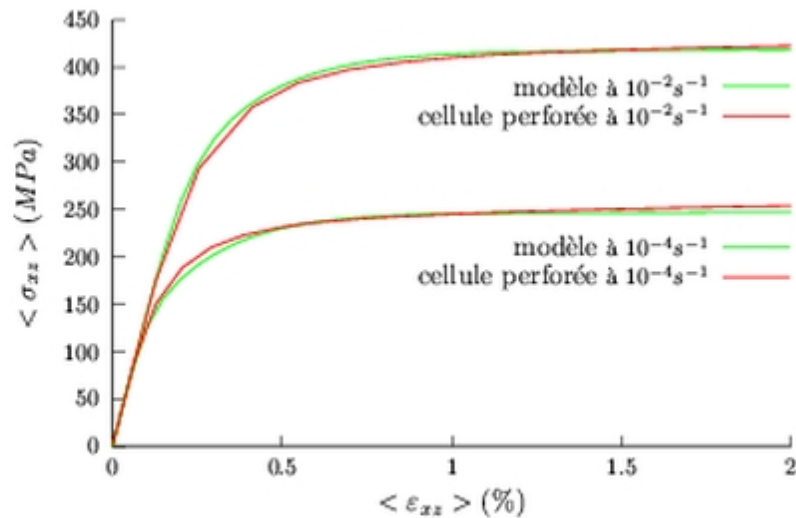




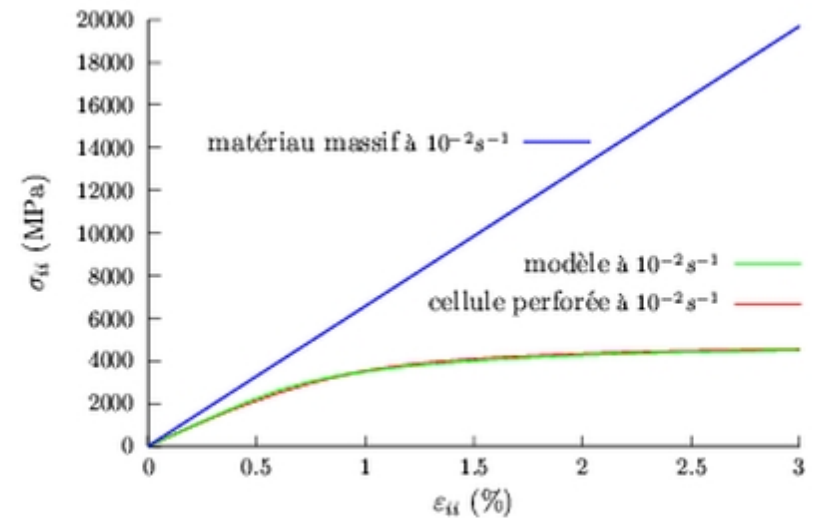
Essai de traction



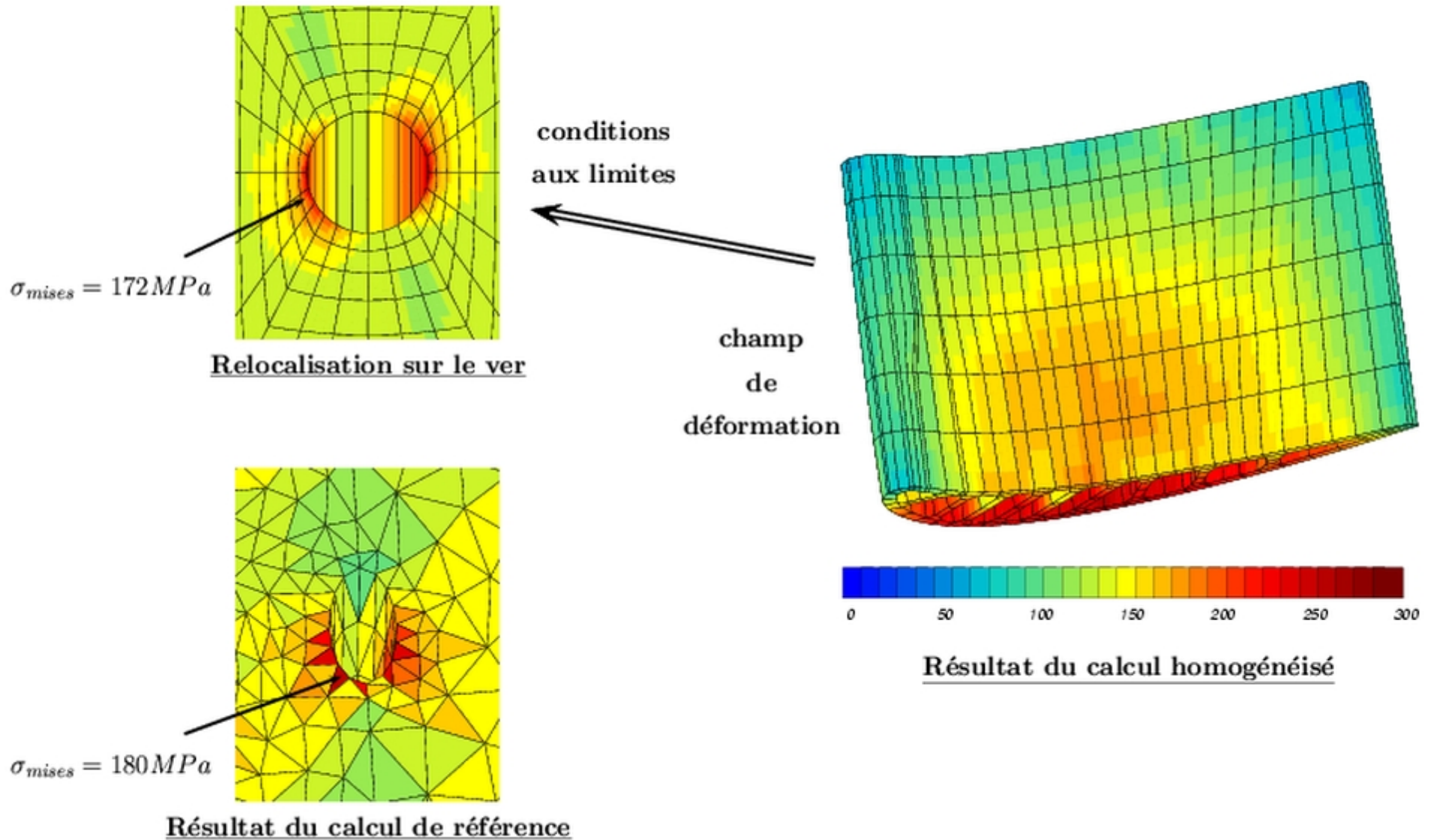
Essai de cyclique



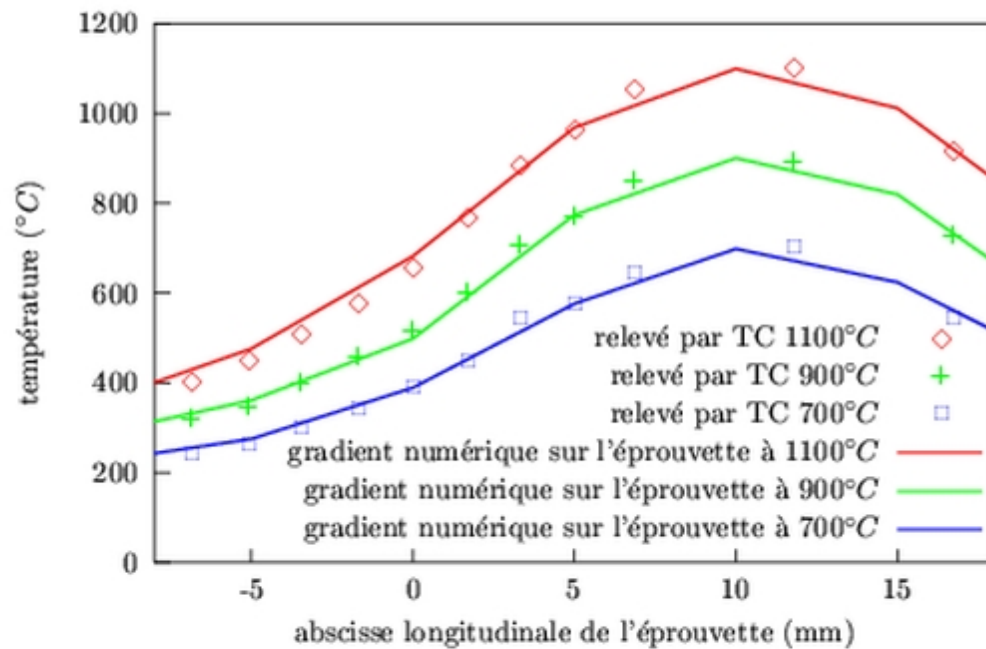
Essai de cisaillement



Essai de dilatation hydrostatique

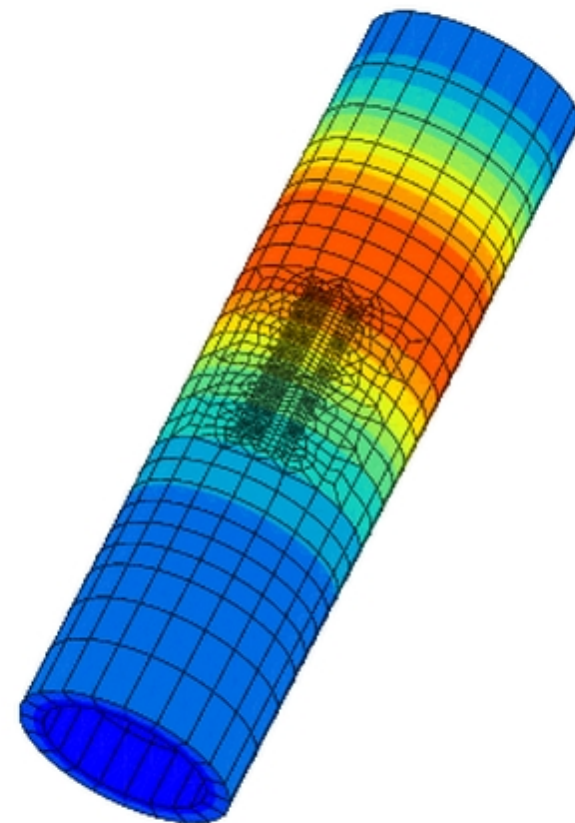


Représentation du gradient longitudinal  
déterminé numériquement par  
les thermiciens de Snecma



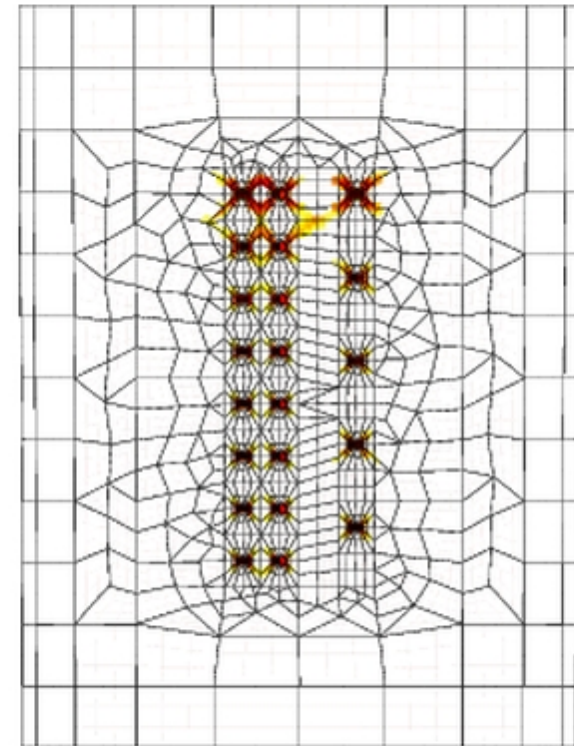
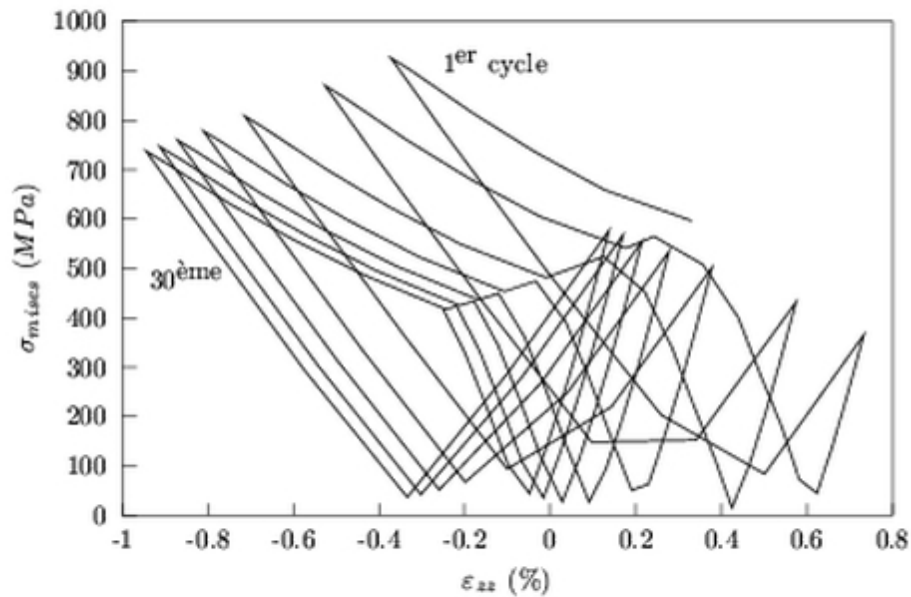
Détermination du champ thermique par TC

Eprouvette de calcul EF



Gradient de paroi de 250°C à 1100°C  
et de 200°C à 700°C

Nous simulons 30 cycles afin d'obtenir un cycle thermomécanique stabilisé



- sous-estime la durée de vie à froid :  
amorçage et propagation de fissure
- estimation correcte à chaud



Isovaleur de durée de vie  
(en nombre de cycles)

Essai	motif	Type cycle	Contrainte (en MPa)	Cycles à amorçage	Cycles à rupture	Type de rupture
	21 trous	Eprouvette d'étalonnage				
Essai 1	21 trous	Isotherme	$\pm 200$	342	412	Zone chaude
Essai 2	21 trous	Type 1	$\pm 200$		2250	Zone chaude
Essai 3	21 trous	Type 2	+550 / - 150	760	855	Trous du haut
Essai 4	21 trous	Type 3	$\pm 400$	804	1476	Trous du haut
	11 trous	Eprouvette d'étalonnage				
Essai 5	11 trous	Type 4	$\pm 400$	1067	1248	Trous du haut
	11 trous	Problème machine				
Essai 6	11 trous	Type 4	$\pm 300$	Tête dessoudée à 2031 cycles		
Essai 7	11 trous	Type 3	$\pm 300$	4155	4685	Trous du haut
Essai 8	11 trous	Type 3	$\pm 350$	1065	2433	Trous du haut

- Le nombre de cycles à amorçage définit la durée de vie pour former une fissure macroscopique dans la pièce (1 à 2 mm)
- La durée de vie à rupture correspond à la rupture complète de la pièce



# Propagation de fissure de fatigue dans un monocristal

feu d'artifices en pointe de fissure...

# Projet Futur

## Calculs de microstructures

Endommagement/rupture/durée de vie

## Couplages multiphysiques

renforcement des moyens de  
calculs

**128 processeurs**

renforcement de l'équipe

imagerie et analyse d'images

3D

méthodes de mesures de

champs ( $U, T$ )

# Confrontation Calculs EF / Méthodes de mesures de champs

