MODELISATION MACRO ET MICRO-MACRO DES MATERIAUX POLYCRISTALLINS ENDOMMAGEABLES AVEC COMPRESSIBILITE INDUITE

Présenté par :
Mohamed BOUDIFA
Le 01 Mars 2006

LASMIS/UTT

INTRODUCTION

UTT
Institut Charles Delaunay

LASMIS | ... | ... | ...

Axe 1
Matériaux multi-échelles – caractérisation mécanique

AXE 2
Modélisations théorique, numérique et géométrique

AXE 3
Intégration pour la conception

Modélisation théorique et numérique

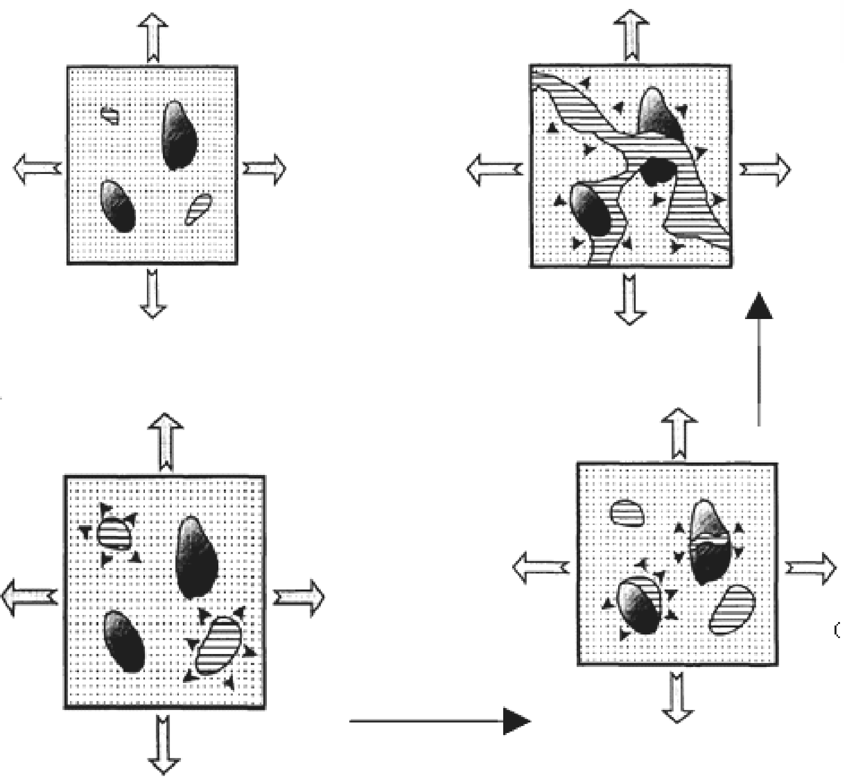
- [HAMMI 00]
- [MARIAGE 03]
- [LESTRIEZ 03]
- [BELAMRI 04]
- [KHELIFA 04]
- **[BOUDIFA 06]**
- [BADREDDINE]
- [SORNIN]

1. **Un modèle macroscopique**
2. **Un modèle micro-macro**

L'ENDOMMAGEMENT DUCTILE ?

État initial

1. Naissance de cavités



2. Croissance des cavités

3. Coalescence des cavités

I. MODELISATION

I.1 Modélisation Macroscopique

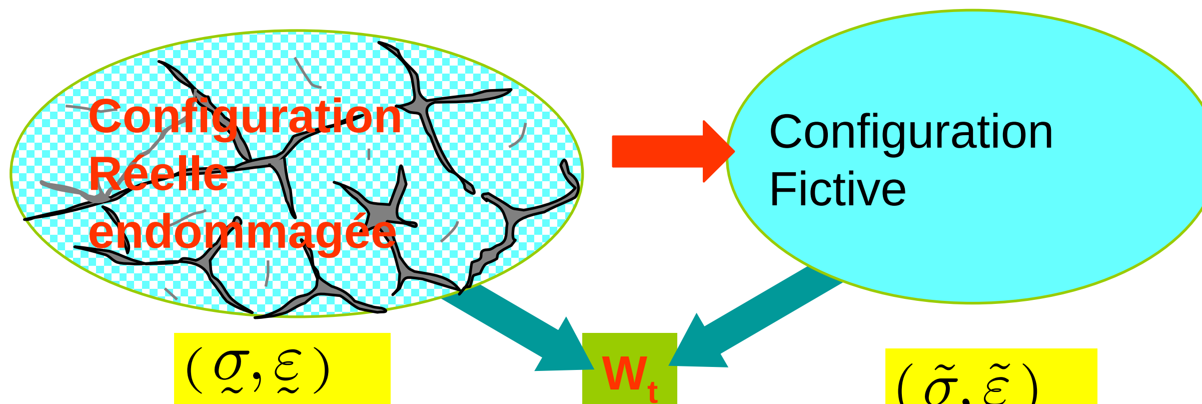
Théorie de GURSON [Gurson 77]
Cinétique des cavités :
-Nucleation
- Croissance
-Coalescence
Variable d'endommagement :
porosité f

Théorie CDM [Lemître85]
Effet Phénoménologique des Défauts sur la Réponse Mécanique

Variable d'Endommagement :
D, D_i, D_{ij}, D_{ijkl}

-Principe d'équivalence en déformation [Chaboche 78]

-Principe d'équivalence en énergie [Cordebois 79], [Saanouni 88]



$(\underset{\sim}{\sigma}, \underset{\sim}{\varepsilon})$

(D, Y)

$(\underset{\sim}{A}_i, a_i)$

$(\tilde{\underset{\sim}{\sigma}}, \tilde{\underset{\sim}{\varepsilon}})$

$(\tilde{\underline{A}}_i, \tilde{\underline{a}}_i)$

Formulation CDM du modèle macroscopique

Relations d'état

$$\underset{\sim}{\sigma} = (1 - D)\,\underset{\approx}{L} : \underset{\sim}{\varepsilon}^e$$

$$\underset{\sim}{X} = (1 - D)\frac{2}{3}C\,\underset{\sim}{\alpha}$$

$$R = (1 - D)Qr$$

$$Y = \frac{1}{2}\underset{\sim}{\varepsilon}^e : \underset{\approx}{L} : \underset{\sim}{\varepsilon}^e + \frac{2}{3}C\,\underset{\sim}{\alpha} : \underset{\sim}{\alpha} + \frac{1}{2}Qr^2 = Y_e + Y_{an}$$

Variable d'Endommagement

$$D^* = D_0 + D + D^v$$

$$f = \frac{\|\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\| - R}{\sqrt{1 - D^*}} - \sigma_y$$

Relations Complémentaires

$$\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}^p = \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\,\underset{\sim}{n} \qquad \underset{\sim}{n} = \overline{\underset{\sim}{n}} + \underset{\sim}{n}^s$$

$$\dot{\underset{\sim}{\alpha}} = \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\,\overline{\underset{\sim}{n}} - a\dot{\lambda}\underset{\sim}{\alpha}$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\left(1 - br\sqrt{1 - D^*}\right)$$

$$\dot{D} = \dot{\lambda}(1 - D)^{-\beta}\left\langle \frac{Y - Y_0}{S} \right\rangle^s$$

$$\dot{D}^v = (1 - D^v)\,\mathrm{tr}(\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}^p)$$

$$\dot{f}_g = (1 - f)\,tr(\dot{\varepsilon}^p)$$

$$\left\|\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\right\| = \sqrt{\left(\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\right) : \underset{\approx}{H} : \left(\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\right) \boxed{+\, \alpha D^* \left[tr\left(\underset{\sim}{\sigma}\right)\right]^2}}$$

Version (GTN)

$$F = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{q_2\,\mathrm{tr}(\underset{\sim}{\sigma})}{2\sigma_y}\right) - 1 - \left(q_1 f^*\right)^2$$

$$\underset{\sim}{n} = \frac{\underset{\approx}{H} : (\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X})}{\left\|\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\right\|} + \frac{\alpha D^* tr(\underset{\sim}{\sigma})}{\left\|\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\right\|}\underset{\sim}{1}$$

$$\underset{\sim}{n}^{GTN} = \frac{\partial F}{\partial \underset{\sim}{\sigma}} = \frac{3\underset{\sim}{s}}{{\sigma_y}^2} + \frac{q_1 q_2 f^*\,\mathrm{tr}(\underset{\sim}{\sigma})}{2\sigma_y}\sinh\left(\frac{q_2\,\mathrm{tr}(\underset{\sim}{\sigma})}{2\sigma_y}\right)\underset{\sim}{1}$$

Ecoulement plastique $\dot{\lambda}^p = \frac{1}{H}\left\langle\left[(1-D)\underset{\sim}{n} : \underset{\approx}{L} : \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}\right]\right\rangle$

Ecoulement Viscoplastique $\dot{\lambda}^{vp} = \left\langle \frac{f}{K} \right\rangle^n$

Généralisation aux transformations finies

Pour tout tenseur T $\underset{\sim}{T}_Q = \underset{\sim}{Q}^T \cdot \underset{\sim}{T} \cdot \underset{\sim}{Q} \Rightarrow \dot{\underset{\sim}{Q}} = \underset{\sim}{W}_Q \cdot \underset{\sim}{Q}$ avec $\underset{\sim}{Q}(t=0) = \underset{\sim}{1}$

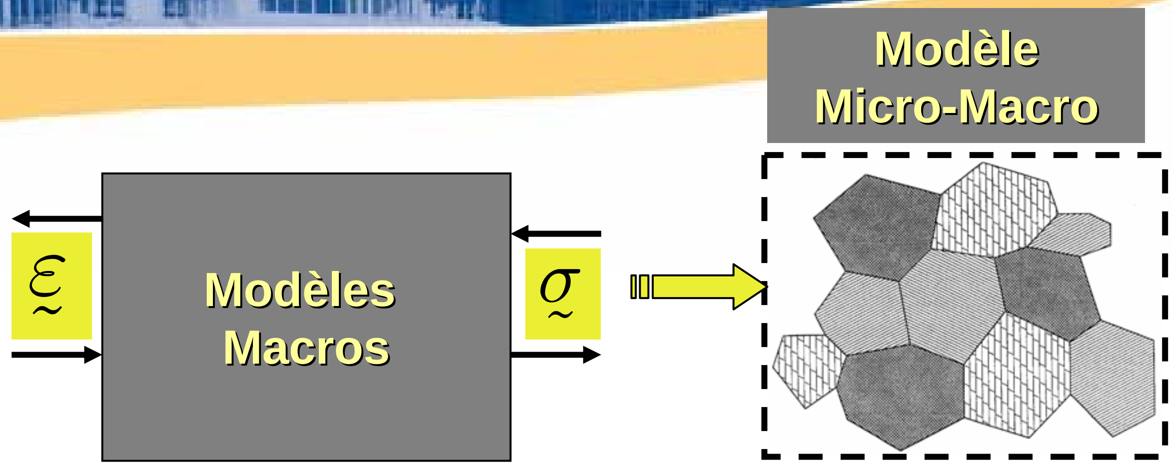
Jaumann

$$\underset{\sim}{W}_Q = \underset{\sim}{\mathfrak{L}}^{AntySym} = \left\{ \dot{\underset{\sim}{F}} \cdot \underset{\sim}{F}^{-1} \right\}^{AntySym}$$

Green-Naghdi

$$\underset{\sim}{W}_Q = \dot{\underset{\sim}{R}}\underset{\sim}{R}^T$$

Taux de déformation $\underset{\sim}{D} = \underset{\sim}{\mathfrak{L}}^{Sym} = \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_e^J + \underset{\sim}{D}_p$



1. Definition de l'EVR

2. Localisation

3. Modélisation du comportement

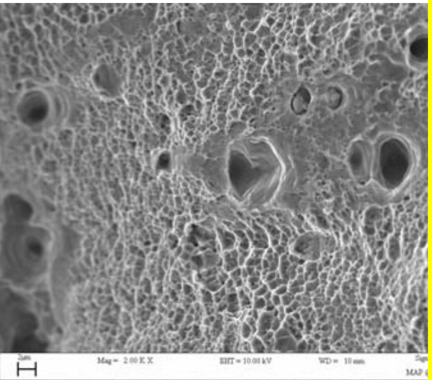
4. Homogénéisation

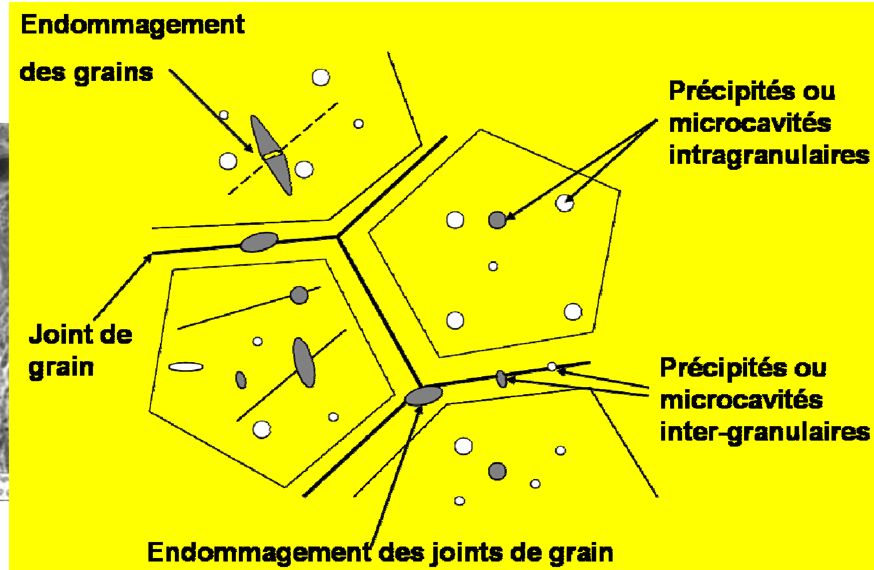
Matériau :

-Métal polycristallin

-Monophasique définit par des directions et plans cristallins

L’endommagement à l’échelle micro?



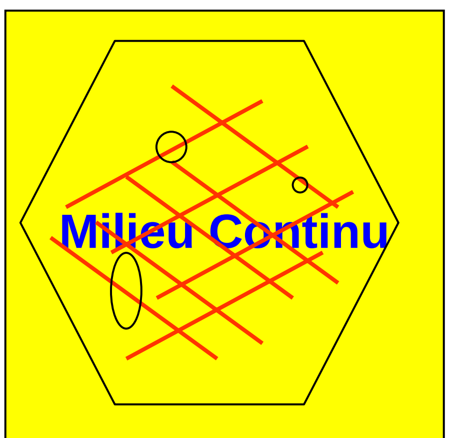


Hypothèses sur l’endommagement ductile

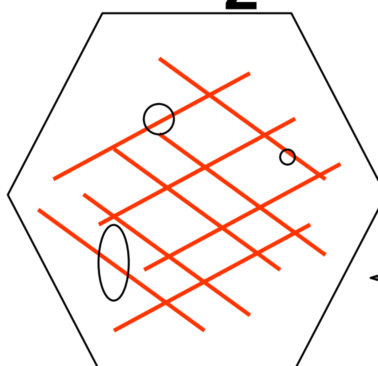
1. <u>Variable phénoménologique d^s</u> traduit la présence en nucléation ou en croissance de microcavités

$$(d^s, Y^s)$$

1



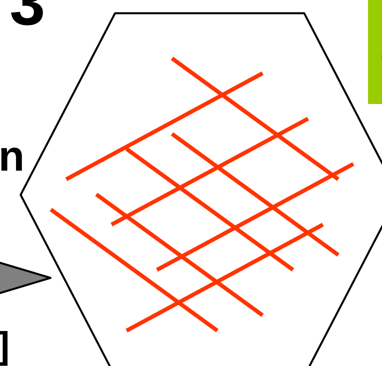
2



Équivalence en énergie

[Abdul-Latif 94]

3



$$\sigma_n^s, D^g$$

Cission de Schmid

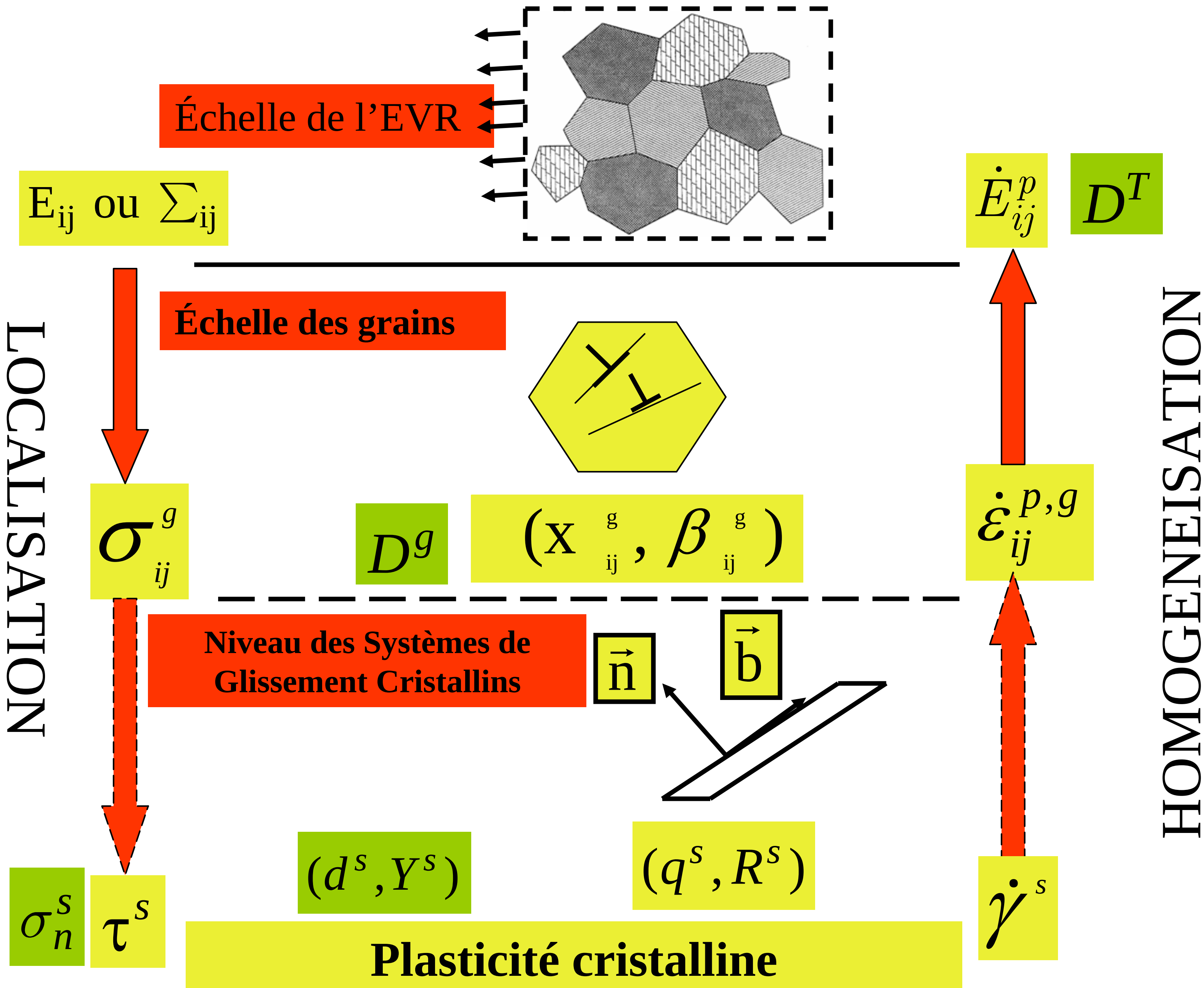
Glissement cristallin

$$\left(\tau^s, \gamma^s\right)$$

Plasticité cristalline

2. Mesure de dommage granulaire D^g due à la contrainte normale au plan de glissement

Schéma du Modèle



Equations du modèle

1. Au Niveau SGC

$$f^s = \frac{|\tau^s| + \alpha D^g \langle \sigma_n^s \rangle - R^s}{\sqrt{1 - d^s}} - \tau_0$$

$$\tau^s = \underset{\sim}{\sigma}^g : \underset{\sim}{m}^s, \text{ avec } \underset{\sim}{m}^s = \frac{1}{2}\left(\vec{n}^s \otimes \vec{b}^s + \vec{b}^s \otimes \vec{n}^s\right)$$

$$\sigma_n^s = \underset{\sim}{\sigma}^g : \underset{\sim}{\eta}^s, \text{ avec } \underset{\sim}{\eta}^s = \vec{n}^s \otimes \vec{n}^s$$

$$f^s > 0$$

Relations d'évolution

$$\dot{\gamma}^s = \frac{\dot{\lambda}^s}{\sqrt{1 - d^s}} sign(\tau^s)$$

$$\dot{q}^s = \frac{\dot{\lambda}^s}{\sqrt{1 - d^s}} (1 - b\dot{\lambda}^s)$$

$$\dot{d}^s = \dot{\lambda}^s \left\langle \frac{Y^s - Y_0}{S} \right\rangle^\beta \frac{1}{(1 - d^s)^m}$$

$$\dot{\lambda}^s = \left\langle f^s / K \right\rangle^n$$

Relations d'état

$$R^s = Q\sqrt{1 - d^s} \sum_r^{Ns} H^{sr} \sqrt{1 - d^r} q^r$$

$$Y^s = \frac{1}{2} \frac{R^s q^s}{(1 - d^s)}$$

À l'échelle des grains

[KRÖNER 61]

$$\underset{\sim}{\sigma}^g = \underset{\sim}{\Sigma} + C^g \left(\sum_{g=1} f^g \underset{\sim}{\varepsilon}_g^p - \underset{\sim}{\varepsilon}_g^p \right)$$

Relation de localisation
[CAILLETAUD 87]

$$\underset{\sim}{\sigma}^g = \underset{\sim}{\Sigma} + C \left(\sum_{g=1}^{Ng} f^g \underset{\sim}{\beta}^g - \underset{\sim}{\beta}^g \right)$$

Relation d'état

$$\underset{\sim}{x}^g = \frac{2}{3} C \underset{\sim}{\beta}^g$$

Relations d'évolution

$$\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^g = \dot{\bar{\underset{\sim}{\varepsilon}}}_p^g + \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^{gH} \begin{cases} \dot{\bar{\underset{\sim}{\varepsilon}}}_p^g = \displaystyle\sum_{s=1}^{s=Ns} \frac{\dot{\lambda}^s sign\left(\tau^s\right)}{\sqrt{1-d^s}} \underset{\sim}{m}^s \\ \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^{gH} = \displaystyle\sum_{s=1}^{s=Ns} \frac{\dot{\lambda}^s \alpha D^g}{\sqrt{1-d^s}} \underset{\sim}{\eta}^s \end{cases}$$

$$\dot{\underset{\sim}{\beta}}^g = \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^g - a \underset{\sim}{\beta}^g \sum_{s=1}^{Ns} \dot{\lambda}^s$$

$$D^g = \sum_{s=1}^{s=Ns} d^s$$

À l'échelle de l'EVR

Relation d'état

$$\underset{\sim}{\Sigma} = \left(1 - D^T\right) \underset{\approx}{L} : \underset{\sim}{E}^e$$

Relations d'évolution

$$\dot{\underset{\sim}{E}}^p = \sum_{g=1}^{g=N^g} f^g \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^g$$

$$\dot{\underset{\sim}{E}}^e = \dot{\underset{\sim}{E}} - \dot{\underset{\sim}{E}}^p$$

$$\dot{D}^T = \sum_{g=1}^{Ng'} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} \dot{d}^s$$

Compressibilité plastique

$$\mathrm{tr}\left(\dot{\underset{\sim}{E}}^p\right) = \mathrm{tr}\left(\sum_{g=1}^{g=N^g} f^g \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^g\right)$$

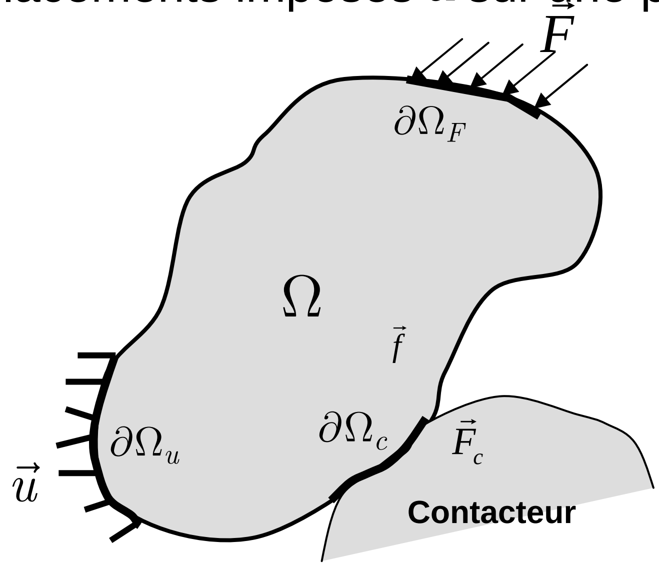
$$= \mathrm{tr}\left(\sum_{g=1}^{g=N^g} f^g \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_p^{gH}\right)$$

$$= \mathrm{tr}\left(\sum_{g=1}^{g=N^g} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} \frac{\dot{\lambda}^s \alpha D^g}{\sqrt{1-d^s}} \underset{\sim}{\eta}^s\right)$$

$$= \sum_{g=1}^{g=N^g} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} \frac{\dot{\lambda}^s \alpha D^g}{\sqrt{1-d^s}} \neq 0$$

II. Modélisation numérique

- Une densité de forces volumiques $\vec{f}$ dans Ω,
- Des efforts surfaciques $\vec{F}$ sur une partie $\partial\Omega_f$ de $\partial\Omega$,
- Des efforts de contact $\vec{F}_C$ (avec un autre solide) sur une partie $\partial\Omega_c$ de $\partial\Omega$,
- Des déplacements imposés $\vec{u}$ sur une partie $\partial\Omega_u$ de $\partial\Omega$.



$$\int_{\Omega} \underset{\sim}{\sigma} : \delta \underset{\sim}{D} dV - \int_{\Omega} \vec{f} \delta \vec{\dot{u}} dV - \int_{\partial\Omega_f} \vec{F} \delta \vec{\dot{u}} dS - \int_{\partial\Omega_c} \vec{F}_c \delta \vec{\dot{u}} dS = \int_{\Omega} \rho \vec{\ddot{u}} \delta \vec{\dot{u}} dV$$

(P)

II.2 Méthodes incrémentales de résolution

Discrétisation Spatiale par E.F. du PPV

Élément e:
$$u_e = N_N u_e^N \,; \quad \dot{u}_e = N_N \dot{u}_e^N \,; \quad \ddot{u}_e = N_N \ddot{u}_e^N \,;$$
$$\delta u_e = N_N \delta u_e^N \,; \quad \delta \dot{u}^e = N_N \dot{u}_e^N \,;$$

(A) $[M]\{\ddot{U}\} + \{\Re\} = 0$ **AVEC** $\{\Re\} = \{F_{int}\} - \{F_{ext}\}$

Résolution Statique Implicite (Schéma itératif de Newton-Raphson)

$$Convergence$$
$$\left|\{\Re\}_{n+1}^{h}\right| = \left|\{F_{int}\}_{n+1}^{h} - \{F_{ext}\}_{n+1}^{h}\right| \leq \varepsilon$$
$$\{\triangle U\}_{n+1}^{h} = -[K]_{n+1}^{h}\{\Re\}_{n+1}^{h}$$

$$[K]_{n+1}^{h} = \left[\frac{\{\partial \Re\}}{\{\partial U\}}\right]_{n+1}^{h} \approx \int_{V^r} \left[B_{(\eta)}^{el}\right]^T \left[\underset{\approx}{L}_c^{el}\right]_{n+1}^{h} \left[B_{(\eta)}^{el}\right] J_V dV^r + \ldots$$

$$\left[\underset{\approx}{L}_c^{el}\right]_{n+1}^{h} = \frac{\partial\left(\{\underset{\sim}{\sigma}^{el}\}\right)_{n+1}^{h}}{\partial\left(\{\underset{\sim}{\varepsilon}^{el}\}\right)_{n+1}^{h}}$$

Résolution Dynamique Explicite (POINT MILIEU)

$$\{\ddot{U}\}_n = [M_D]_n^{-1}\{\Re\}_n$$
$$\{\dot{U}\}_{n+\frac{1}{2}} = \{\dot{U}\}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_n + \Delta t_{n+1}}{2}\{\ddot{U}\}_n$$
$$\{U\}_{n+1} = \{U\}_n + \Delta t_n \{\dot{U}\}_{n+\frac{1}{2}}$$

Introduction

I. Modélisation du comportement avec endommagement ductile

I.1 Modélisation Macroscopique

I.2 Modélisation micro-macro

II. Modélisation numérique

II.1 Principe de résolution

II.2 Méthodes incrémentales de résolution

II.3 Intégration numérique des modèles de comportement

III. Quelques Applications

Conclusions et Perspectives

Intégration du modèles macroscopique

$$\left\{\begin{aligned}
H^e_{n+1} &= \Delta\underset{\sim}{\varepsilon}^e + \Delta p \underset{\sim}{n}_{n+1} - \Delta\underset{\sim}{\varepsilon} \ldots \\
H^\alpha_{n+1} &= \Delta\underset{\sim}{\alpha}\left(1 + a\sqrt{1 - D^*_{n+1}}\ldots\right. \ldots \underset{\sim}{\alpha}_{n+1} = 0 \\
H^r_{n+1} &\ \dot{\Lambda}\left(\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}^e, \dot{\underset{\sim}{\alpha}}, \dot{r}, \dot{D}, \dot{D}^v, \dot{p}\right) \ldots 0 \\
H^D_{n+1} &= \Delta D - \Delta p \widehat{Y}^c_{n+1} = 0 \\
H^{D^v}_{n+1} &= \Delta D^v - \Delta p \hat{Y}^v_{n+1} = 0 \\
\hline
H^p_{n+1} &= f_{n+1} = \|\underset{\sim}{\sigma}_{n+1} - \underset{\sim}{X}_{n+1}\| \ldots
\end{aligned}\right.$$

$$\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}^e = \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}} - \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\underset{\sim}{n}$$

$$\dot{\underset{\sim}{\alpha}} = \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\overline{\underset{\sim}{n}} - a\dot{\lambda}\underset{\sim}{\alpha}$$

$$\dot{r} = \frac{\dot{\lambda}}{\sqrt{1 - D^*}}\left(1 - br\sqrt{1 - D^*}\right)$$

$$\dot{D} = \dot{\lambda}(1 - D)^{-\beta}\left\langle\frac{Y - Y_0}{S}\right\rangle^s$$

$$\dot{D}^v = (1 - D^v)\,\mathrm{tr}\left(\dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}^p\right)$$

$$f = \frac{\|\underset{\sim}{\sigma} - \underset{\sim}{X}\| - R}{\sqrt{1 - D^*}} - \sigma_y = 0$$

Prédiction élastique- Correction plastique

$\Delta\underset{\sim}{\varepsilon} = \Delta\underset{\sim}{\varepsilon}^e$ **SI** $f_{n+1} \leq 0$ **Solution élastique**

SINON

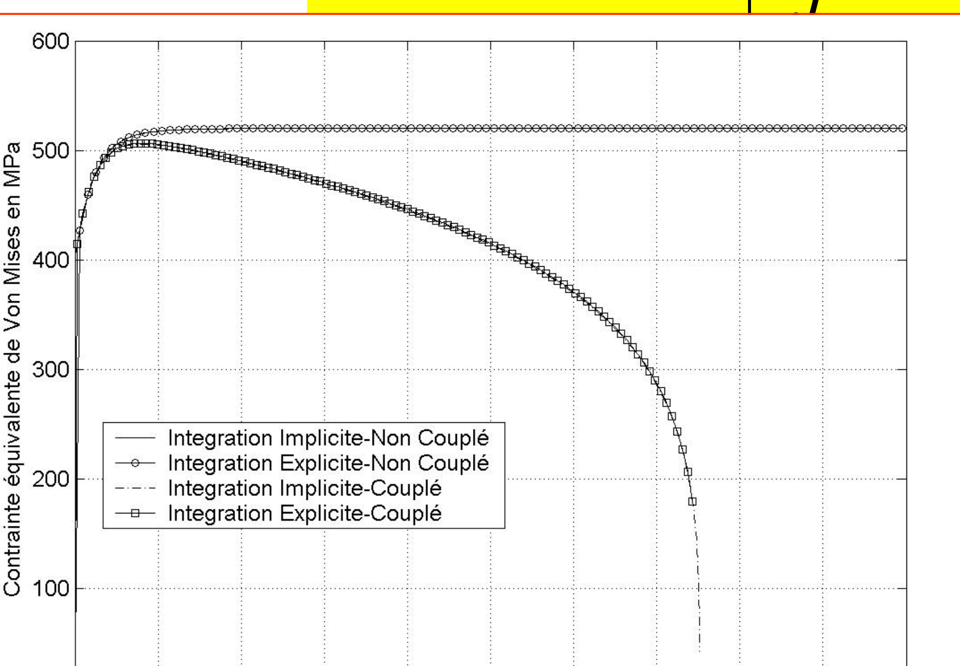
Correction plastique $\{H_{n+1}\} = 0$

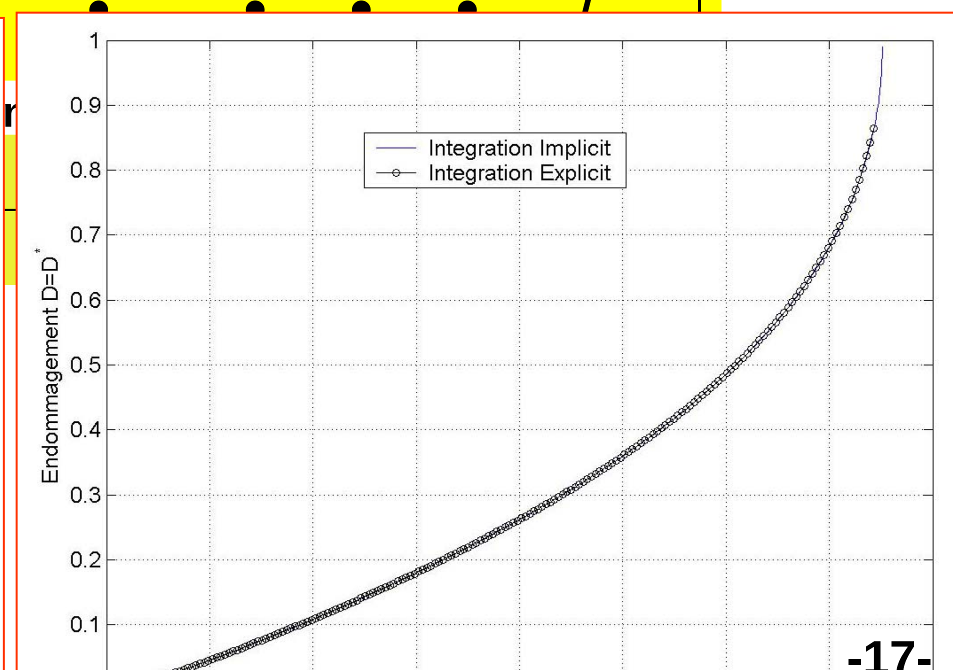
A convergence de l'itération s

$$\{\delta\Delta\underline{x}\}^s_{n+1} = -\left[\boldsymbol{J}^{-1}\right]^s_{n+1}\{H\}^s_{n+1}$$

$$\{\delta\Delta\underline{x}\}^s_{n+1} = \{\delta\Delta\underset{\sim}{\varepsilon}^e, \delta\Delta\underset{\sim}{\alpha}, \delta\Delta r, \delta\Delta D, \delta\Delta D^v, \delta\Delta p\}^s_{n+1}$$

$$\left[\boldsymbol{J}_{n+1}\right]^{-1} = \begin{bmatrix} \underset{\approx}{J}^{*}_{ee} & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \underset{\sim}{J}^{*}_{ep} \\ \underset{\approx}{J}^{*}_{\alpha e} & \underset{\approx}{J}^{*}_{\alpha\alpha} & & & & \\ \underset{\sim}{J}^{*}_{re} & & \bullet & & & \\ \underset{\sim}{J}^{*}_{De} & & & \bullet & & \\ \underset{\sim}{J}^{*}_{D^v e} & & & & \bullet & \\ J^{*} & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & J^{*} \end{bmatrix}$$





Intégration du modèle micro-macro

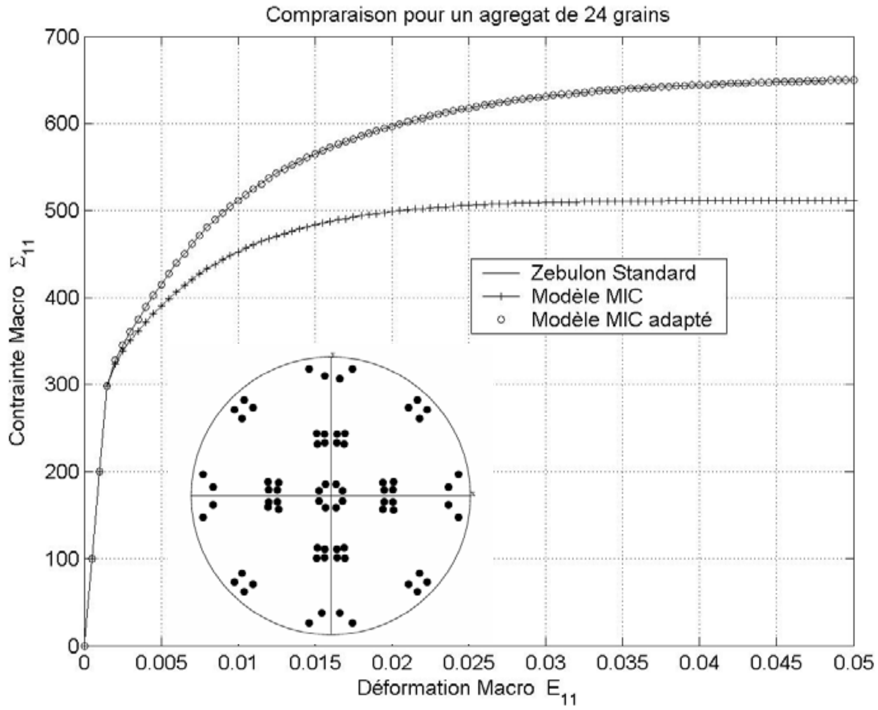
$$\langle \dot{\underline{Y}} \rangle = \langle \dot{\underset{\sim}{E}}^{e}, \dot{D}^{T}, \dot{\underset{\sim}{\beta}}^{g}, \dot{\lambda}^{s}, \dot{q}^{s}, \dot{d}^{s} \rangle$$

CFC → 12 systèmes cristallins →7+(6+3×12)×Ng EDO

$$\langle \underline{Y} \rangle_{n+1} = \langle \underline{Y} \rangle_{n} + \langle \Delta \underline{Y} \rangle$$
$$\langle \underline{Y} \rangle_{0} = \langle \underline{Y}_{0} \rangle$$

Runge-Kutta d'ordre 2

$$\langle \underline{K}_1 \rangle = \Delta t \Big\langle \dot{\underline{Y}}\big(t_n, \langle \underline{Y} \rangle_{t_n}\big) \Big\rangle$$
$$\langle \underline{K}_2 \rangle = \Delta t \Big\langle \dot{\underline{Y}}\big(t_n + \tfrac{1}{2}\Delta t, \langle \underline{Y} \rangle_{t_n} + \tfrac{1}{2}\langle \underline{K}_1 \rangle\big) \Big\rangle$$
$$\langle \Delta \underline{Y} \rangle = \langle \underline{K}_2 \rangle + O(\Delta t^3)$$



Différence en entre Zébulon standard et le modèle MIC en Non Couplé

$$\dot{\underset{\sim}{\beta}}^{g} = \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g} - a\underset{\sim}{\beta}^{g} \left\| \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g} \right\|$$

- Zébulon Standard

$$\left\| \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g} \right\| = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g} : \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g}}$$

- Modèle MIC

$$\left\| \dot{\underset{\sim}{\varepsilon}}_{p}^{g} \right\| = \sum_{s=1}^{Ns} \dot{\lambda}^{s}$$

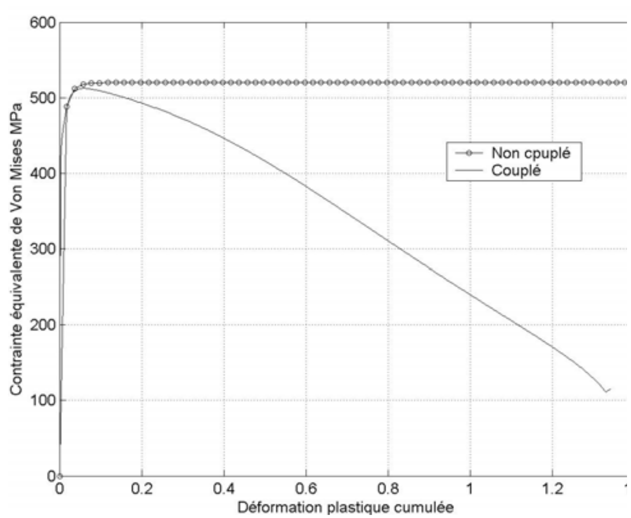
III.1 Application du modèle macroscopique

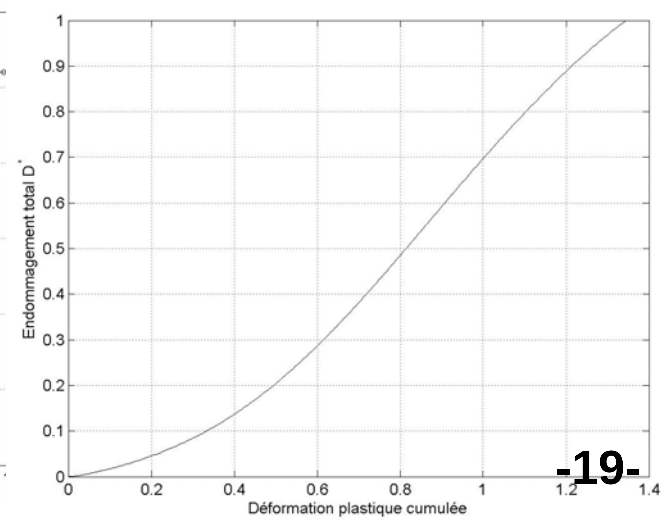
But : Comparaison avec le modèle de Gurson

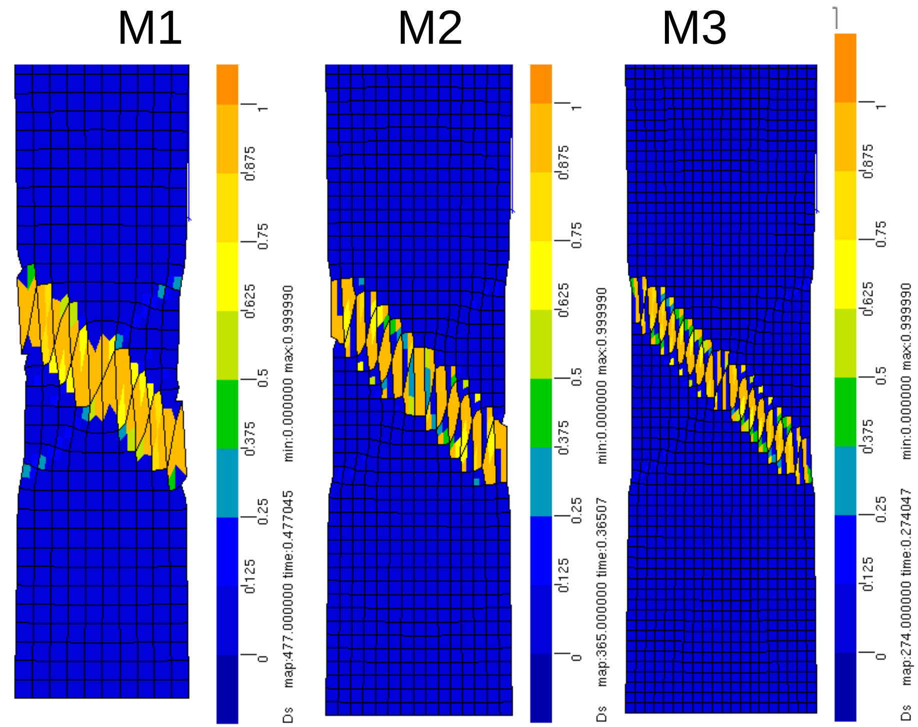
- Modèle MAC1 avec endommagement mixte (couplage fort)
- Modèle MAC2 avec endommagement volumique D^v seulement
- Modèle GUR (GTN du modèle de Gurson).

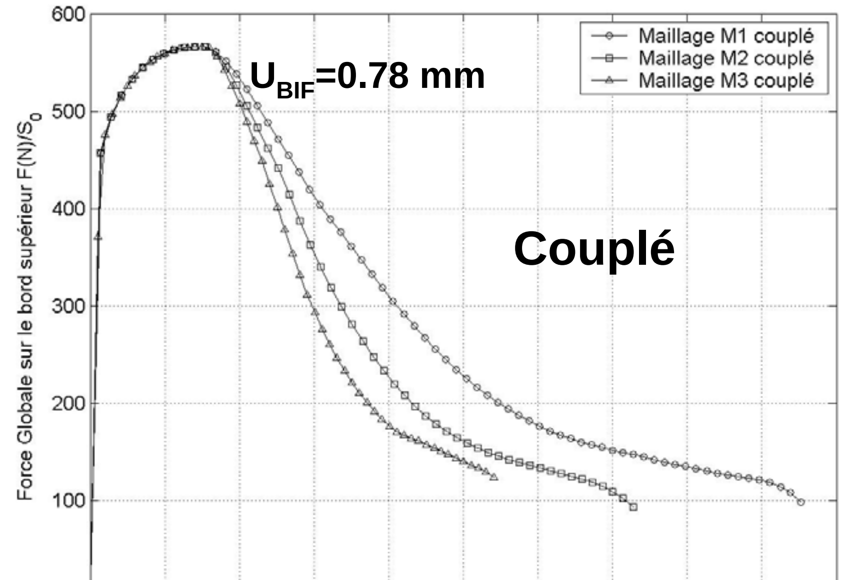
Etude du Modèle MAC1 (Couplage Fort)

Elasticité	Ecrouissage	Endommagement volumique	Endommagement
E=200000. MPa ν=0.3	σ_Y=400. MPa Q=1000.0 MPa b=50.0 C=10000. MPa a=100.	D_0=0 α=1 δ=1 Dcrit=0.005	β=2, s=1, S=8.35 MPa Y_0=0. MPa

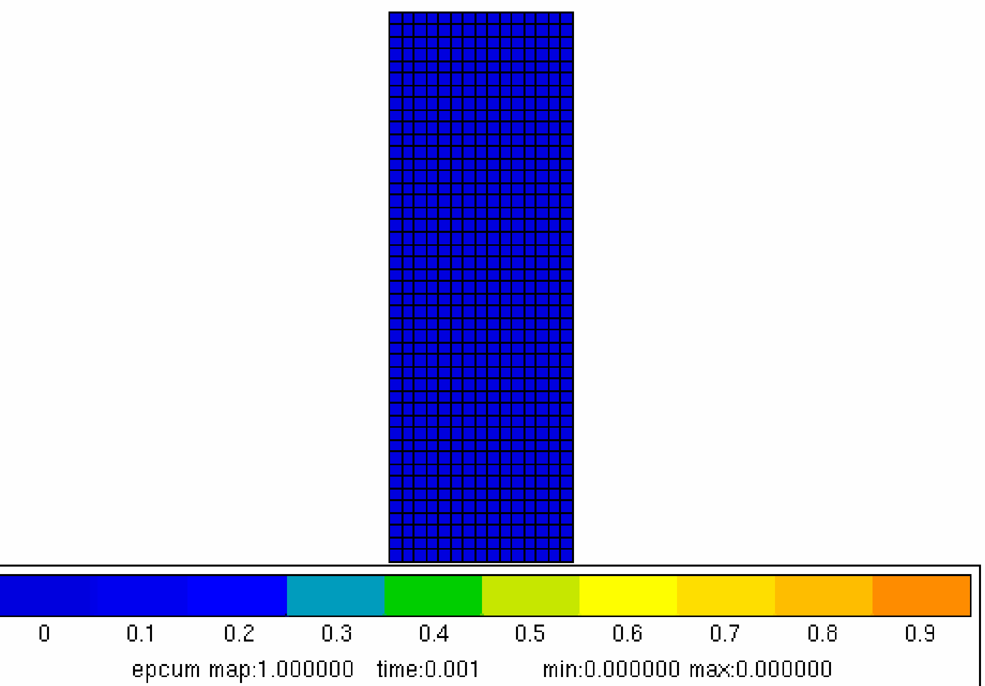


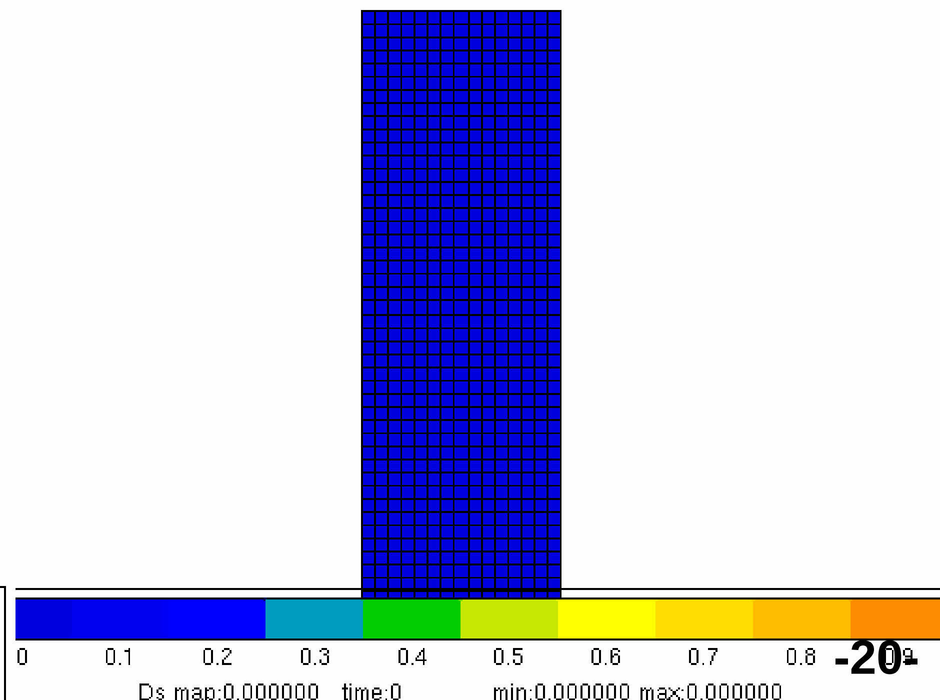






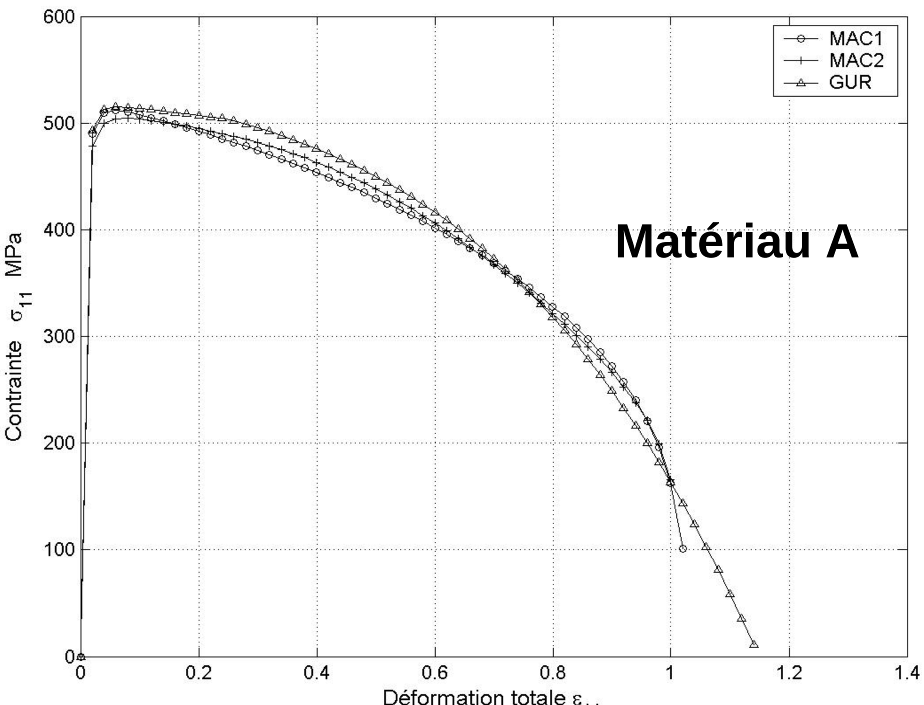
Ds Cas couplé (Zébulon)

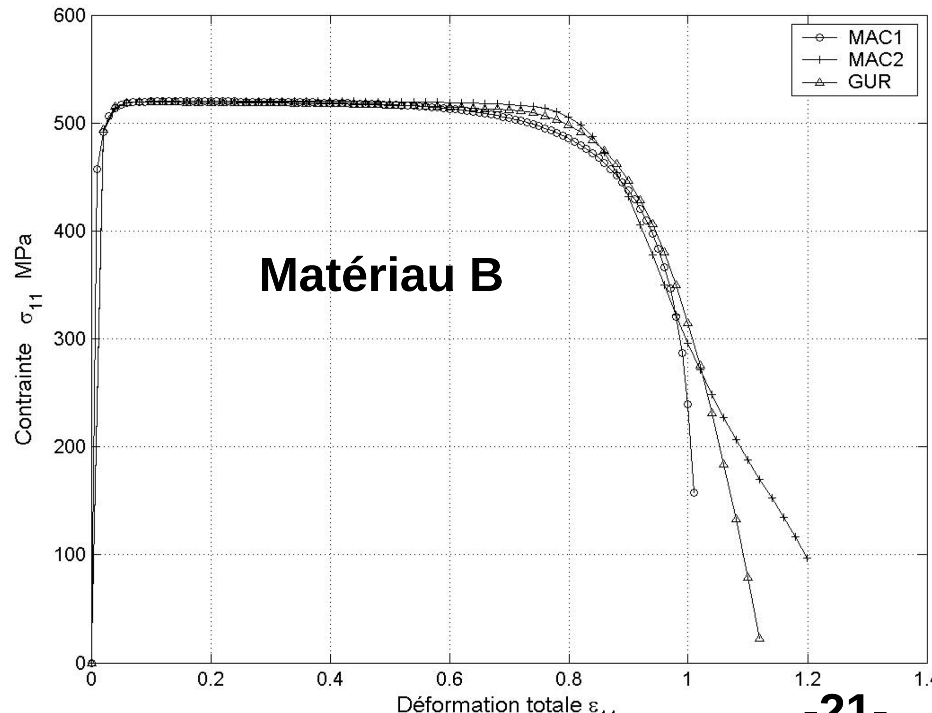


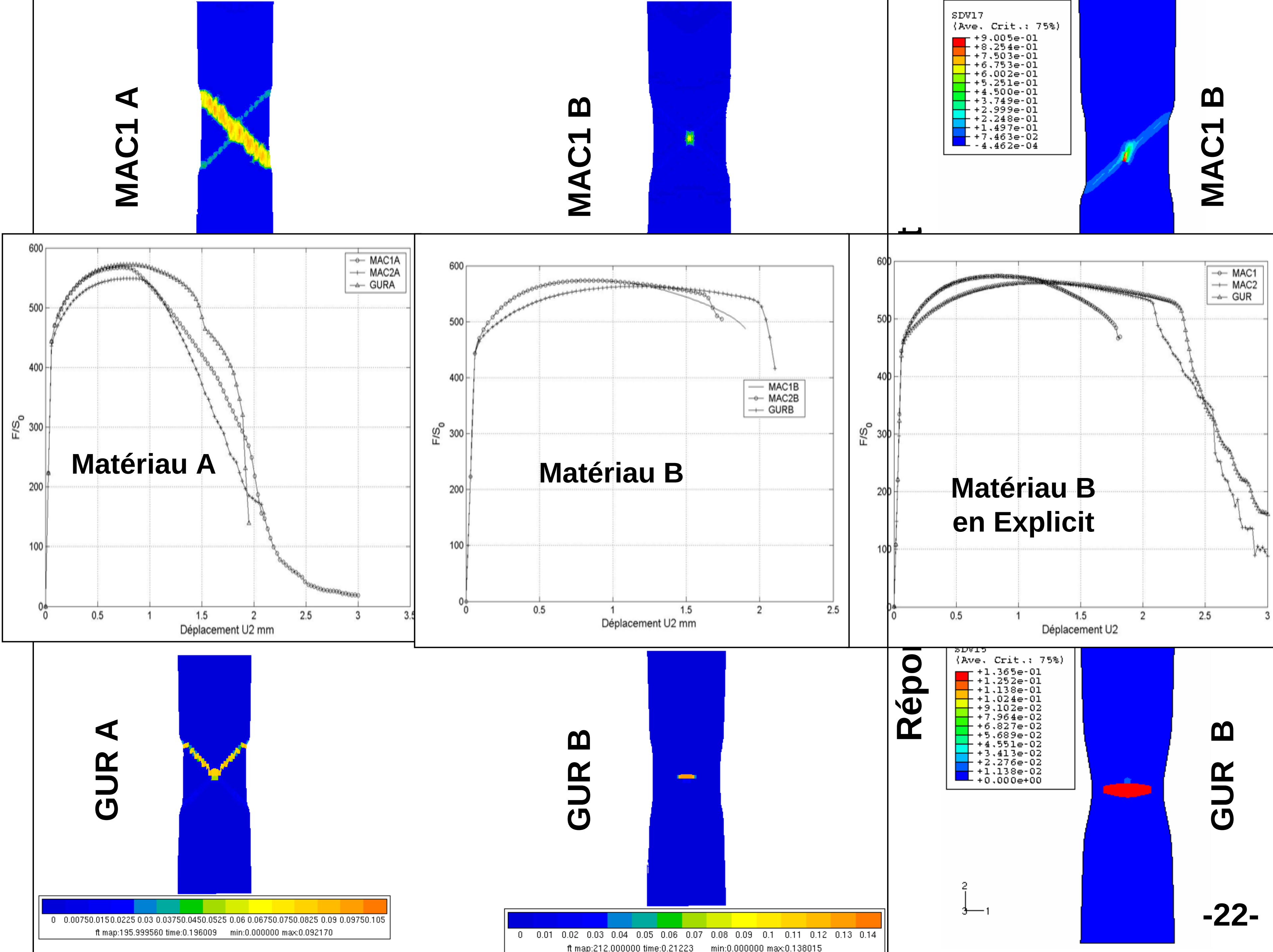


Comparaison MAC1, MAC2 et GUR

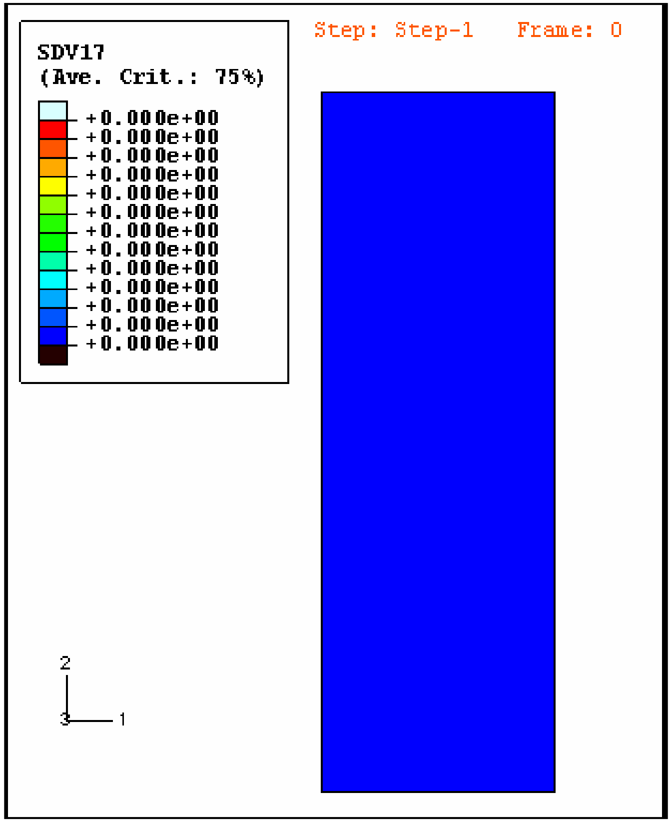
Endommagement	MAC1	MAC2	GUR
A	$\beta=2.$, $s=1.$, $S=4.$ MPa, $Y0=0.$ MPa, $\alpha=0,3$, $D_{crit}^{\varphi}=0.005$, et $\delta=1.$	$D0=0.0322$ $\alpha=0.638$ $D_{crit}^{\varphi}=0.005$ $\delta=2.02$	$q1=2.5$ $q2=1.45$ $f_c=0.005$, $\delta=3.$ $A=0.001$(nucléation constante
B	$\beta=0.7$, $s=1.$, $S=0,1$ MPa, $Y0=1.375$ MPa $\alpha=0.3$, $D_{crit}^{\varphi}=0.005$ et $\delta=1.$	$D0=1.e\text{-}6$ $\alpha=3.$ $D_{crit}^{\varphi}=0.005$ $\delta=2.$	$q1=5.81$ $q2=0.58$ $f_c=0.005$, $\delta=2.$ $A=0.0172$ (nucléation constante)

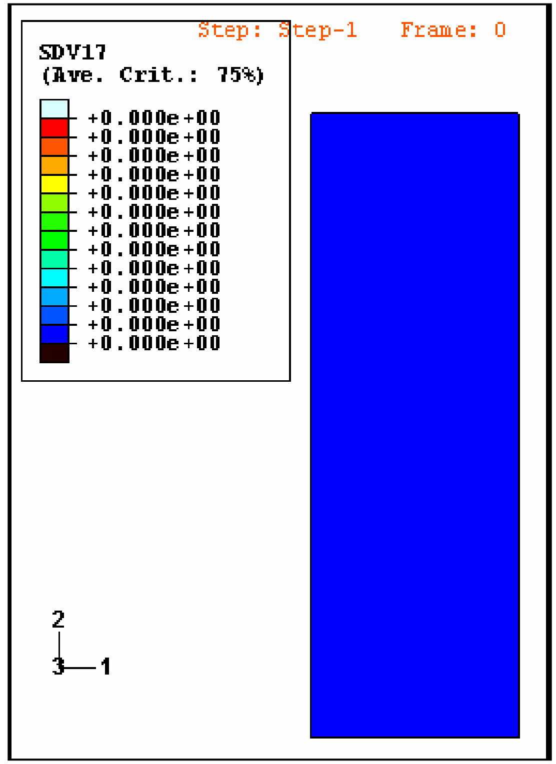


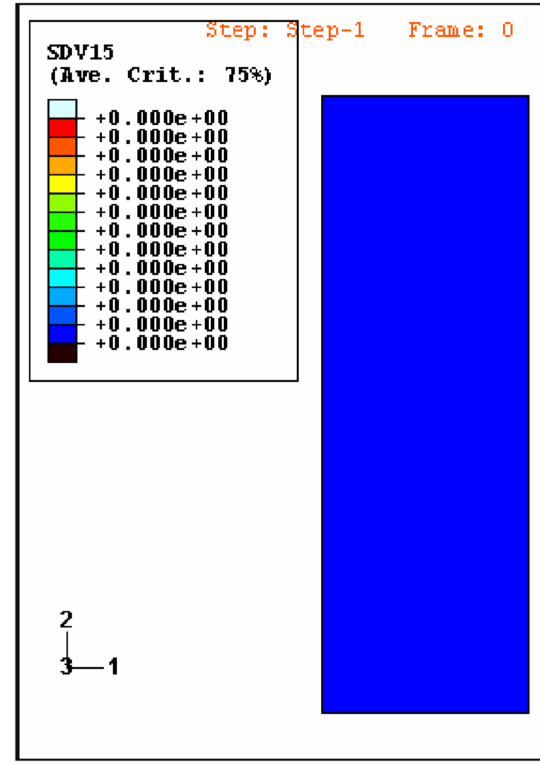



MAC1 A
MAC1 B
SDV17
(Ave. Crit.: 75%)
+9.005e-01
+8.254e-01
+7.503e-01
+6.753e-01
+6.002e-01
+5.251e-01
+4.500e-01
+3.749e-01
+2.999e-01
+2.248e-01
+1.497e-01
+7.463e-02
-4.462e-04
MAC1 B
Matériau A
MAC1A
MAC2A
GURA
F/S0
Déplacement U2 mm
Matériau B
MAC1B
MAC2B
GURB
F/S0
Déplacement U2 mm
Matériau B
en Explicit
MAC1
MAC2
GUR
F/S0
Déplacement U2
GUR A
0 0.0075 0.015 0.0225 0.03 0.0375 0.045 0.0525 0.06 0.0675 0.075 0.0825 0.09 0.0975 0.105
ft map:195.999560 time:0.196009 min:0.000000 max:0.092170
GUR B
0 0.01 0.02 0.03 0.04 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
ft map:212.000000 time:0.21223 min:0.000000 max:0.138015
(Ave. Crit.: 75%)
+1.365e-01
+1.252e-01
+1.138e-01
+1.024e-01
+9.102e-02
+7.964e-02
+6.827e-02
+5.689e-02
+4.551e-02
+3.413e-02
+2.276e-02
+1.138e-02
+0.000e+00
GUR B

Animations sur les endommagements (Abaqus/explicit)





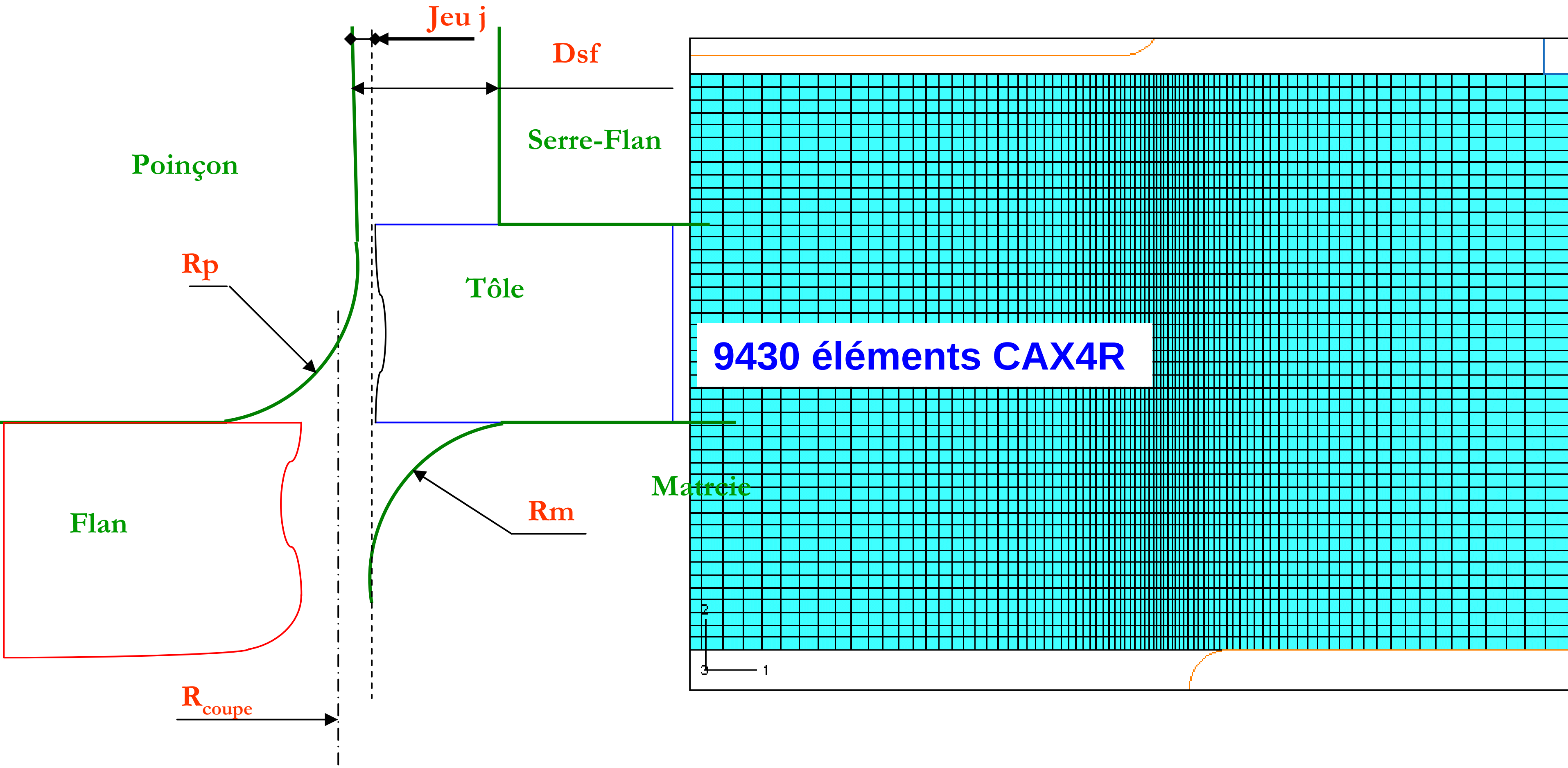


MAC1 B
Couplage fort D*

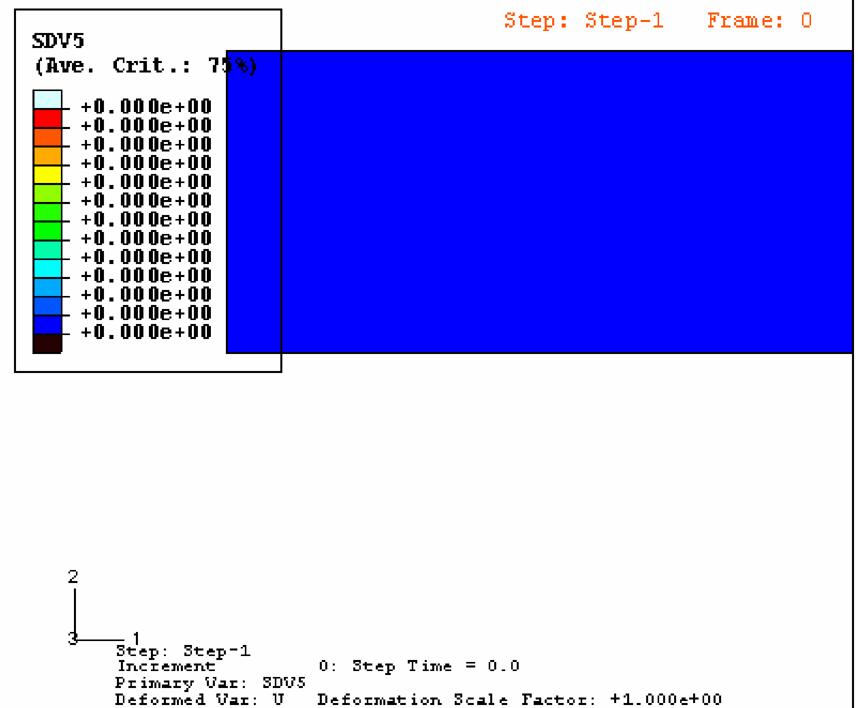
MAC2 B
Couplage avec D^v seulement

GUR B
Endommagement volumique

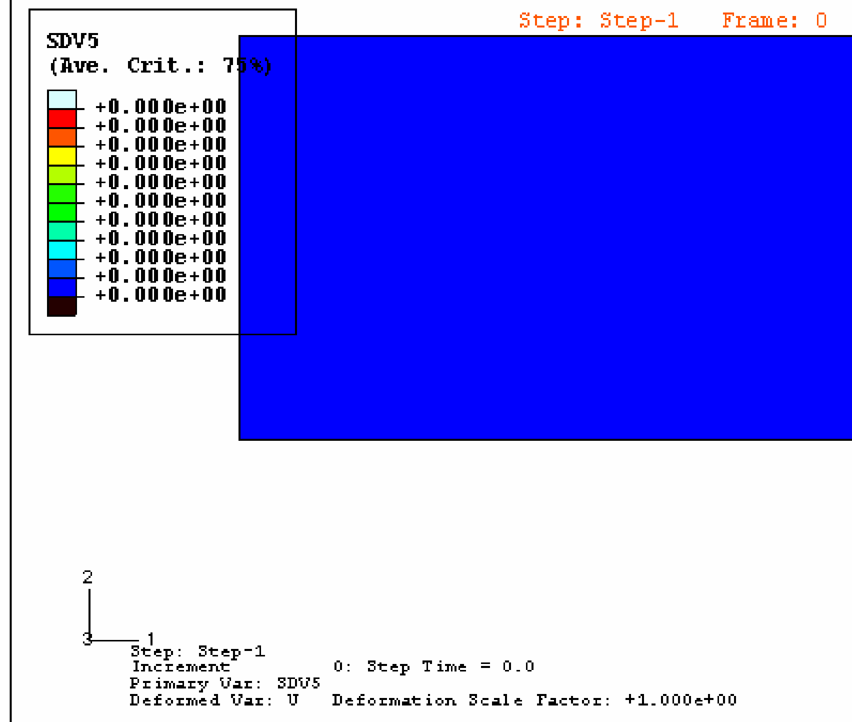
Comparaison des modèles sur un essai de poinçonnage



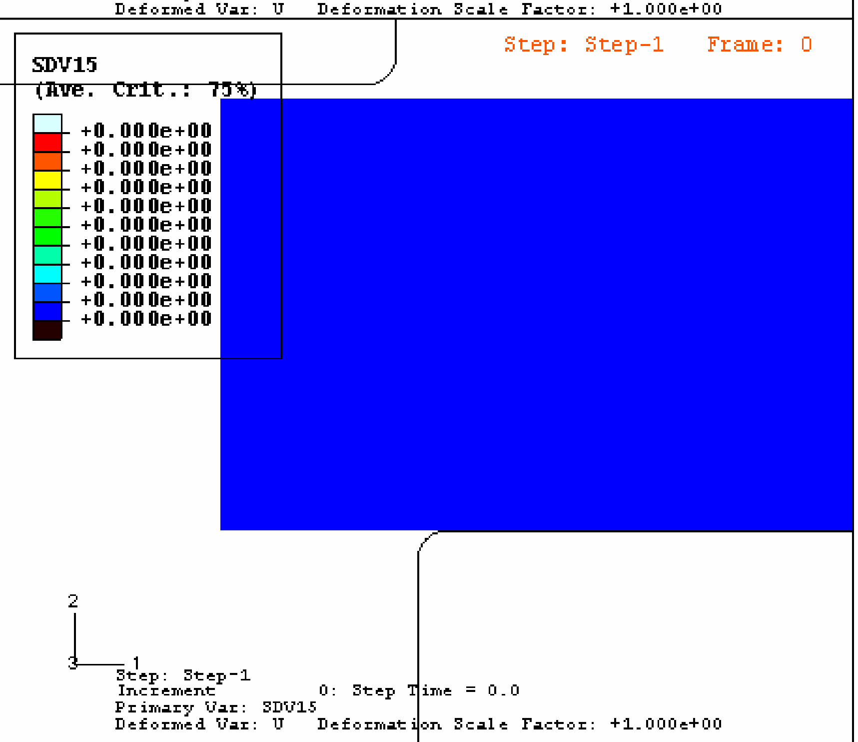
Jeu j (mm)	Rayon poinçon Rp (mm)	Rayon matrice Rm (mm)	Distance serr-flan poinçon Dsf (mm)	Epaisseur de la tole	Rayon de la tôle initiale(mm)	Rayon de coupe R_{coupe} (mm)
0.075	0.1	0.1	1	1.5	30	10



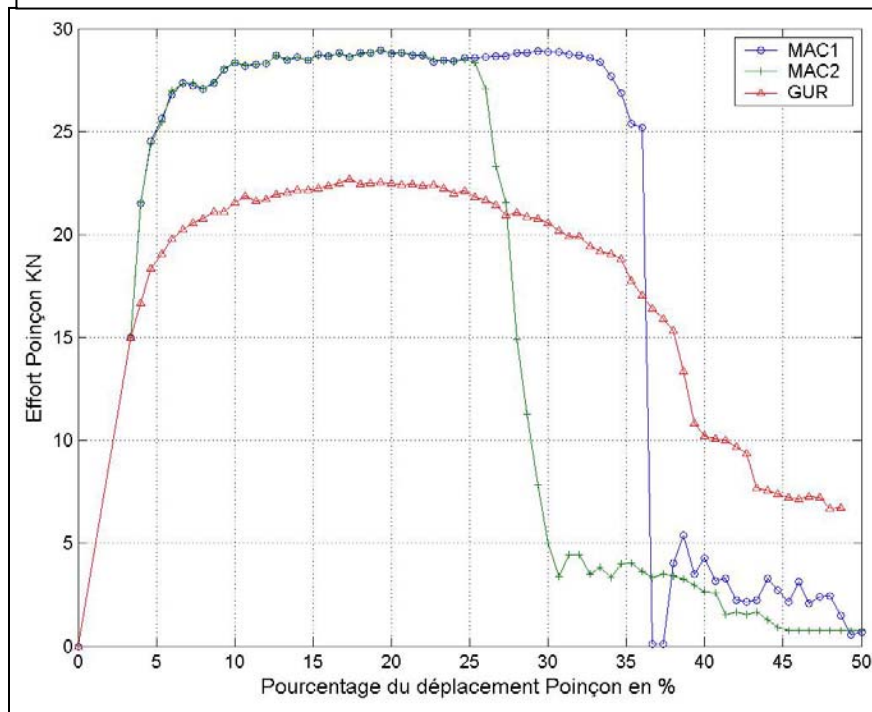
MAC1 B

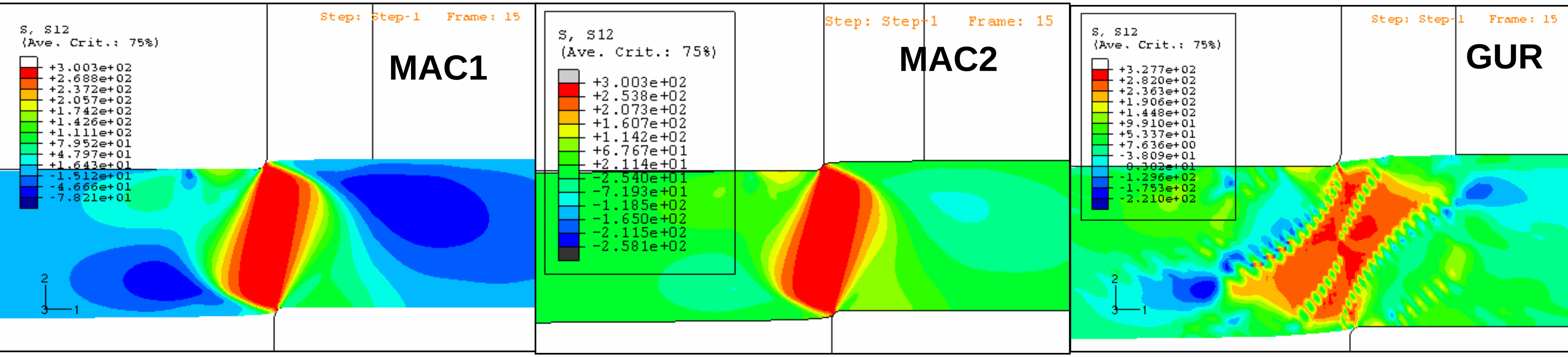


MAC2 B



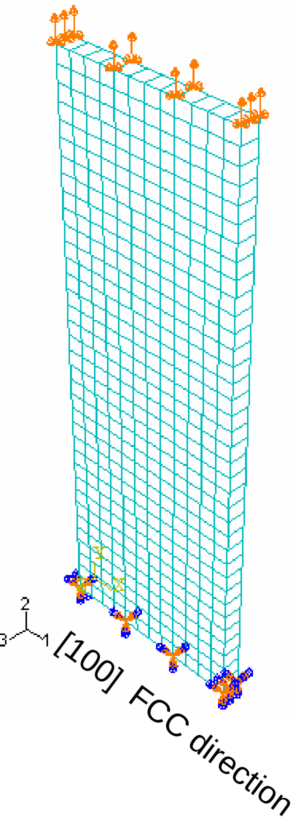
GUR B





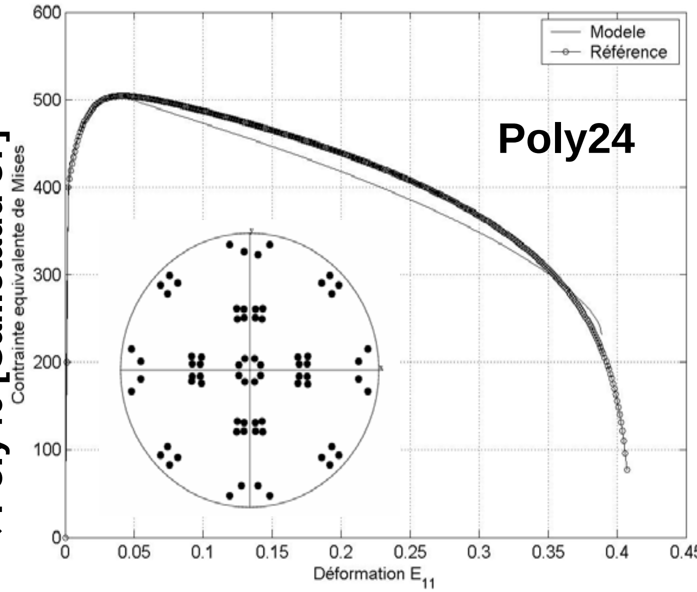
10 % pénétration poinçon

III.2 Application du modèle Micro-Macro



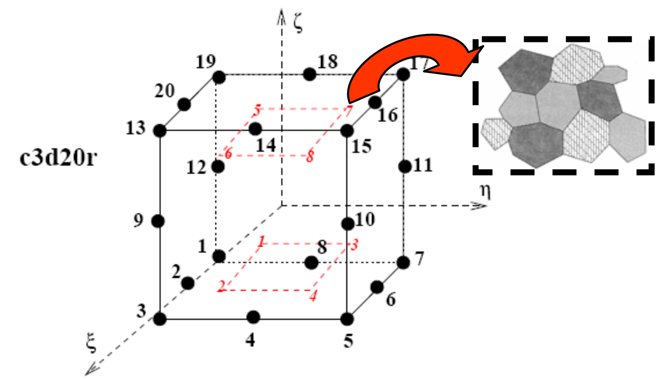
❖Poly24 [Bugat 00]

❖Poly40 [Cailletaud 87]



Éléments c3d20r

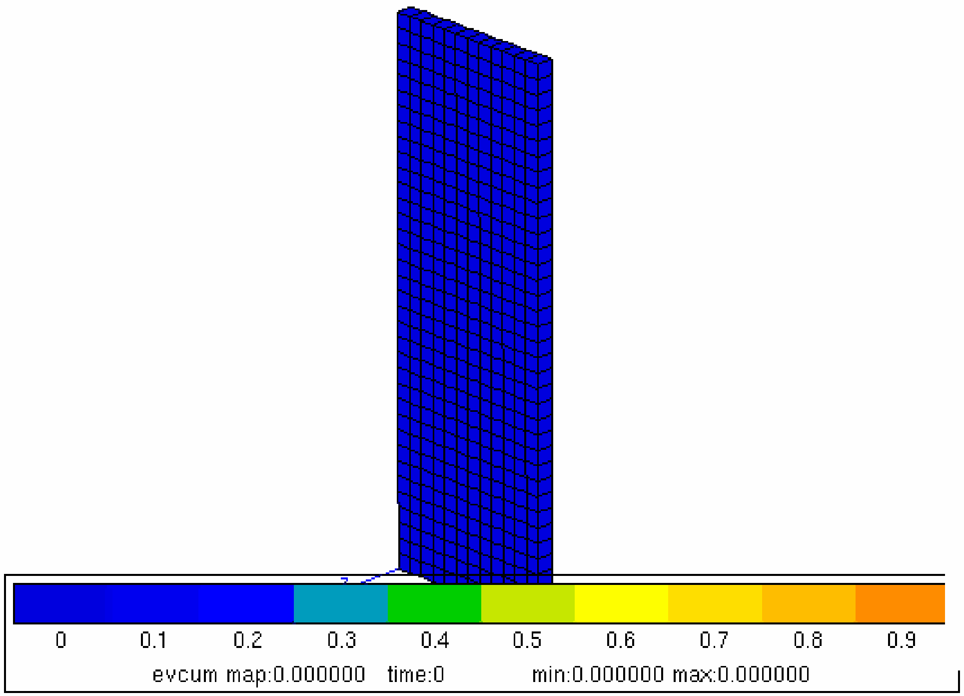
→ 8 Points Gauss



Coefficients du Poly24

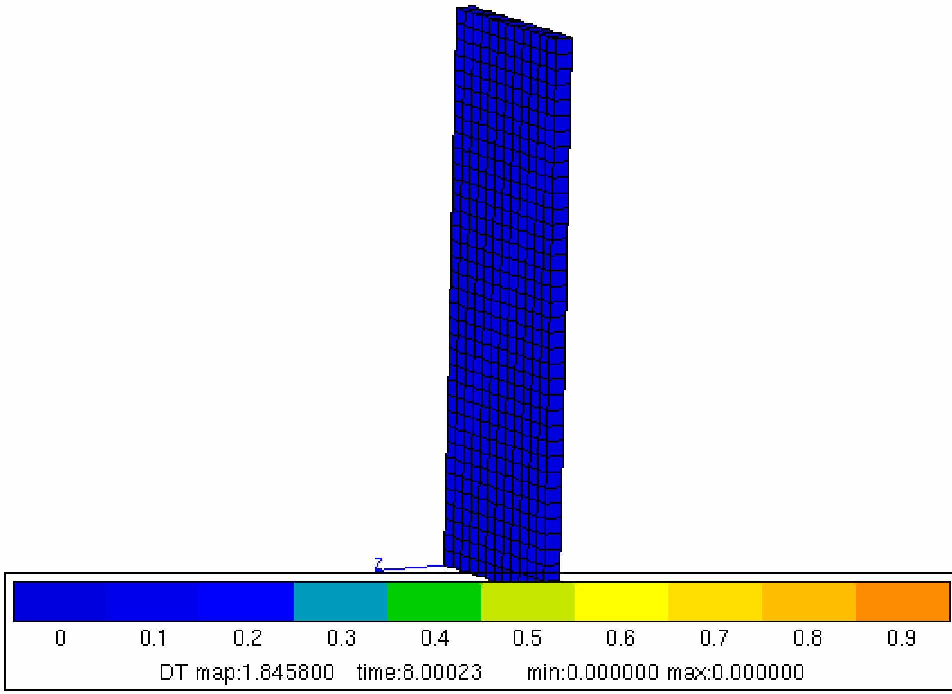
Elasticité macroscopique	Ecrouissage intergranulaire	Ecrouissage intragranulaire	Endommagement
E=200 GPa ν=0,3	C=30067,72 Mpa a=26,74716	σ0=145.Mpa Q=50. MPa b=74,788 h1=1., h2=1., h3=2. , h4=1.5, h5=1, h6=2,5 K=50 MPa, n=25.	S=1.2 MPa s=1,194 β=4,785 α=0,5 Y_0=0,03

Réponse du Poly24



Cas Non Couplé (Calcul Zébulon)

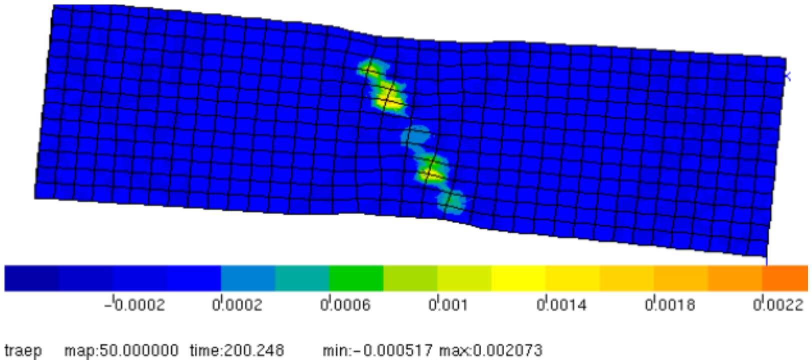
Déformation plastique cumulée macroscopique P



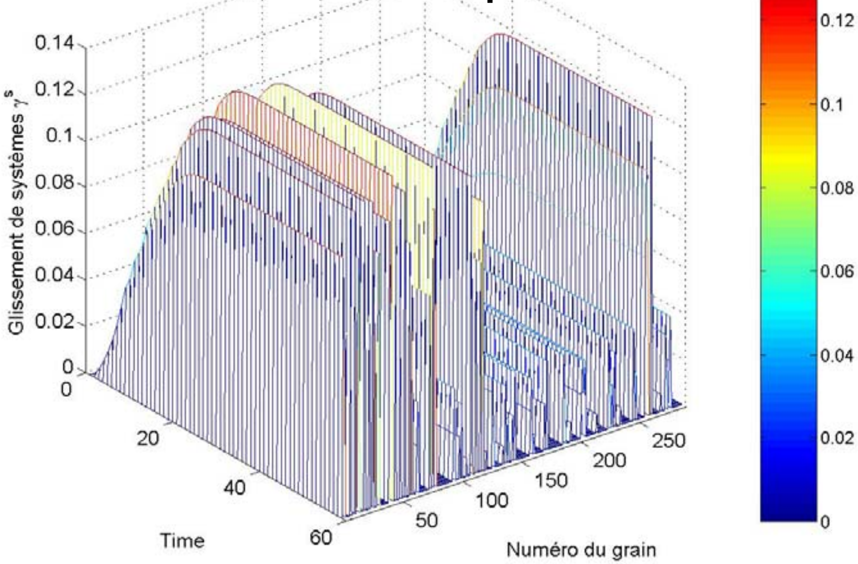
Cas Couplé (Calcul Zébulon)

Endommagement macroscopique D^T

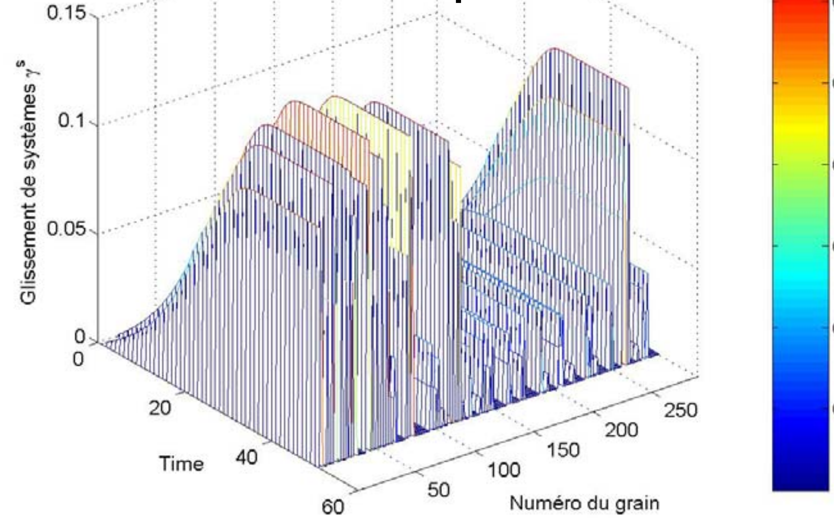
Déformation plastique volumique $Tr(E^p)$



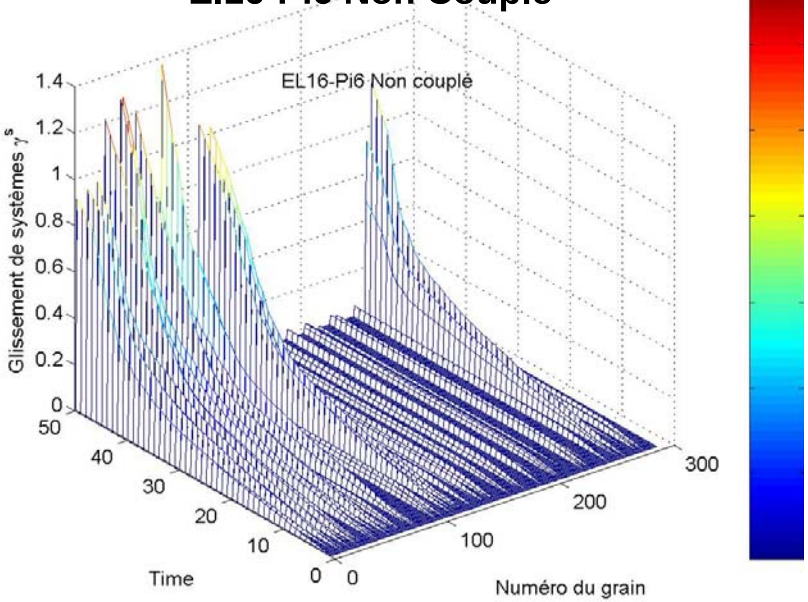
El351-Pi1 Non Couplé



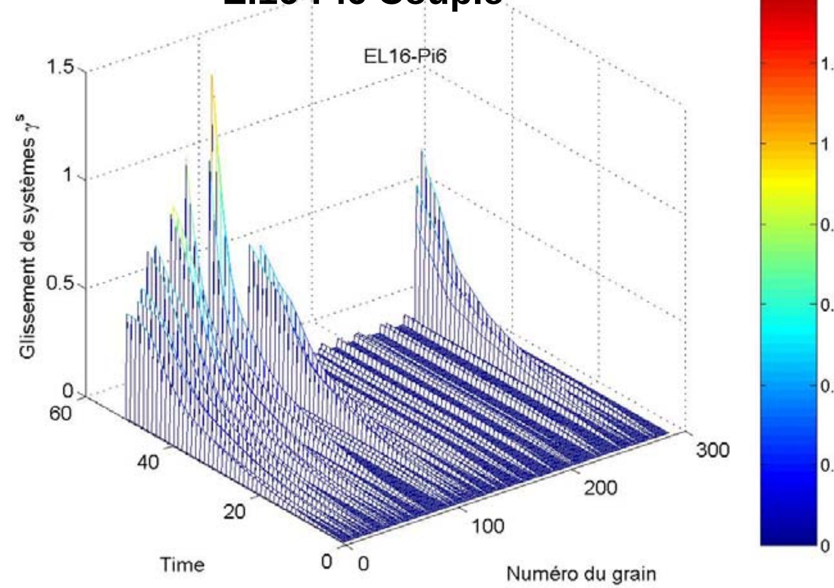
El351-Pi1 Couplé



El16-Pi6 Non Couplé

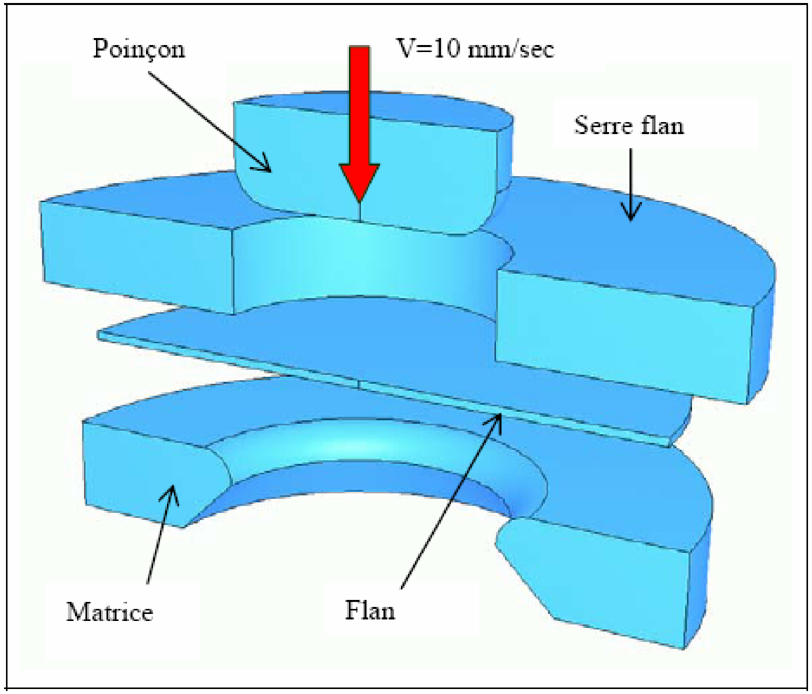


El16-Pi6 Couplé



Comparaison du Poly24 et MAC1 sur un procédé d'Emboutissage

Diamètre extérieur matrice = 80 mm ;
Diamètre intérieur matrice = 80 mm ;
Hauteur matrice = 10.5 mm ;
Petit rayon matrice = 4 mm ;
Diamètre extérieur serre flan = 33.9 mm ;
Diamètre intérieur serre flan = 90 mm ;
Petit rayon poinçon = 5 mm ;
Diamètre du flan = 73 mm ;
Epaisseur du flan = 1 mm

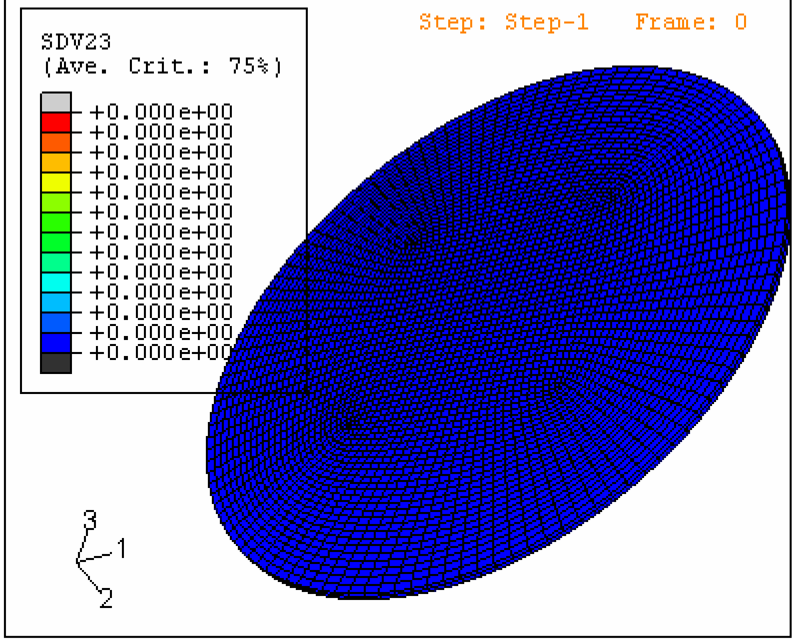


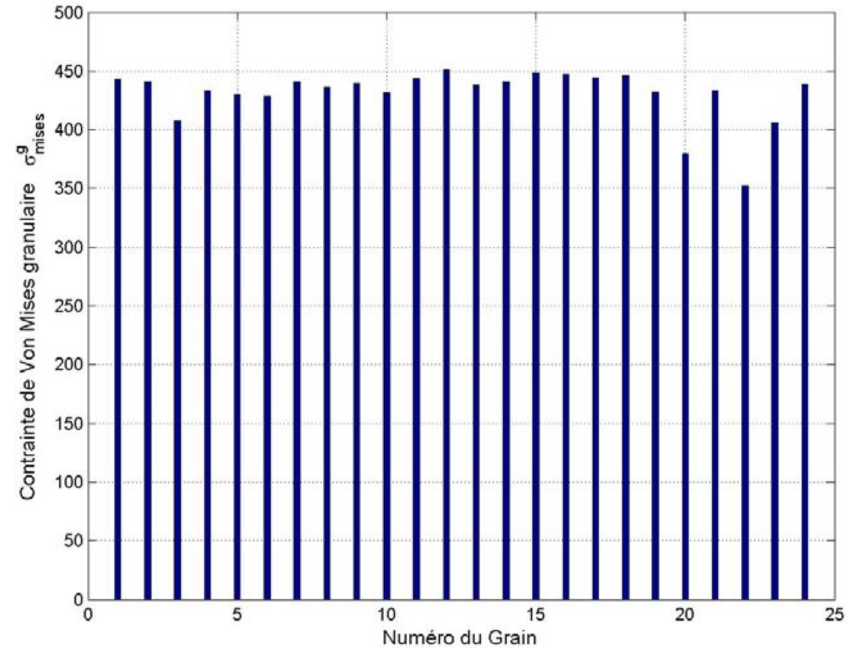
Essai Swift [KHE 04]

Matériaux

-Poly24

-Référence MAC1





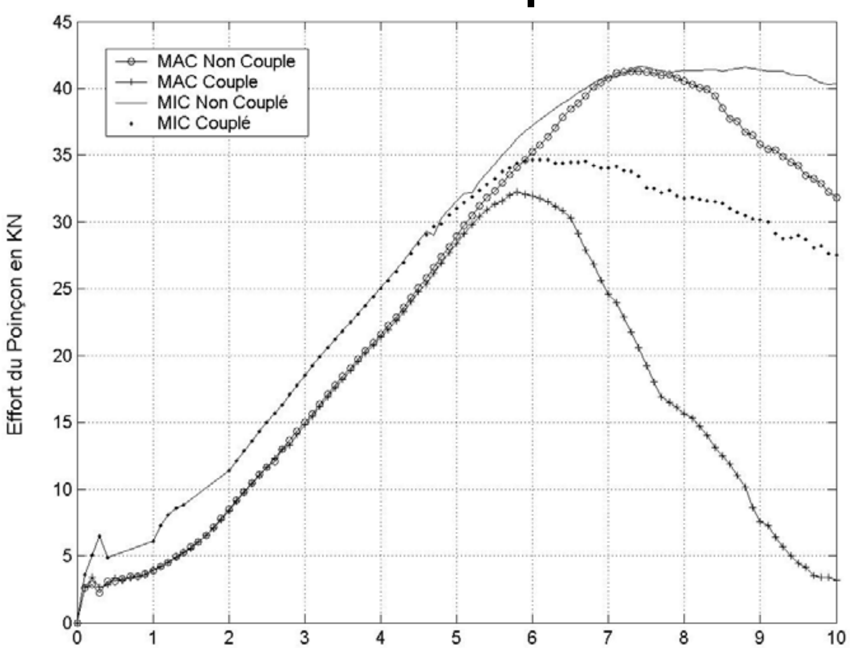
5

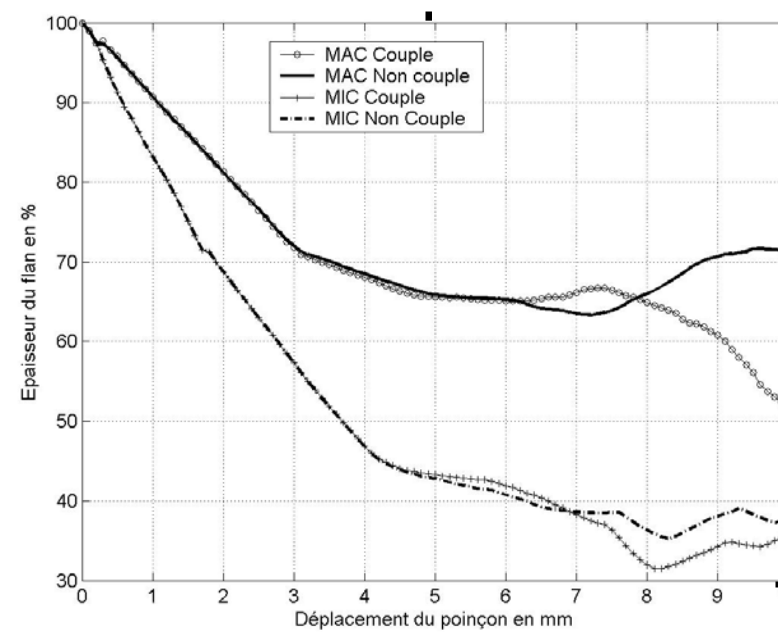
D* Modèle MAC1

0.6 0

Déformation plastique cumulée macroscopique

Courbe Force-Déplacement





utt
université de technologie Troyes

CONCLUSIONS

- ✓ Formulation de modèles : introduction d'une compressibilité plastique induite par l'endommagement ductile en MACRO et MICRO-MACRO
- ✓ Intégration numérique et implémentation des modèles de ces modèles de comportement.
- ✓ Application sur des cas de calcul de structures simples :
- \- Essai de traction : étude de la localisation
- \- Matériaux à endommagement fortement non linéaire !
- \- Réponses cohérentes des modèles micro-macros et macros.
- ✓ Applications à des essais de mise en forme
- \- Incapacité du modèle de Gurson à simuler les procédés de cisaillage.
- \- Bonne prédiction des modèles proposés pour la simulation des procédés de formage de tôles (emboutissage et poinçonnage).

PERSPECTIVES

-Valoriser l'apport des modèles micro-macros : anisotropie de l'écoulement plastique avec endommagement, …

-Etude de l'influence de l'endommagement sur les évolutions texturales.

-Etude expérimentale sur des matériaux réels (thèse en cours [Hfaiedh]) pour corrélation avec les deux familles de modèles (adaptation des modèles si nécessaire).

- Réaliser des études expérimentales afin d'alimenter les modèles

-Calcul d'agrégats réels qui nécessite le développement de Techniques de maillage, Techniques de calcul parallèle …

MERCI

$$\dot{d}^s = \dot{\lambda}^s \left\langle \frac{Y^s - Y_0}{S} \right\rangle^{\beta} \frac{1}{(1-d^s)^m}$$

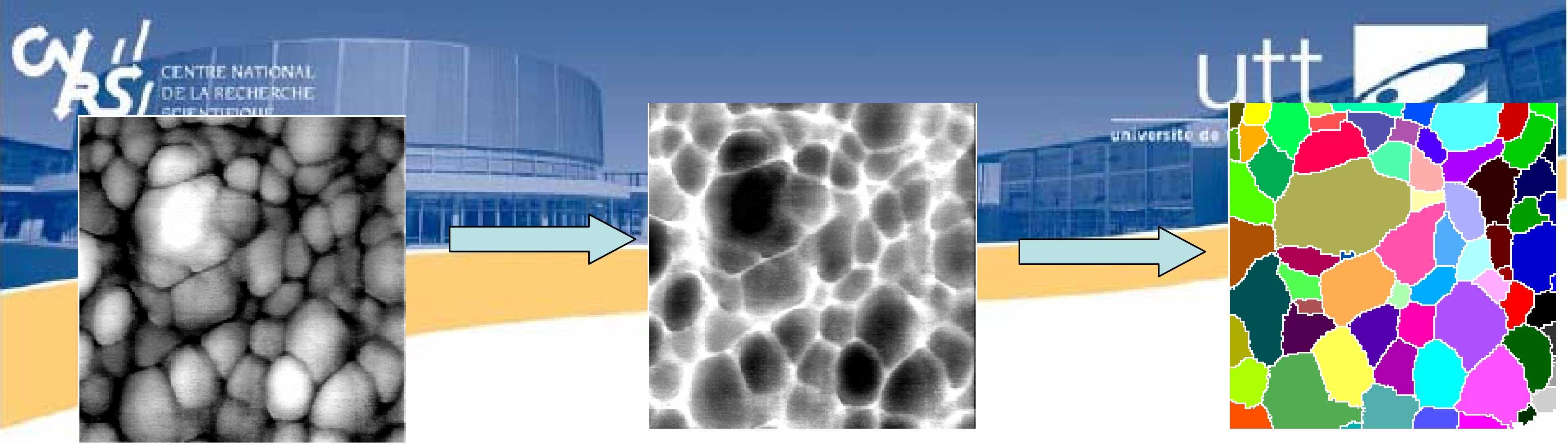
$$Y^s = \frac{1}{2}\frac{q^s}{(1-d^s)} R^s$$

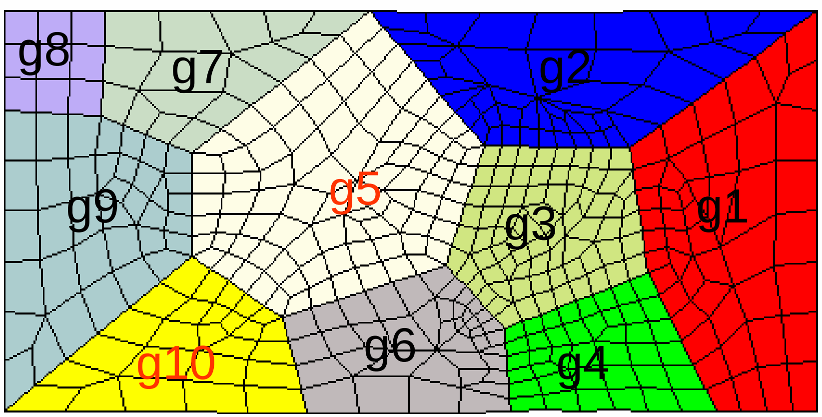
$$R^s = Q\sqrt{1-d^s}\sum^{Ns} H^{sr}\sqrt{1-d^r}\, q^r$$

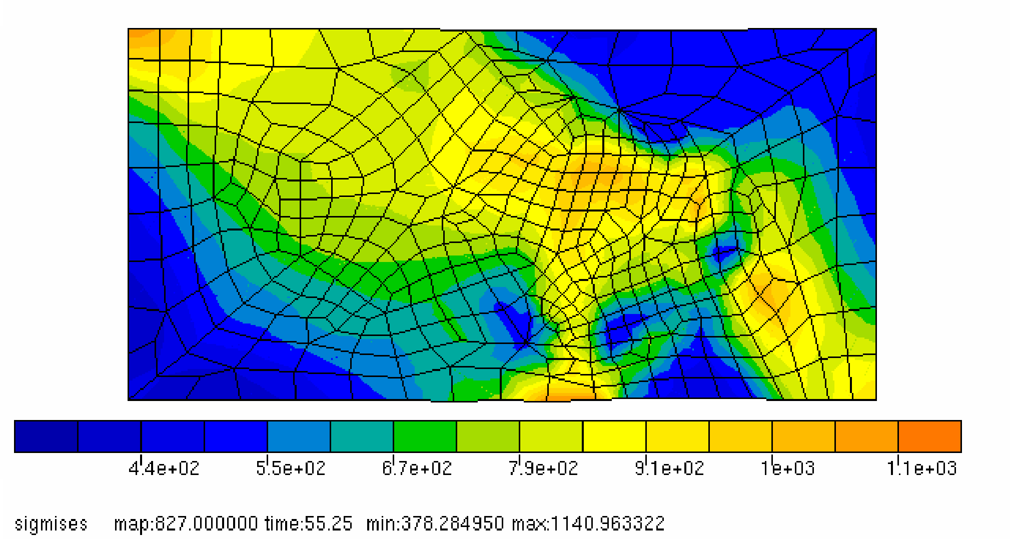
$$\dot{\lambda}^s = \left\langle \frac{\dfrac{\left|\left[\underset{\sim}{\Sigma} + C\left(\sum_{g=1}^{Ng} f^g \underset{\sim}{\beta}^g - \underset{\sim}{\beta}^g\right)\right] : \underset{\sim}{m}^s\right| + \alpha D^g \left\langle \left[\underset{\sim}{\Sigma} + C\left(\sum_{g=1}^{Ng} f^g \underset{\sim}{\beta}^g - \underset{\sim}{\beta}^g\right)\right] : \underset{\sim}{\eta}^s \right\rangle - R^s}{\sqrt{1-d^s}} - \tau_0}{K} \right\rangle^n$$

$$\dot{D}^T = \sum_{g=1}^{Ng'} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} \dot{d}^s$$

$$\int \dot{D}^T dt = \int \sum_{g=1}^{Ng'} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} \dot{d}^s dt \neq D^T = \sum_{g=1}^{Ng'} f^g \sum_{s=1}^{s=Ns} d^s$$


CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
utt
université de


g8
g7
g2
g9
g5
g3
g1
g10
g6
g4


4.4e+02
5.5e+02
6.7e+02
7.9e+02
9.1e+02
1e+03
1.1e+03
sigmises map:827.000000 time:55.25 min:378.284950 max:1140.963322