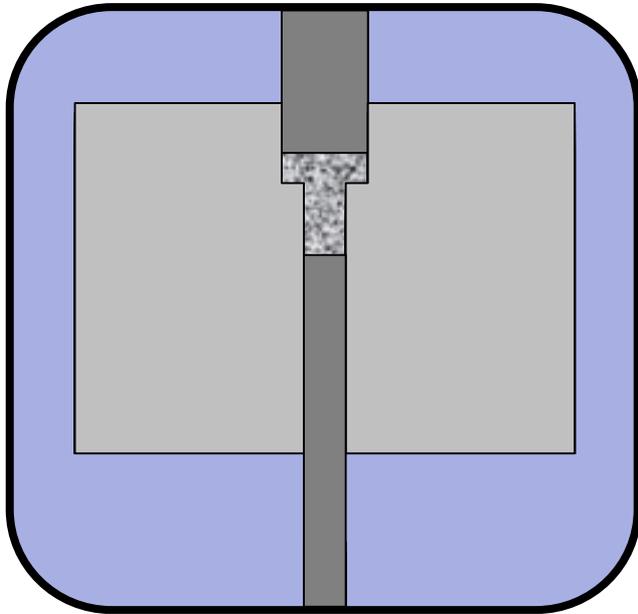


# **Modélisation en Métallurgie des Poudres sur Castem**

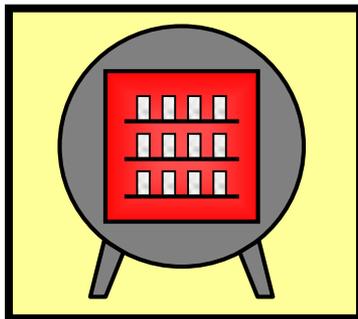
**Christophe Dellis, Olivier Gillia**

- ❖ **Rappel sur la MdP**
- ❖ **Principe & Objectif de la simulation**
- ❖ **Modèles et implantation**
- ❖ **Exemples**
- ❖ **Interfaces métiers**

- **Métallurgie des Poudres conventionnelle**
- **Compression Isostatique à Chaud (CIC)**
- **Moulage par injection**
- **Spark Plasma Sintering**



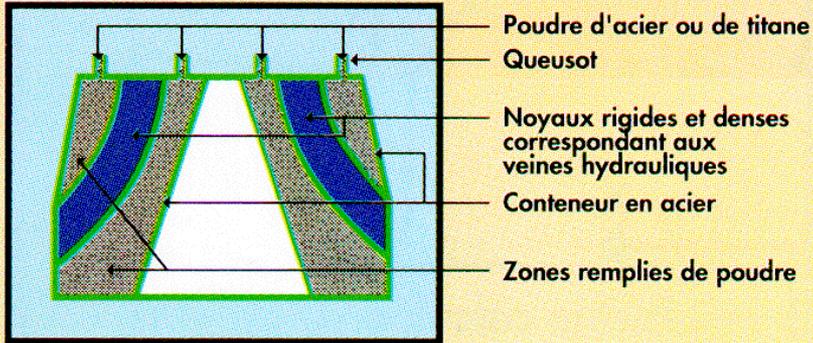
compression à froid



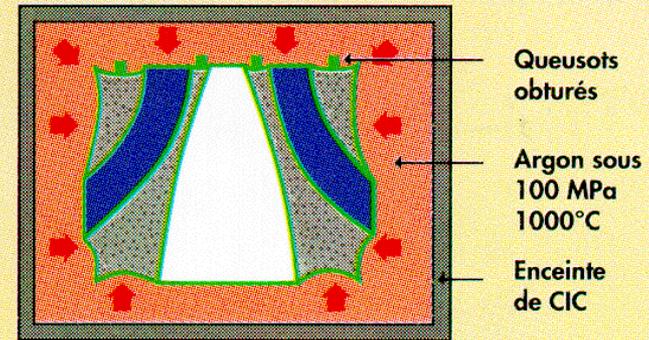
frittage



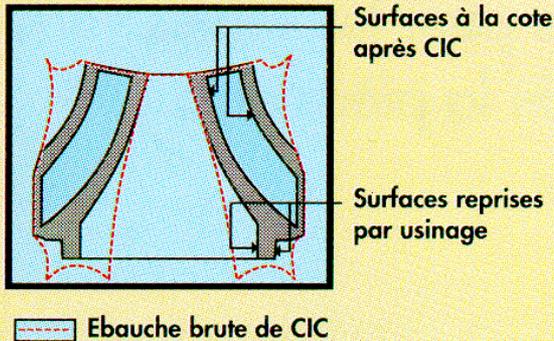
## 1- Remplissage et obturation des queusots

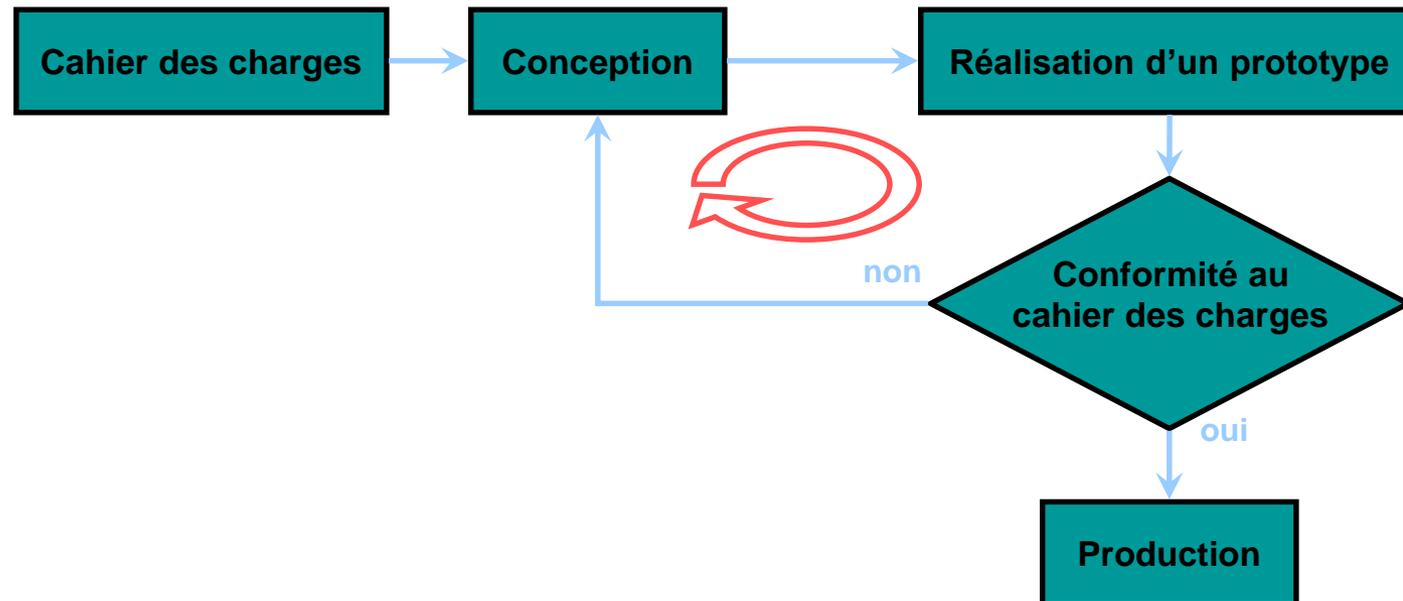


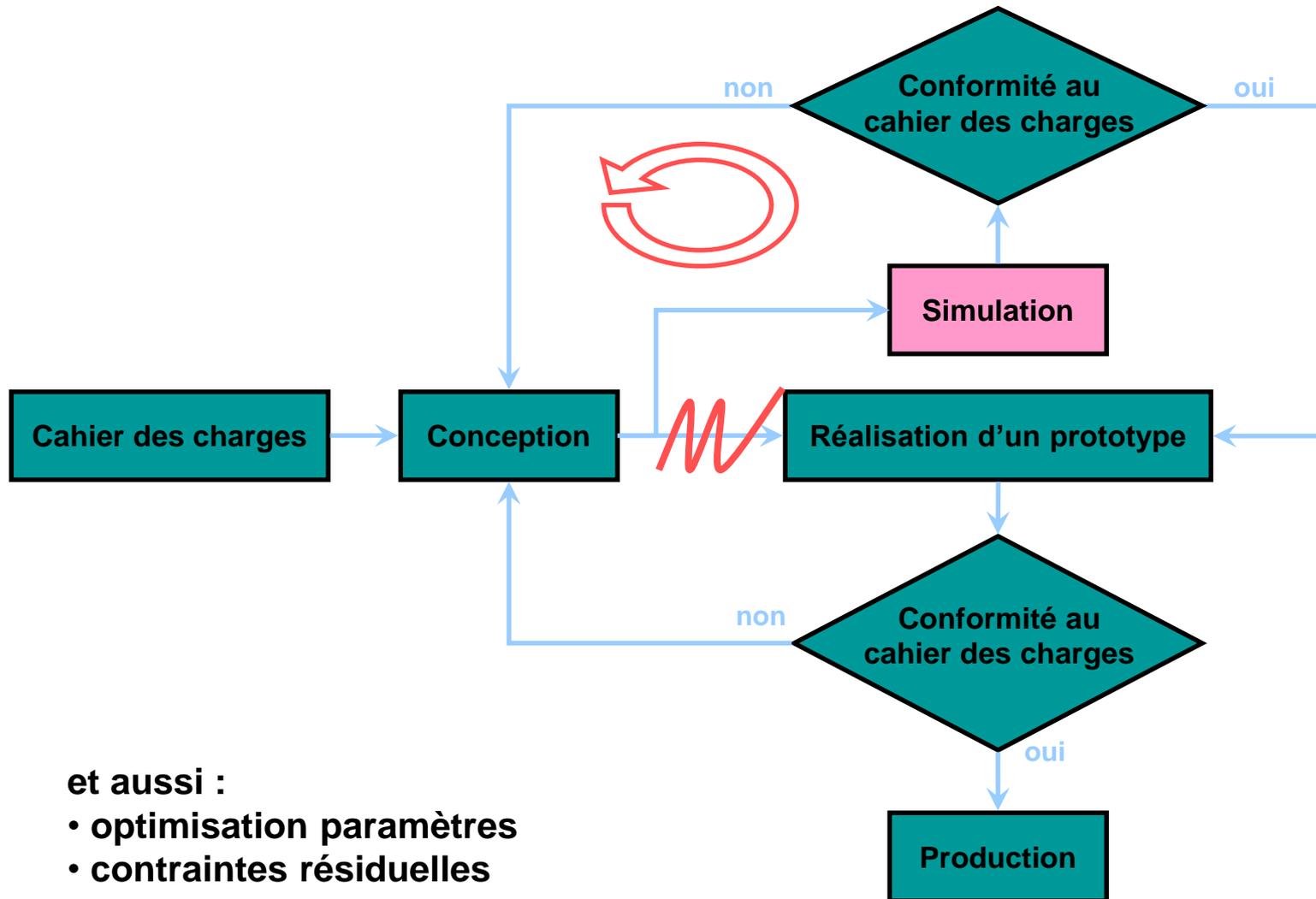
## 2- Compression Isostatique à Chaud

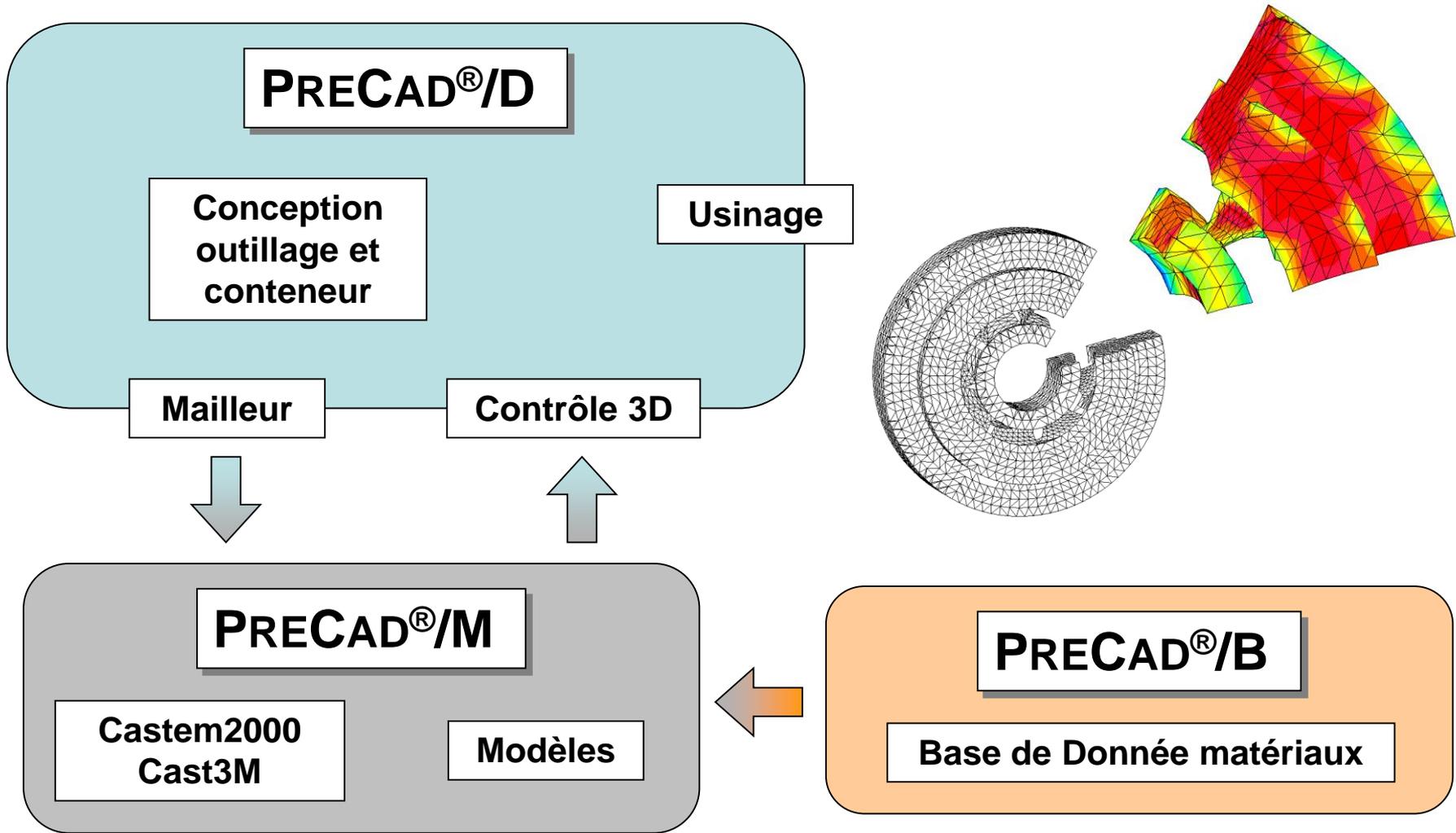


## 3- Dégainage, usinage, extraction des noyaux ou dissolution chimique









## notations

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}] \cdot \underline{\underline{I}}$$

$$I_1 = \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}]$$

$$J_2^2 = \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}'^2]$$

$$E_1 = \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}]$$

$$\bar{E}_2^2 = \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} \cdot \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}]$$

## Matériau standard généralisé

Le potentiel viscoplastique dépend de la contrainte visqueuse  $\Omega(\sigma_{\text{vp}})$

Loi d'Abouaf classique :  $\sigma_{\text{vp}} = \sigma_{\text{eq}}(\underline{\underline{\sigma}}, \rho)$

$$\text{avec } \sigma_{\text{eq}}(\underline{\underline{\sigma}}, \rho) = \sqrt{f(\rho) \cdot I_1^2 + \frac{3}{2} c(\rho) \cdot J_2^2}$$

$c(\rho) \rightarrow 1$  quand  $\rho \rightarrow 0$   
 $f(\rho) \rightarrow 0$   
 (on tend vers  
 Von Mises standard)

Matériau standard généralisé avec potentiel type Norton

$$\Omega(\sigma_{\text{vp}}) = \frac{A(T)}{n(T)+1} \langle \sigma_{\text{vp}}(\rho) \rangle^{n(T)+1}$$

Découplage des  
 dépendances en T et  $\rho$



# Loi de comportement en CIC

## notations

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}] \cdot \underline{\underline{I}}$$

$$I_1 = \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}] \quad E_1 = \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}]$$

$$J_2^2 = \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}'^2] \quad \bar{E}_2^2 = \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} \cdot \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}]$$

Loi d'Abouaf étendue (avec écrouissage)

$$\sigma_{\text{vp}} = \sigma_{\text{eq}}(\underline{\underline{\sigma}}, \rho) - R(p) \rightarrow \Omega(\langle \sigma_{\text{vp}} \rangle)$$

Dérivation des lois de comportement (évolution des variables observables)

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} = \frac{\partial \Omega}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \rightarrow \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} = \left\langle \frac{\sigma_{\text{eq}} - R}{K_0} \right\rangle^n \cdot \frac{f \cdot I_1 \cdot \underline{\underline{I}} + \frac{2}{3} c \cdot \underline{\underline{\sigma}}'}{\sigma_{\text{eq}}}$$

$$\dot{p} = -\frac{\partial \Omega}{\partial R} \rightarrow \dot{p} = \left\langle \frac{\sigma_{\text{eq}} - R}{K_0} \right\rangle^n \rightarrow \dot{p} = D_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{E_1^2}{9f} + \frac{2}{3} \frac{\bar{E}_2^2}{c}}$$

$$\phi = \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} = \sigma_{\text{eq}} \cdot D_{\text{eq}}$$

## notations

$$\underline{\underline{\sigma}}' = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}] \cdot \underline{\underline{I}}$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}] & E_1 &= \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}] \\ J_2^2 &= \text{tr}[\underline{\underline{\sigma}}'^2] & \bar{E}_2^2 &= \text{tr}[\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} \cdot \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}}] \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{\text{vp}} = \left\langle \frac{\sigma_{\text{eq}} - R}{K_0} \right\rangle^n \cdot \frac{f \cdot I_1 \cdot \underline{\underline{I}} + \frac{2}{3} c \cdot \underline{\underline{\sigma}}'}{\sigma_{\text{eq}}}$$

$$R(p, T) = R_{\text{MAX}} - (R_{\text{MAX}} - K) e^{-BR \cdot p}$$

- Paramètres :**
- RMAX(T), K(T), BR(T), n(T), K<sub>0</sub>(T)
  - f(ρ), c(ρ)
  - E(ρ, T), ν(ρ, T) *remarque* : la variation de ν avec ρ n'a jamais été prise en compte
  - λ(ρ, T), C<sub>p</sub>(T) *remarque* : dans l'équation de la chaleur : d(ρ, T) · C<sub>p</sub>(T) = d<sub>th</sub>(T) · ρ · C<sub>p</sub>(T)

➔ **donnés par valeurs discrètes en T (interpolation linéaire dans Precad)**  
**donnés par équations en ρ (pour E) ou par valeurs discrètes en ρ (f, c, λ)**

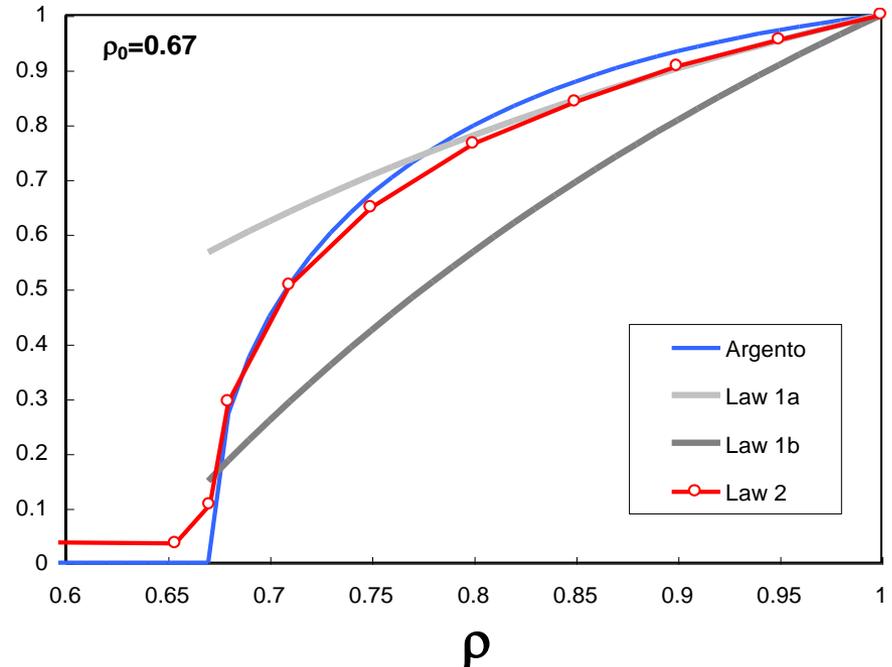
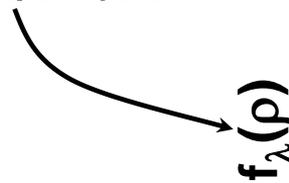
## Fortement non-linéaire (géométrique et matériau)

### Couplages

1/ mécanique, ex :  $E(\rho, T) = E_T(T) \cdot f_E(\rho)$  avec  $f_E(\rho) = A + B\rho^C$

2/ thermique-mécanique

conductivité  $\lambda = \text{fct}(\rho, T) = f_\lambda(\rho) \cdot E_T(T)$

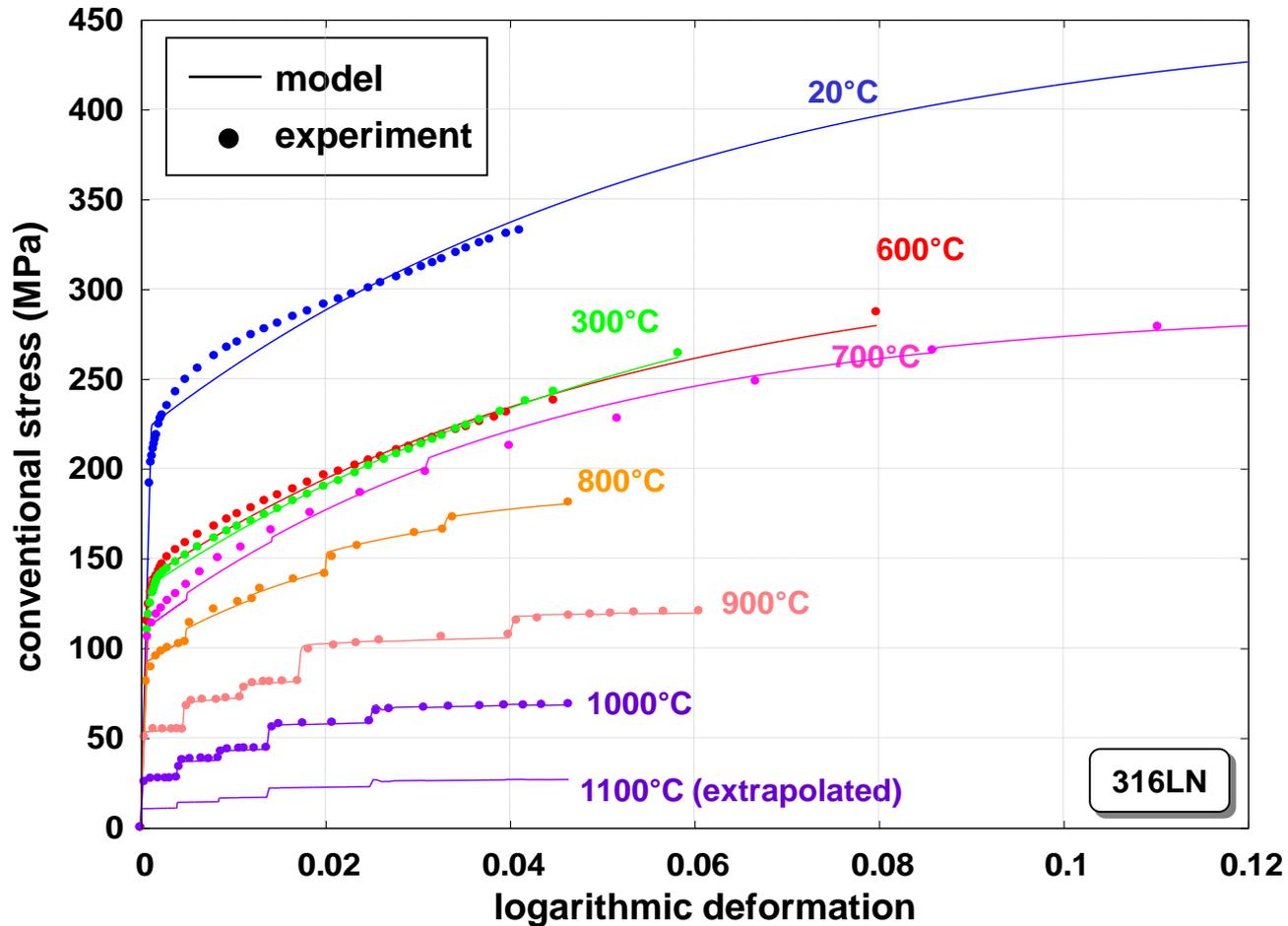


### Lois utilisées

lois poudres : POUDRE\_A, POUDRE\_B

lois outillages : NOUILLAS\_A et NOUILLAS\_B

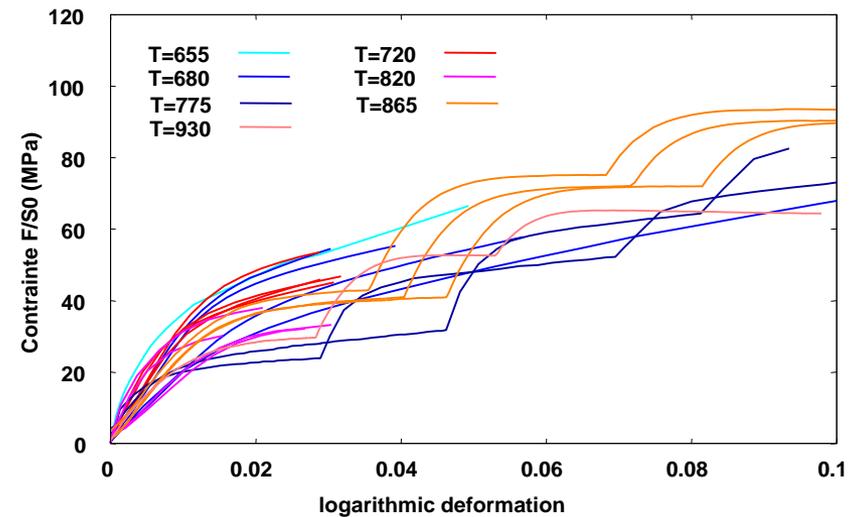
## Adjustment of $A(T)$ , $n(T)$ , $K(T)$ , $R_{MAX}(T)$ , $BR(T)$



## CIC interrompues



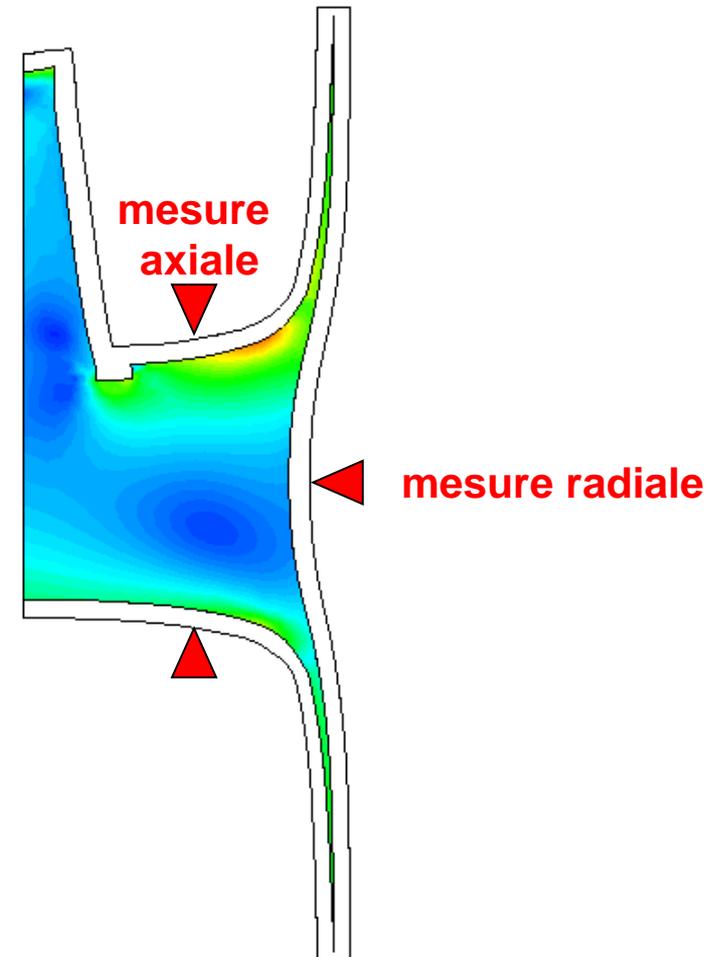
## Essais de compression simple sur les poreux



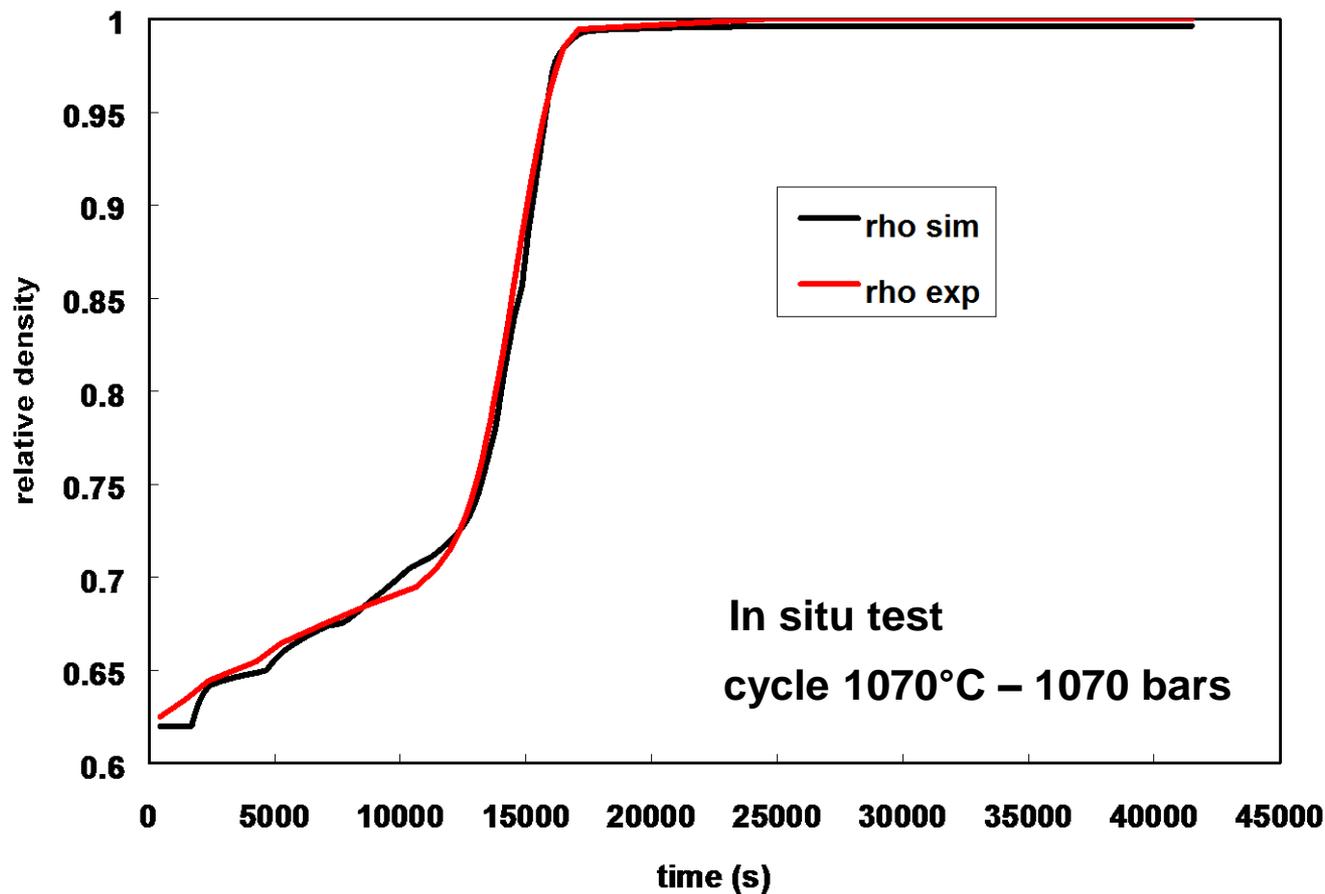
Essais réalisés à l'université de Villetaneuse  
[J.P. Fondère, H.F. Raynaud, A. Vignes,  
C. Rizkallah]

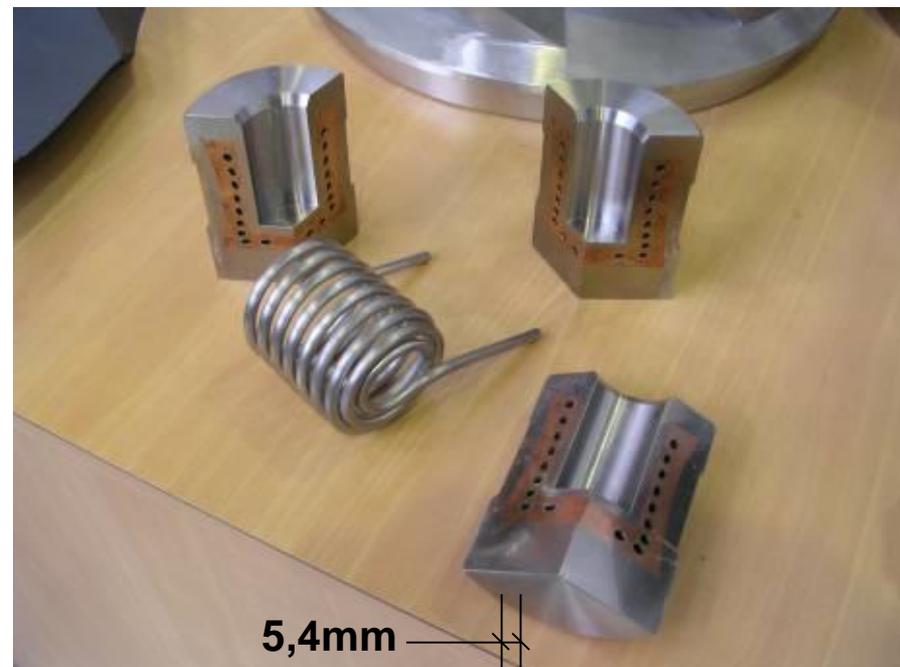
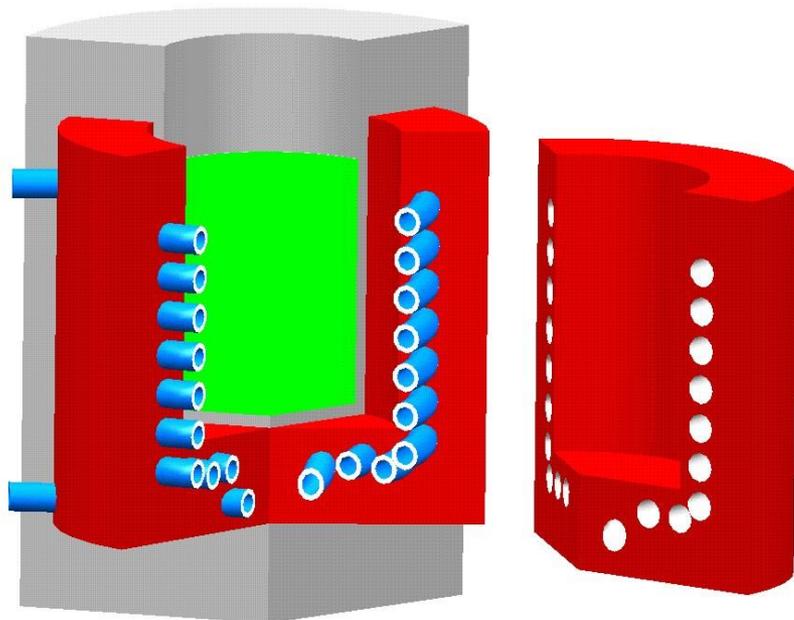


➔ **Identification inverse**

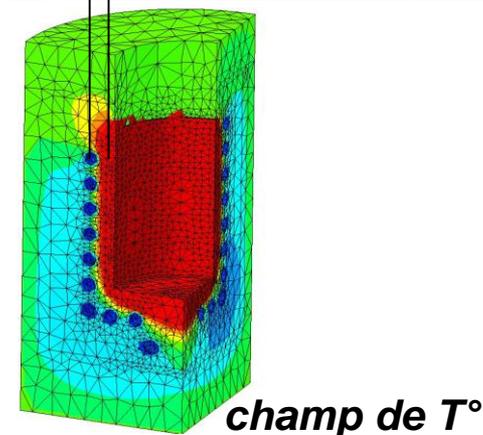


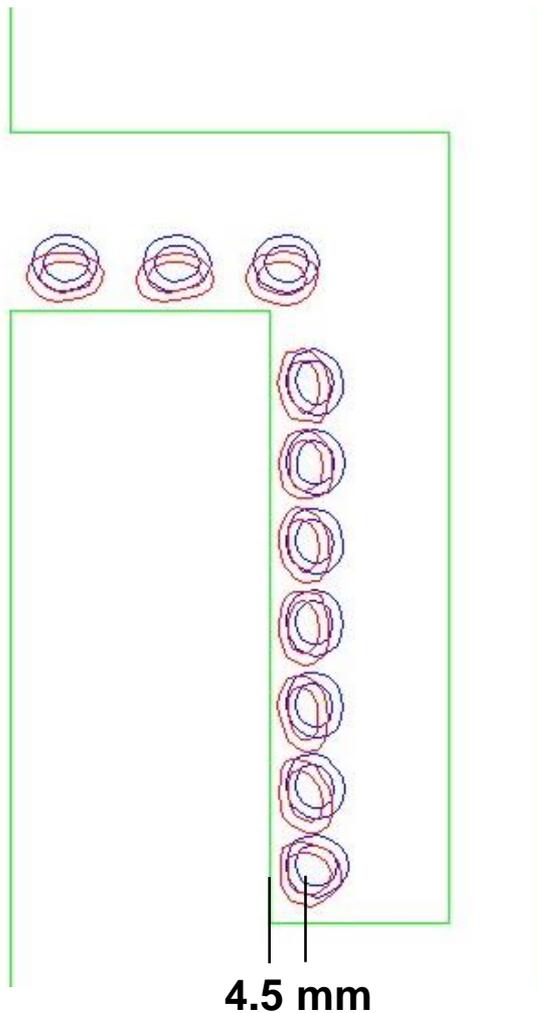
$$\left( \text{tracé} : \int_t \bar{E}_2 = \int_t \sqrt{\underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{\text{VP}} : \underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{\text{VP}}} dt \right)$$



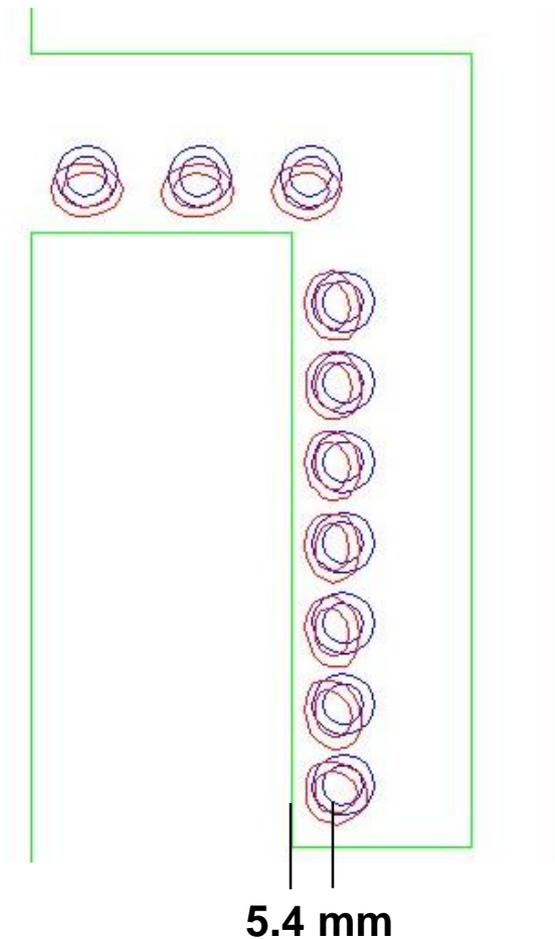


Une étude thermique a montré que le centre des tubes devait se situer à 5,4 mm de la paroi chaude





1ère itération



2ème itération



# Exemple : rouet de pompe moteur fusée

O. Gillia, L. Federzoni, P. Revirand,

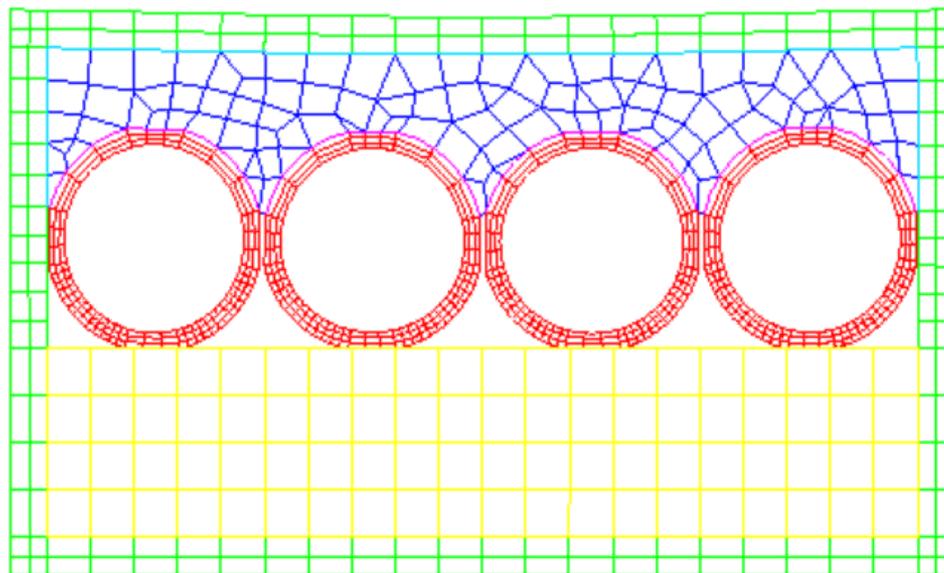
## Pièce ISOPREC

### Partenaires :

**Snecma, SEP, Turbomeca**

**CEA**

**Aubert & Duval**

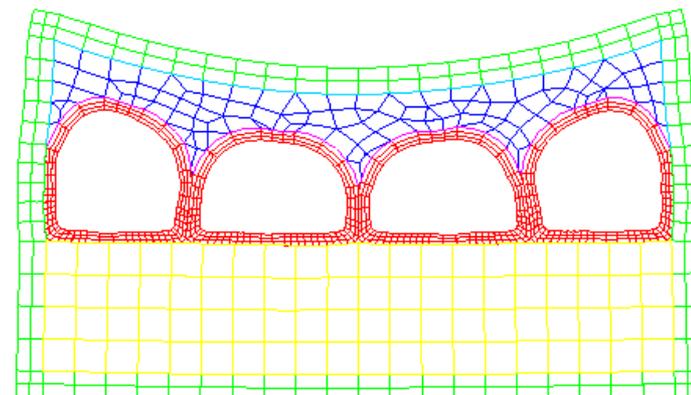
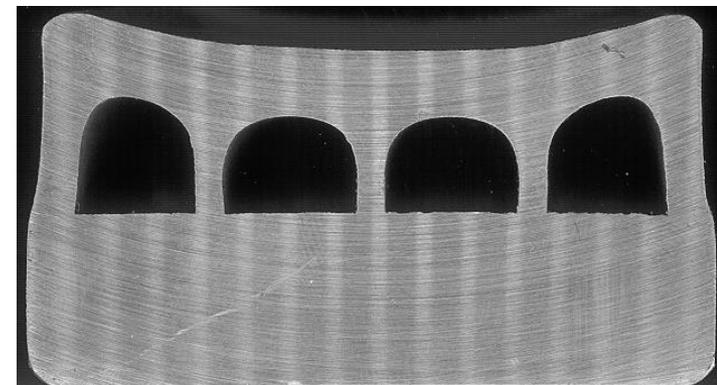


Deformée Ind=1 t= 7.10000E+01 P= 0.77130E+01

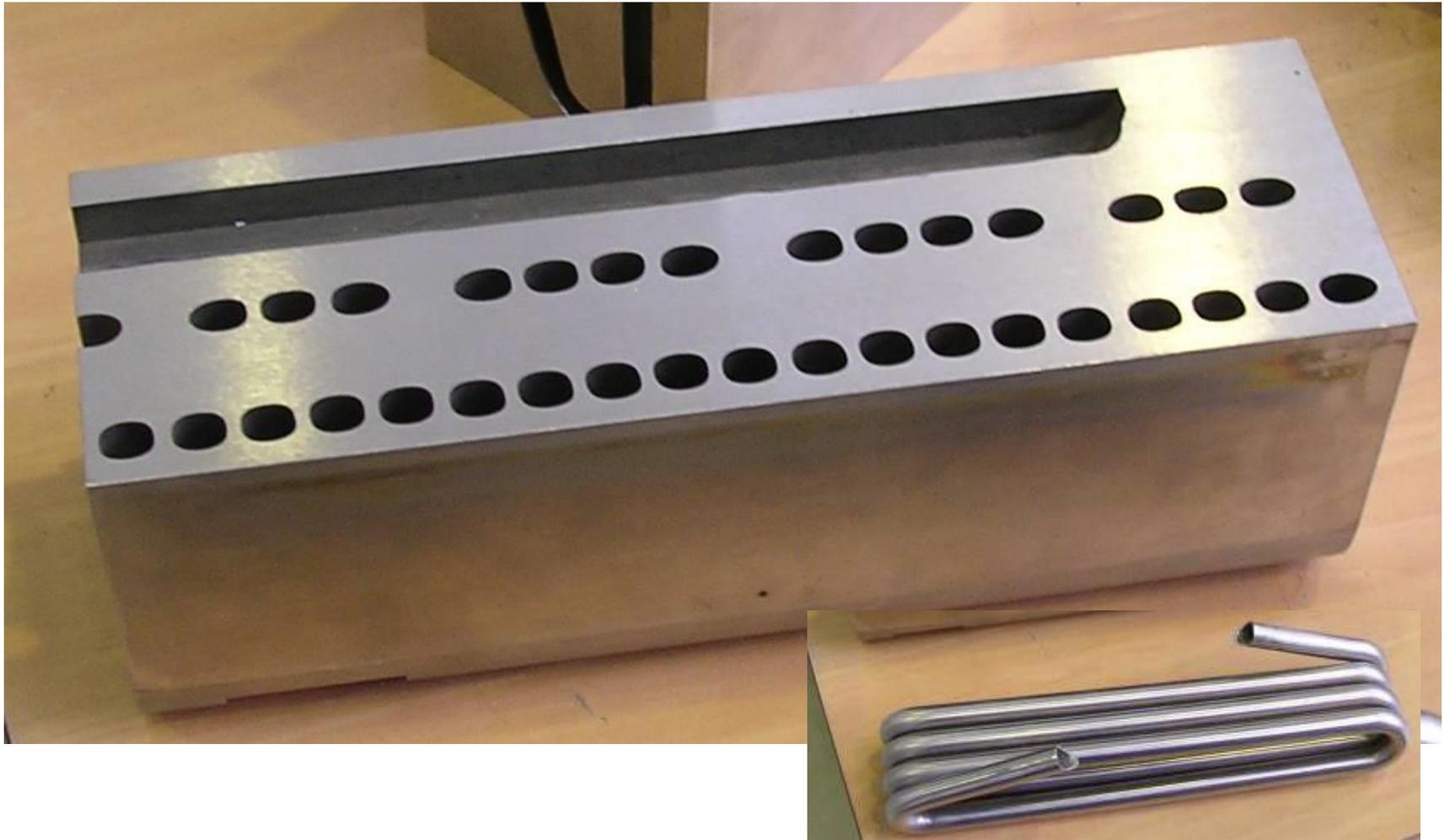
← 80 mm →

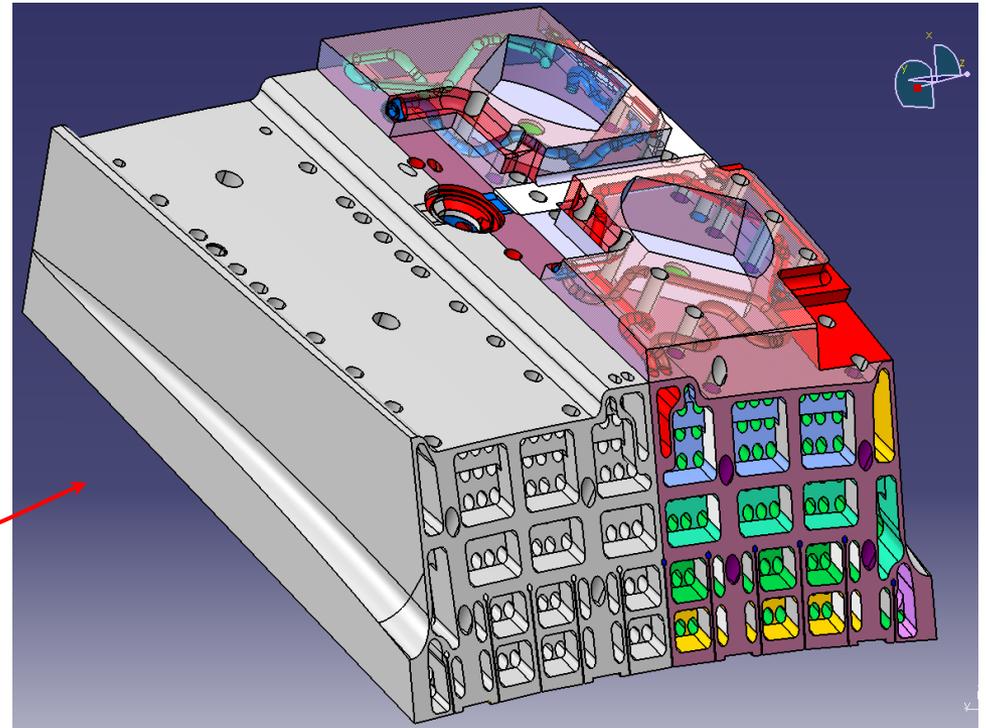
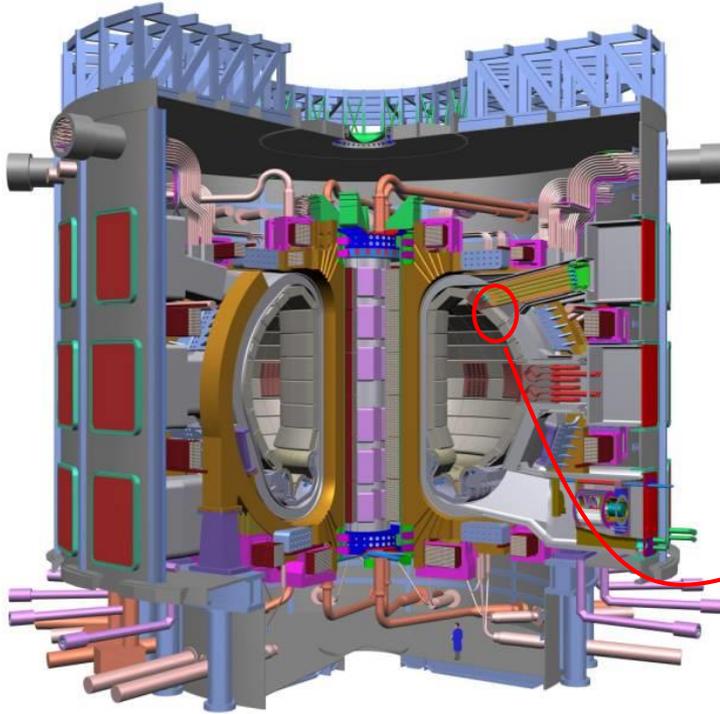
AMPLITUDE

L.0



Deformée Ind=11 t= 0.00000E+01 P= 7.02963E+01



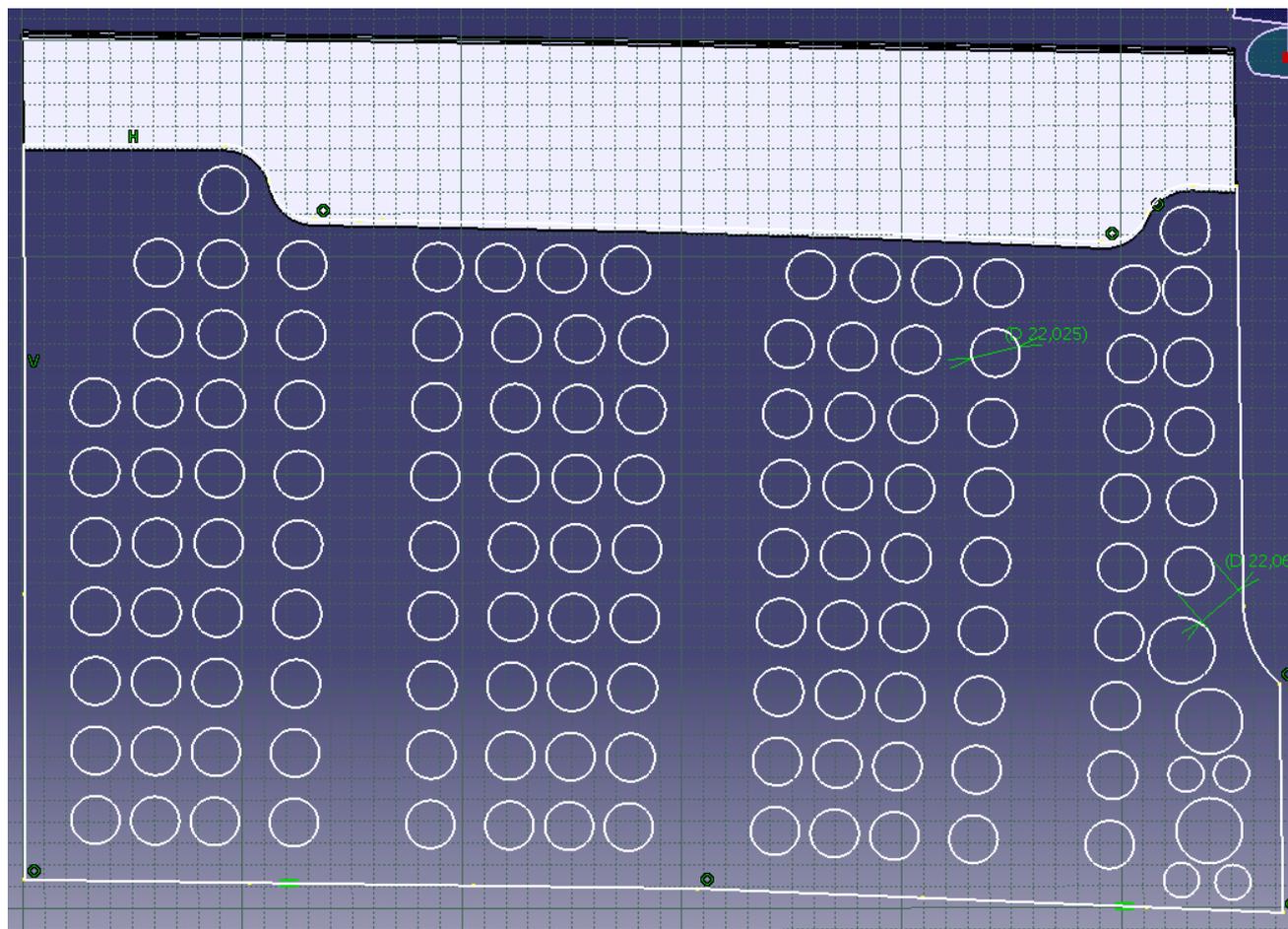


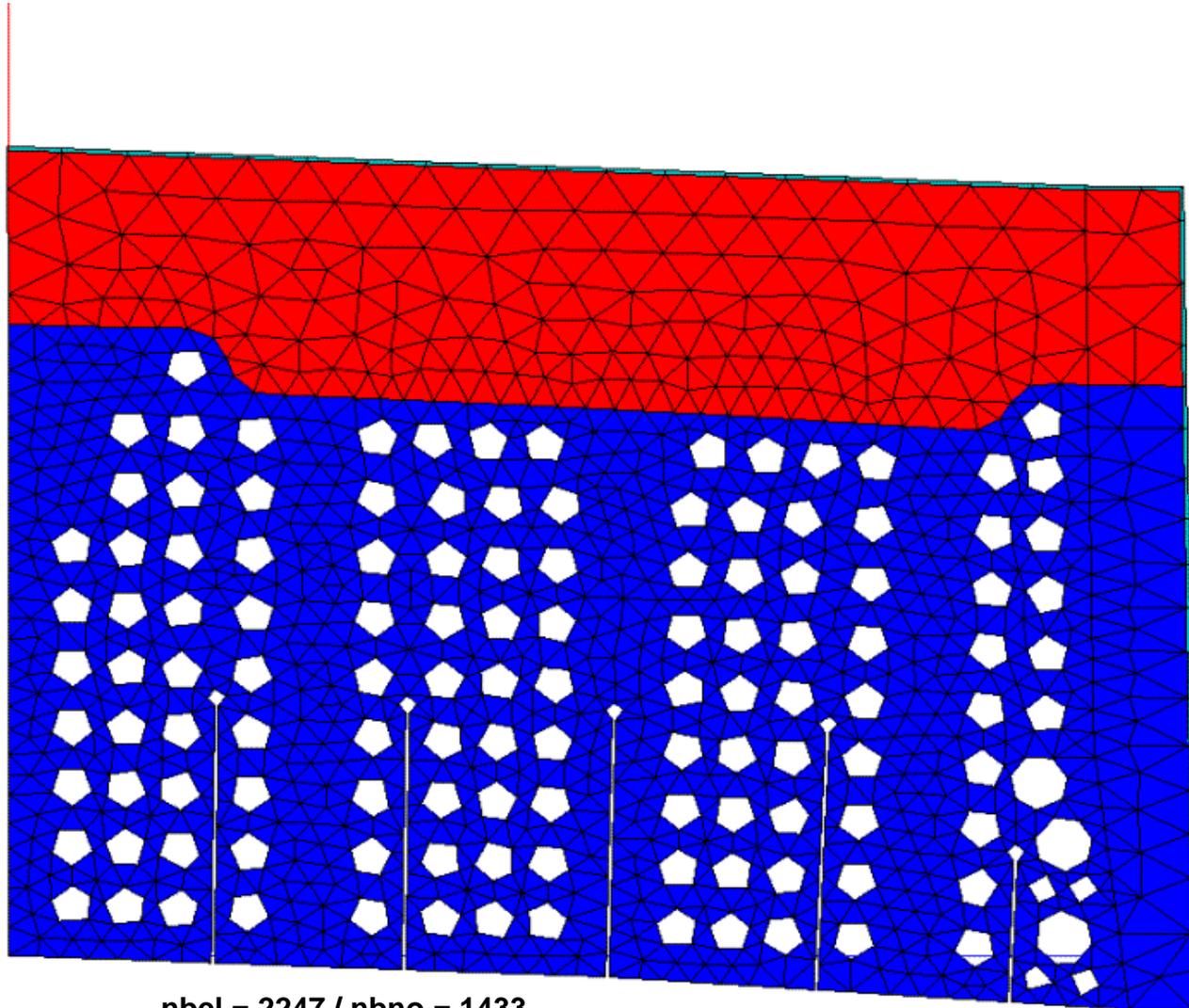
**4.5 tonnes en 316LN**

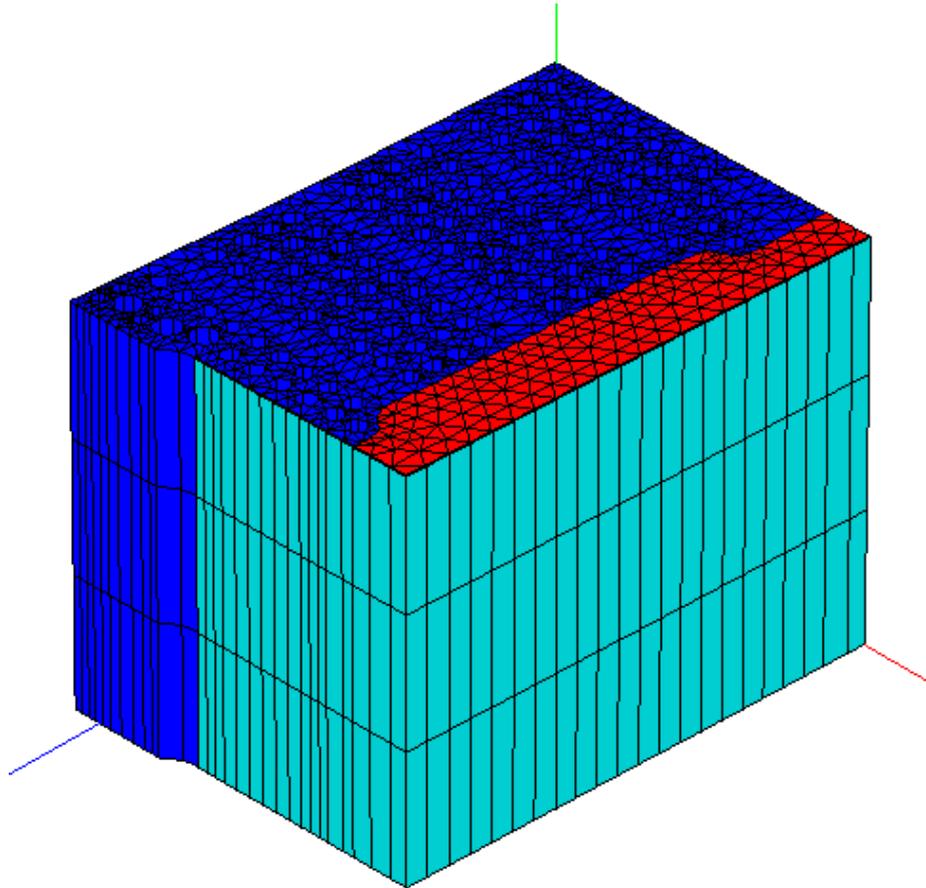
**1.20 m x 1.20 m x 0.80 m**

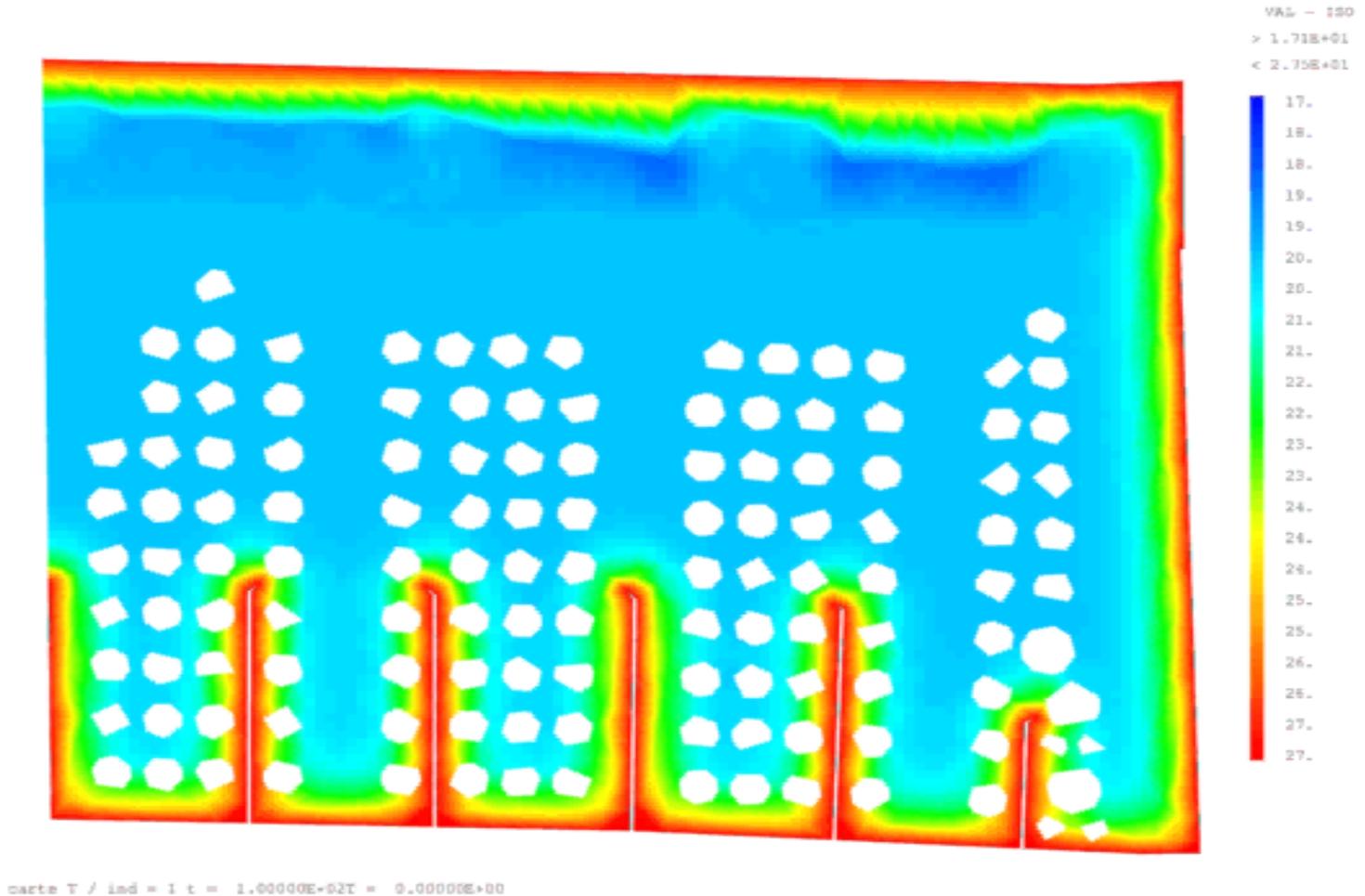
une tranche au milieu du shield

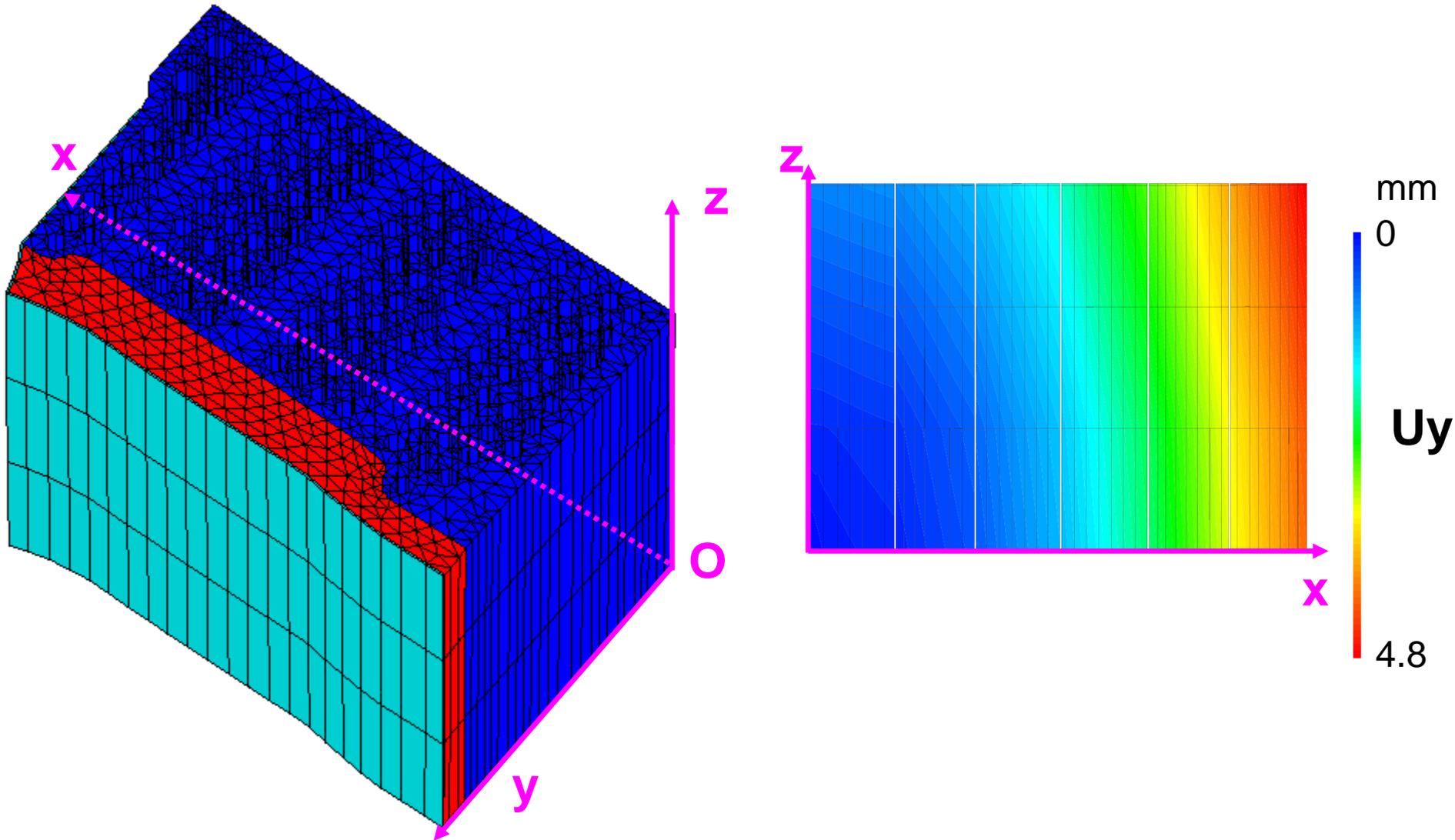
Modèle  
CATIA



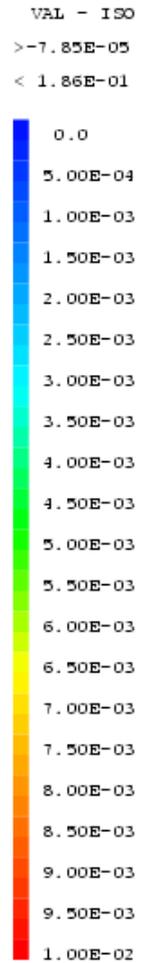
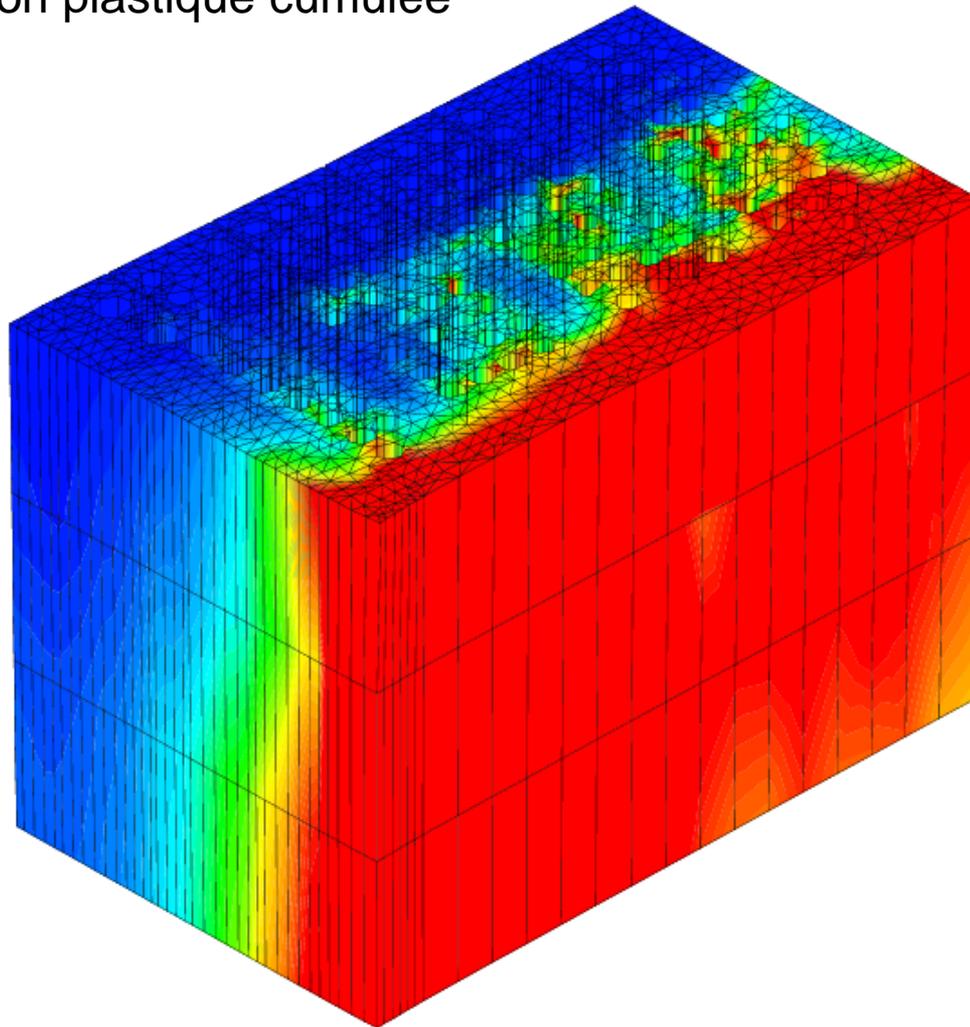


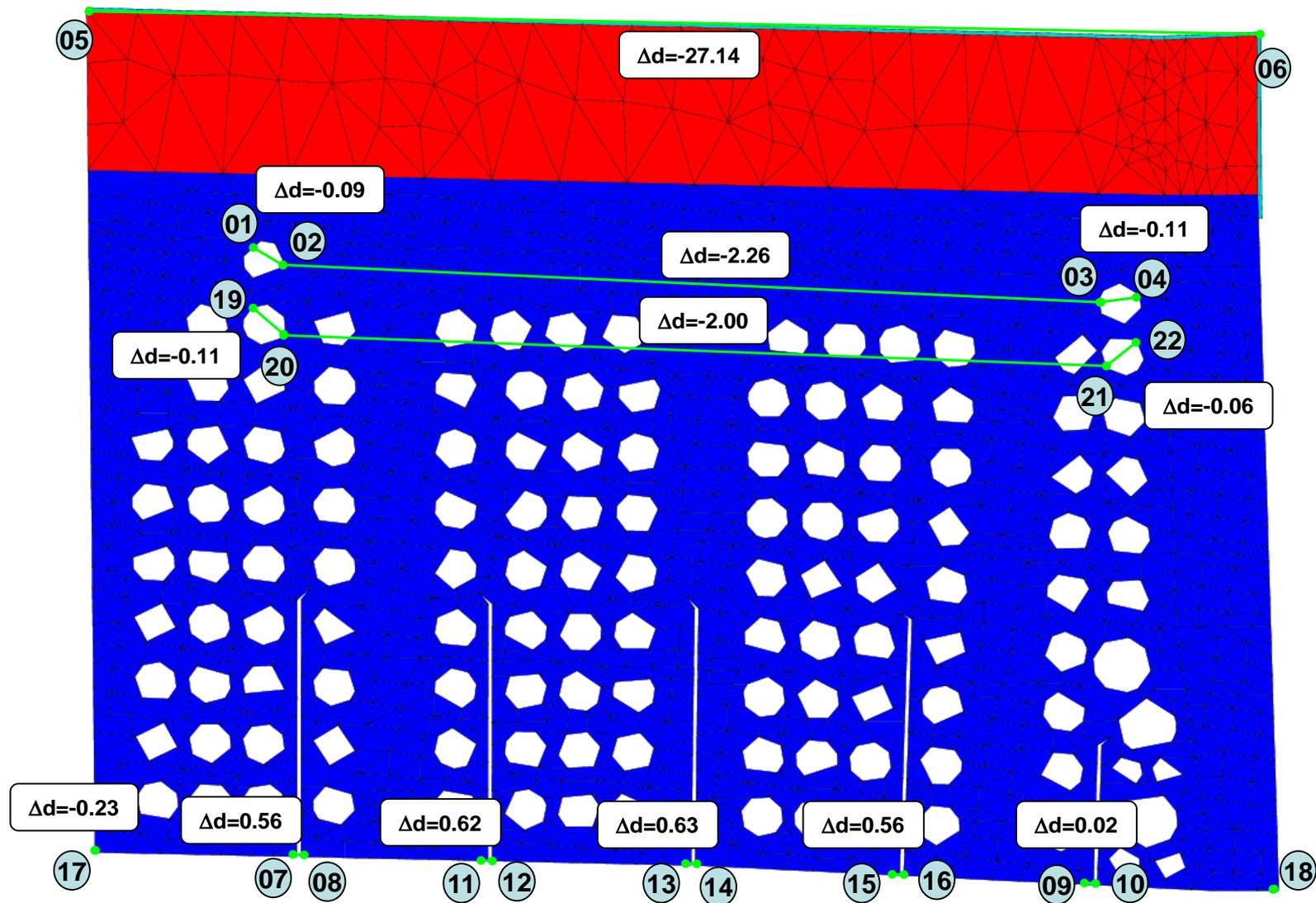


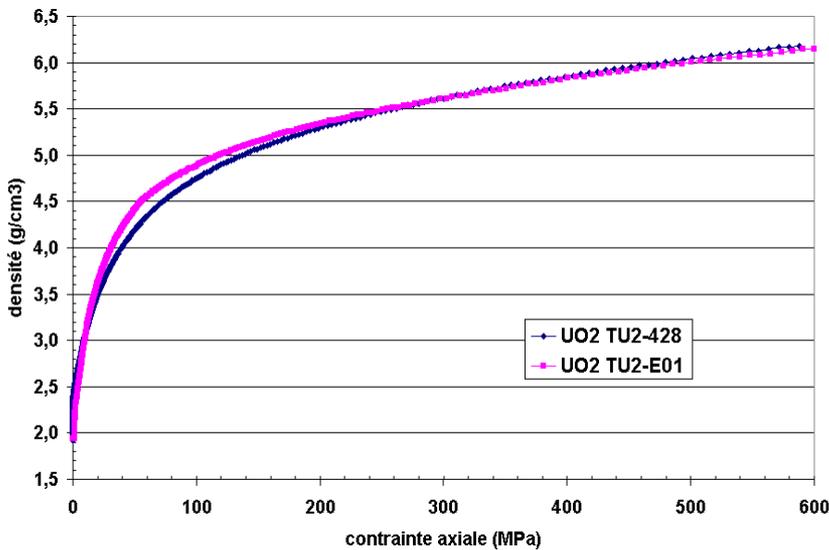




déformation plastique cumulée





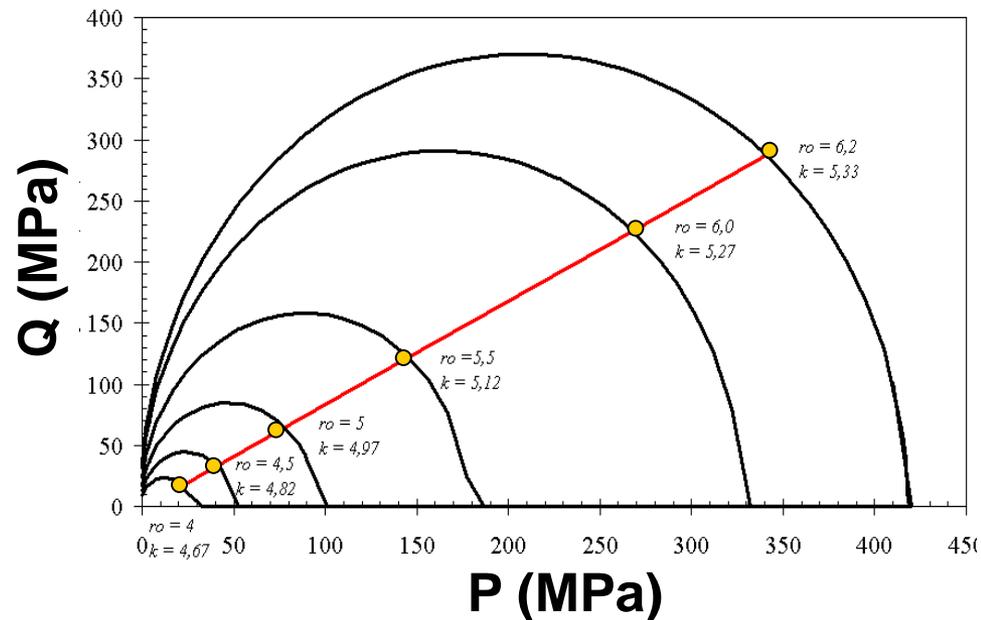


**Caractérisation poudre UO<sub>2</sub>-TU<sub>2</sub> lot 428**  
**Courbe de compressibilité à 600 MPa**  
**essais en matrice instrumentée**

*Identification paramètres*  
*modèle CAM-CLAY*

**Potentiel de la loi de Cam-Clay**

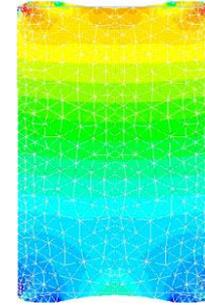
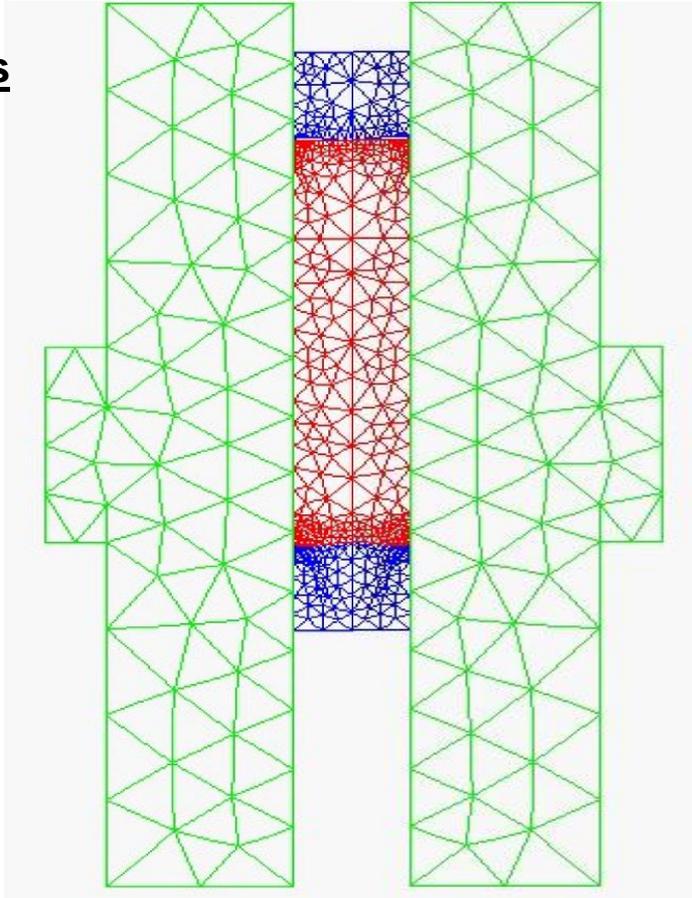
$$f(P, Q) = Q^2 + M^2 (P - P_0)(P - P_1) = 0$$



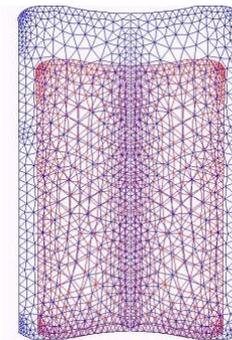
Application à simulation de la fabrication MOX

Représentation géométrique du problème

avec contacts

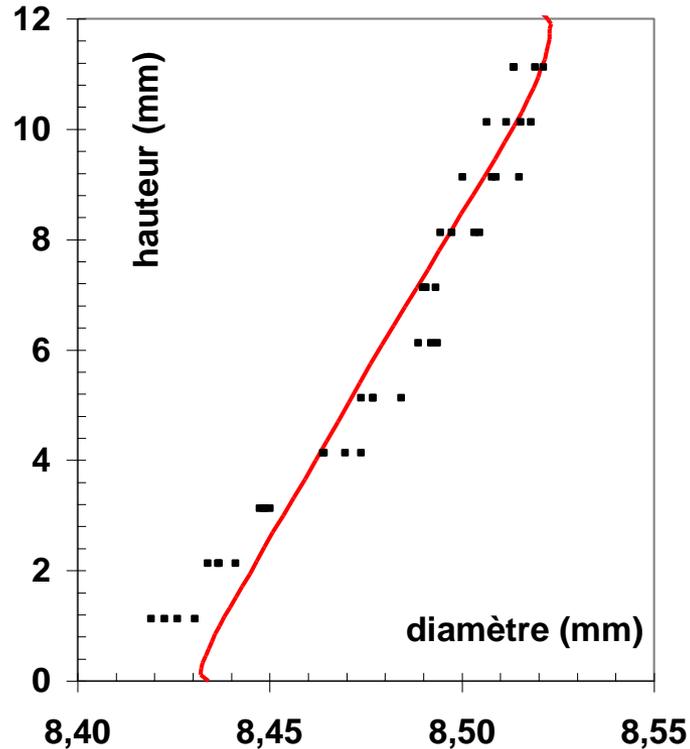


Minimiser et contrôler les  
Gradients  
de densité



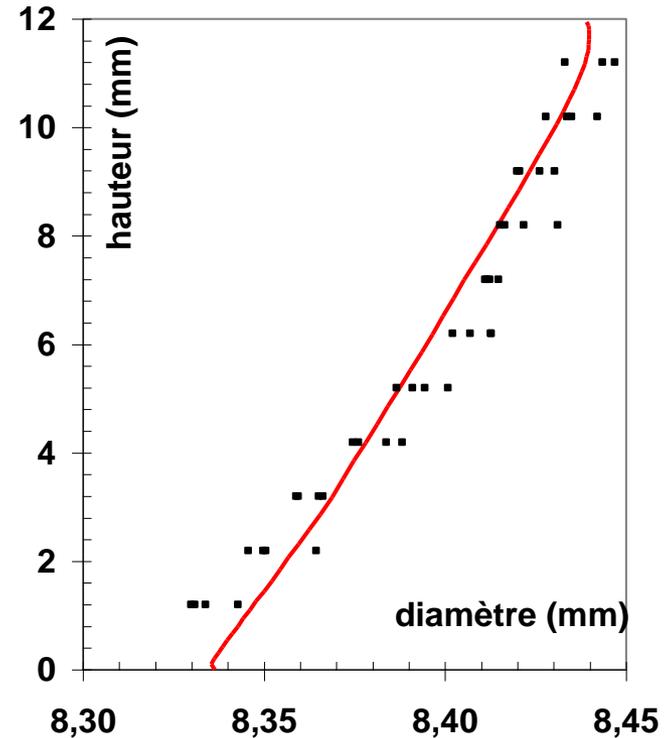
Maîtriser les  
Écart de  
forme  
après frittage

## PROFILS APRES FRITTAGE



— Calcul PreCAD MOX  
 • mesures LEFCA 525-B2

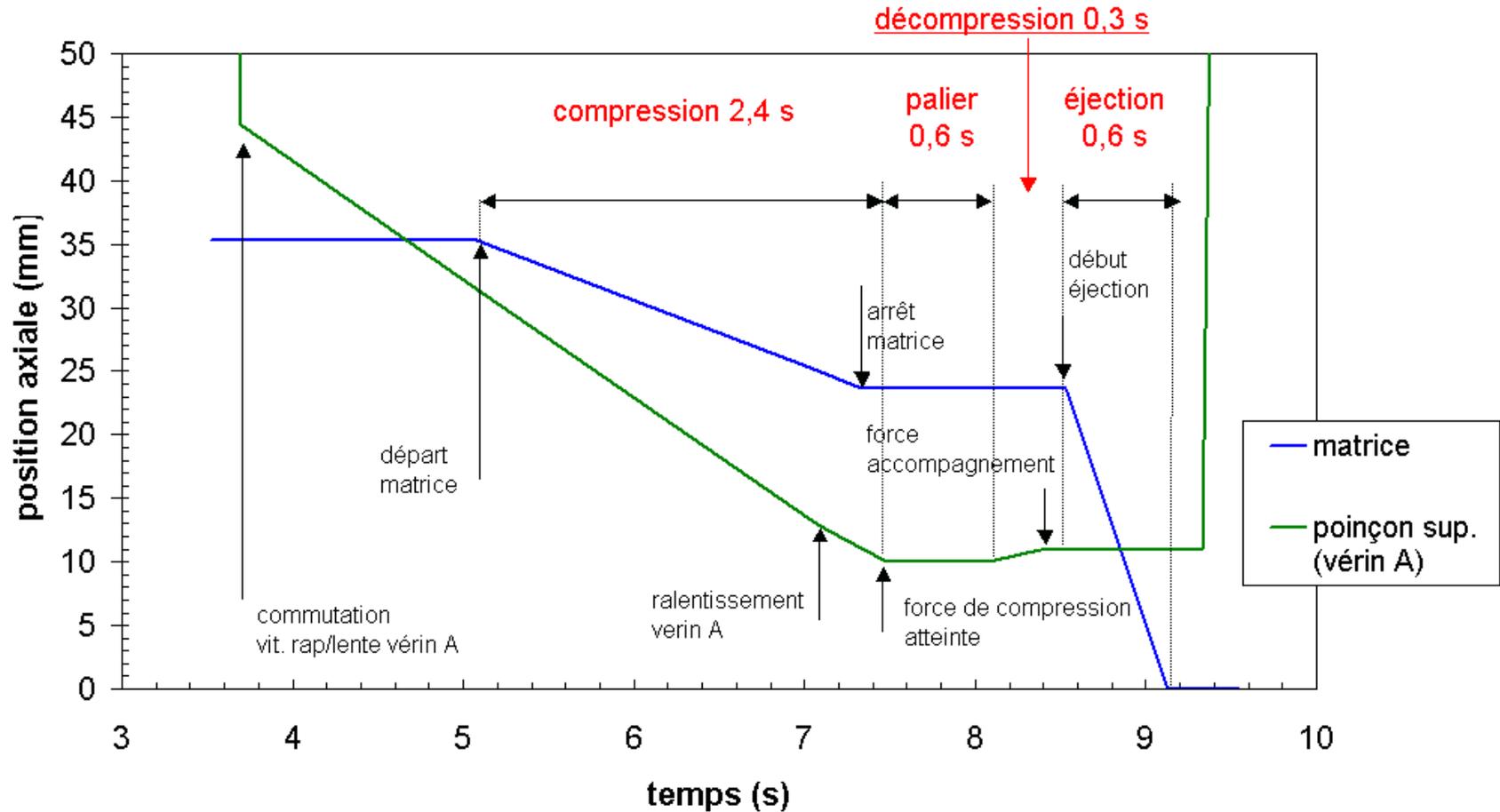
11 % Pu



— Calcul PreCAD  
 • Mesures LEFCA N515-C5

7,5 % Pu

## OPTIMISATION DE CINEMATIQUE D'OUTILLAGES



## OPTIMISATION DE CINEMATIQUE D'OUTILLAGES

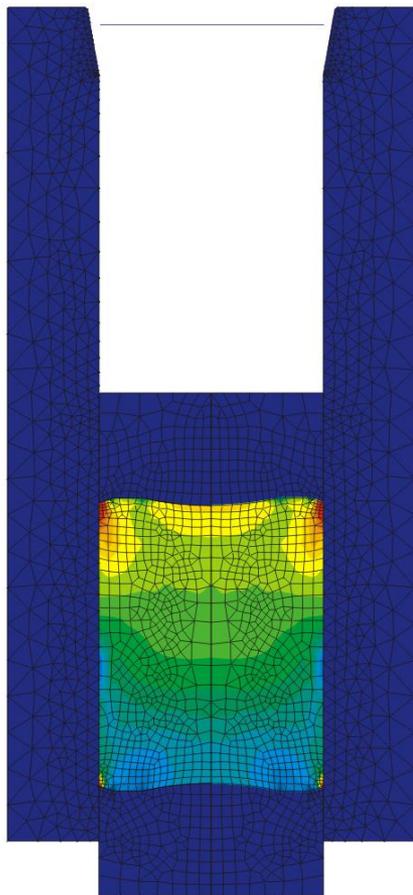


image 64 densite au temps 1.92100E+00 moyenne 6.38967E+00

déphasage 1

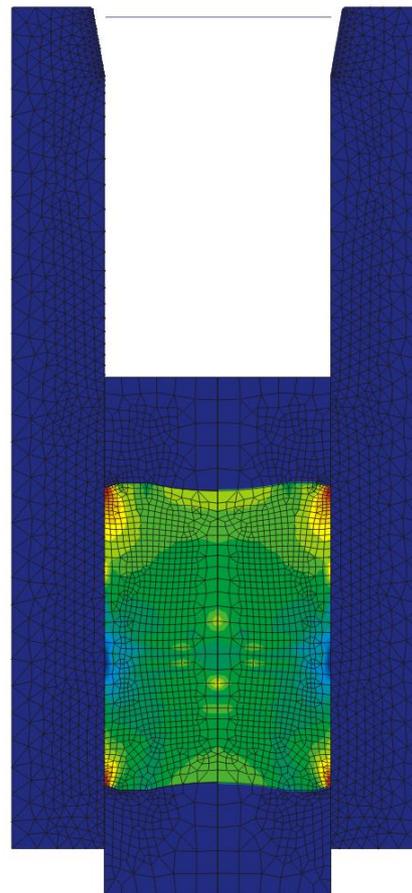


image 66 densite au temps 1.87400E+00 moyenne 6.44895E+00

déphasage 2

## OPTIMISATION DE CINEMATIQUE D'OUTILLAGES

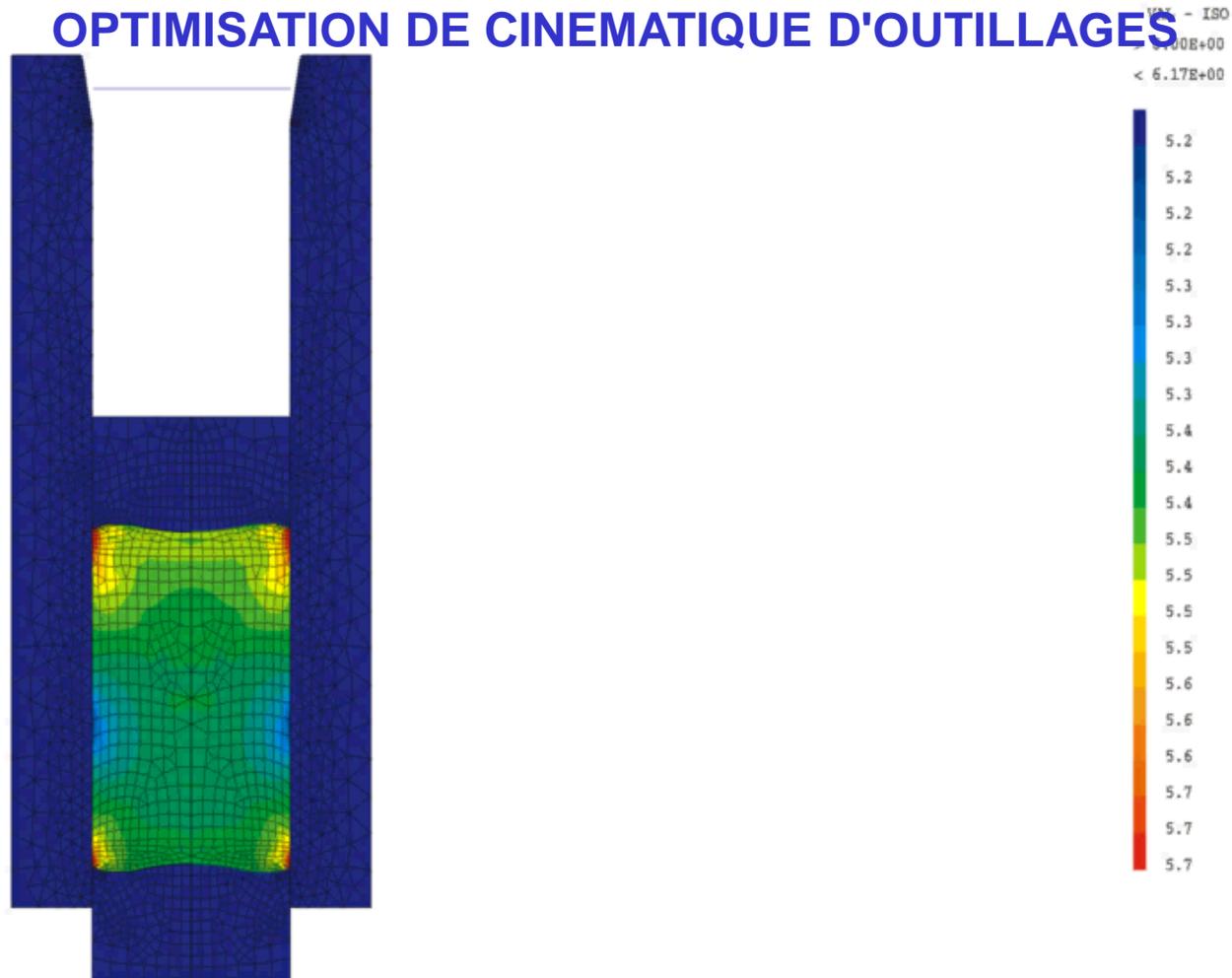


image 35 densite au temps 1.72700E+00 moyenne 5.50080E+00

## OPTIMISATION DE CINEMATIQUE D'OUTILLAGES

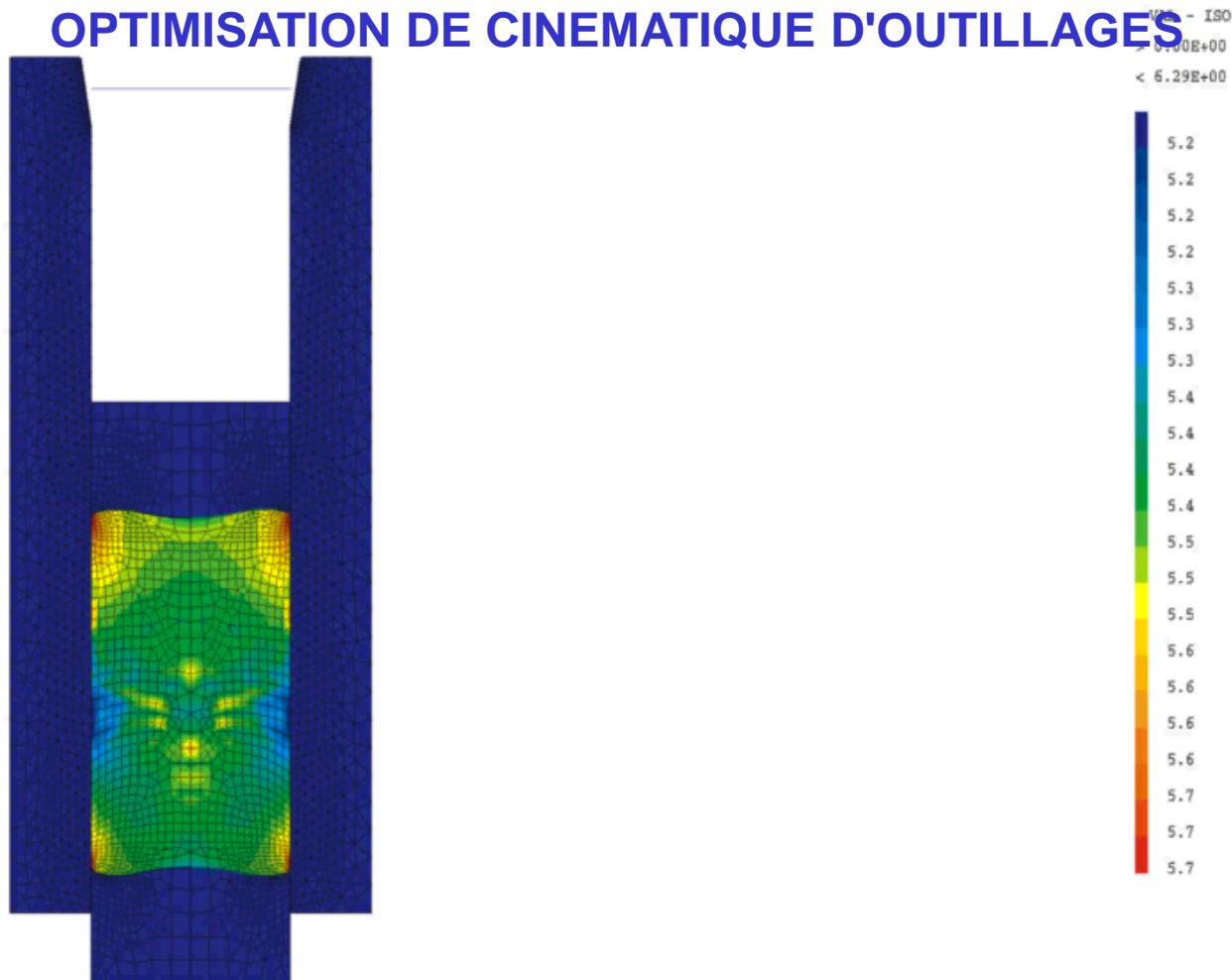
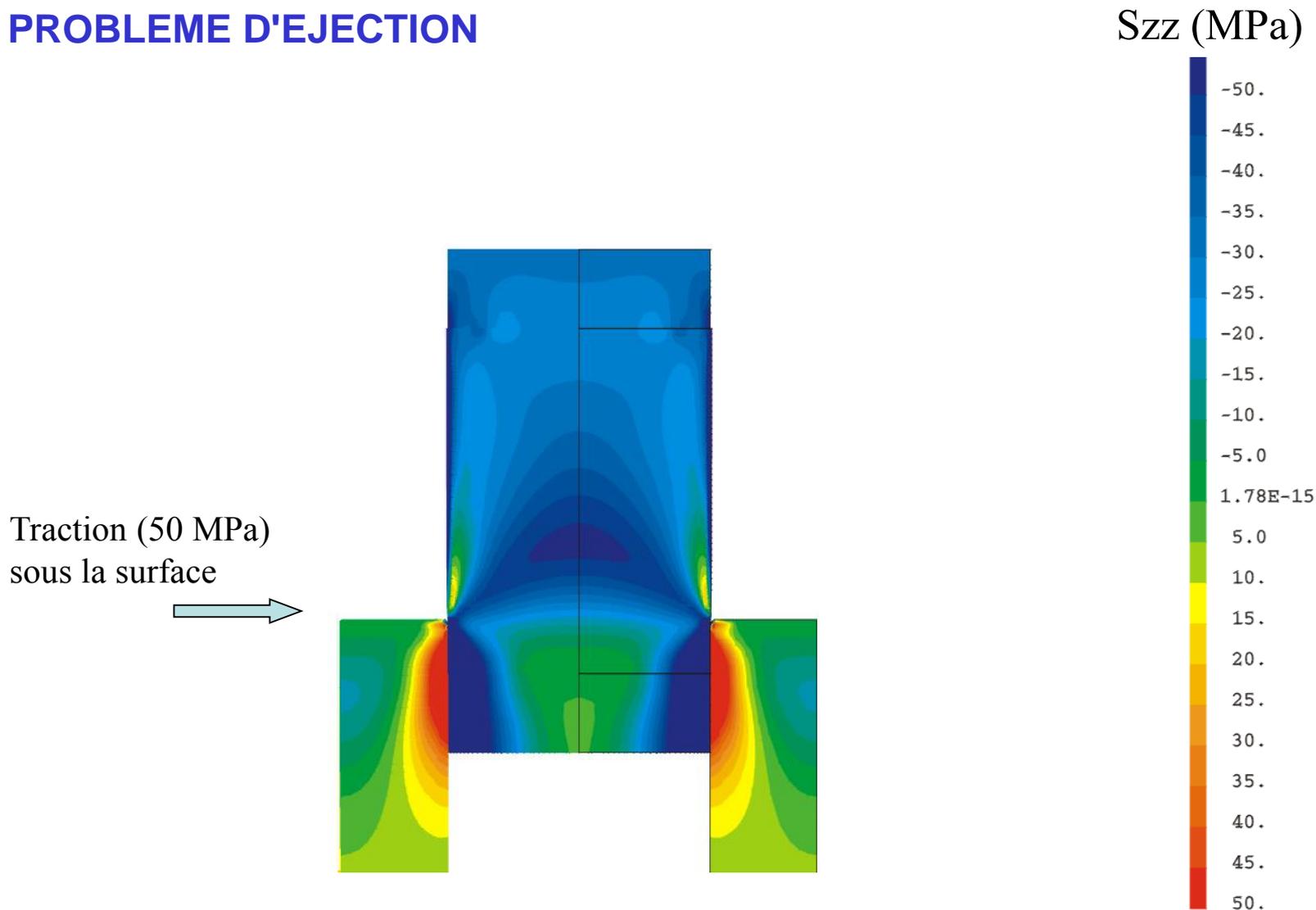


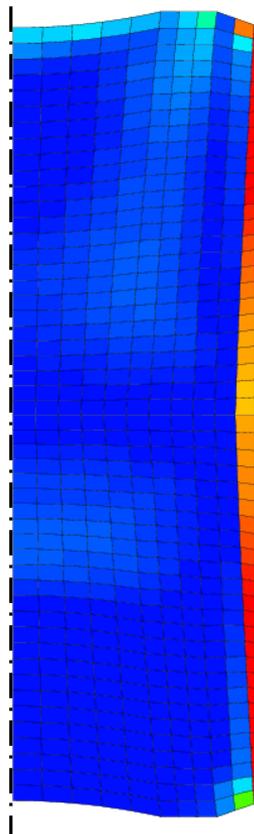
image 35 densite au temps 1.66200E+00 moyenne 5.51269E+00

## PROBLEME D'EJECTION

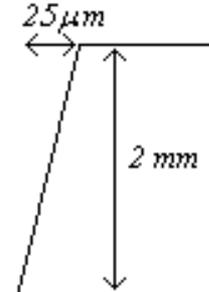
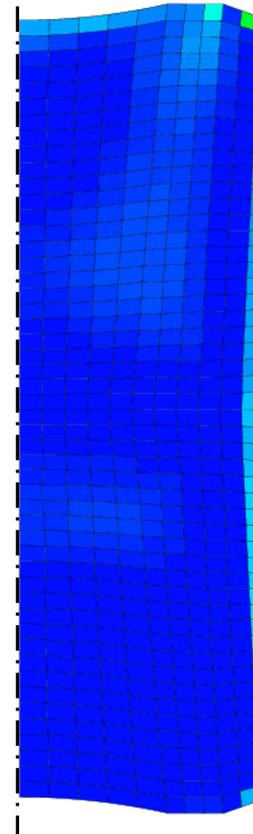


## PROBLEME D'EJECTION

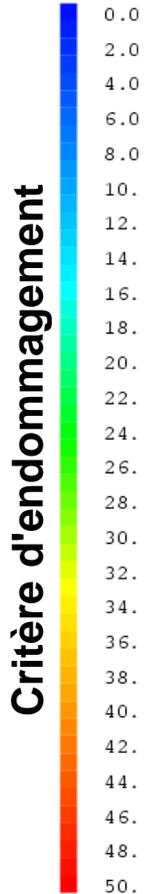
## Endommagement de la surface



Arrondi 1



Chanfrein 2



Arrondi : Géométrie industrielle

Chanfrein : Géométrie proposée

*Calcul élastique avec critère en cumul de l'éloignement à la droite de Coulomb*

PreCAD(R)-Combustibles MOX > Etude standard----- CAM\_CLAY-POUDRE-MOX-TU2-7%--2003-D=6,5

Gestion des études ?

Paramètres remplissage    Modèle poudre    Géométrie poinçons    Pilotage presse    Calcul    Résultats    Fiche synoptique    Quitter

**Paramètres de remplissage**

Hauteur de chambre initiale (mm) : 33,62

Diamètre interne de la matrice (mm) : 9,8

Revêtement interne de la matrice : WC

Masse de remplissage (g) : 5,34

Densité apparente initiale de la poudre (g/cm3) : 2,5

cocher la case correspondant à la condition initiale imposée : masse ou densité apparente de la poudre

Valider    Sortir

**Cycle de pressage**

**Paramètres courants**

Instant du cycle de pressage (s) : 1,91

Pression poinçon supérieur (MPa) : 410

Pression poinçon inférieur (MPa) : 382

Densité en charge (g/cm3) : 6,48

Hauteur de chambre (mm) : 13,11

Compression

Décompression

Ejection

Frittage

**Compressibilité**

**Elasticité**    CAM-CLAY (K)    CAM-CLAY (M)    Frittage    Frottement

Borne inférieure du domaine (Densité relative) : 0,28

Borne supérieure du domaine (Densité relative) : 0,61

Densité théorique du matériau poudre (g/cm3) : 10,99

Module d'Young (MPa) : 14600

Coefficient de Poisson : 0,1

**Modèle poudre**

CAM\_CLAY-POUDRE-MOX-TU2-7%--2003-D=6,5

Valider    Sortir

**Géométrie poinçons**

Diamètre finale de la pastille visé (mm) : 8,19

**Géométrie poinçon supérieur**

Diamètre du dishing - DMDS (mm) : 6

Rayon de courbure du dishing (mm) : 13,3

Largeur chanfrein - PST (mm) : 0,64

Hauteur chanfrein - PSH (mm) : 0,23

**Géométrie poinçon inférieur**

Diamètre du dishing - DMDI (mm) : 6

Rayon de courbure du dishing (mm) : 13,3

Largeur chanfrein - PIT (mm) : 0,64

Hauteur chanfrein - PIH (mm) : 0,23

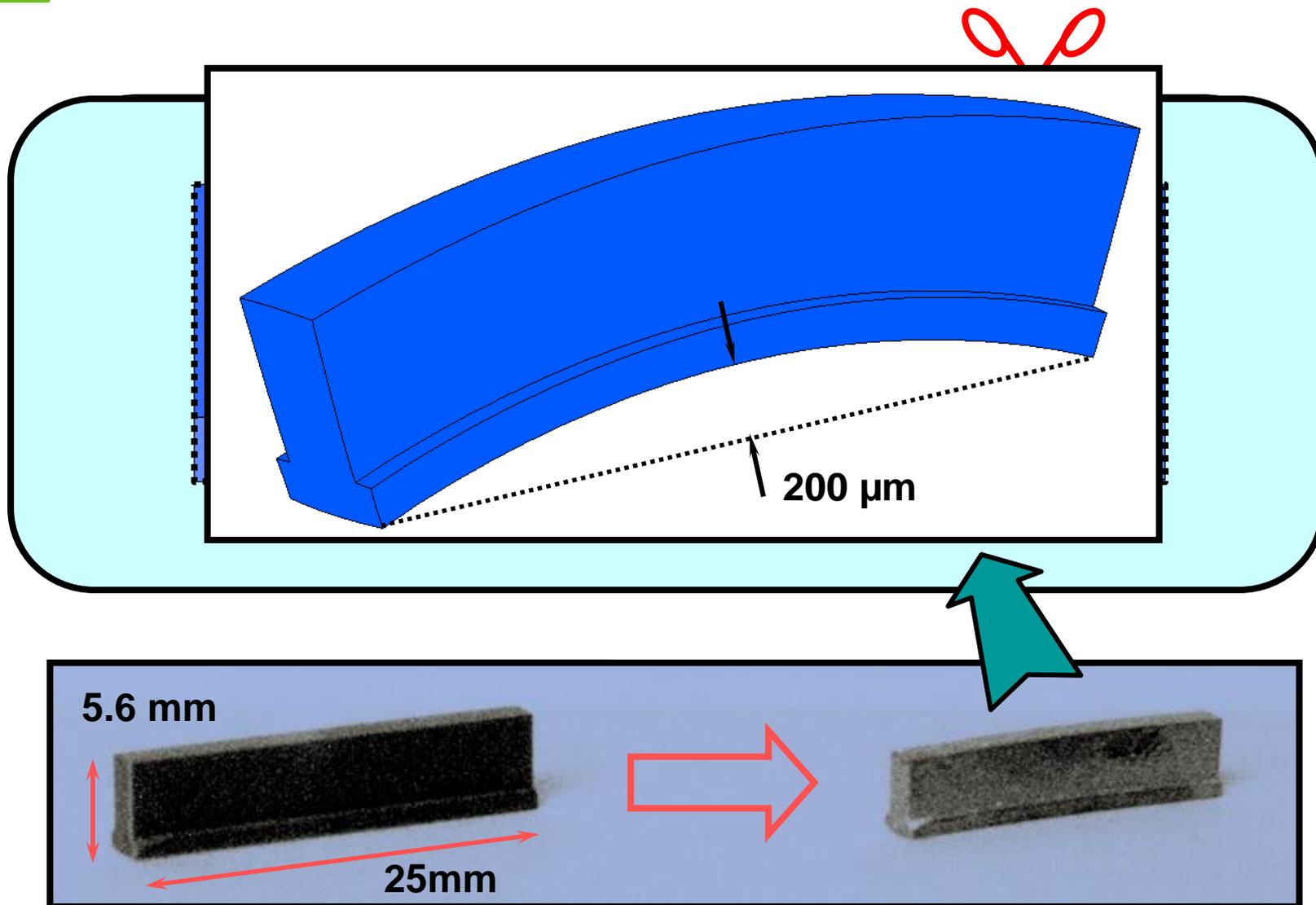
Valider    Sortir

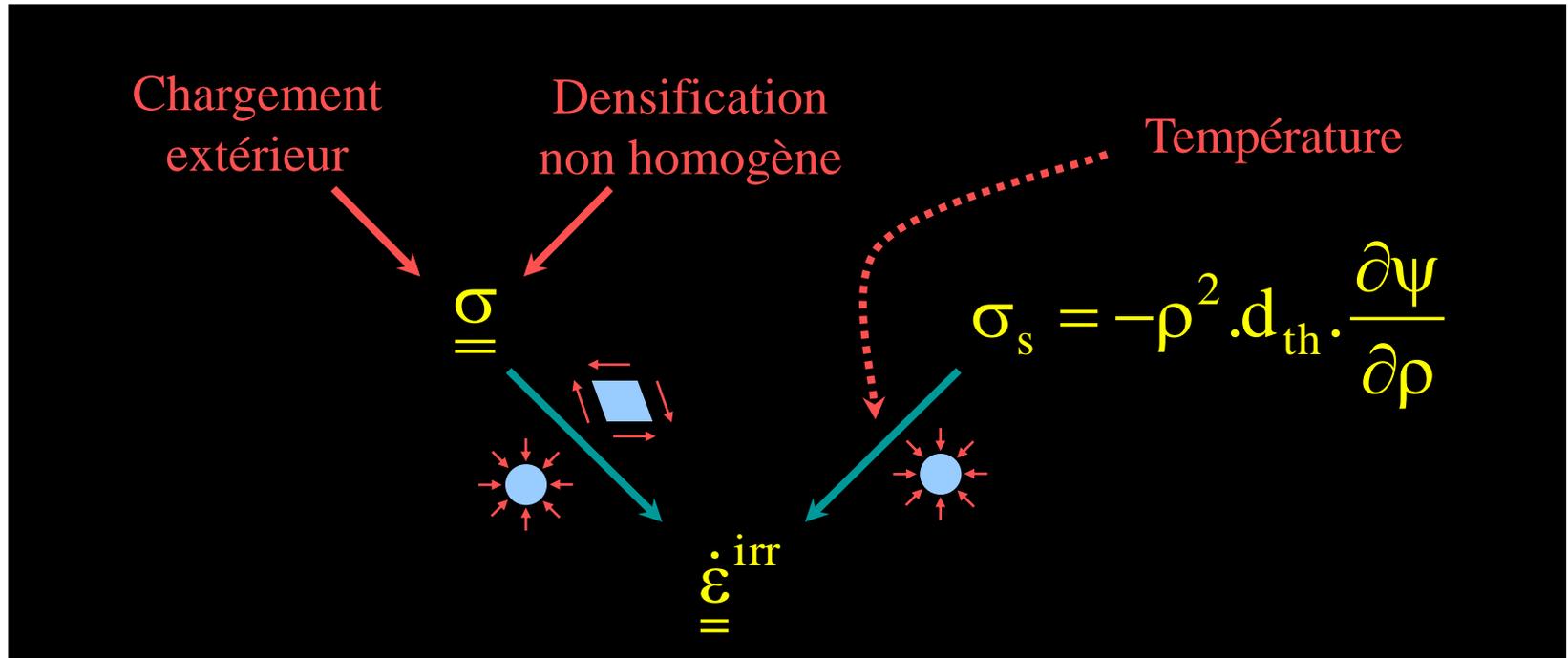
Paramétrage complet du calcul sans toucher au fichier dgibi

The screenshot displays the PreCAD software interface for UO2 pellet compaction. It is divided into several panels:

- Résultats intermédiaires:** Shows input parameters such as initial powder height (33.62 mm), density (2.5 g/cm3), and final density after firing (10.638 g/cm3).
- Fichiers de données utilisés:** Lists files used for powder model and kinematics.
- Cinématique:** Defines compression velocities for the upper punch (10.74 mm/s) and matrix (4.4 mm/s).
- Matrice:** Specifies matrix type (WC) and friction coefficient (0.15).
- Volumes de rectification:** Shows rectification volume (0.732%) and diameter (8.19 mm).
- Tableau de résultats (Excel):** A detailed table of results including intermediate results, geometry, powder file, and kinematics.
- Graphiques:**
  - Cinématique:** A graph of punch and matrix positions over time, showing a peak in pressure (Effort PSU) at approximately 2.2 seconds.
  - Contour pastille (mm):** A graph showing the pellet diameter profile.
  - Bord pastille:** A graph showing the pellet height profile.

Rapport de calcul complet sur Excel





$$\dot{\epsilon}^{irr} = \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_{vol}^{fr} - \frac{p}{3K} \mathbf{I} + \frac{\sigma'}{2G} \quad \dot{\epsilon}_{vol}^{fr} = \frac{\sigma_s}{K}$$

Intégration dans PASAPAS

Calcul de la déformation de frittage

Résolution de l'équation  
globale linéariséeRésolution de l'équation aux  
dérivées partielles locale

- ★ Intégration explicite du frittage
  - ↳ entré avant les itérations de Newton
- ★ Loi élasto-viscoplastique
  - ↳ schéma itératif (accel. de conv.)

Schéma non standard

Calcul du champ de vitesse

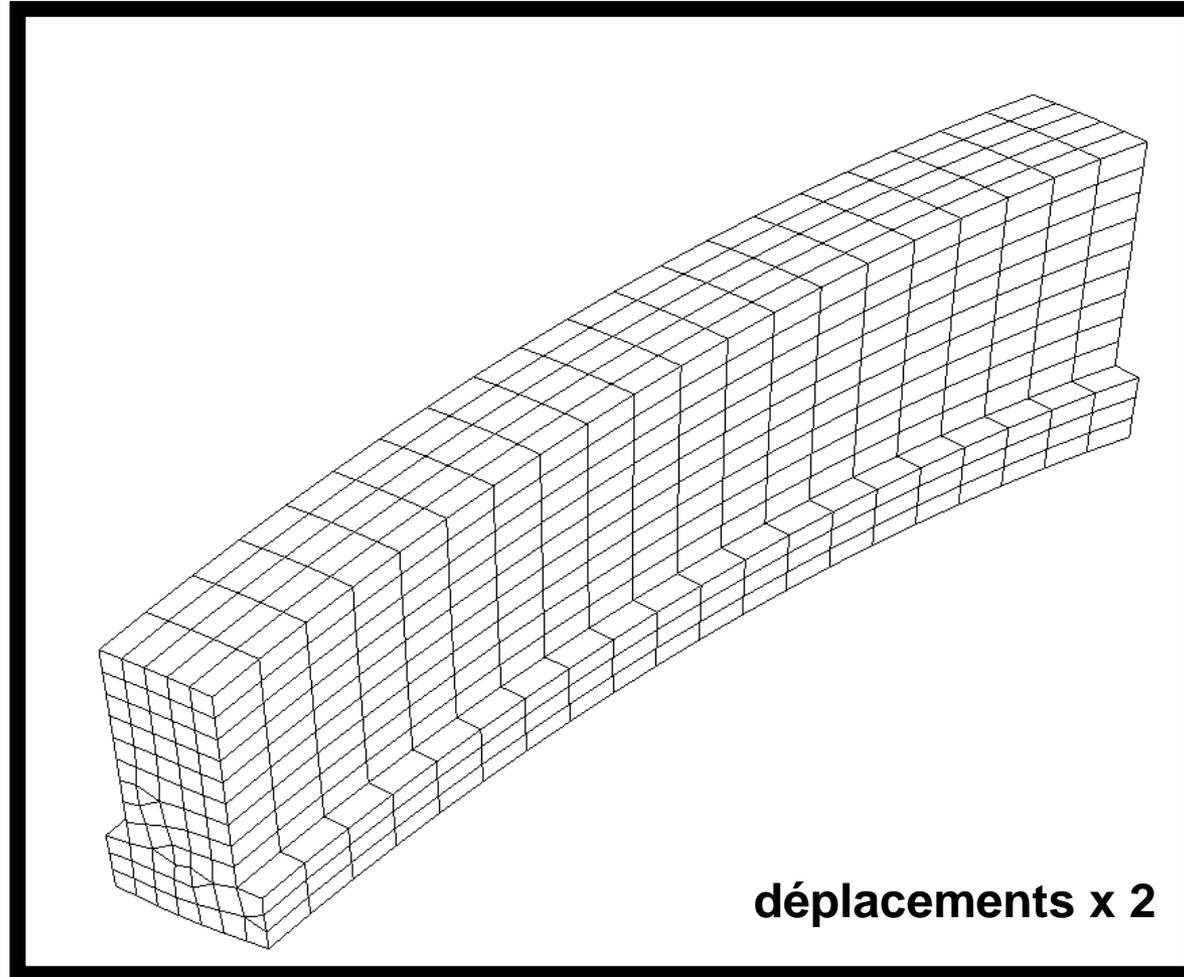
$$\mathbf{V} = \mathbf{K}_{vp}^{-1} (\mathbf{F}^{th} + \mathbf{F}^{ext} + \mathbf{F}^{fr})$$

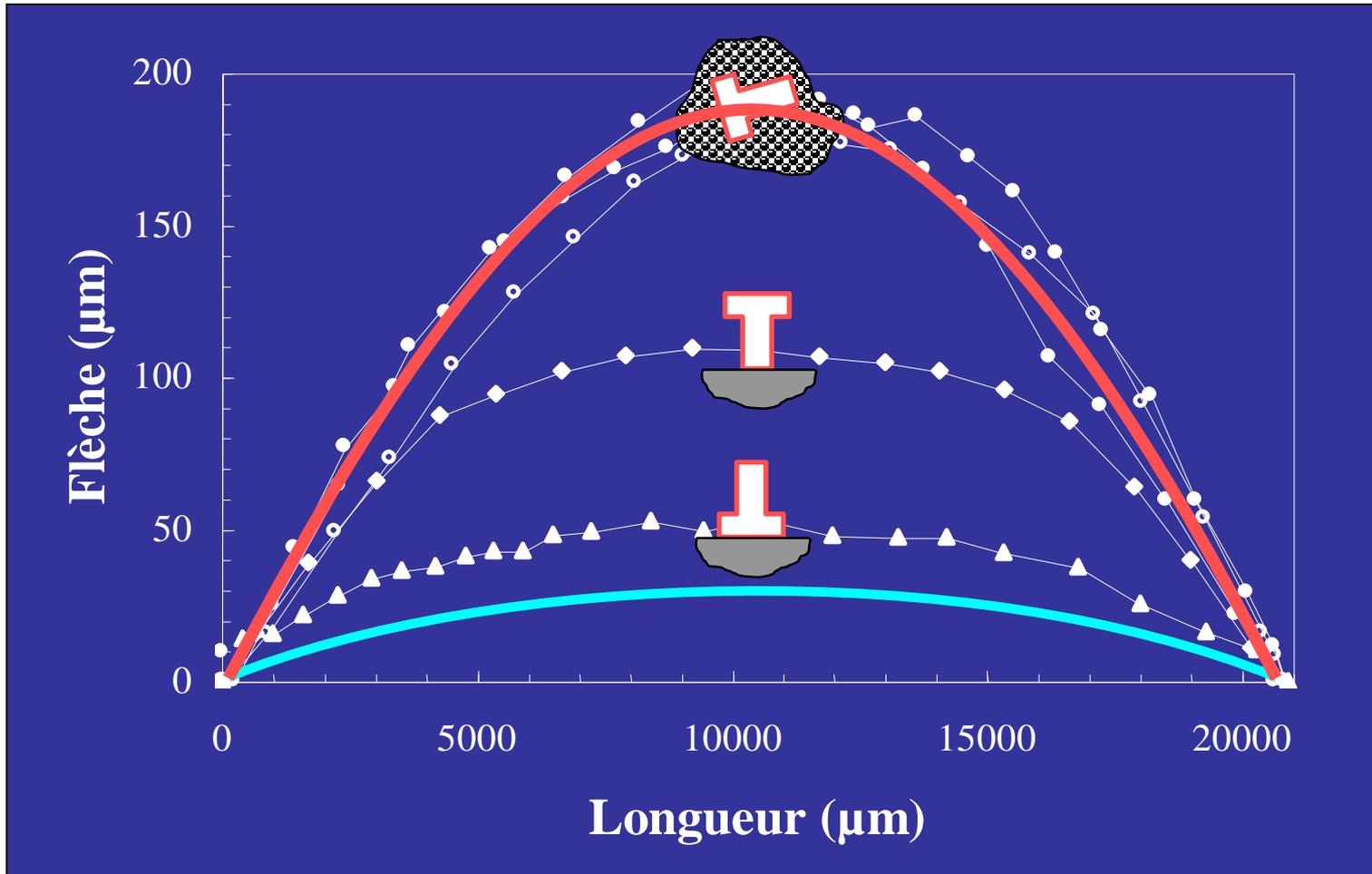
$\mathbf{K}$  et  $\mathbf{G}$        $\alpha$        $\vec{g}, \dots$        $\dot{\epsilon}_{vol}^{fr}$

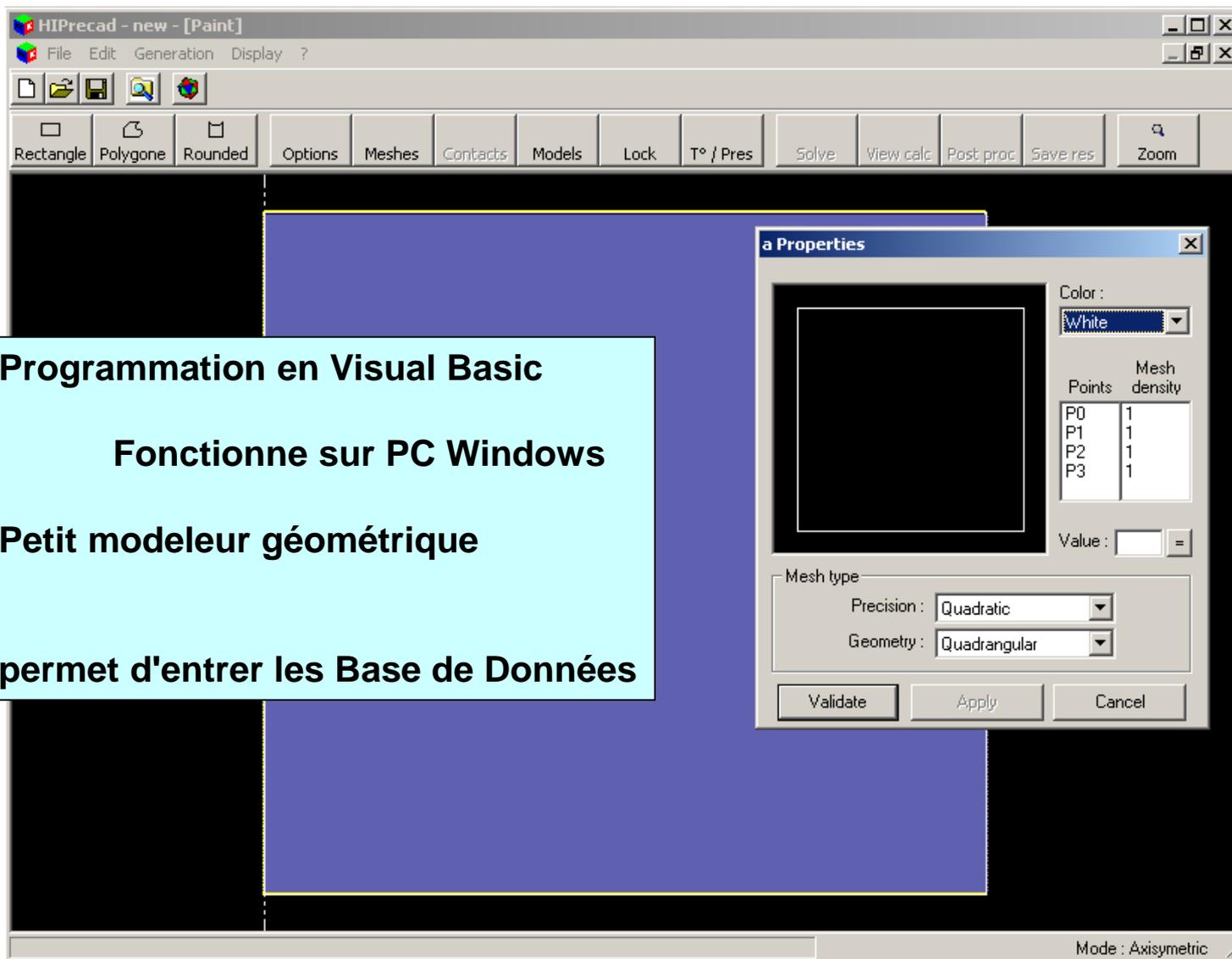


Intégration du déplacement

- ★ Loi viscoplastique purement
- ★ Intégration explicite du déplacement
- ★ Contrôle sur l'incrément de densité







- ❖ Programmation en Visual Basic
- Fonctionne sur PC Windows
- ❖ Petit modeleur géométrique
- ❖ permet d'entrer les Base de Données



## CEA

G. Delette  
L. Federzoni  
P. Revirand  
O. Gillia  
D. Lasalmonie  
O. Bouaziz  
D. Abondance  
L. Sanchez

Ph. Bucci  
R. Baccino  
F. Moret  
Ch. Dellis

## INPG / UJF / CNRS

P. Doremus  
D. Bouvard  
E. Ouedraogo  
D. Imbault  
V. Bonnefoy  
A. Frachon  
E. Pavier

## LES PARTENAIRES & PROJETS

ISOPREC

Réseau Européen : DieNet - MC2 - ModNet

Snecma (Turbomeca - SEP)

EFDA

Framatome ANP

Areva - Cogema

TecPhy (Aubert & Duval)

Federal Mogul

Sandvik Hard Materials

Norton Desmarquest