

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



SIMULATION AVEC CASTEM D'ESSAIS  
MÉCANIQUES RÉALISÉS SUR DES  
PORTIONS DE TUBES DE GAINAGE DE  
CRAYONS COMBUSTIBLES, PILOTÉS À  
L'AIDE D'UN RÉGULATEUR  
PROPORTIONNEL INTÉGRAL DÉRIVÉ  
(PID)

Club CAST3M 2013. David LE BOULCH, Matthew BONO, Roger LIMON

28 NOVEMBRE 2013

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

## Contexte

Essais sur portions de gaines de crayons combustibles

## Simulation des essais mécaniques au LCMI

Simulation en un point avec « MISTRAL autonome »

Simulation par éléments-finis avec CAST3M

## Simulation des essais de pression interne

Essais pilotés en contrainte ou pilotés en déformation à l'aide d'un régulateur PID

Simulation des essais pilotés en déformation à l'aide d'une procédure GIBIANE qui s'apparente à un régulateur PID numérique

## Simulation des essais de compression de mandrin du SCIP

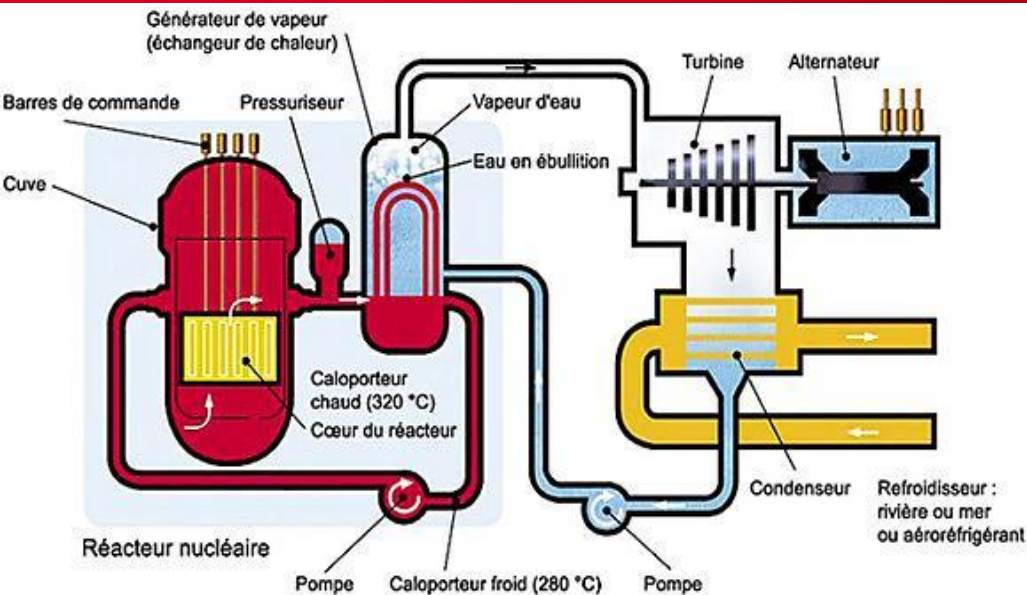
Principe des essais de compression de mandrin

Simulation par éléments-finis avec CAST3M

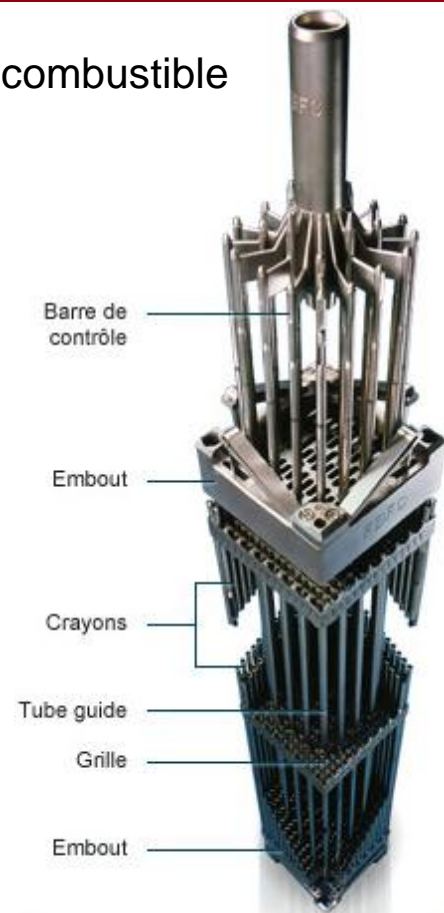
## Conclusions

**CONTEXTE**  
**LABORATOIRE DE COMPORTEMENT**  
**MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX**  
**IRRADIÉS (LCMI)**

# ESSAIS SUR PORTIONS DE GAINES DE CRAYONS COMBUSTIBLE



Assemblage combustible



Exemples d'éprouvettes usinées dans des gaines de crayons combustibles

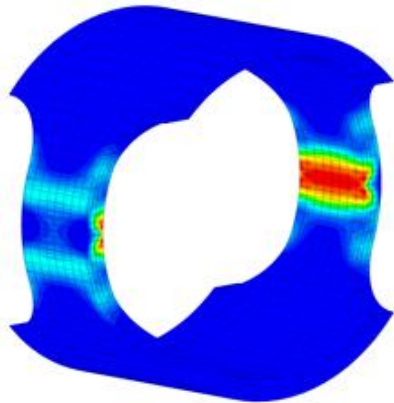


# **SIMULATION DES ESSAIS DU LCMI**

MISTRAL est un catalogue de lois de comportement (visco)-plastiques anisotropes développé au LCMI (R. Limon)

MISTRAL est utilisable:

- Via le module « MISTRAL autonome » qui permet de simuler la réponse en un point d'un modèle de comportement de MISTRAL.
  - dans le cas où il est possible de considérer que les contraintes et les déformations sont homogènes dans l'éprouvette.
- Via CASTEM
  - dans le cas où les contraintes et les déformations ne sont pas homogènes dans l'éprouvette.



Buts:

- établir un formalisme de comportement viscoplastique pour les matériaux de gainage,
- identifier les paramètres correspondants sur la base des résultats d'essais disponibles.

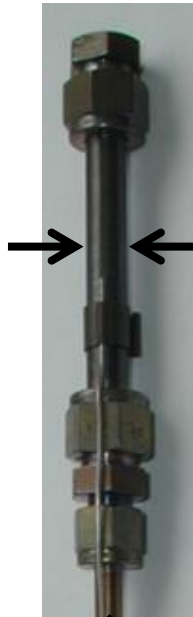
**SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION  
INTERNE PAR ÉLÉMENTS-FINIS AVEC  
CAST3M**

# SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE

Pilotage en contrainte

Pilotage en déformation

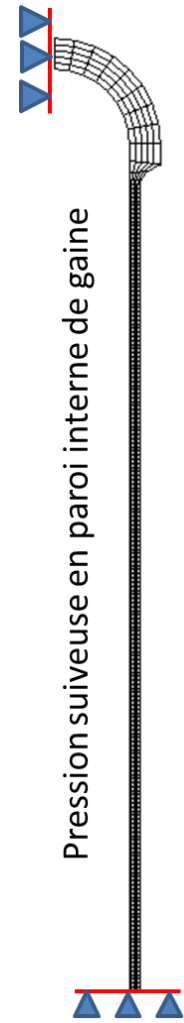
$$DS = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_0}$$



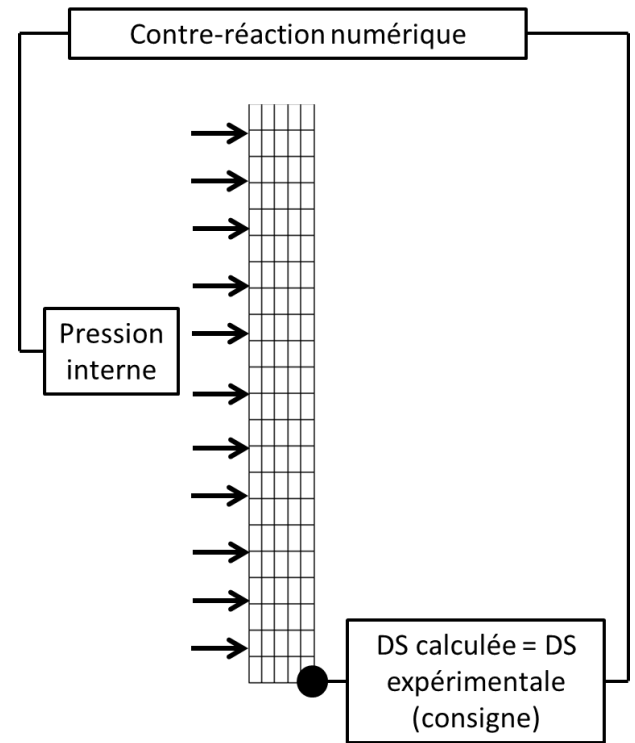
Mesure de la déformation diamétrale DS à l'aide d'une nappe laser

Régulateur PID

Pression interne imposée



Exemple de calculs par éléments-finis en 2D axisymétrique, pilotés en déformation diamétrale DS.





La contre-réaction numérique s'apparente à un régulateur PID numérique, implanté dans une procédure en GIBIANE.

La procédure est appelée à chaque pas de temps de calcul dans PERSO1 de PASAPAS. Elle évalue la pression interne  $P(t)$  en fonction de l'erreur  $ERR0(t)$  entre DS calculée en paroi interne de gaine et sa consigne.

$$P(t) = k_P \cdot ERR0(t - dt) + k_I \cdot \int_0^{t-dt} ERR0 \cdot dt + k_D \cdot \frac{d(ERR0(t - dt))}{dt}$$

Les paramètres du « régulateur PID numérique » sont  $k_P$ ,  $k_I$  et  $k_D$ .

Les calculs sont menés à l'aide d'une procédure de pilotage automatique du pas de temps qui impose une valeur minimale du pas de temps ( $dt > dt_{\min}$ ) et une variation maximale de la déformation au cours d'un pas de temps ( $\Delta\varepsilon < \Delta\varepsilon_{\max}$ ).

# VISCOPLASTIC BEHAVIOR OF THE CLADDING (MISTRAL)

The equivalent viscoplastic strain rate is written as a combination of a primary strain rate  $V_p$  and a secondary strain rate  $V_s$

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} = V_s + \left( (V_p - V_s) \exp\left(-\frac{\varepsilon_{eq}^{vp}}{\varepsilon_0}\right) \right)$$

$V_p$  and  $V_s$  are written as a function of the Hill stress ( $\sigma_{Hill}$ ), the temperature  $T$  and the irradiation of the material ( $\phi$ =fluence).

$$V_p = V_{p0}(\sigma_{Hill}, T) \cdot V_{pf}(\phi) \quad V_s = V_{s0}(\sigma_{Hill}, T) \cdot V_{sf}(\phi)$$

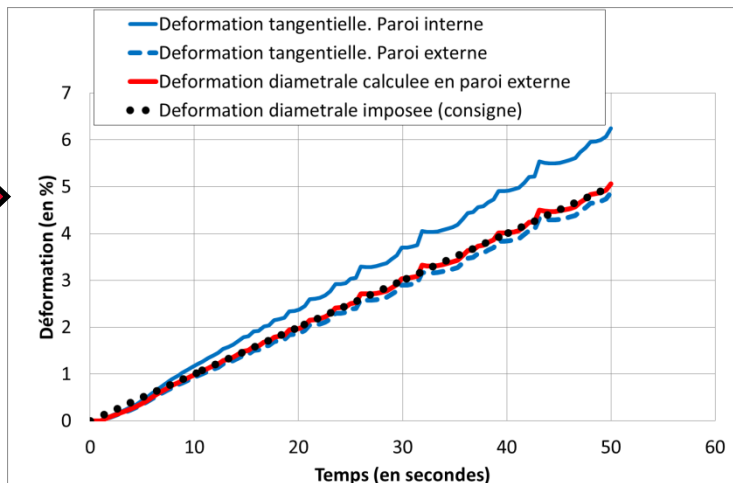
Assumptions of the model:

- 1) Cladding = Anisotropic viscoplastic behavior (through the use of the  $\sigma_{Hill}$ )
- 2) Cladding = Homogeneous media (in the frame of the continuum mechanics)

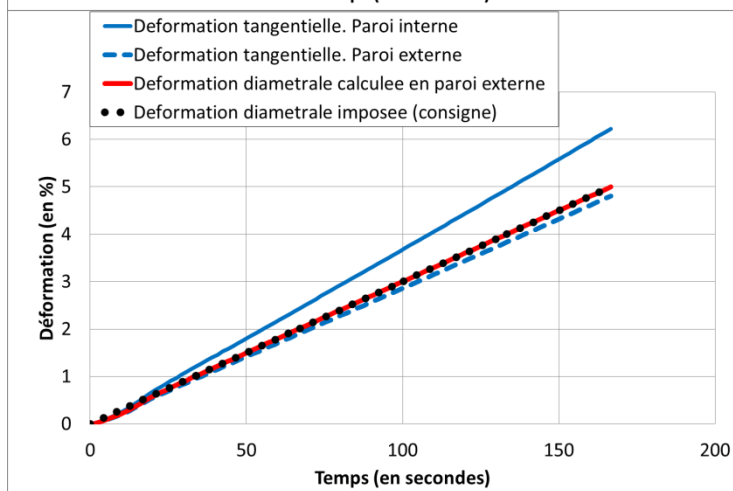
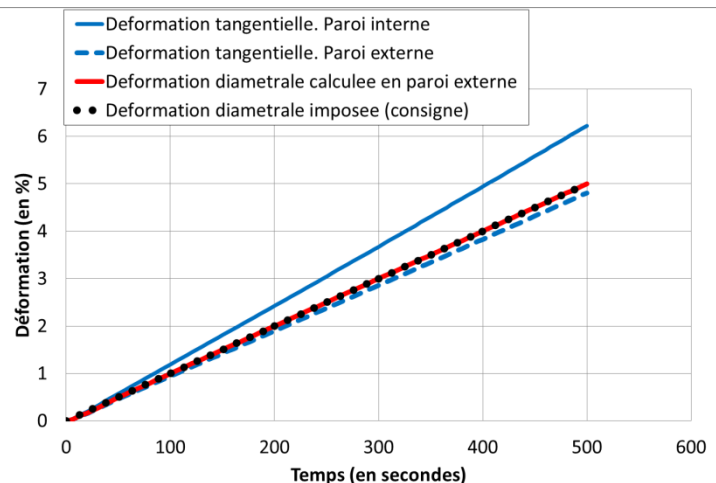
A. SONIAK, N. L'HUILLIER, J.P. MARDON, V. REBEYROLLE, P. BOUFFIOUX, C. RENAUDAT, "Irradiation creep Behavior of Zr-Base Alloys", Thirteenth International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry (2002), ASTM STP 1423.

# SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE

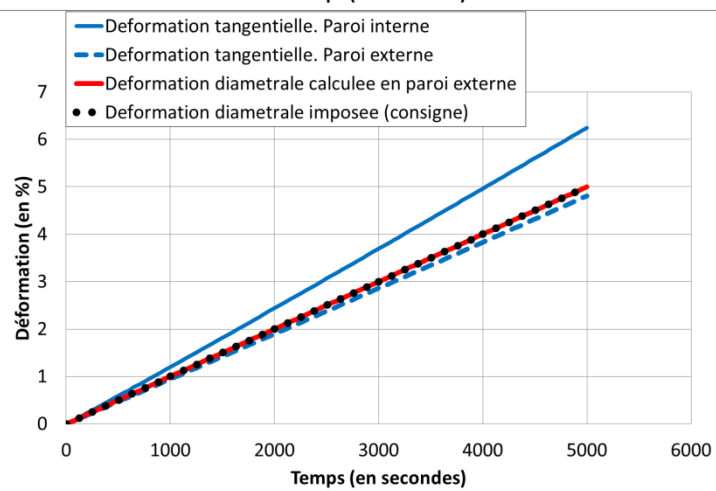
$V=dDS/dt=10^{-3} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$



$V=dDS/dt=10^{-4} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$



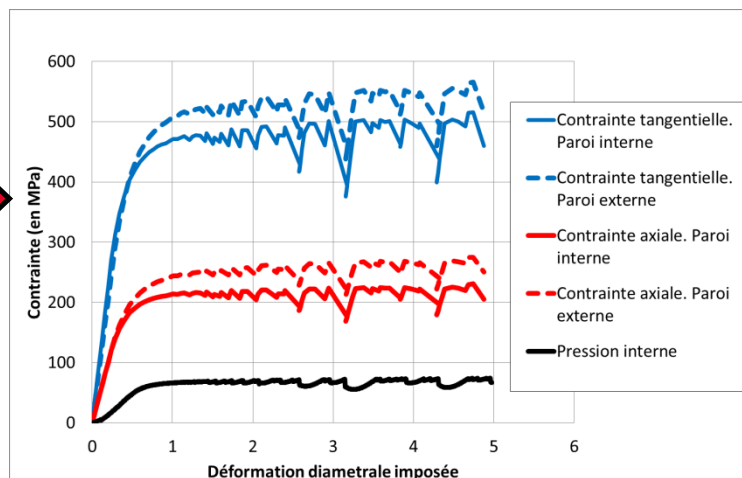
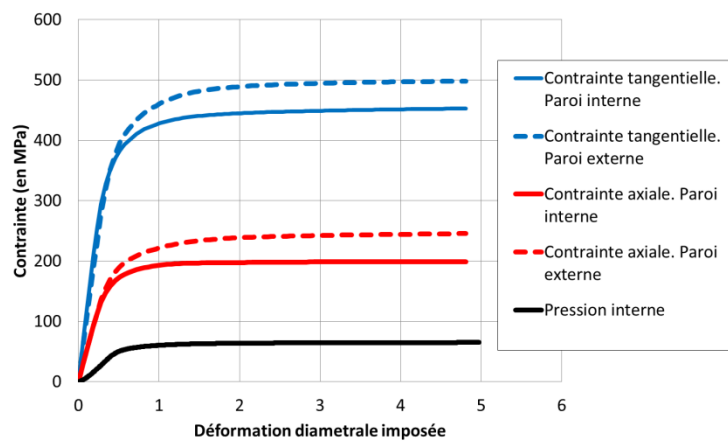
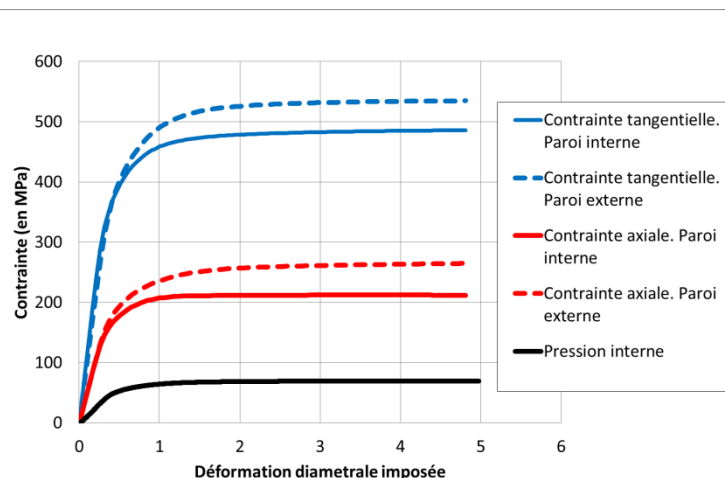
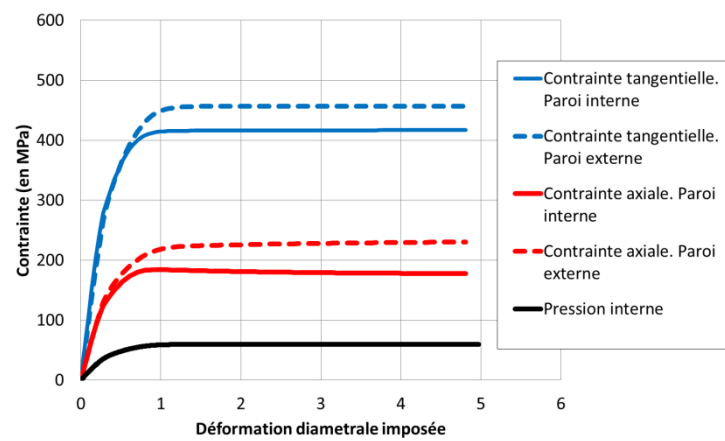
$V=dDS/dt=3.10^{-4} \text{ s}^{-1} - T=380^{\circ}\text{C}$



$V=dDS/dt=10^{-5} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$

Réponse perturbée à forte vitesse

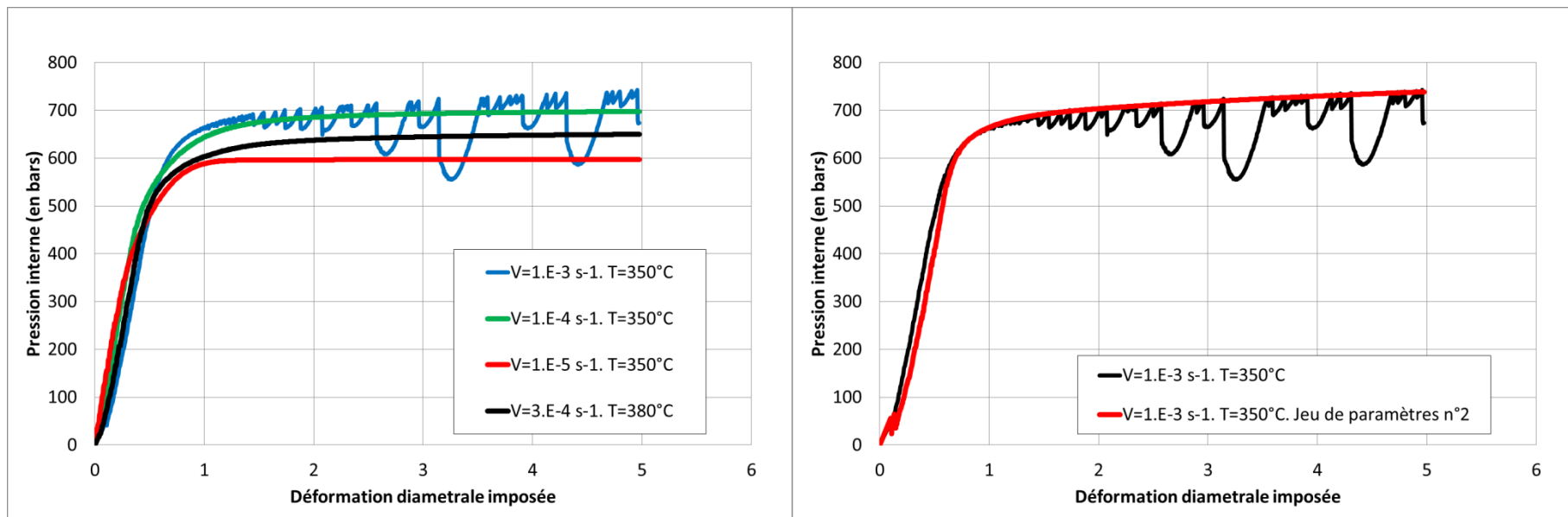
## SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE

 $V=dDS/dt=10^{-3} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$ 

 $V=dDS/dt=10^{-4} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$ 

 $V=dDS/dt=3.10^{-4} \text{ s}^{-1} - T=380^{\circ}\text{C}$ 

 $V=dDS/dt=10^{-5} \text{ s}^{-1} - T=350^{\circ}\text{C}$ 

Réponse perturbée à forte vitesse

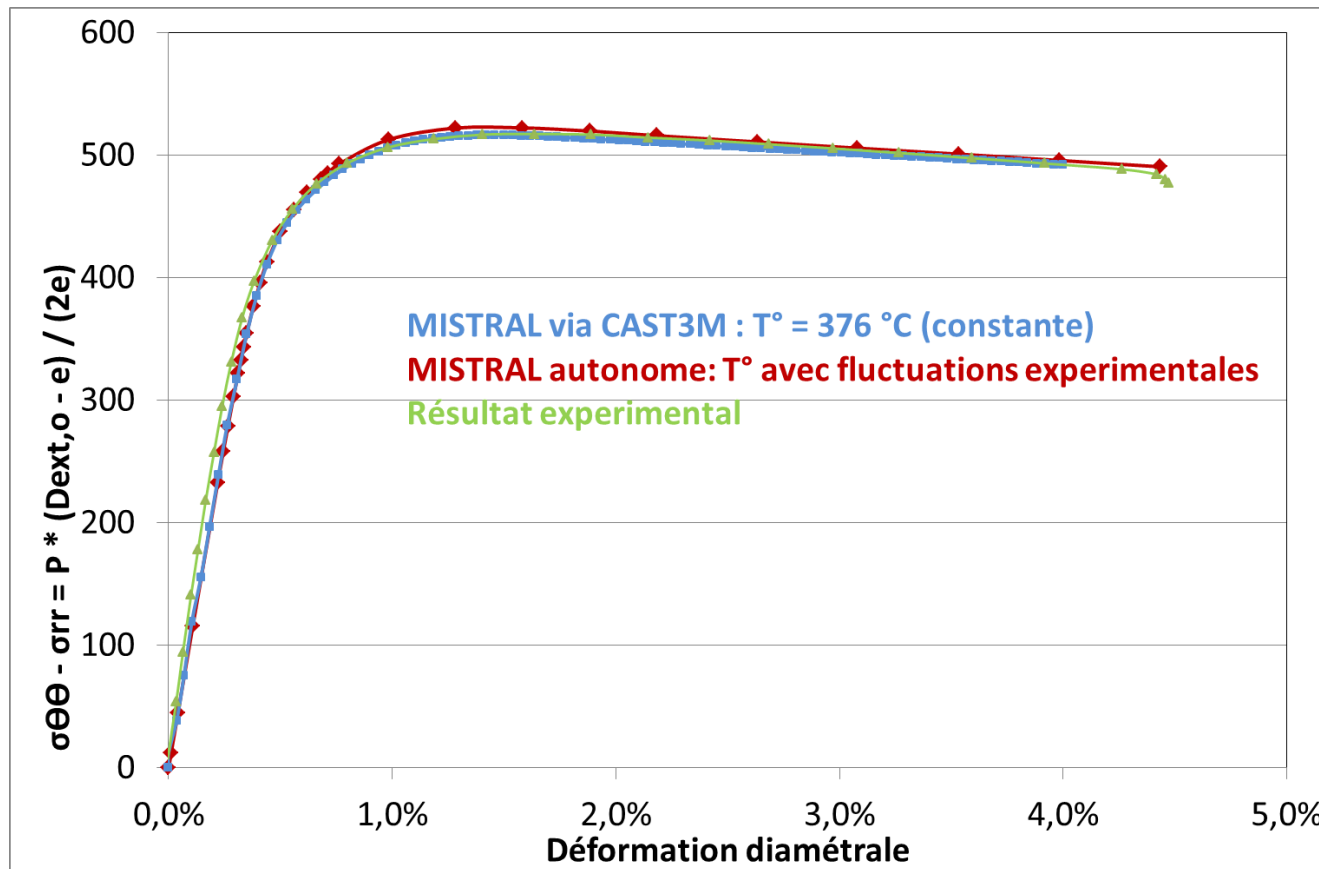
## SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE

Pression interne calculée pour l'ensemble des conditions thermo-mécaniques précédentes (avec un seul jeu de paramètres « PID »). Réponse perturbée à forte vitesse.



Amélioration possible de la réponse à forte vitesse avec un autre jeu de paramètres « PID ».

# SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE



$$V=3.10^{-4} \text{ s}^{-1} - T=376^{\circ}\text{C}$$

# SIMULATION DES ESSAIS DE PRESSION INTERNE

- Les essais de pression interne peuvent être simulés en un point à l'aide de MISTRAL autonome:
  - ↪ Si on souhaite considérer que les déformations et les contraintes sont homogènes dans les calculs.
  - ↪ Les essais peuvent être pilotés en contrainte ou en déformation diamétrale dans les calculs.
- Les essais de pression interne peuvent être simulés par éléments-finis à l'aide de MISTRAL via CAST3M (ou un autre modèle de CAST3M)
  - ↪ Si on souhaite considérer que les déformations et les contraintes ne sont pas homogènes dans les calculs.
  - ↪ Les essais peuvent être pilotés en contrainte ou en déformation diamétrale.
  - ↪ Le pilotage en déformation est réalisable à l'aide d'une procédure qui s'apparente à un régulateur « PID » numérique dans CAST3M.
- Pas d'application au LCMI actuellement.
  - ↪ La simulation des essais pilotés en déformation avec MISTRAL autonome suffit aujourd'hui (identification de lois de comportement viscoplastique).
  - ↪ Application à la simulation par le CEA des essais de compression de mandrin réalisés par STUDSVIK (Suède) dans le cadre du Structural Cladding Integrity Project (SCIP).

# SIMULATION DES ESSAIS DE COMPRESSION DE MANDRIN DU SCIP

## Experimental and Finite Element Modeling Parametric Study for Iodine-Induced Stress Corrosion Cracking of Irradiated Cladding

Clara Anghel<sup>1,\*</sup>, Anna-Maria Alvarez Holston<sup>1</sup>, Gunnar Lysell<sup>1</sup>, Sören Karlsson<sup>1</sup>, Robert Jakobsson<sup>1</sup>, Johan Flygare<sup>1</sup>,  
S. T. Mahmood<sup>2</sup>, David Le Boulch<sup>3</sup>, Arimescu Ioan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Studsvik Nuclear AB*

<sup>2</sup>*Global Nuclear Fuel*

<sup>3</sup>*CEA*

<sup>4</sup>*AREVA*

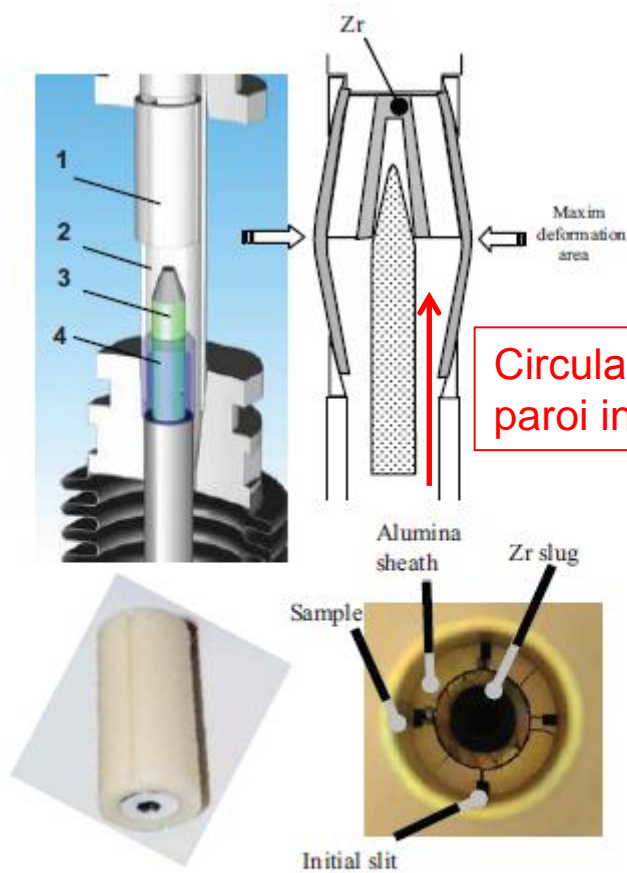
Proceedings of Top Fuel 2010  
Orlando, Florida, USA, September 26-29, 2010  
Paper 111



# cea PRINCIPE DES ESSAIS DE COMPRESSION DE MANDRIN

La position du « plunger » (3) est pilotée par la déformation diamétrale (DS) mesurée en paroi externe de la gaine, au pied de « l'alumina sheath » (1).

Le mesure de DS est réalisée à l'aide d'une nappe laser.  
La position du « plunger » est pilotée à l'aide d'un régulateur PID.



Circulation d'iode vapeur en paroi interne de gaine

L'essai simule le chargement mécanique des gaines de crayons combustible en réacteur

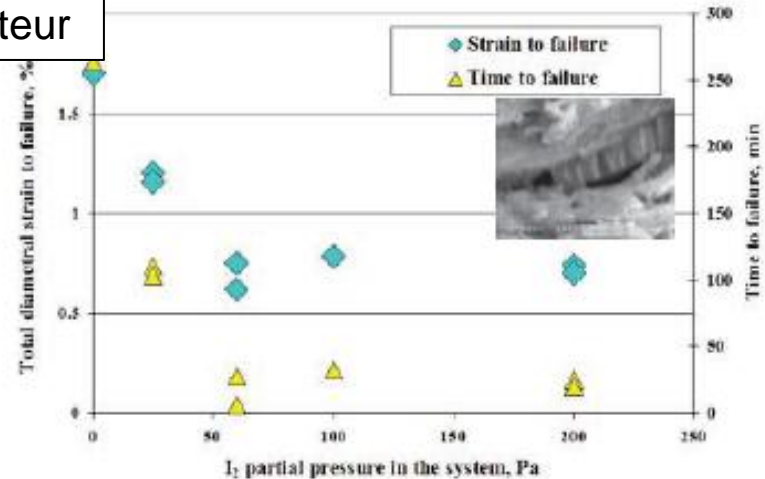
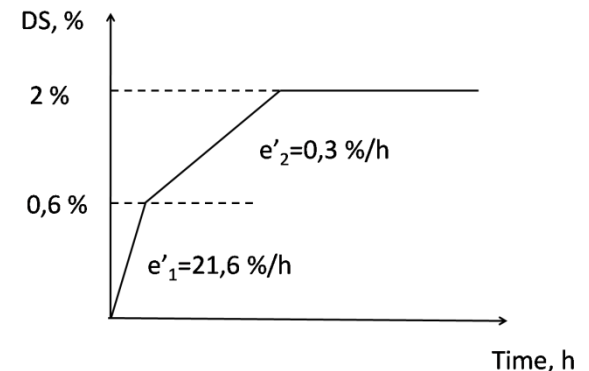
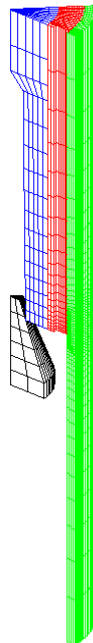
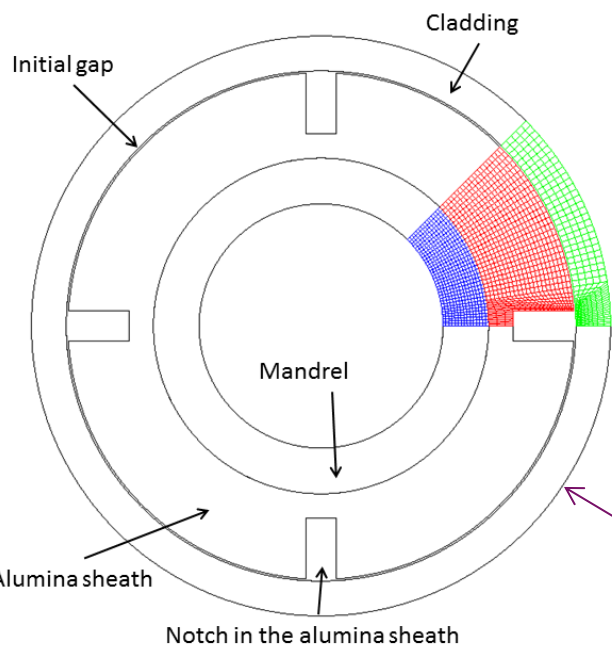
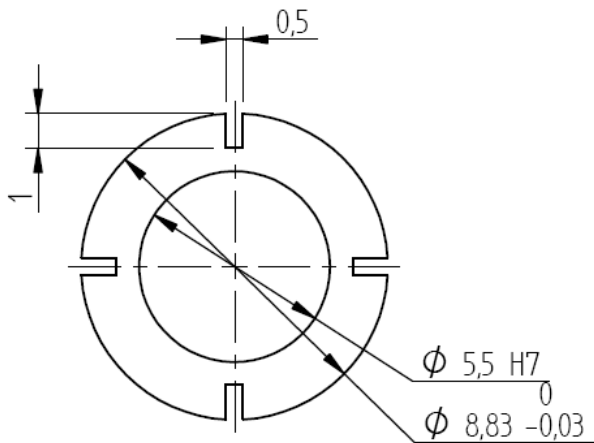


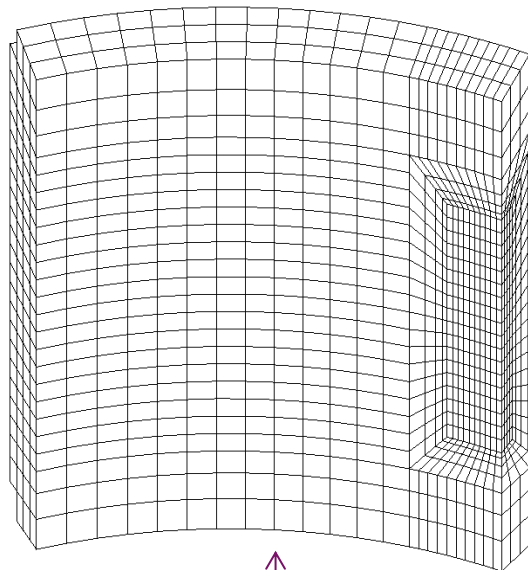
Fig. 1 Expanding mandrel sample configuration for ISCC investigations of irradiated fuel cladding materials, the alumina insert with 4 longitudinal slits and the pure Zr mandrel in the central part and a cross section of a cladding sample after mandrel testing [3]; 1 – alumina sheath; 2 – Zircaloy cladding (sample); 3 – plunger; 4 – channel from pure Zr;

# EXEMPLE DE MAILLAGES DU DISPOSITIF

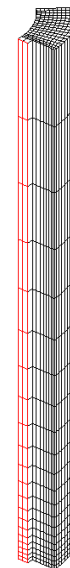
SCIP I – 4 notches



Detailed view of the mesh of the cladding (smallest elements: 40x40x120 microns)



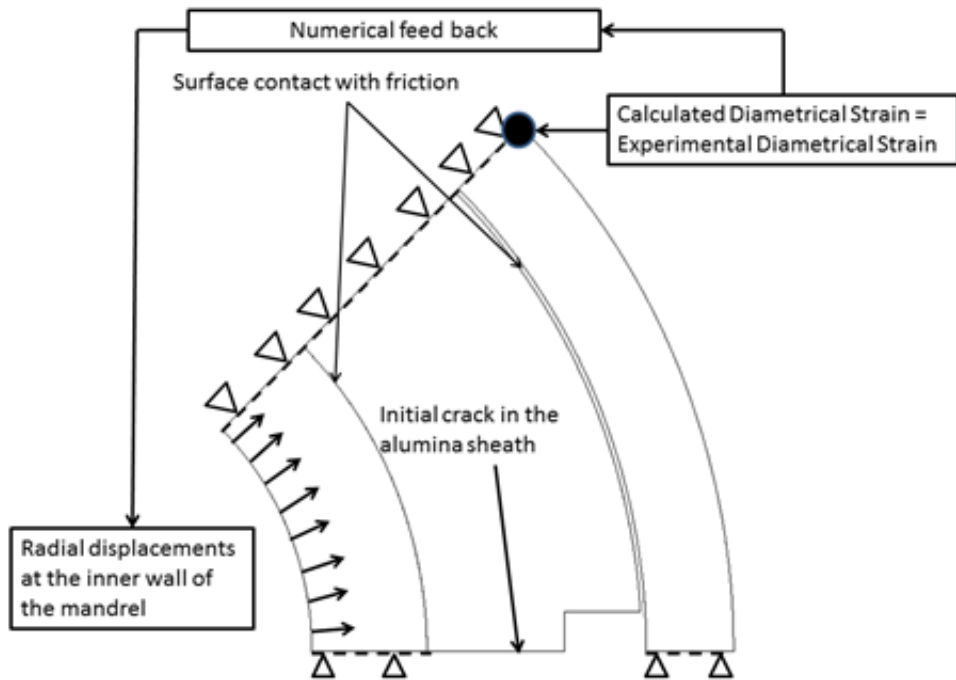
Alumina sheath (the red surface is the initial crack)



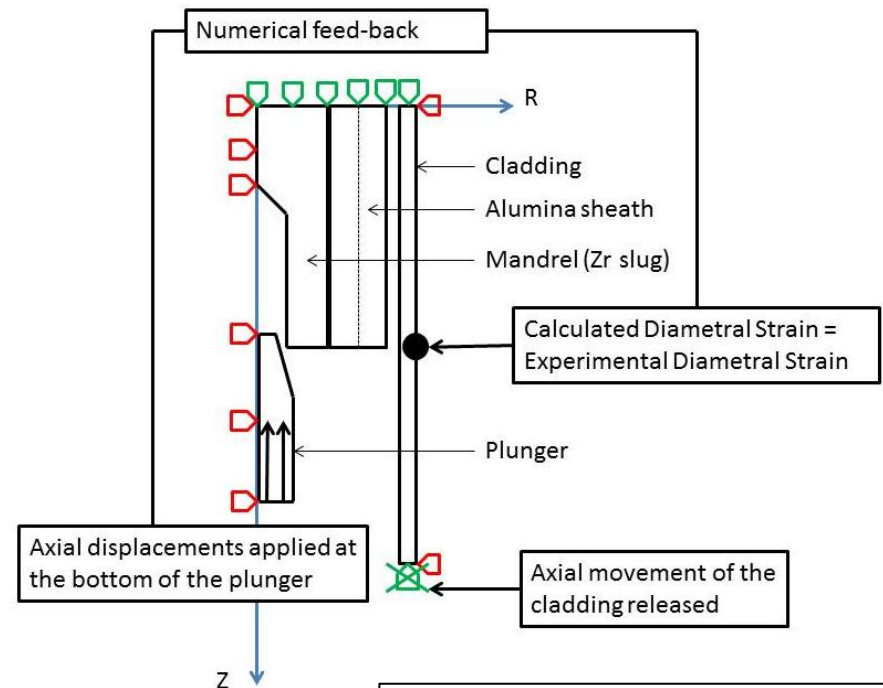
Mesh in a 2D-RT plane

# 3D: GENERAL DESCRIPTION

## 2D-R $\theta$



## 3D

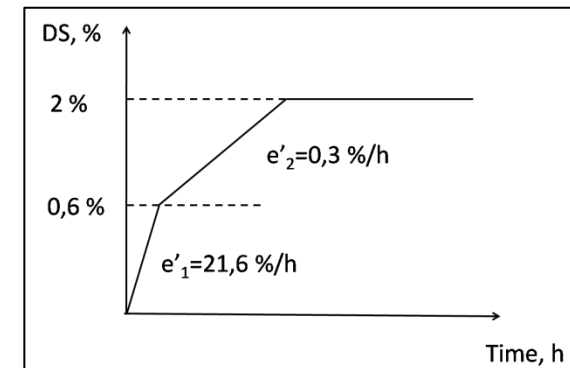


Cladding = viscoplastic behavior (stress-relieved Zircaloy-4,  $\phi_0=9,5$  mm, thickness=570 microns).

Alumina sheath = fully elastic ( $E=380$  GPa,  $\nu=0,2$ ).

Mandrel = fully elastic ( $E= 98$  GPa,  $\nu=0,3$ )

Assumption of calculation: the alumina sheath is initially cracked



# BUTS DE LA SIMULATION

- Etude paramétrique en 2D-R $\theta$ :
  - ↪ Coefficients de frottement
  - ↪ Jeu initial entre la gaine et la céramique (alumina sheath)
  - ↪ Gaine irradiée ou non
- L'utilisation de la contre-réaction numérique facilite l'étude paramétrique.
- Les calculs paramétriques en 2D-R $\theta$  ont pour but de mettre en évidence les paramètres expérimentaux qui impactent les contraintes locales.
  - ↪ Calculées en paroi interne de gaine,
  - ↪ Là où s'amorcent les fissures de CSC-I.
- Ensuite, les calculs 3D sont réalisés avec les paramètres influents établis en 2D-R $\theta$ .
  - ↪ Evaluation des contraintes tangentielles locales.
  - ↪ Là où s'amorcent les fissures de CSC-I.

The equivalent viscoplastic strain rate is written as a combination of a primary strain rate  $V_p$  and a secondary strain rate  $V_s$

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{vp} = V_s + \left( (V_p - V_s) \exp\left(-\frac{\varepsilon_{eq}^{vp}}{\varepsilon_0}\right) \right)$$

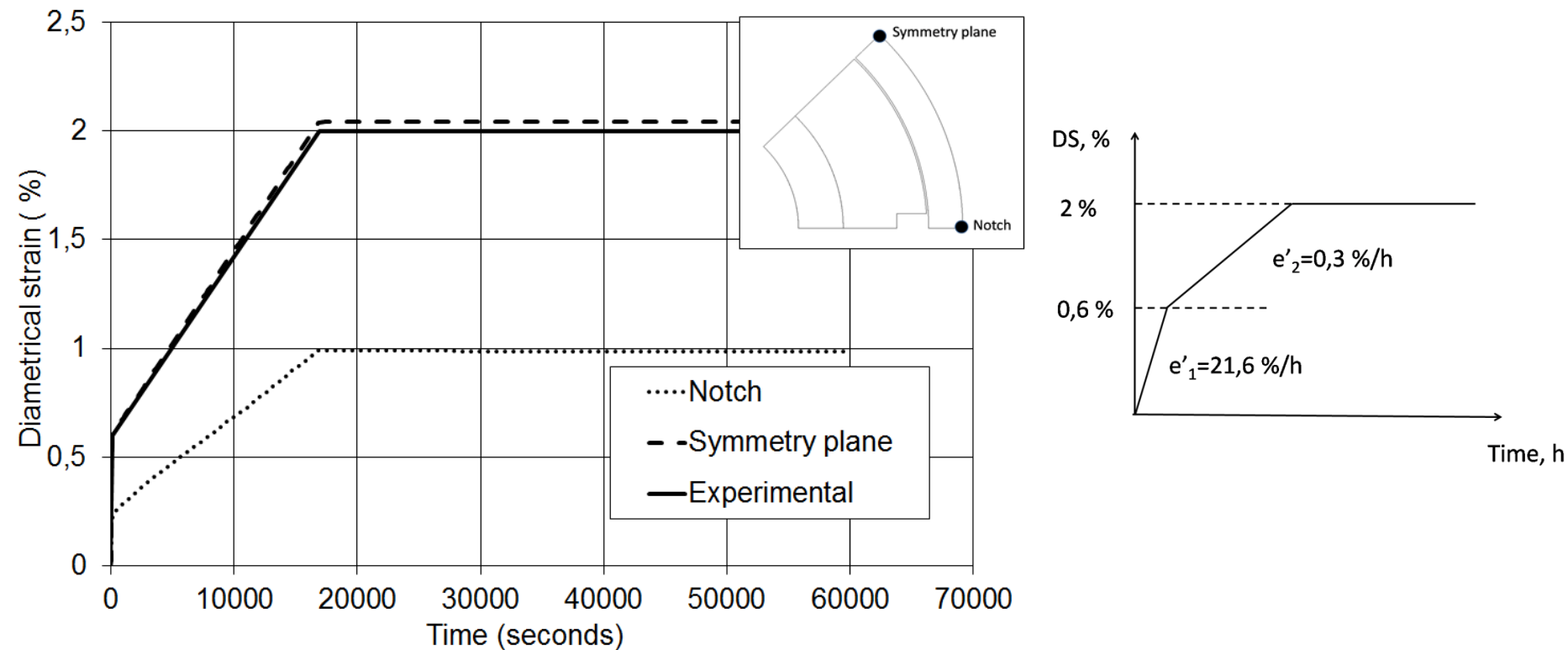
$V_p$  and  $V_s$  are written as a function of the Hill stress ( $\sigma_{Hill}$ ), the temperature  $T$  and the irradiation of the material ( $\phi$ =fluence).

$$V_p = V_{p0}(\sigma_{Hill}, T) \cdot V_{pf}(\phi) \quad V_s = V_{s0}(\sigma_{Hill}, T) \cdot V_{sf}(\phi)$$

Assumptions of the model:

- 1) Cladding = Anisotropic viscoplastic behavior (through the use of the  $\sigma_{Hill}$ )
- 2) Cladding = Homogeneous media (in the frame of the continuum mechanics)

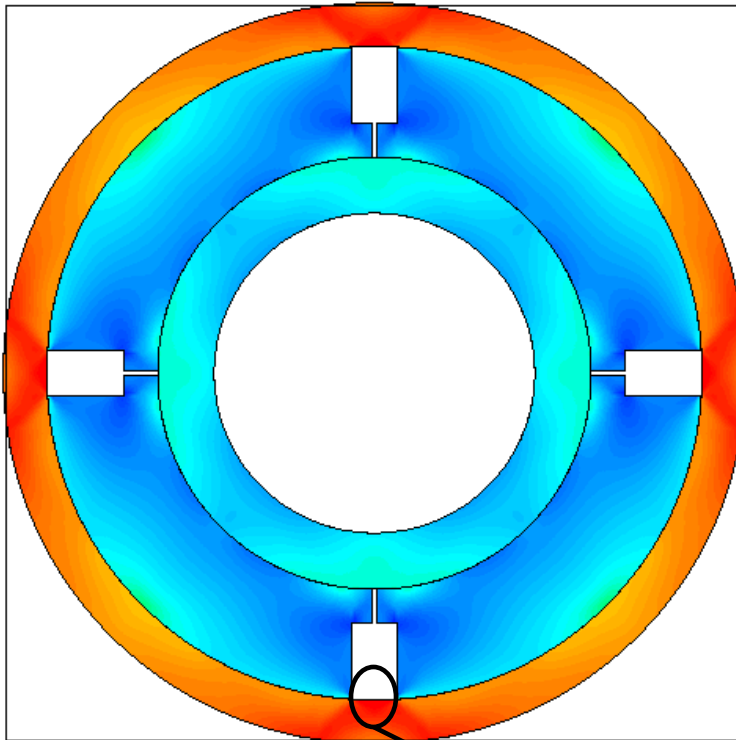
A. SONIAK, N. L'HUILLIER, J.P. MARDON, V. REBEYROLLE, P. BOUFFIOUX, C. RENAUDAT, "Irradiation creep Behavior of Zr-Base Alloys", Thirteenth International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry (2002), ASTM STP 1423.



La consigne (courbe « expérimentale ») est correctement appliquée sur le plan de symétrie en 2D-Rθ et en 3D.

## 2D-R $\theta$

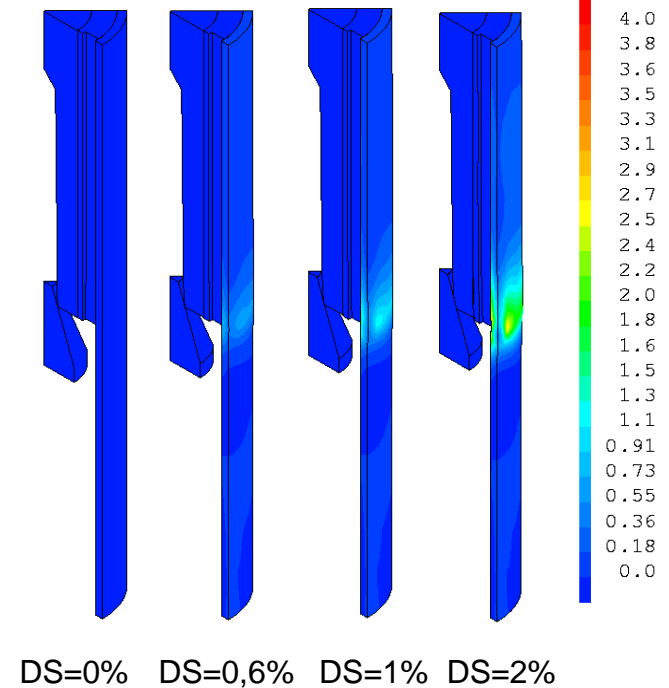
### Hoop stress

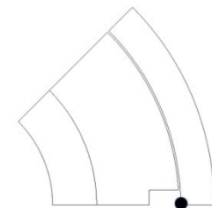


Concentration de contrainte en paroi interne de gaine, en face des entailles.

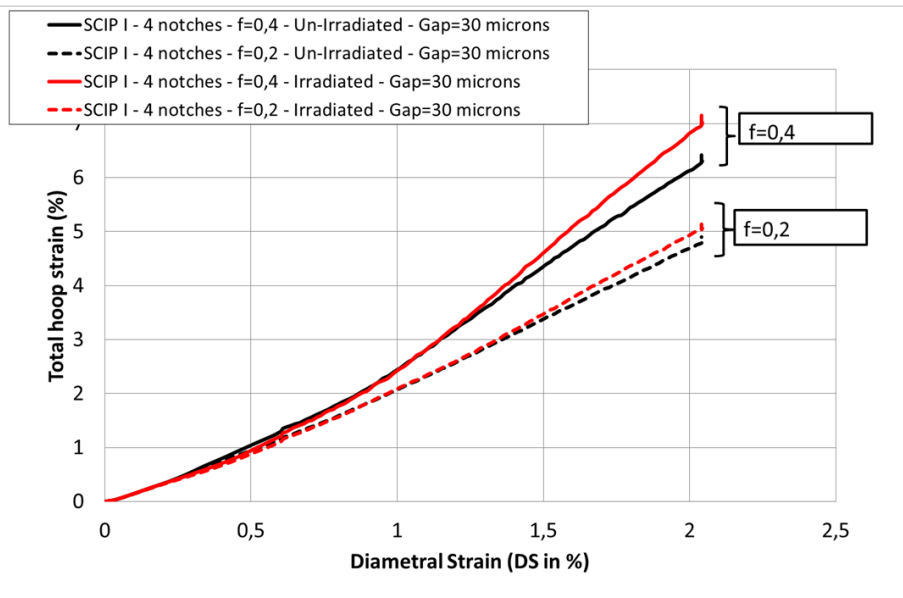
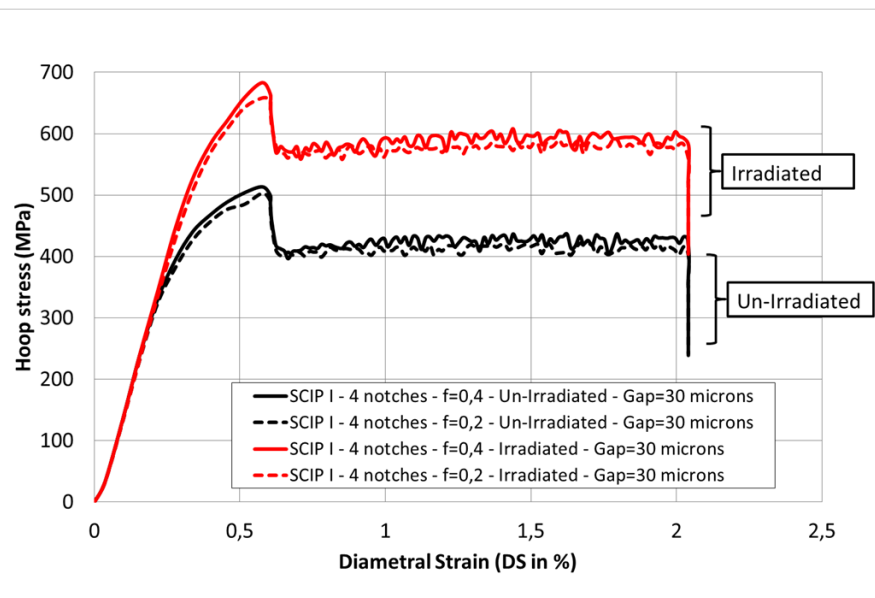
## 3D

### Total hoop strain





## Exemples en 2D-Rθ





- Etude paramétrique effectuée en 2D-R $\theta$ :
  - ↪ Coefficients de frottement
  - ↪ Jeu initial entre la gaine et la céramique (alumina sheath)
  - ↪ Gaine irradiée ou non
- Les calculs 2D-R $\theta$  ont permis de mettre en évidence les paramètres expérimentaux qui impactent les contraintes locales.
  - ↪ Calculées en paroi interne de gaine,
  - ↪ Là où s'amorcent les fissures de CSC-I.
- Les calculs 3D ont été réalisés avec les paramètres influents établis en 2D-R $\theta$ .
  - ↪ Evaluation des contraintes tangentielles locales.
  - ↪ Là où s'amorcent les fissures de CSC-I.

# CONCLUSIONS

# CONCLUSIONS

- Les essais de pression interne peuvent être simulés en un point à l'aide de MISTRAL autonome:
  - ↪ Si on souhaite considérer que les déformations et les contraintes sont homogènes dans les calculs.
  - ↪ Les essais peuvent être pilotés en contrainte ou en déformation diamétrale dans les calculs.
- Les essais de pression interne peuvent être simulés par éléments-finis à l'aide de MISTRAL via CAST3M
  - ↪ Si on souhaite considérer que les déformations et les contraintes ne sont pas homogènes dans les calculs.
  - ↪ Les essais peuvent être pilotés en contrainte ou en déformation diamétrale.
  - ↪ Le pilotage en déformation est réalisable à l'aide d'une procédure qui s'apparente à un régulateur « PID » numérique dans CAST3M.
- Application à la simulation des essais de compression de mandrin du SCIP.
  - ↪ A permis une étude paramétrique en 2D-R $\theta$  et les calculs équivalents en 3D.

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
T. +33 (0)1 69 08 57 89 | F. +33 (0)1 69 08 93 24

DEN/DANS  
DMN  
SEMI/LCMI

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019