



Thèse : oct. 2005 - oct. 2008



# Compréhension et Modélisation de la Rupture d'Alliages à Base de Zirconium Irradiés en Conditions Accidentelles de Type RIA

Matthieu Le Saux

Directeur de thèse : Jacques Besson (Centre des Matériaux, EMP)

Encadrant CEA : Christophe Poussard (DEN/DMN/SEMI/LCMI, CEA Saclay)



Perspective : Accroître le taux de combustion des crayons combustibles dans les REP

- Études de sûreté :

Accident d'injection de réactivité  
(RIA, Reactivity Initiated Accident)

⇒ Accident **HYPOTHETIQUE** de dimensionnement

- Éjection d'une barre (ou grappe) de contrôle

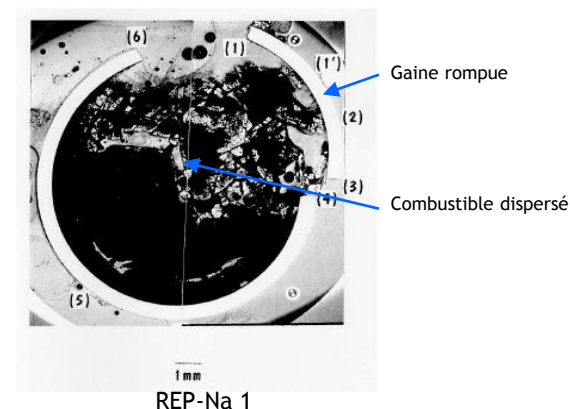
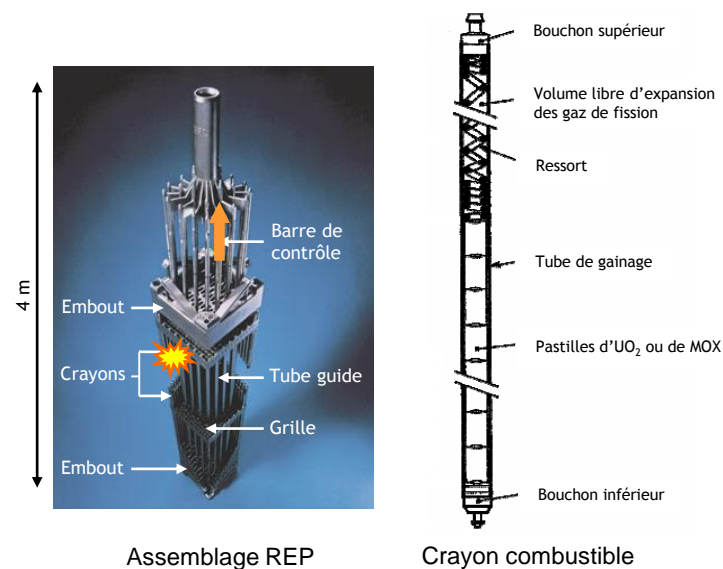
⇒ Augmentation rapide de la réactivité du réacteur

- Simulations expérimentales de RIA (CABRI, France ; NSRR, Japon)

⇒ Rupture prématurée de la gaine des crayons combustibles

⇒ Dispersion du combustible dans le réfrigérant

⇒ Vaporisation de l'eau, pics de pression, ...



Compréhension et modélisation des mécanismes de rupture des gaines de Zircaloy-4 détendu à fort taux de combustion lors de transitoires de type RIA

- (i) Développement d'une loi de comportement pour le Zy-4 détendu applicable aux conditions de type RIA
- (ii) Mise au point d'un essai représentatif reproduisant les sollicitations rencontrées lors d'un RIA et réalisable en enceinte blindée
- (iii) Analyse expérimentale des micro-mécanismes d'endommagement et de rupture  
⇒ Proposition d'un critère de rupture





- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives



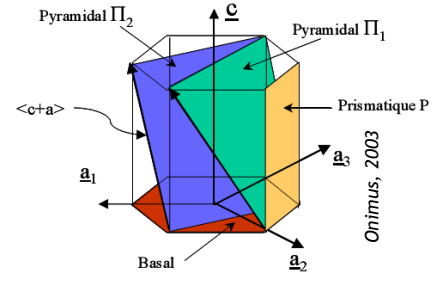
# Matériau de l'étude : Zy-4 détendu

- Matériau : Zircaloy-4 détendu (non irradié)
- Géométrie : Tubes de gainage REP ( $D_e = 9.5 \text{ mm}$ ,  $e = 0.57 \text{ mm}$ )

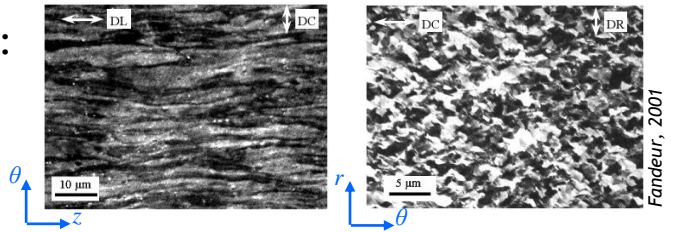
▪ Composition chimique :

Elément	Zr	Fe	Cr	Sn	O (ppm)
Teneur (% massique)	Complément à 100%	0.2	0.1	1.25	1100

- Modes de déformation : - Maclage  
- Glissement des dislocations

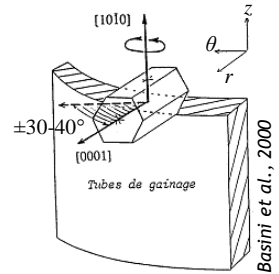
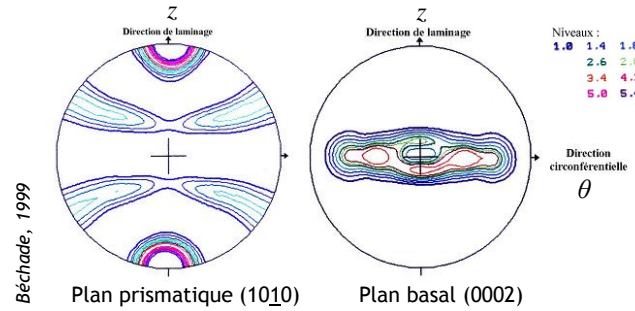


▪ Microstructure :



Grains allongés (~2x2x20 µm) dans la direction axiale de laminage

▪ Texture cristallographique :



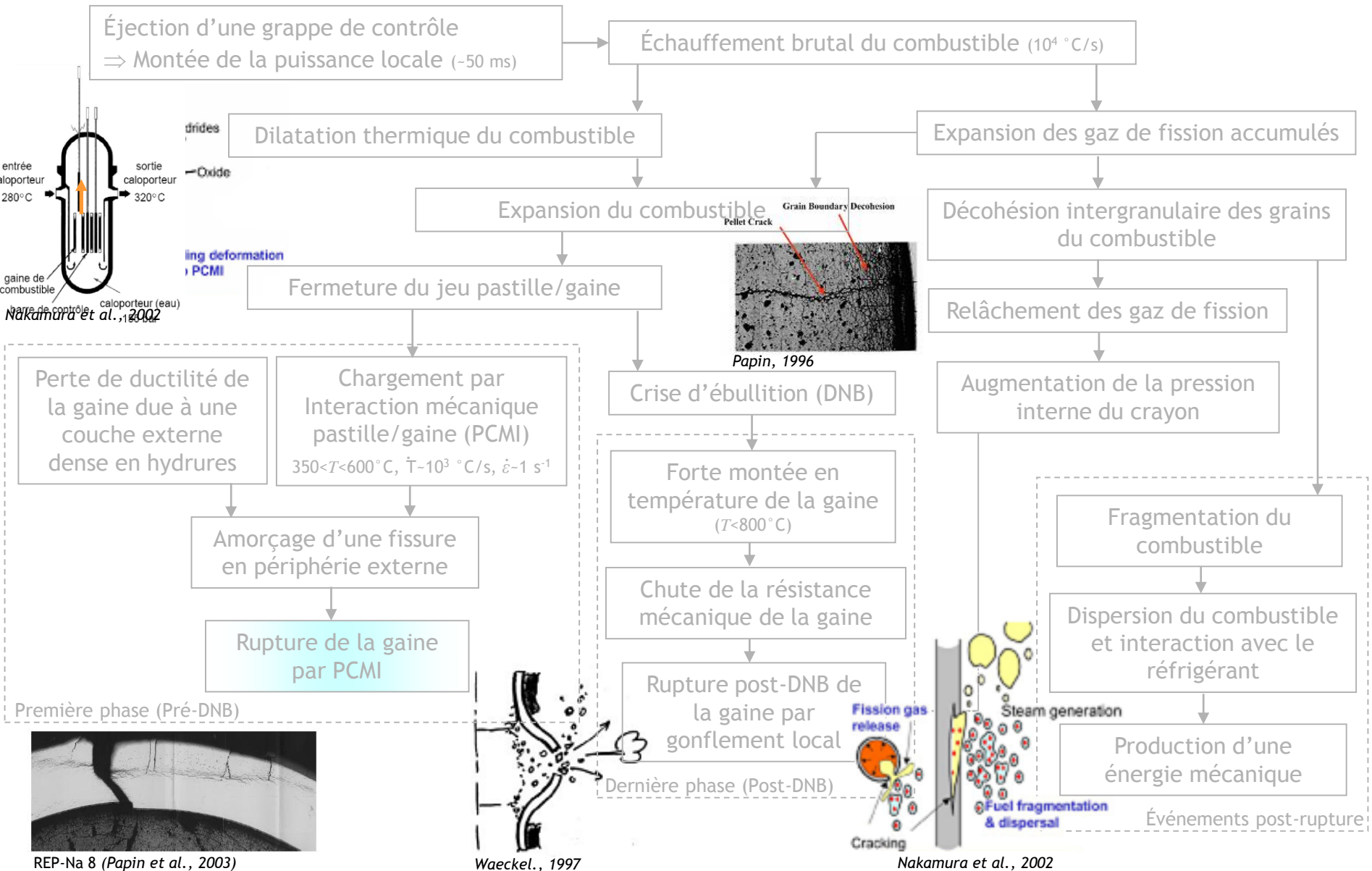


- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- **Les accidents de réactivité (RIA)**
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives







- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives

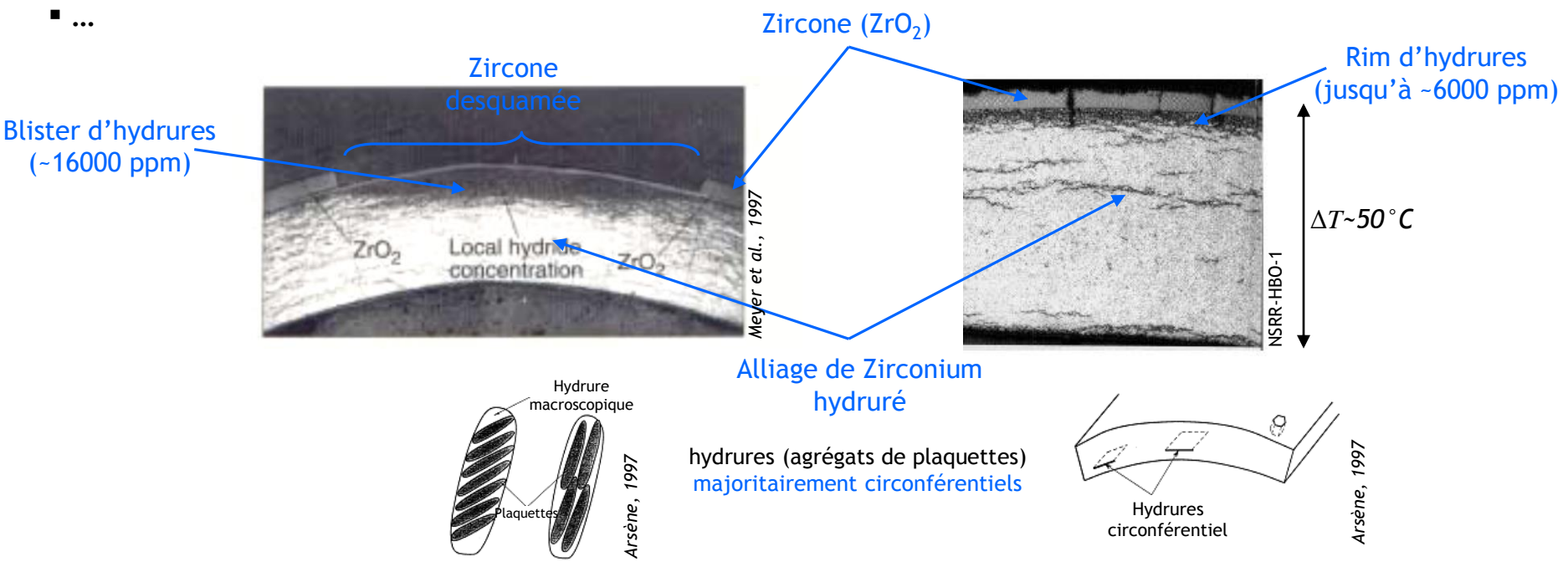




# Rupture par PCMI : Conditions pré-accidentelles

Forte dépendance de la rupture aux conditions pré-accidentelles :

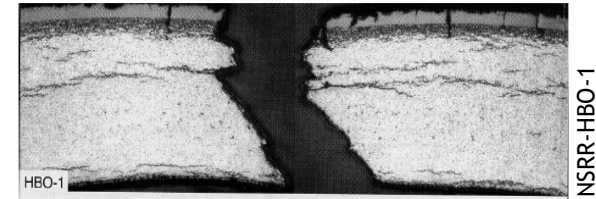
- Fermeture du jeu pastille/gaine
- Fragilisation :
  - Irradiation
  - Corrosion
  - Hydruration
- ...



⇒ Rôle critique des couches externes denses en hydrures et en oxygène sur la rupture

- 2 étapes principales :

1. **Propagation à travers l'épaisseur** des fissures amorcées dans les couches externes fragiles de la gaine (propagation axiale limitée)

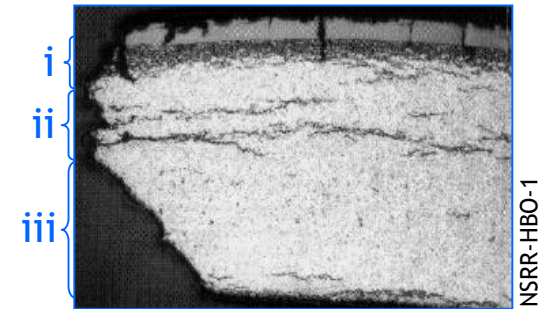


2. **Propagation axiale**

(au cours du transitoire ou post-transitoire ?)

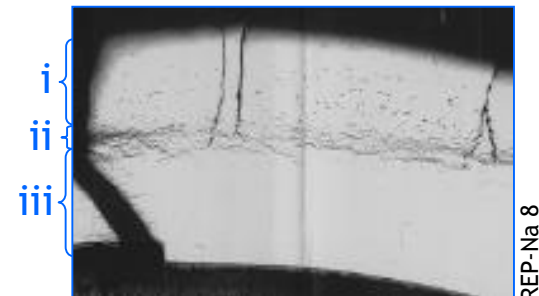


i. **Amorçage** de fissures radiales dans les couches externes riches en oxygène et en hydrogène (rupture fragile, mode I)

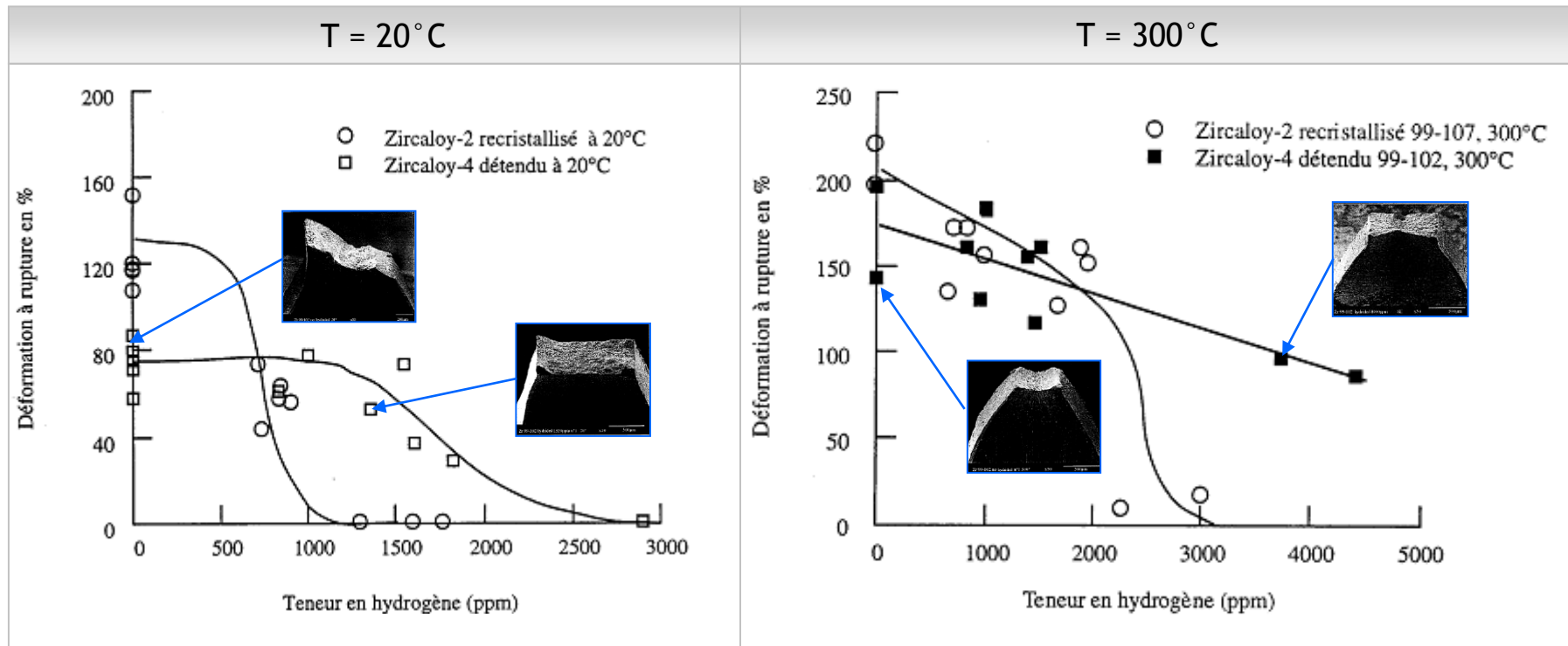


ii. **Zone de transition** (rupture quasi-fragile, mode I)

iii. **Propagation** selon un plan orienté à 45° par rapport à la direction radiale dans le ligament sous-jacent (rupture ductile, cisaillement)



Influence de la **teneur en hydrures** sur la rupture du composite Zircaloy-4/hydrures :



⇒ **Ductilité du composite réduite** lorsque la teneur en hydrures augmente (existence d'une transition ductile-fragile fonction de la température)

## Approche globale

- Critères énergétiques (Montgomery et al., 1997; Chung et Kassner, 1998; Rashid et al., 2000; de Barrio et al., 2002; Monerie, 2003; Leclercq et al., 2005)
- Mécanique de la Rupture (Kuroda et Yamanaka, 2002; Pierron et al., 2003; Desquines et al., 2004; Desquines et Fleurot, 2005; Lui, 2005)
- Critères en déformation (Link et al., 1998; Vitanza, 2001; Jernkvist, 2003; Daum et al., 2001; Jernkvist et al., 2003)
  - ☹ - Non intrinsèques au matériau (dépendent de la géométrie)
    - Tube de gainage : structure mince
    - Matériau hétérogène (distribution d'hydrures)
    - Ne prévoient pas l'amorçage de fissures  $\Rightarrow$  nécessité d'une pré-fissure ou d'un critère d'amorçage *ad hoc*, ...

## Approche locale

- Modèles de Zones Cohésives (Varias et Massih, 2000; Perales, 2005)
  - ☹ Difficilement transférables lorsque la triaxialité des contraintes change
- Critères en endommagement non couplés (Racine, 2005)
  - ☹ Ne reproduisent pas la localisation de la déformation liée à l'endommagement
- Critères en endommagement couplés (Prat, 1994, Grange, 1998, Desquines et al., 2005)
  - $\Rightarrow$  Prédiction de l'amorçage et de la propagation de fissures

$$\text{Modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN)} : \Phi(\underline{\Sigma}, \sigma_0, f) = \left( \frac{\bar{\Sigma}}{\sigma_0} \right)^2 + 2q_1 f_* \cosh\left( \frac{3}{2} q_2 \frac{\Sigma_m}{\sigma_0} \right) - 1 - q_3 f_*^2 = 0$$

(Éventuellement couplé avec un modèle de dissolution/précipitation des hydrures)





- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- [Vers un essai représentatif...](#)
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives



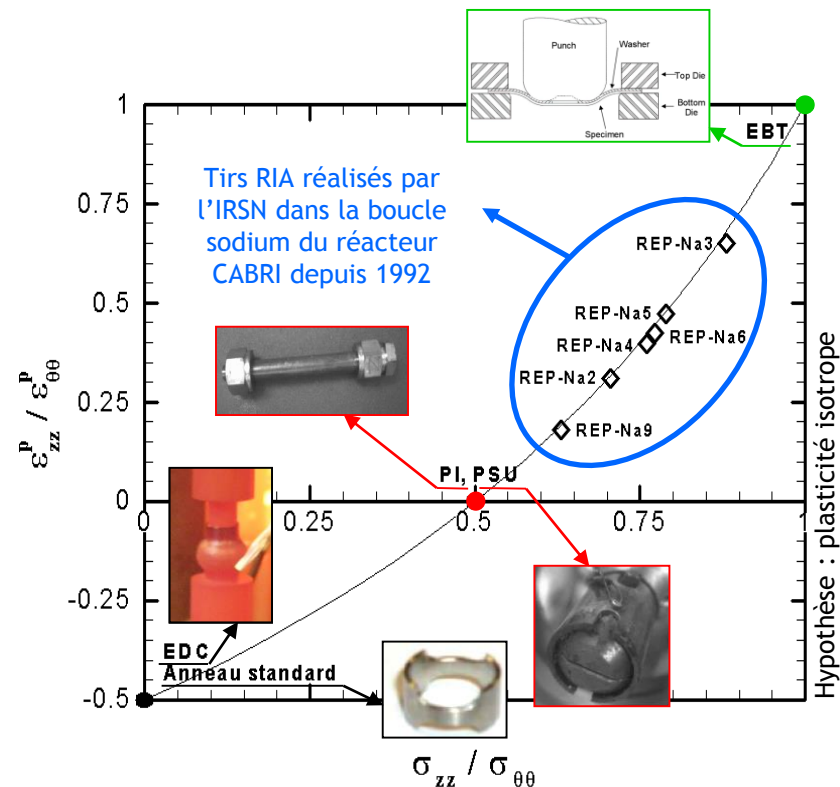
« Cahier des charges » :

▪ Applicable aux tubes de gainage irradiés :

- Éprouvettes prélevées dans tubes de gainage REP
- Quantité de matière limitée
- Usinage réduit
- Réalisable en enceinte blindée, ...

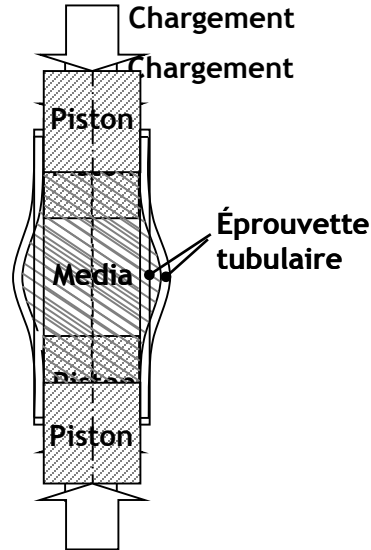
▪ Sollicitations représentatives d'un RIA :

- Températures (jusqu'à 600 °C)
- Vitesse de chauffage (jusqu'à 100-200 °C/s)
- Vitesse de déformation (jusqu'à 1-5 s<sup>-1</sup>)
- Biaxialité du chargement (entre EPD et EBT)



⇒ Actuellement, aucun essai ne satisfait tous ces critères

Essai d'Expansion Due à la Compression (EDC) (Studsvik AB (Grigoriev et al., 2001)) :



- Échantillon de tube de gainage sollicité grâce à l'expansion radiale d'un media cylindrique placé à l'intérieur de l'éprouvette et comprimé axialement entre deux pistons
- Pilotage en déplacement de piston imposé
- Mesures :
  - Force imposée
  - Déplacement vérin
  - Diamètre externe médian du tube
- Localisation de la déformation dans le plan médian du tube

**Limitations :** -  $T < 340^{\circ}\text{C}$  (Media en Téflon)  
- Sollicitation uniaxiale circonférentielle

# Essai d'Expansion Due à la Compression

## Élargissement du domaine de température d'exploitation

- Utilisation de matériaux adaptés pour le media :

$20 < T < 300^{\circ}\text{C}$  : Téflon

$300 < T < 600^{\circ}\text{C}$  : Aluminium pur (1050) ( $T_f \sim 750^{\circ}\text{C}$ )

$600 < T < 900^{\circ}\text{C}$  : Cuivre pur (Cu OF) ( $T_f \sim 1080^{\circ}\text{C}$ )

- Étude de faisabilité :

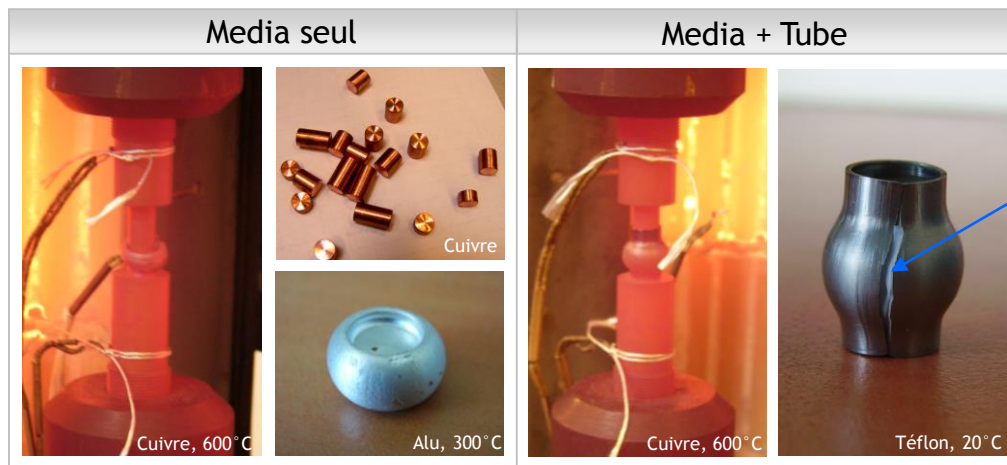
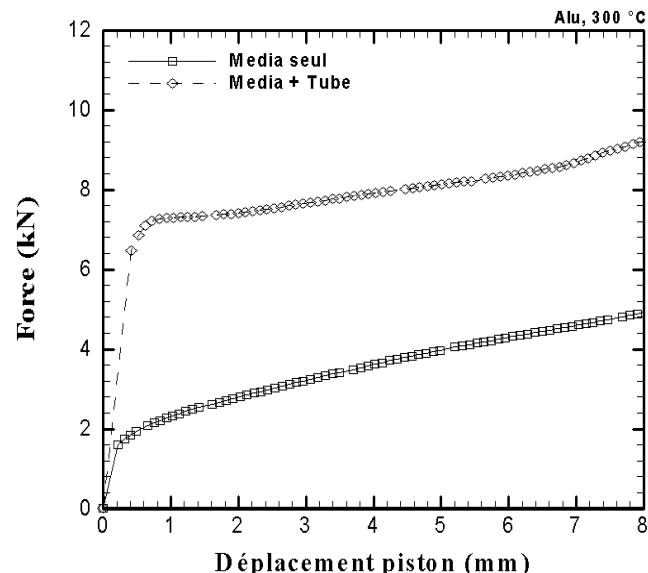
Chauffage four

Vitesse vérin = 25 mm/min

Media :  $L_{m0} = 15$  mm, Téflon, Cuivre, Aluminium

Tube :  $L_{t0} = 20$  mm, Zy-4 détendu

⇒ Enregistrement force vérin - déplacement traverse

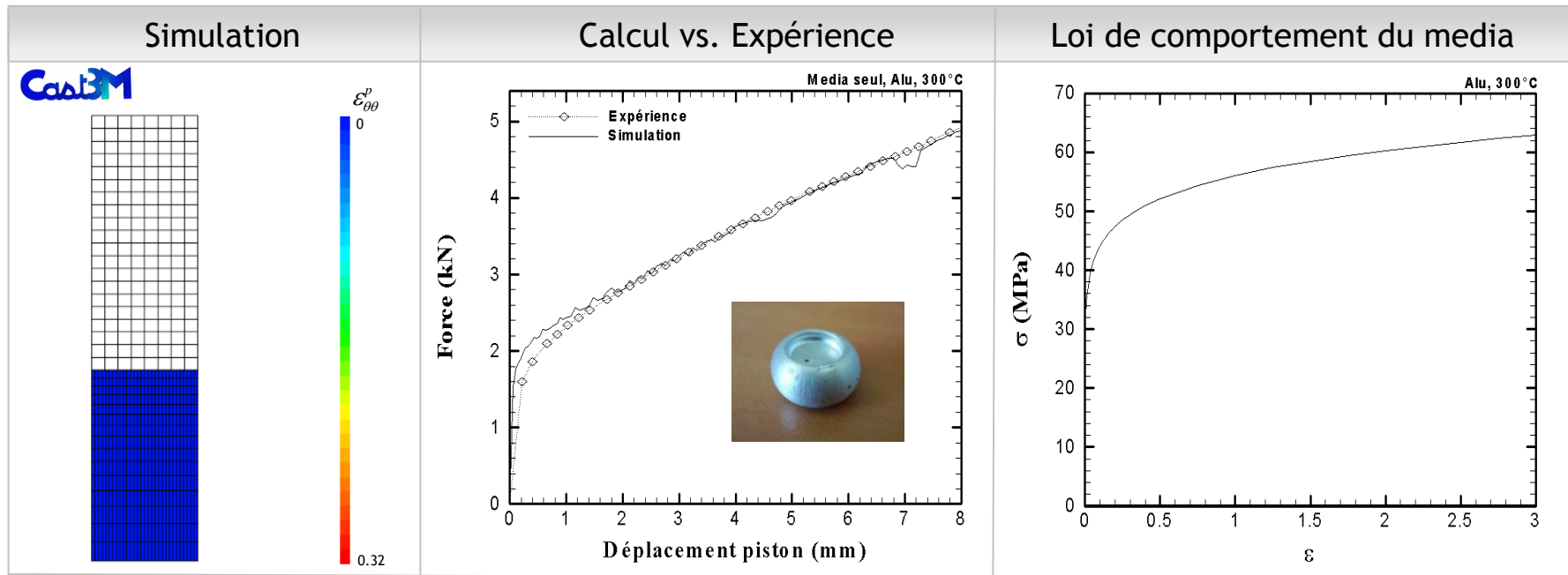


Mode rupture représentatif



## Analyse Éléments Finis - Media seul

Identification inverse (algorithme de Levenberg-Marquardt) des propriétés du media (Loi élastoplastique de type Ramberg-Osgood) par couplage MATLAB/CAST3M



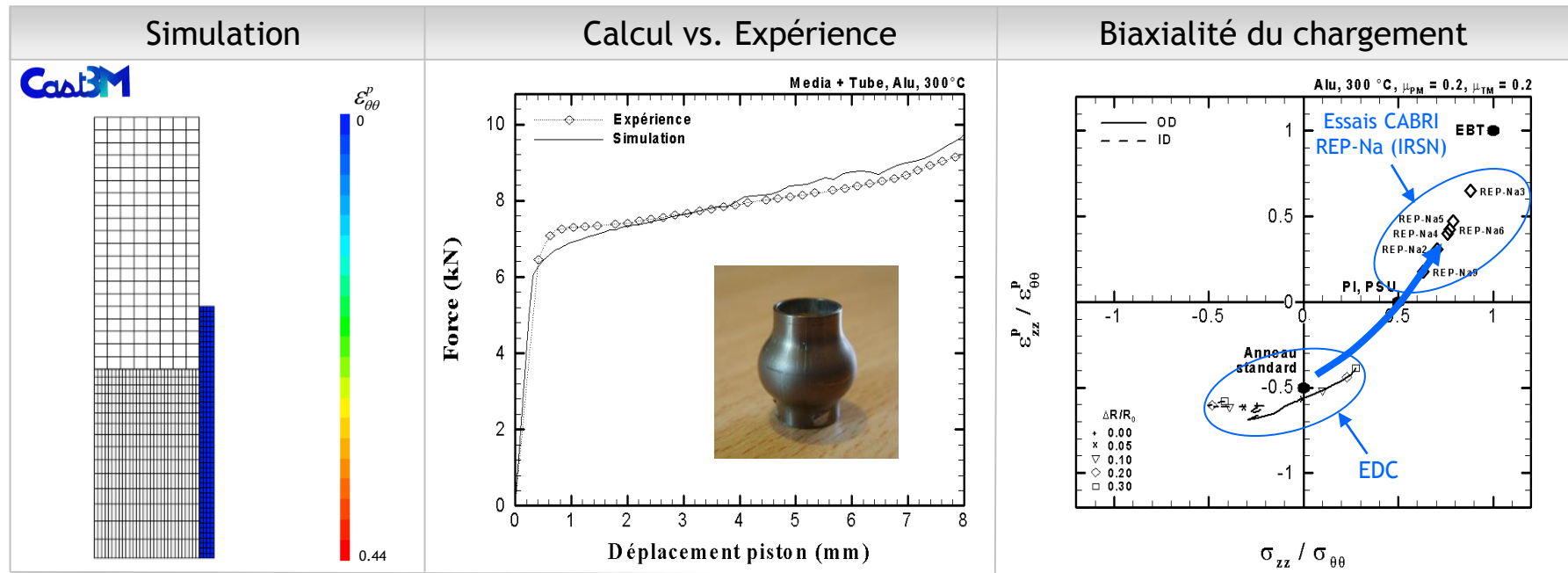
Aluminium,  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $\mu_{PM} = 0.2$

# Essai d'Expansion Due à la Compression

## Analyse Éléments Finis - Media + Tube

Propriétés mécaniques : - Media : préalablement obtenues par identification inverse  
 - Tube de gainage : loi GPL

Identification inverse des coefficients de frottement entre : - le Piston et le Media  $\mu_{PM}$   
 - le Tube et le Media  $\mu_{TM}$

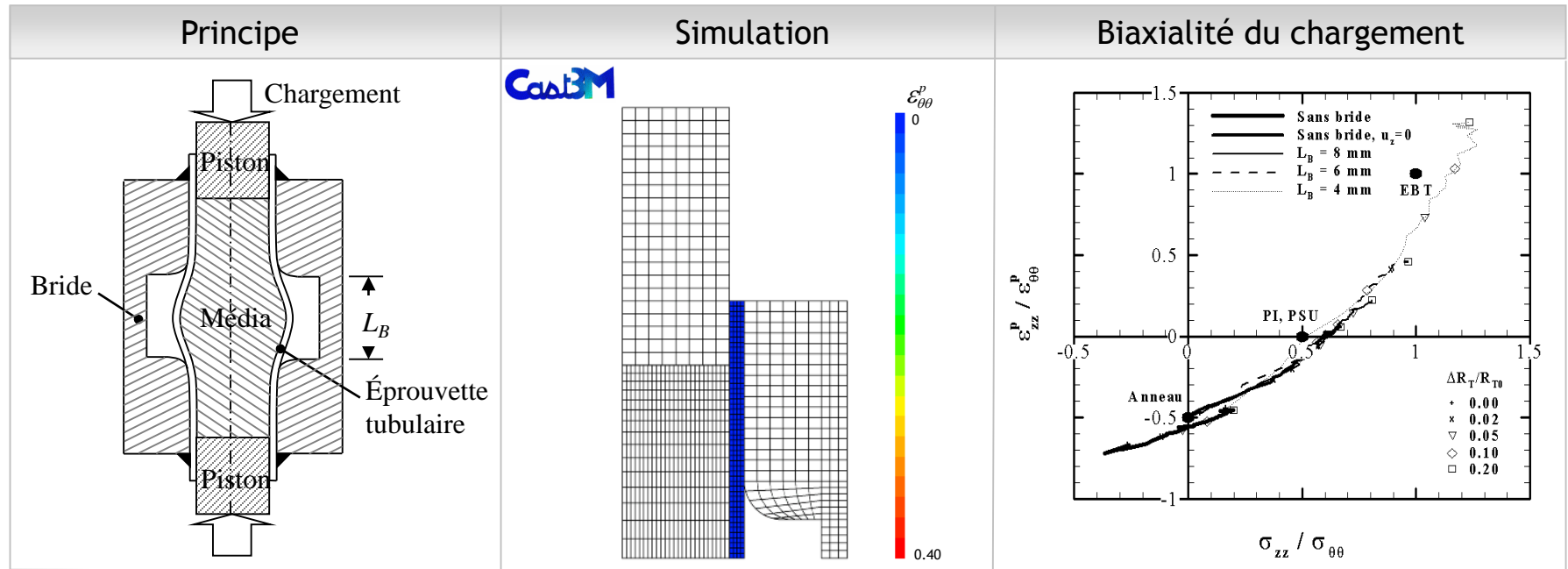


Aluminium,  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $\mu_{PM} = 0$ ,  $\mu_{TM} = 0.2$

EDC ~ sollicitation **circonférentielle pure**  $\Rightarrow$  Nécessité de « **contrôler** » la déformation axiale



Vers un essai EDC avec biaxialité « contrôlée » ...





- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- **Loi de comportement pour le Zy-4 détendu**
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives



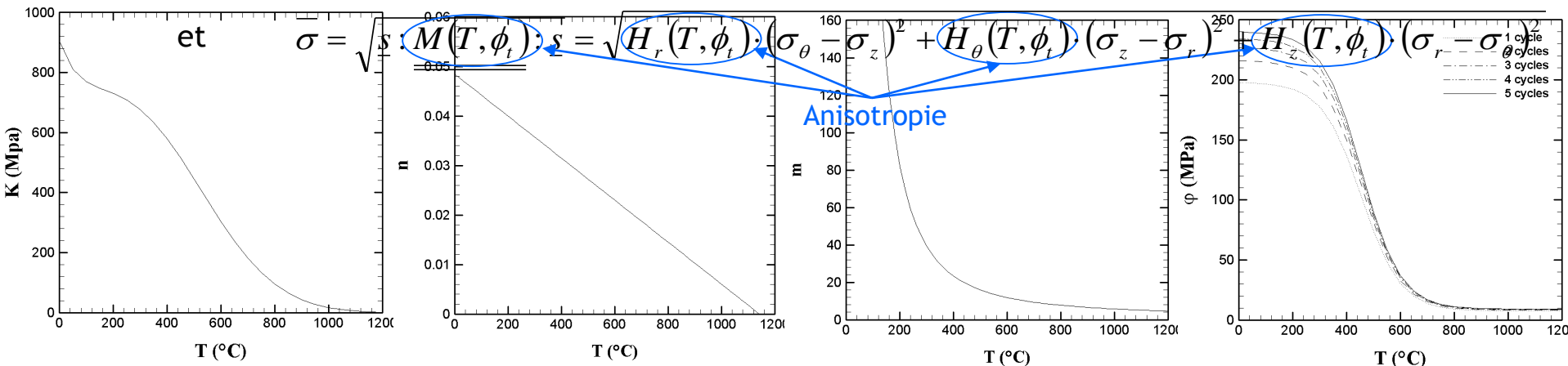
**Loi GPL (Goguel Poussard Limon)** (*Goguel et al., 2005*) : Loi viscoplastique anisotrope unifiée applicable au Zy-4 détendu vierge ou irradié en conditions de type RIA

- Hypothèses :
  - Dilatations thermiques isotropes
  - Élasticité isotrope
  - Plasticité anisotrope
  - Fluage thermique

▪ Formalisme de type Lemaitre :  $\dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} = \dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} \underline{\underline{M}} : \frac{\underline{S}}{\underline{\sigma}}$

avec  $\dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} = \dot{\underline{\varepsilon}}_0 \left[ \frac{\underline{\sigma}}{K(T)(\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0) + \varphi(T, \phi_t)} \right]^{m(T)}$

Influence de la température sur la contrainte →  $K(T)$   
 Écrouissage →  $\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0$   
 Durcissement d'irradiation →  $\varphi(T, \phi_t)$   
 Sensibilité de la vitesse de déformation à la contrainte →  $m(T)$



Identifiée sur la base expérimentale **PROMETRA** (PROpriétés MEcaniques en TRAnsitoire) :  
essais réalisés au CEA/DMN/SEMI depuis 1992 afin d'évaluer les propriétés mécaniques des gaines en alliages de zirconium dans des conditions représentatives de la phase de PCMI

Traction Sens Long <i>Éprouvette bi-languette</i>	Traction Sens Travers <i>Anneau standard</i>	Éclatement par Pressurisation Interne
 <p>69 essais</p>	 <p>74 essais</p>	 <p>5 essais</p>

⇒ Rend compte des effets de :

- l'irradiation (de 0 à 5 cycles REP)
- la température (de 200 à 800 °C)
- la vitesse de déformation (de  $3 \cdot 10^{-4}$  à  $5 \text{ s}^{-1}$ )
- l'anisotropie du matériau

Formalisme de type Lemaitre :  $\underline{\dot{\varepsilon}}^{vp} = \underline{\dot{\varepsilon}}^{vp} \underline{\underline{M}} : \frac{\underline{s}}{\bar{\sigma}}$

▪ Loi GPL :

Influence de la température sur la contrainte

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\varepsilon}_0 \left[ \frac{\bar{\sigma}}{K(T) \cdot (\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0)^{n(T)} + \varphi(T, \phi_t)} \right]^{m(T)}$$

Annotations :

- $K(T)$  : Influence de la température sur la contrainte
- $(\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0)^{n(T)}$  : Écrouissage
- $\varphi(T, \phi_t)$  : Durcissement d'irradiation
- $m(T)$  : Sensibilité de la vitesse de déformation à la contrainte

▪ Loi modifiée :

Influence de la température, de l'irradiation et de la cote de prélèvement sur la contrainte

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{\varepsilon}_0 \left[ \frac{\bar{\sigma}}{K(T, \phi_t, c) \cdot \left[ (\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0)^{n_0(T, \phi_t)} \exp(-\alpha_n(T, \phi_t) \cdot \bar{\varepsilon}^{vp}) + (\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0)^{n_\infty(T, \phi_t)} (1 - \exp(-\alpha_n(T, \phi_t) \cdot \bar{\varepsilon}^{vp})) \right]} \right]^{m(T, \phi_t)}$$

Annotations :

- $K(T, \phi_t, c)$  : Influence de la température, de l'irradiation et de la cote de prélèvement sur la contrainte
- $(\bar{\varepsilon}^{vp} + \varepsilon_0)^{n_0(T, \phi_t)}$  : Écrouissage
- $\alpha_n(T, \phi_t)$  : Sensibilité de la vitesse de déformation à la contrainte
- $m(T, \phi_t)$  : Sensibilité de la vitesse de déformation à la contrainte

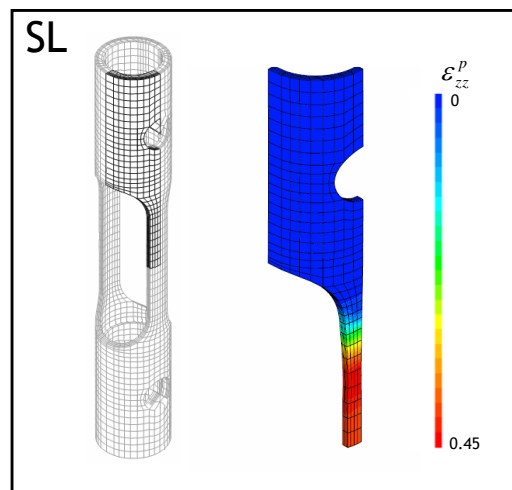
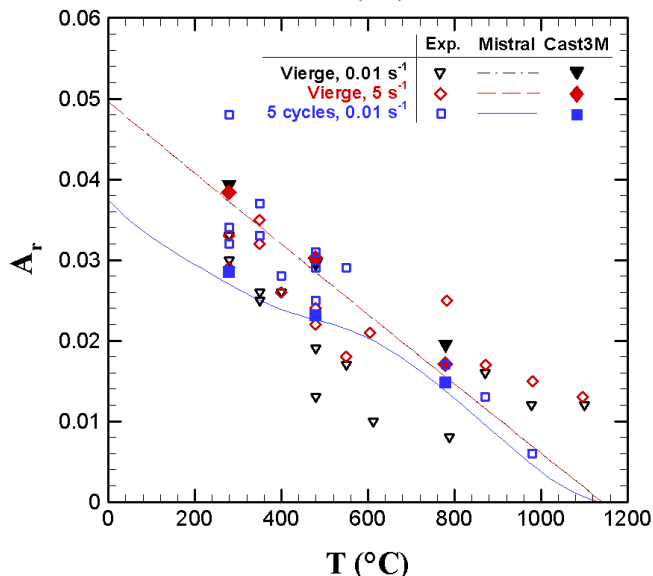
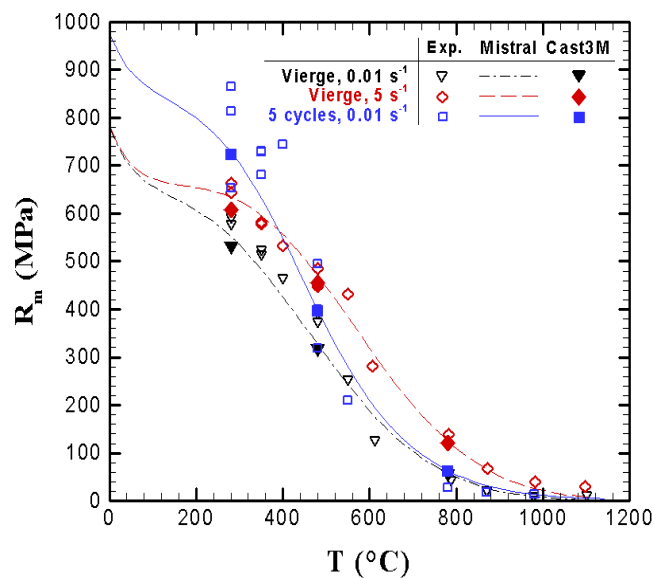
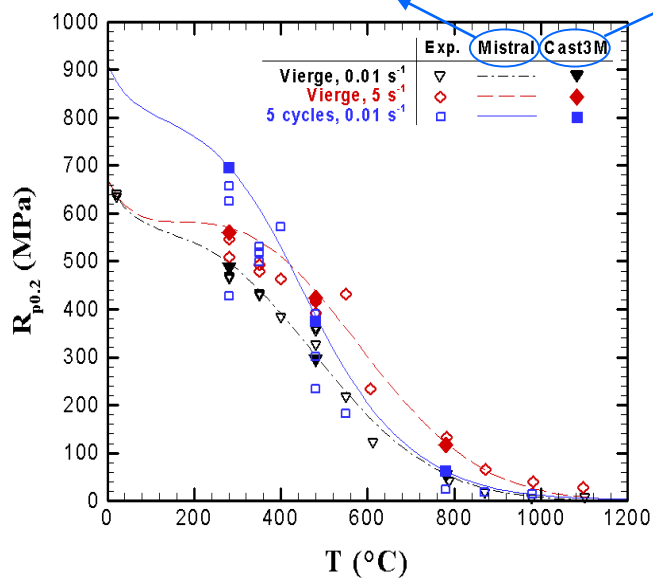
Critère de Hill :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\underline{s} : \underline{\underline{M}}(T, \phi_t) : \underline{s}} = \sqrt{H_r(T, \phi_t) \cdot (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + H_\theta(T, \phi_t) \cdot (\sigma_z - \sigma_r)^2 + H_z(T, \phi_t) \cdot (\sigma_r - \sigma_\theta)^2}$$

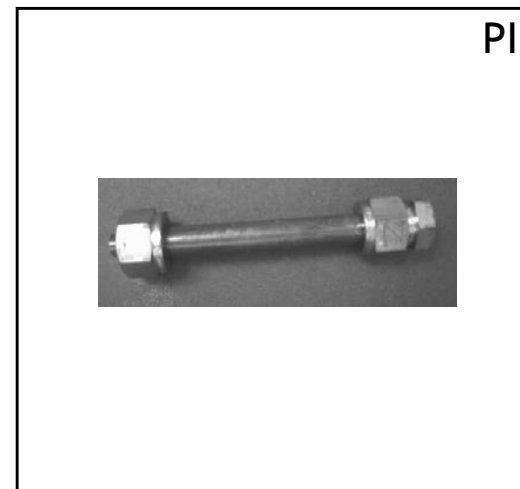
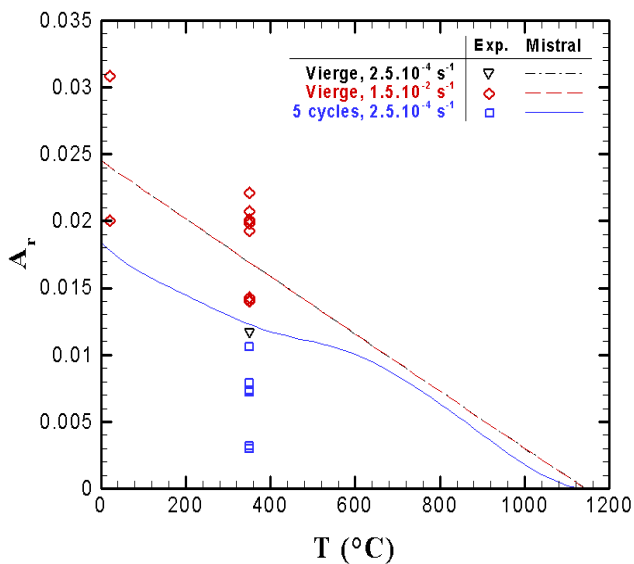
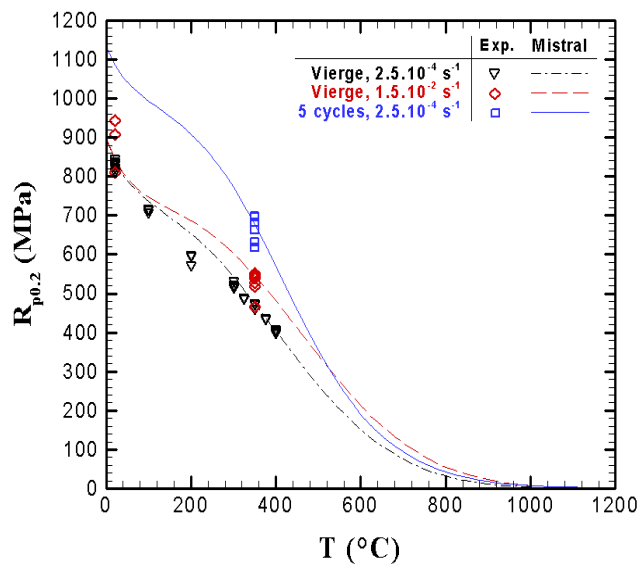
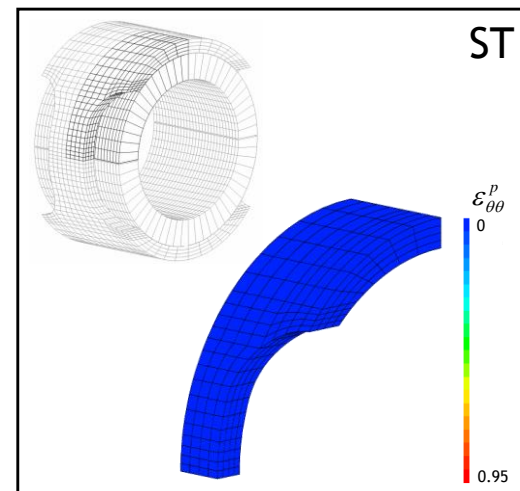
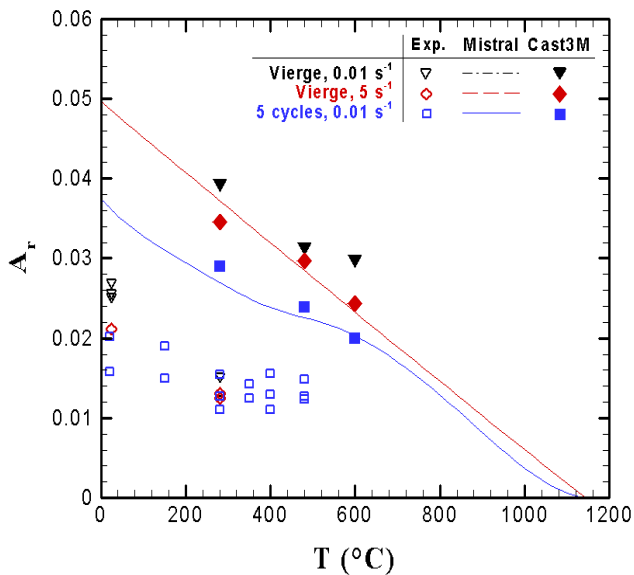
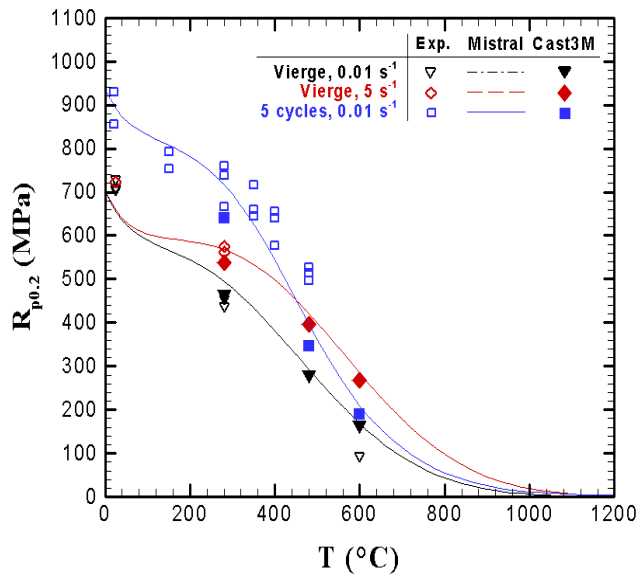
Anisotropie

Calculs « point » (Material STRAIN Laws)

Calculs de structure 3D









- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives





- Matériau de l'étude : Zy-4 détendu
- Les accidents de réactivité (RIA)
- Mécanismes et critères de rupture



- Vers un essai représentatif...
- Loi de comportement pour le Zy-4 détendu
- Programme expérimental
- Bilan et perspectives



## Bilan

- Identification des principaux **mécanismes de rupture** et choix d'un **critère de rupture**
- Faisabilité d'un **essai EDC** à hautes températures
- Étude du **comportement** du Zy-4 détendu
- Évaluation et **modifications de la loi GPL**
- Vérification de l'utilisation de la loi GPL pour des **calculs de structures 3D**
- Analyse de l'influence de la prise en compte de l'**anisotropie** plastique sur structures 3D
- Évaluation numérique des **éprouvettes** utilisées

## Perspectives

- Poursuivre le développement de l'**essai EDC** à « **biaxialité contrôlée** »
- Approvisionnement en matériau et mise en place des **essais**
- **Analyse expérimentale** des cinétiques d'endommagement du Zy-4 détendu hydruré ou non
- Achever l'**identification de la version modifiée de la loi de comportement**
- Développement d'un **modèle d'endommagement** de type GTN  
⇒ Couplage avec la version modifiée de la loi GPL et implémentation dans Cast3M



Merci de votre attention

