



énergie atomique • énergies alternatives

Post-doctorat

03/2010 – 03/2011

Comportement et endommagement de jonctions soudées 9Cr1Mo mod. en fluage entre 450 et 650°C

Projet TEMAS

DTN/STPA – DM2S/SEMT – DMN/SRMA

EDF/MMC Renardières – AREVA-NP



Contexte

- 9Cr1Mo mod. (Gr 91) = matériau actuellement candidat pour le générateur de vapeur des réacteurs nucléaires de génération IV (VHTR, SFR).



énergie atomique • énergies alternatives

- Pas de composant sans soudures.
- Hautes températures = Fluage à évaluer.

→ Amélioration de la compréhension du comportement et de l'endommagement du 9Cr1Mo mod. et de ses joints soudés (JS) dans la gamme de température visée.

Objectifs



énergie atomique • énergies alternatives

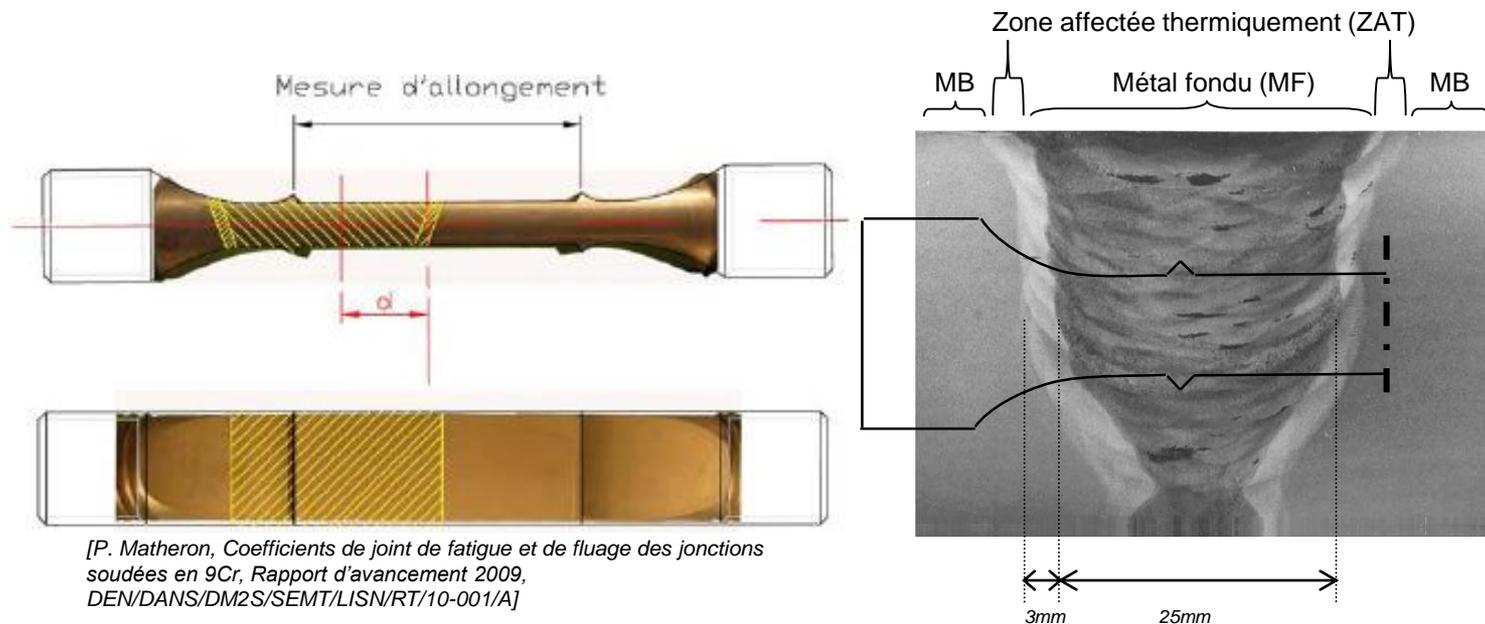
- **Compléter** les données de fluage du métal de base (MB) et du joint soudé (JS) pour modifier les courbes de fluage-déformation, fluage-rupture du RCC-MR (Règles de Conception et de Construction des Matériels mécaniques des îlots nucléaires RNR).
- **Identifier** les manques dans la base de données expérimentales pour calculer les coefficients de réduction de durée de vie en fluage.
- **Disposer** d'un modèle de fluage entre $450^{\circ}\text{C} < T < 650^{\circ}\text{C}$, pour étudier des cas réels de structures avec joints soudés.

Fluage

- **Fluage** = déformation d'un matériau induite pendant le maintien constant de la température et de la contrainte

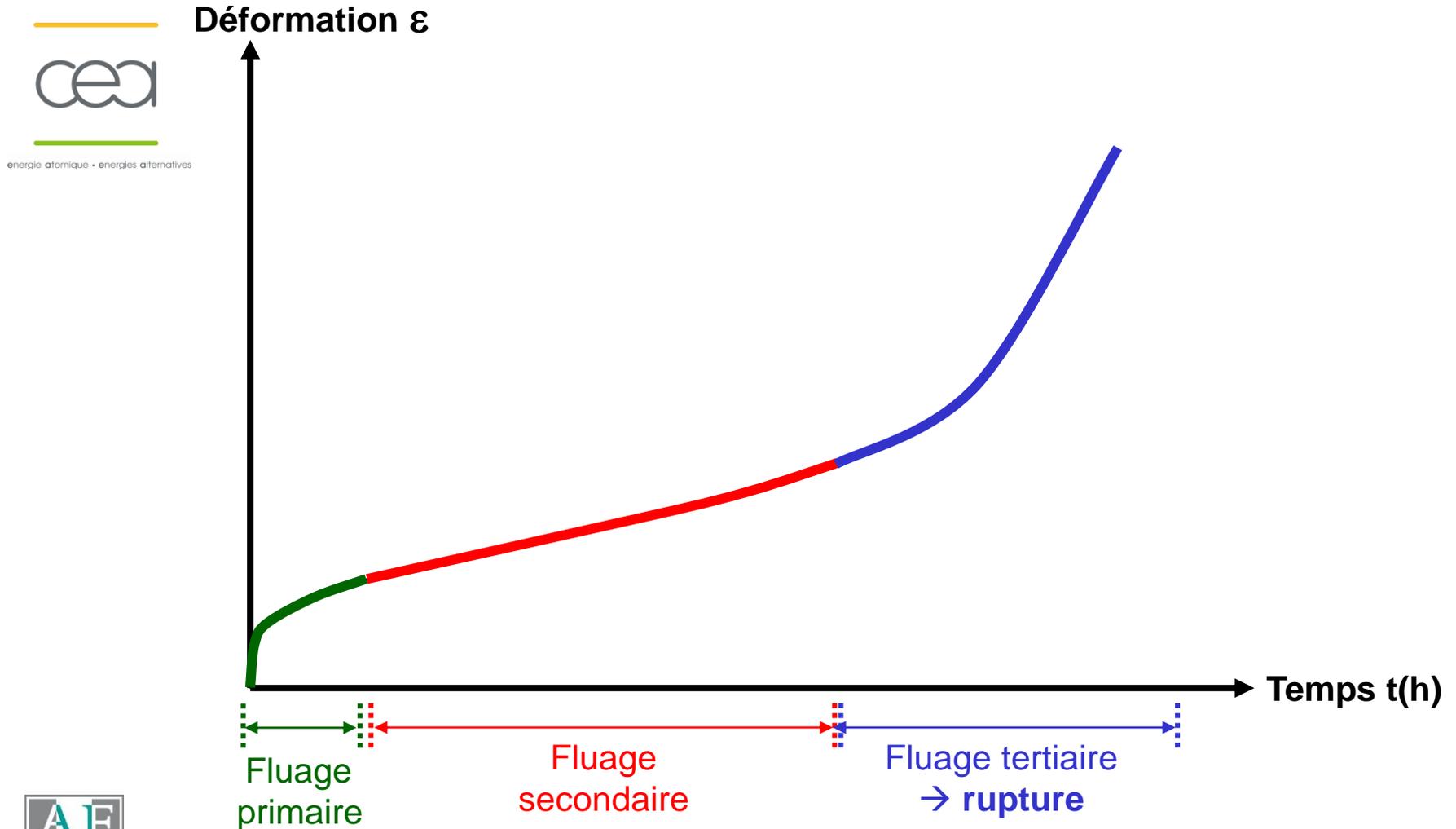
→ Déformation viscoplastique, dépendante du temps de maintien.

- Exemple de géométrie d'éprouvette de caractérisation en fluage du joint soudé :



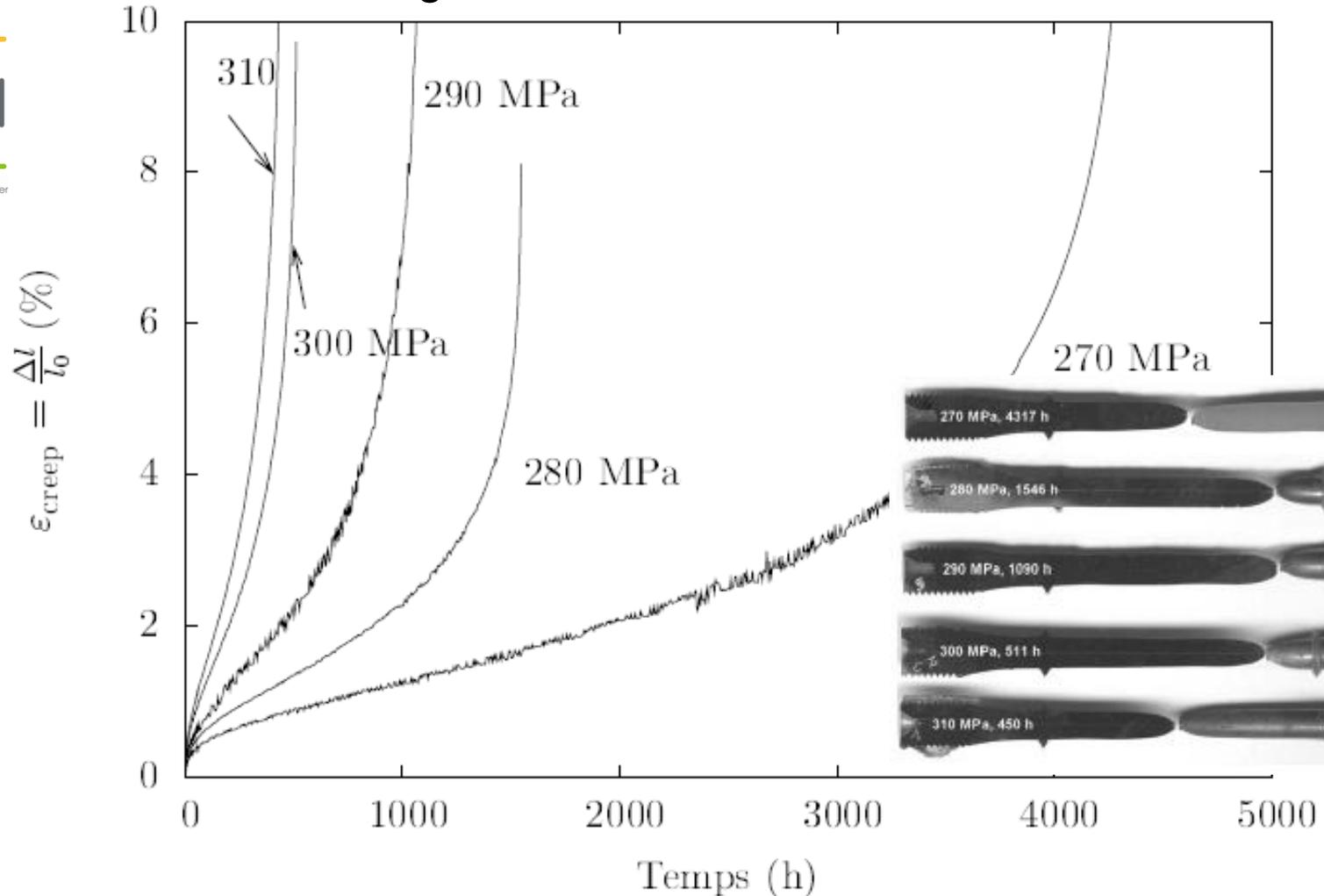
Fluage

- Courbe de fluage : cas général



Fluage

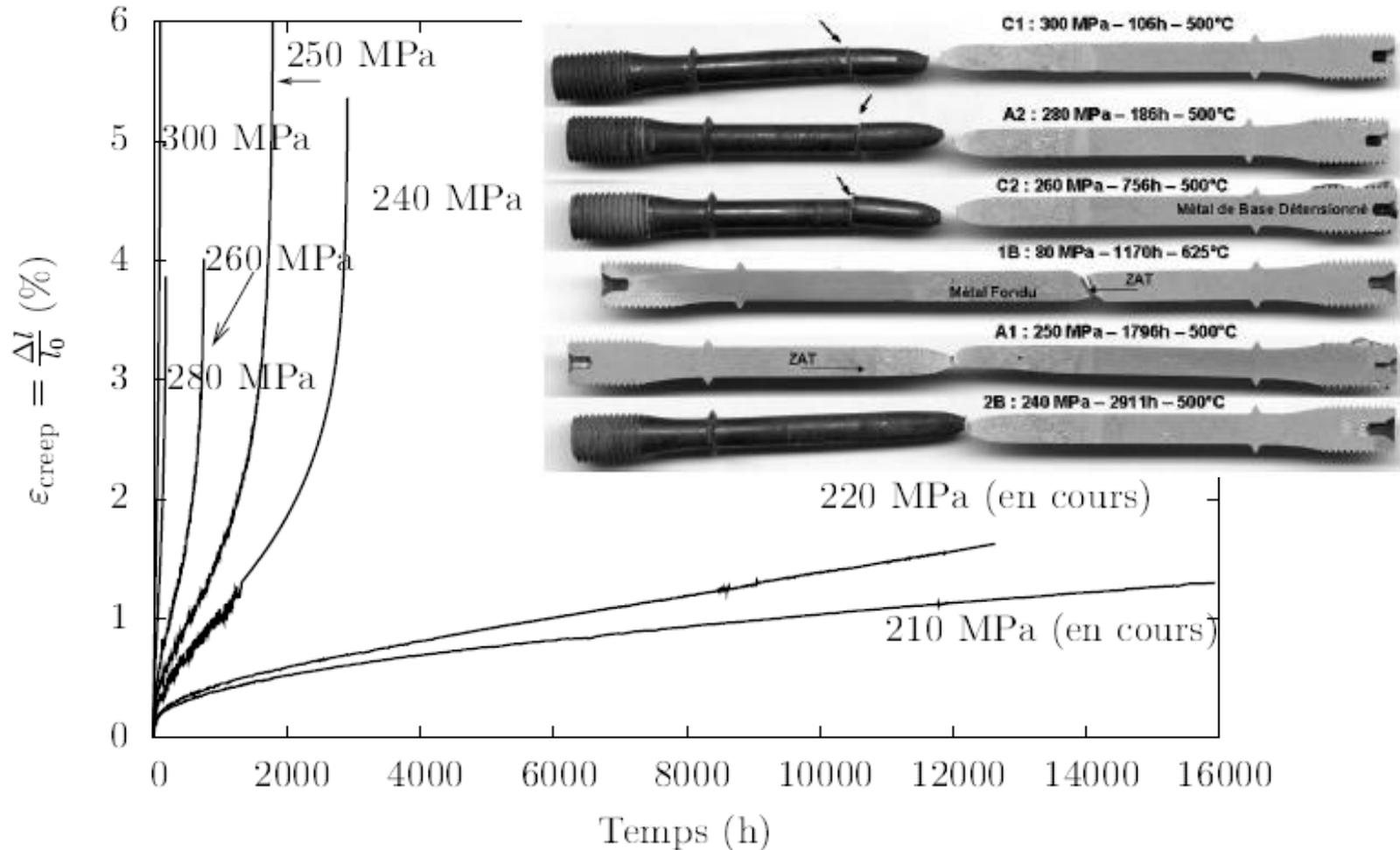
- Courbe de fluage : cas du **métal de base 9Cr1Mo mod.** à 500°C



[F. Vivier, Fluage à 500°C d'un joint soudé d'un acier 9Cr1Mo mod – Évolution de la microstructure & comportement mécanique, Mémoire de thèse, MinesParistech, 03/2009]

Fluage

- Courbe de fluage : cas du **joint soudé 9 Cr1Mo mod.** à 500°C



[F. Vivier, Fluage à 500°C d'un joint soudé d'un acier 9Cr1Mo mod – Évolution de la microstructure & comportement mécanique, Mémoire de thèse, MinesParistech, 03/2009]

Étude données matériaux



énergie atomique • énergies alternatives

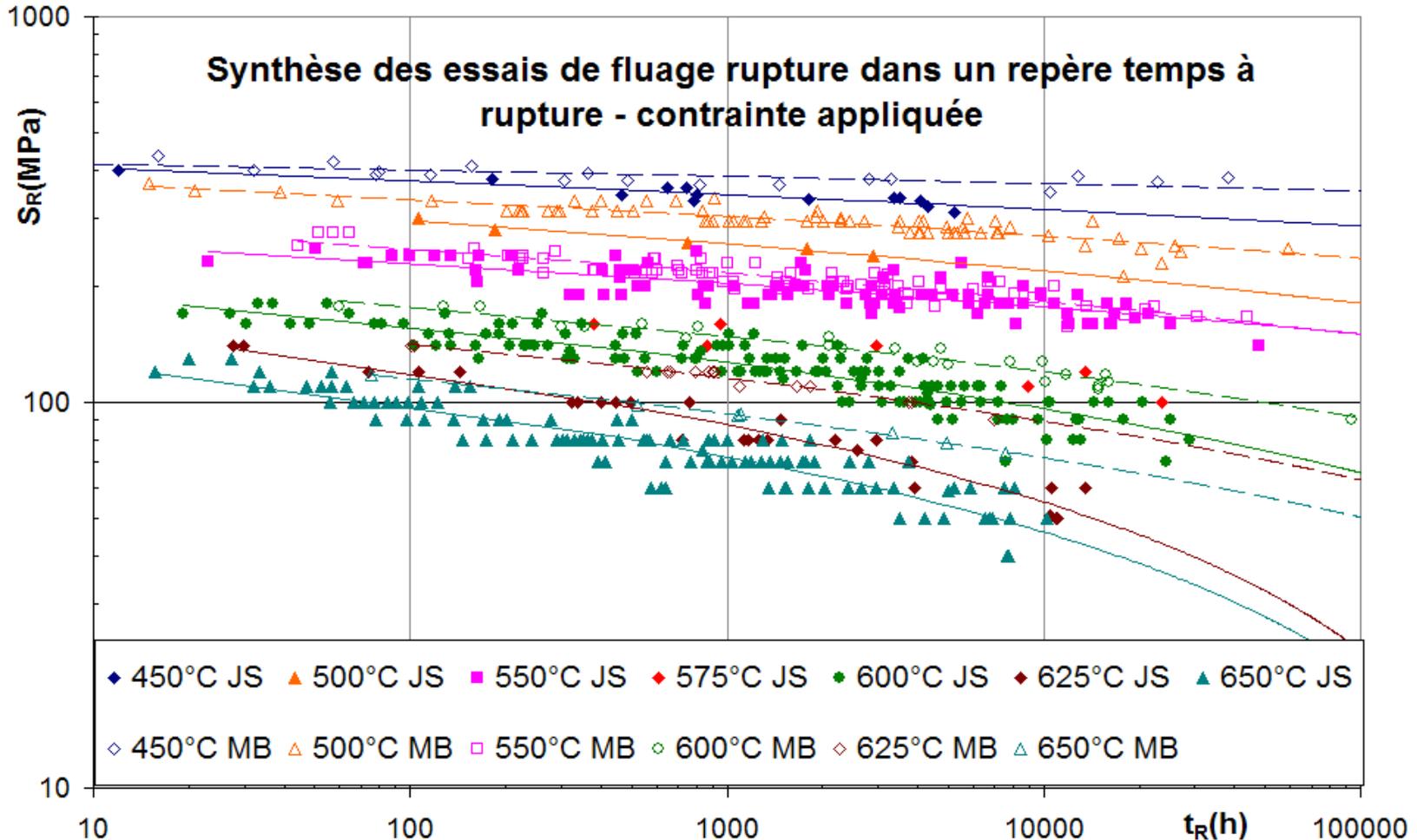
- Base de données alimentée par :
 - Coopération tripartite entre CEA / EDF / AREVA,
 - Thèses :
 - V. Gaffard – MinesParistech/CEA/EDF/AREVA 2004, principalement 625°C, mais aussi 550 et 450°C
 - F. Vivier - MinesParistech/CEA/EDF/AREVA 2008, quasi exclusivement 500°C.
 - Essais SRMA, SEMT, STPA,
 - Collaborations internationales (RAPHAEL, ECCC),
 - Bibliographie (principalement Japon).
- Données expérimentales à utiliser sont :
 - Les courbes de traction monotone,
 - Les courbes de fluage (déformation, rupture). } Entre 450 et 650 °C

Synthèse des essais de fluage

- Synthèse des 210 essais du **métal de base** et des 388 essais sur **joint soudé** en acier 9Cr1Mo mod.



energie atomique • énergies alternatives

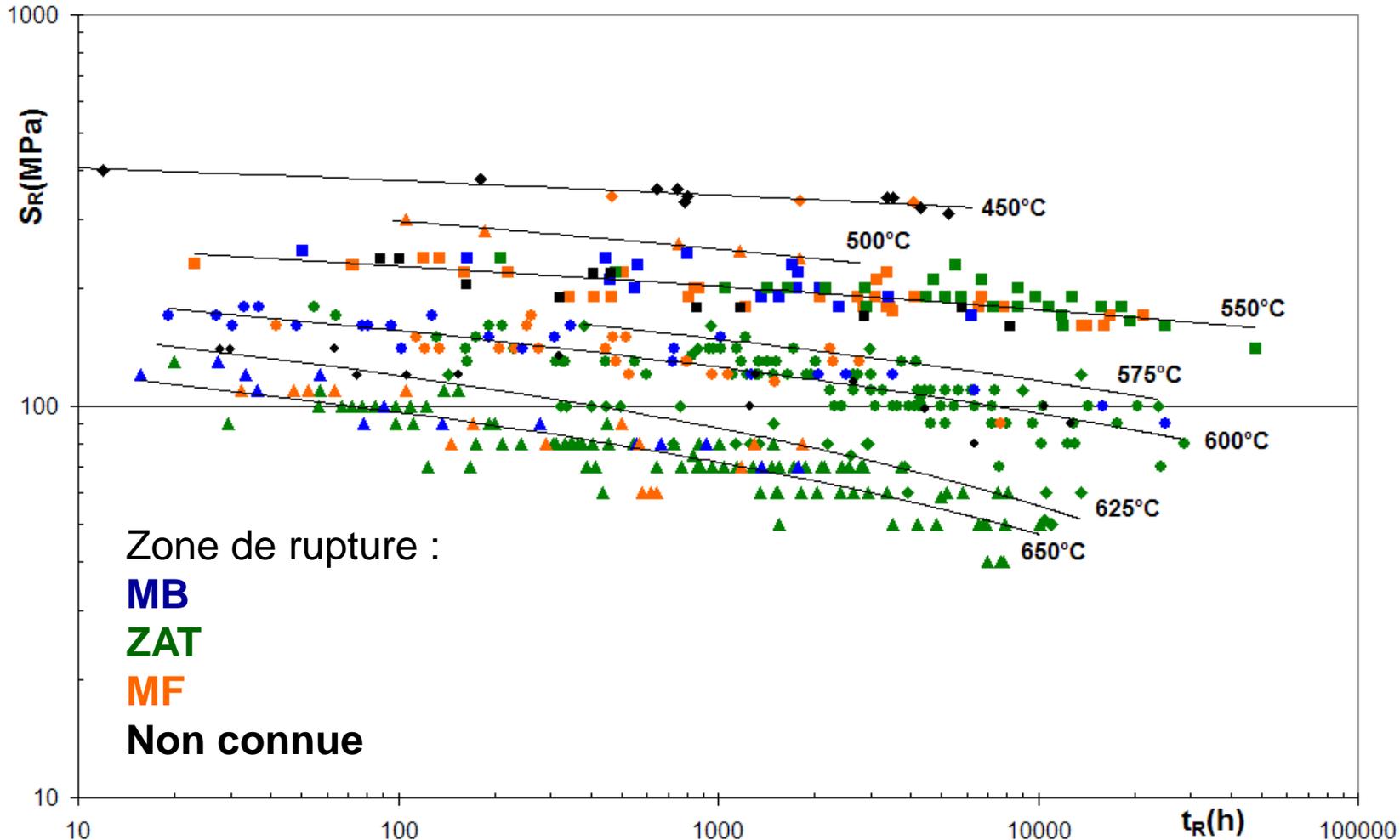


Synthèse des essais de fluage

- Synthèse des 388 essais du **joint soudé** en acier 9Cr1Mo mod. classés selon le lieu de la rupture



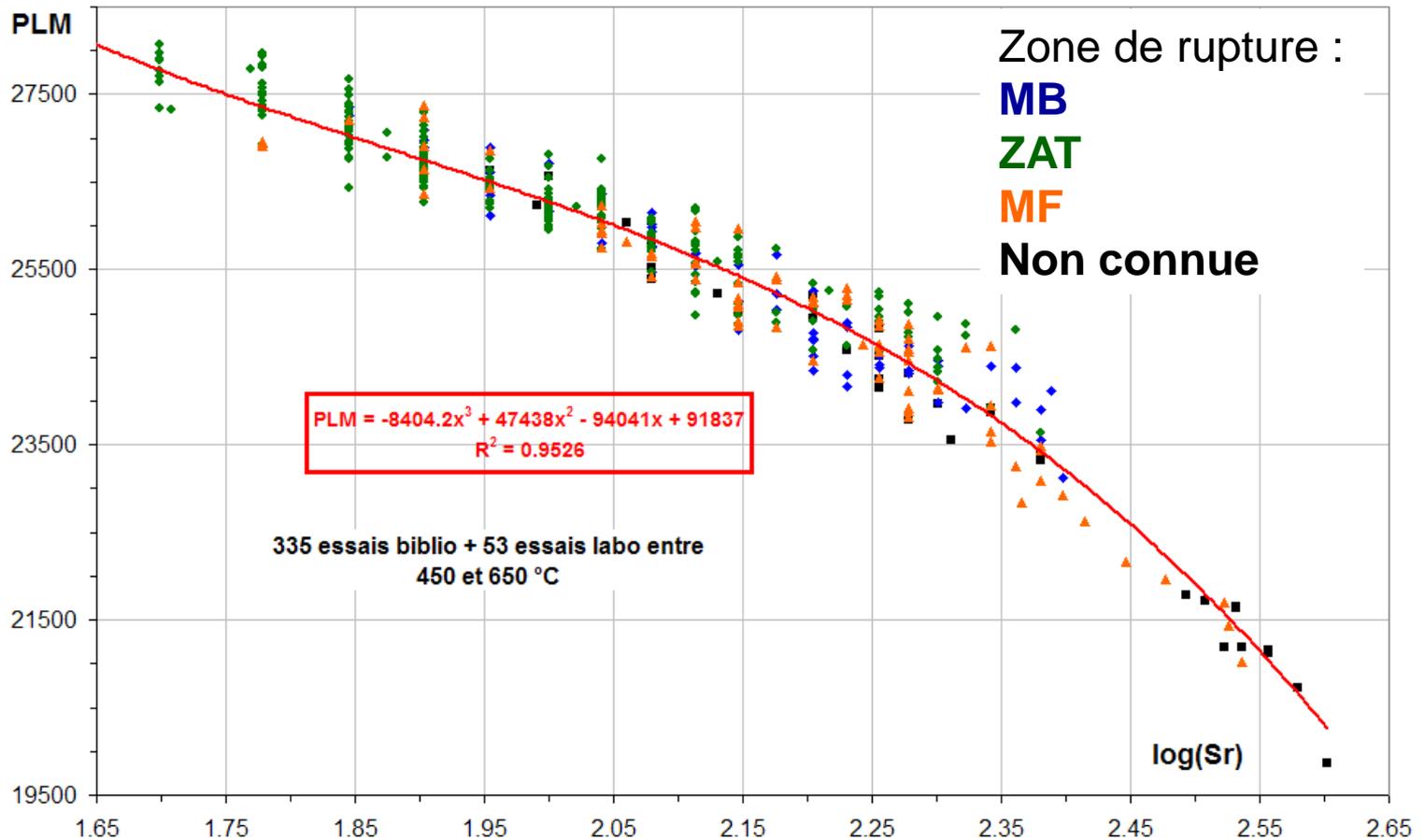
energie atomique • énergies alternatives



Synthèse des essais de fluage

- Synthèse des 388 essais du **joint soudé** en acier 9Cr1Mo mod. dans un ajustement du type Larson-Miller (PLM) et classés selon le lieu de la rupture

$$PLM = [C + \log_{10}(t_R)]\theta$$



energie atomique • énergies alternatives



Approche codification / Approche numérique

- Utilisation de coefficients de joints soudés pour représenter la durée de vie en fluage :

Par exemple RCC-MR définit coefficient J_R

$$J_r = \frac{S_{r_moy}(JS)}{S_{r_moy}(BM)}$$

→ S_{r_moy} = contrainte moyenne qui provoque la rupture pour une température θ et un temps d'application t (déterminée à partir de la courbe moyenne définit par le polynôme de degré 3).

- Approche de codification se fait donc à partir des essais de fluage sur éprouvettes de laboratoire.

→ **Qu'en est-il sur les structures réelles ?**

→ **Utilisation de modèles éléments finis.**

→ **Modèle de fluage Cast3m anisotherme entre 450°C et 650°C**



energie atomique • énergies alternatives



Modélisation Cast3M

Objectifs / étapes de la modélisation :



énergie atomique • énergies alternatives

1. **Implémenter** modèle de comportement de fluage couplé à une loi d'endommagement dans Cast3m,
2. **Créer** la géométrie de l'éprouvette et le fichier de test,
3. **Valider** implémentation sur le comportement du P92,
4. **Identifier** paramètres pour le Gr 91 (MB, puis ZAT et MF) à partir base de données,
5. **Valider** identification par la simulation essais de fluage sur élément de volume (cas MB) puis sur éprouvette complète (joint soudé entier) : vérification courbe de fluage, temps à rupture, localisation rupture,
6. **Appliquer** le modèle aux structures réelles avec / sans joints soudés.



1. Implémentation modèle de fluage

→ *Modèle de Hayhurst – Perrin* développé pour acier 0,5%Cr, modifié par C. Petry (Edf) pour les aciers 9%Cr (notamment le P92) : [C. Pétry, G. Lindet, « Modelling creep behaviour and failure of 9Cr-0.5Mo 1.8W-VNb steel », International Journal of Pressure Vessels and Piping 86 (2009) 486-494]

$$\dot{\underline{\varepsilon}}^{vp} = \frac{3}{2} \dot{\varepsilon}_0 \sinh\left(\frac{\sigma_{eq}(1-H)}{K(1-D)}\right) \frac{\underline{\sigma}^D}{\sigma_{eq}}$$

Evolution de l'écrouissage

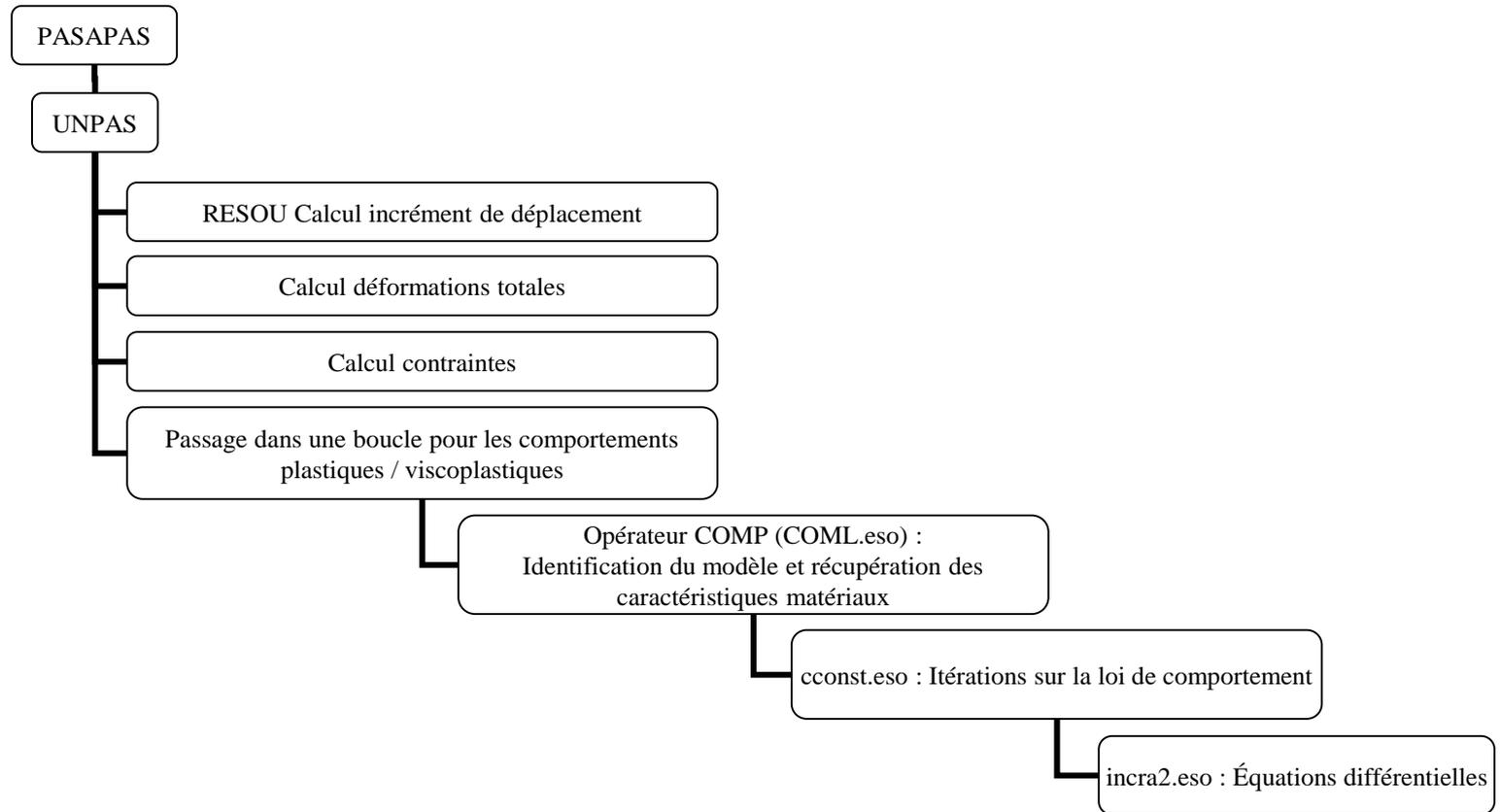
$$\left\{ \begin{array}{l} H = H_1 + H_2 \\ \dot{H}_1 = \frac{h_1}{\sigma_{eq}} (H_1^* - H_1) \dot{p} \\ \dot{H}_2 = \frac{h_2}{\sigma_{eq}} \dot{p} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Cinétique} \\ \text{d'endommagement} \\ \dot{D} = A_0 \sinh\left(\frac{\alpha\sigma_1 + (1-\alpha)\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right) \end{array}$$

→ *Critère de rupture* : $t_R = \text{Min}\{(\varepsilon = 10\%), t(D = D_c)\}$



1. Implémentation modèle de fluage

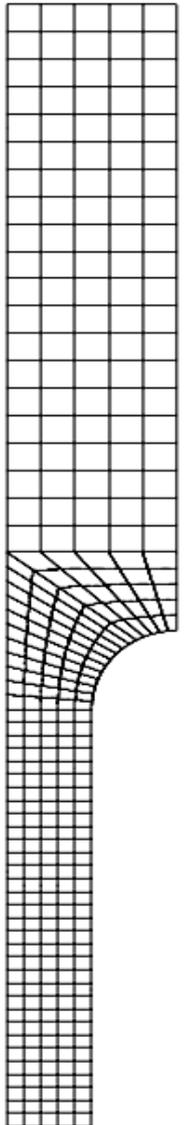
→ Utilisation de la procédure PASAPAS pour la résolution du calcul mécanique non-linéaire



énergie atomique • énergies alternatives

2. Création de la géométrie de l'éprouvette

- Eprouvette cylindrique → calcul axisymétrique → $\frac{1}{4}$ de l'éprouvette à modéliser
- Maillage à 340 éléments (opérateur DALLER)
- Eléments massifs de type quadrangles à 8 nœuds à deux degrés de liberté (QUA8)
- Inconnues nodales en calcul axisymétrique : déplacements UR et UZ.
- Calcul en fluage sur éprouvette: temps CPU ~ 4h (sur Pentium 4, 3GHz, 2 Go de RAM, pour 10% de déformation)



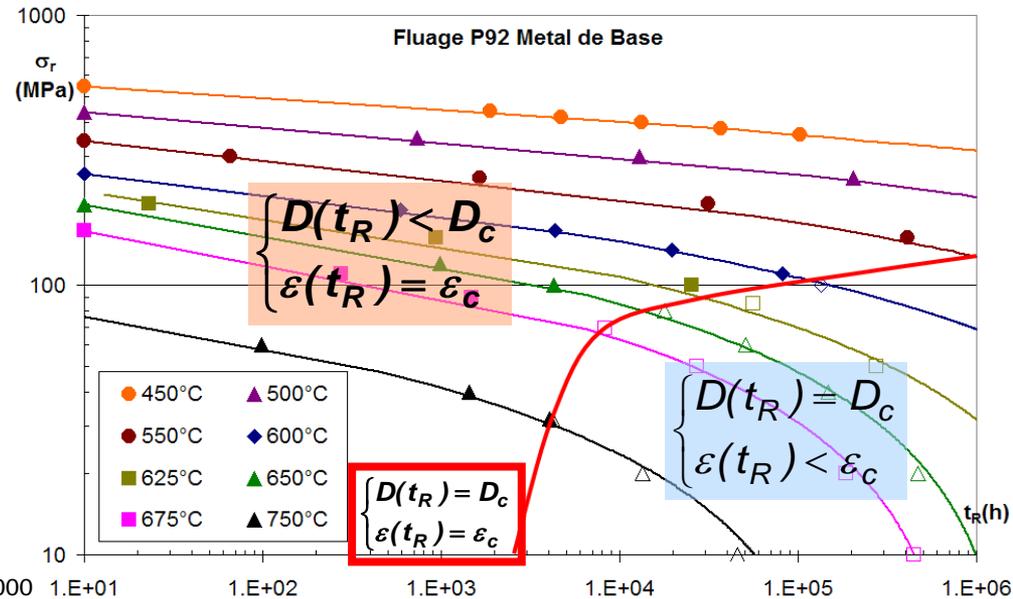
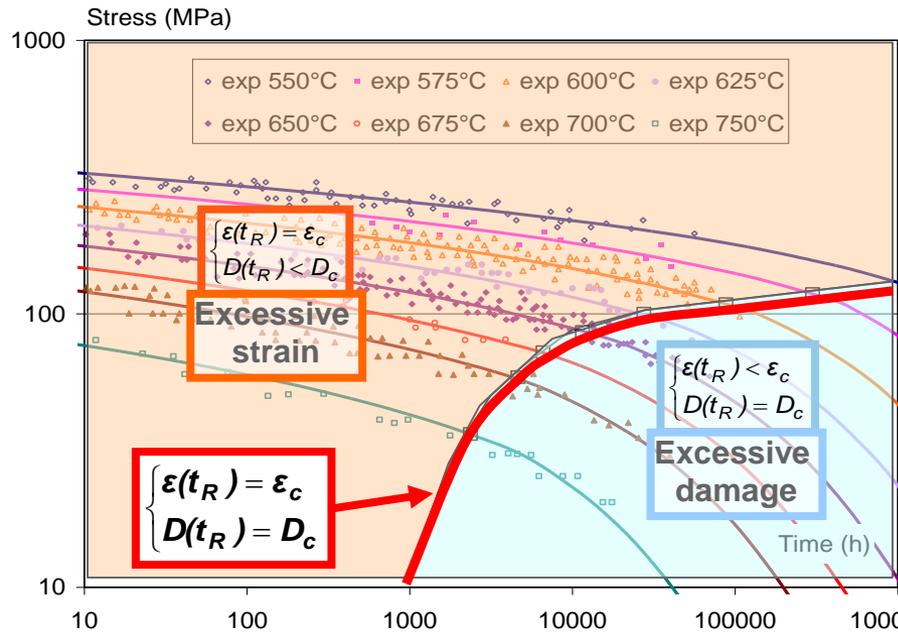
3. Validation de l'implémentation du modèle (sur un élément de volume)



energie atomique • énergies alternatives

→ Réalisé sur le P92 (métal de base ; modèle déjà testé et appliqué avec succès sur ce matériau),

→ Comparaison sur les essais de *fluage* :



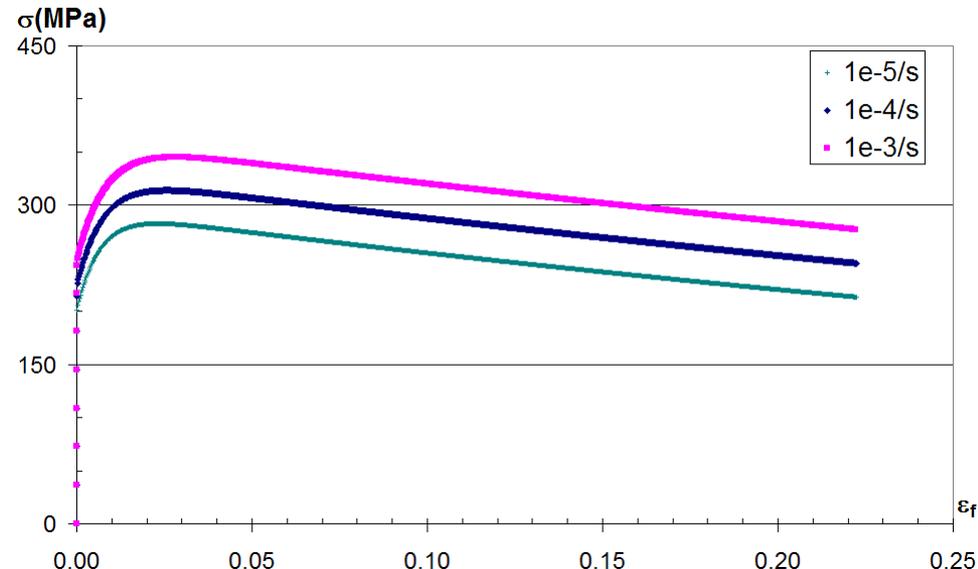
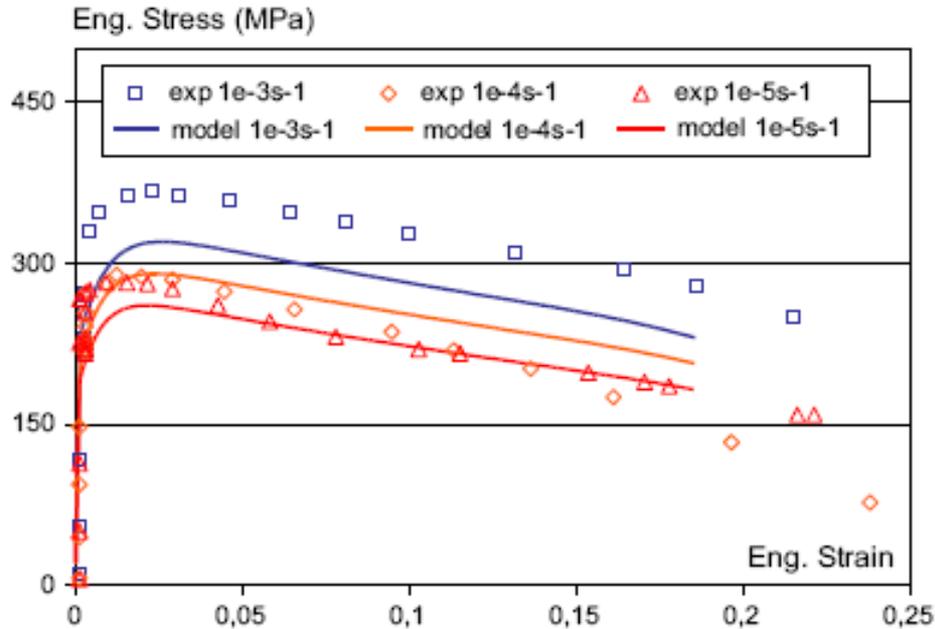
[C. Pétry, E. Gariboldi, « Experimental characterisation and modelling of a P92 weldment », 4th EPRI Expert Workshop on Creep-Fatigue Damage Interaction]

avec $D_c = 0.25$ pour le P92

3. Validation de l'implémentation du modèle (sur un élément de volume)

→ Réalisé sur le P92 (métal de base ; modèle déjà testé et appliqué avec succès avec ce matériau),

→ Comparaison sur les essais de **traction** à 600°C :



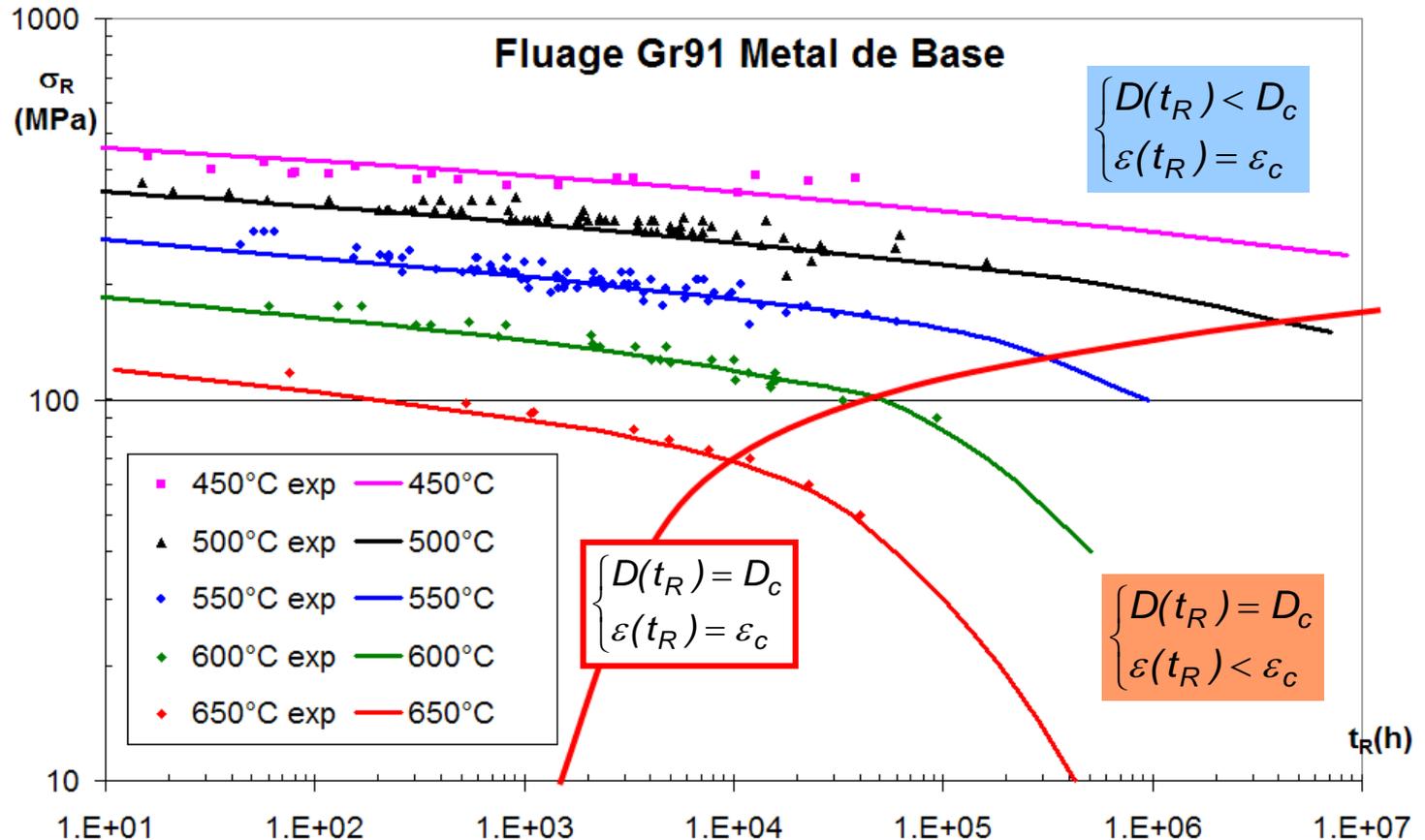
Modélisation Cast3M

4. Identification paramètres pour le Gr 91 pour le MB

5. Validation par la resimulation des essais de fluage



energie atomique • énergies alternatives



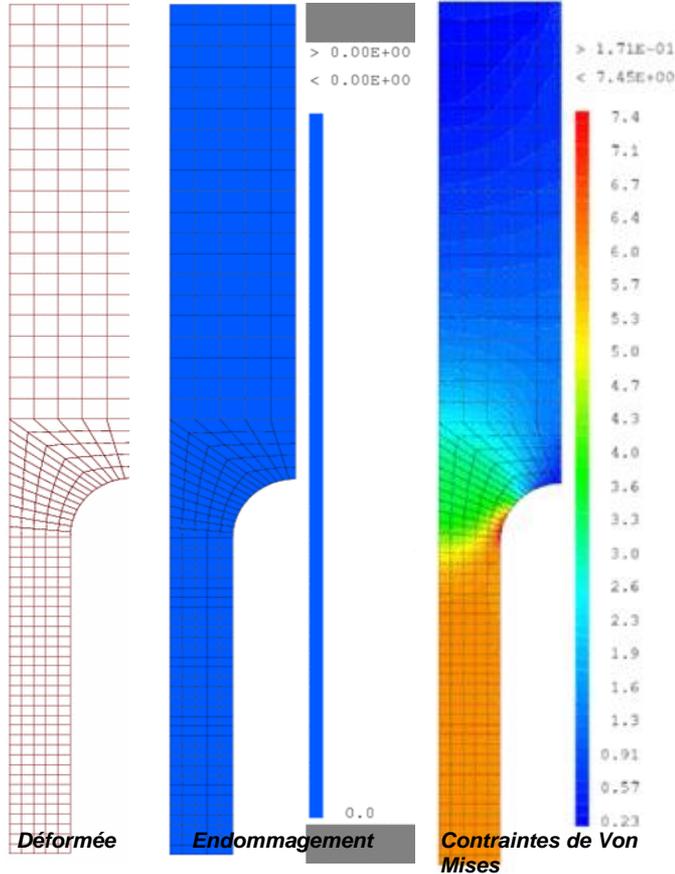
5. Validation par la resimulation des essais de fluage



energie atomique • énergies alternatives

650°C - 120 MPa

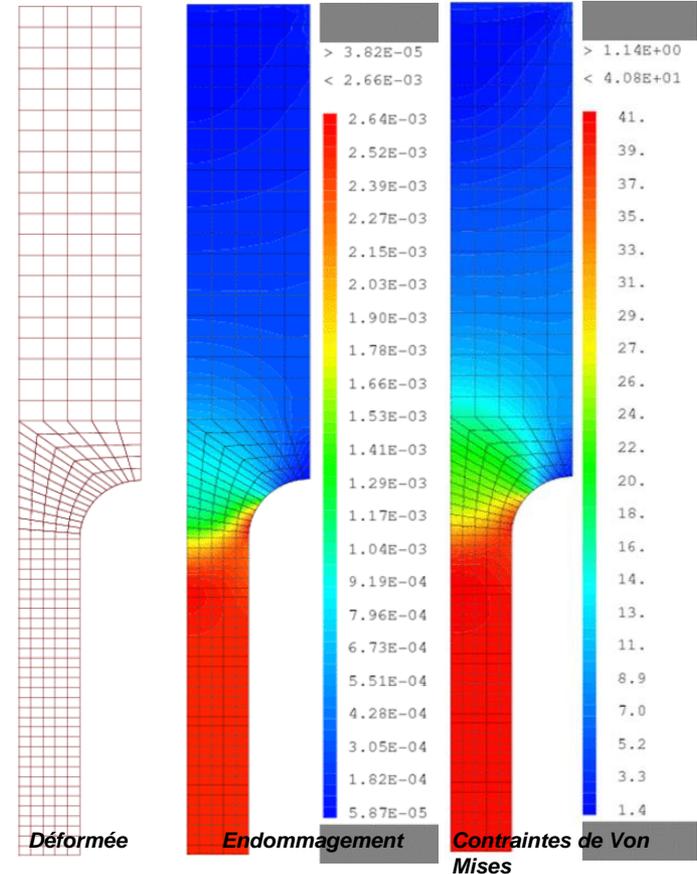
$t_R = 11 \text{ h} - D_{\max}(\epsilon=10\%) = 1.37e^{-3}$



ϵ (%) = 0; 0.004; 0.7; 1.1; 1.6; 2.1; 2.6; 3.4; 4.6; 12

650°C - 40 MPa

$t_R = 207000 \text{ h} - D_{\max}(\epsilon=10\%) = 0.35$



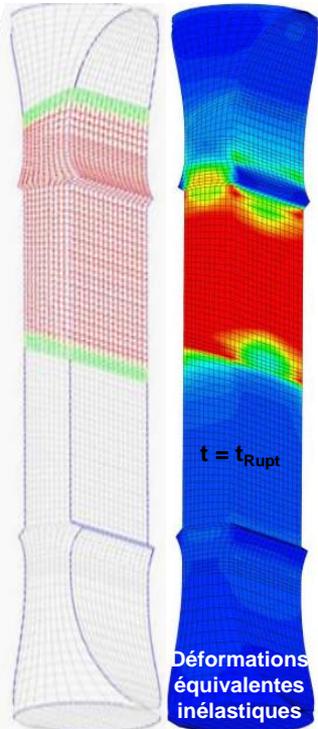
ϵ (%) = 0; 0.1; 0.3; 0.5; 0.9; 2; 2.6; 3.9; 7.1; 10.9



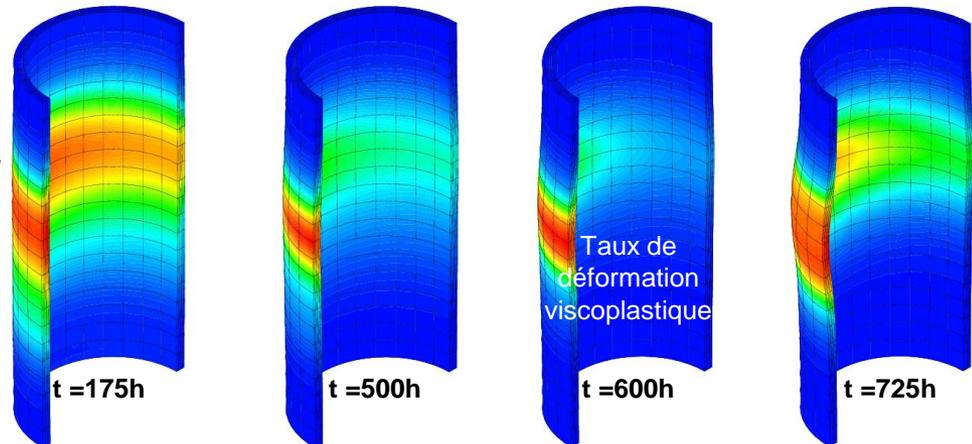
Modélisation Cast3M

Perspectives :

1. **Compléter** données exp. fluage long terme pour confirmer valeur de $Dc \rightarrow$ détermination précise courbe limite.
2. **Valider** modèle pour le Gr 91 sur le MB en traction,
3. **Identifier** paramètres du modèle pour ZAT et MF,
4. **Valider** identification par la simulation essais de fluage sur éprouvette complète (vérification courbe de fluage, temps à rupture, localisation rupture),
5. **Appliquer** le modèle aux structures réelles avec / sans joints soudés.



[Y. Lejeail, Assessment of results of Large Component Tests, Sub-project SP-ML, RAPHAEL-0904-D-ML1-7, 04/2009]



[P. Matheron et O. Ancelet, Coefficients de joint de fatigue et de fluage des jonctions soudées en 9Cr, Rapport d'avancement 2008, SEMT/LISN/RT/08-35/A]



énergie atomique • énergies alternatives

MERCI



Projet TEMAS



énergie atomique • énergies alternatives

- **Coordonné** entre les acteurs français CEA, AREVA et EDF.
- **Couvre** l'ensemble des actions relatives au choix et au développement des matériaux envisagés pour l'assemblage combustible (hors combustible) et pour les structures du futur RNR-Na.
- **Intègre** le retour d'expérience des réacteurs Phénix, SuperPhénix et du projet EFR.
- **Se focalise** également sur le développement, notamment les règles de dimensionnement et les lois de comportement, du code RCC-MR qui a été retenu par le CEA, AREVA et EDF pour la construction des réacteurs RNR-Na.



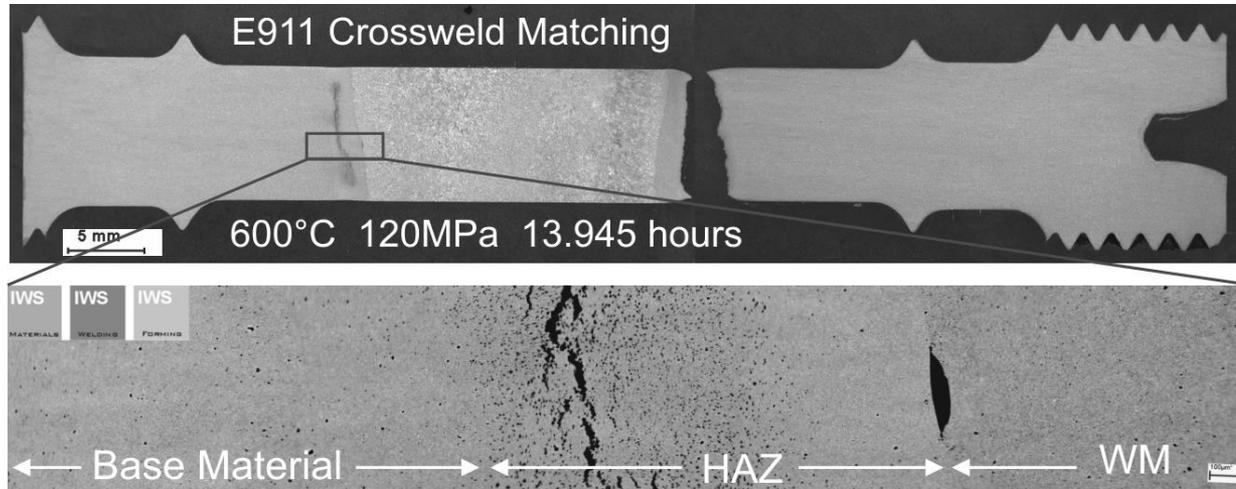
Modes de rupture des joints soudés

- Lieux de rupture différents :
 - Forte $\sigma \rightarrow$ cours $t_R \rightarrow$ rupture dans le métal fondu,



[P. Mayr et al., Long-term creep behaviour of 9% Cr steel weldments, Proc. of CREEP8, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas]

- Faible $\sigma \rightarrow$ long $t_R \rightarrow$ rupture dans la ZAT (ICHAZ de type IV).



[P. Mayr et al., Long-term creep behaviour of 9% Cr steel weldments, Proc. of CREEP8, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas]

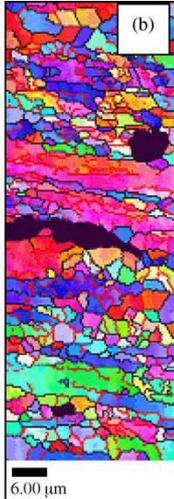
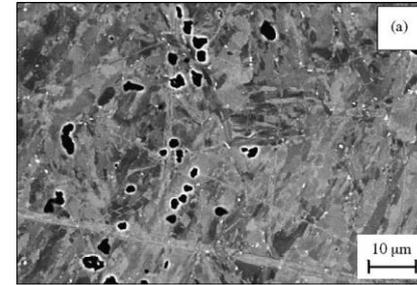
\rightarrow Pourquoi des lieux de rupture différents ?

Modes de rupture des joints soudés

→ Car mécanismes de rupture différents :

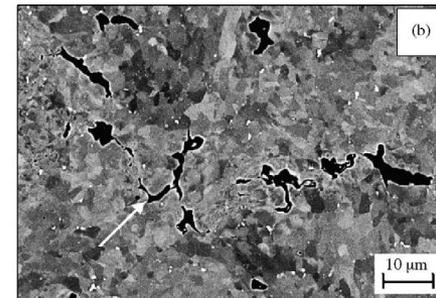
- Forte σ : rupture ductile intergranulaire dans les cupules assistée par la viscoplasticité

- Nucléation de cavités aux joints de grains,
- Croissance de cavités assistée par la déformation des grains et coalescence des petites cavités intergranulaires,
- Striction est déclenchée par le recouvrement d'une microstructure en latte de martensite qui entraîne la rupture ductile (faible fraction de volume de cavités (10%).



- Faible σ : rupture gouvernée par l'endommagement de fluage par cavitation assistée par la diffusion :

- Nucléation de cavités (en forme de fissures) aux joints de grains :
- Croissance de cavités assistée par diffusion le long des joints de petits grains équiaxes.
- Coalescence des cavités pour formation micro-puis macro-fissure



Modes de rupture des joints soudés

→ Pourquoi rupture type IV dans ICHAZ (InterCritical Heat Affected Zone) ?



energie atomique • énergies alternatives

- MB = distribution uniforme des précipités + forte densité de dislocations → Structure fine de sous grains stabilisée par ancrage des particules et durcissement de la solution solide

→ **Microstructure avec excellente résistance au fluage**

[V. Gaffard et al., High temperature creep flow and damage properties of 9Cr1MoNbV steels: Base metal and weldment, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 2547–2562]



9.00 μm Boundaries: Rotation Angle

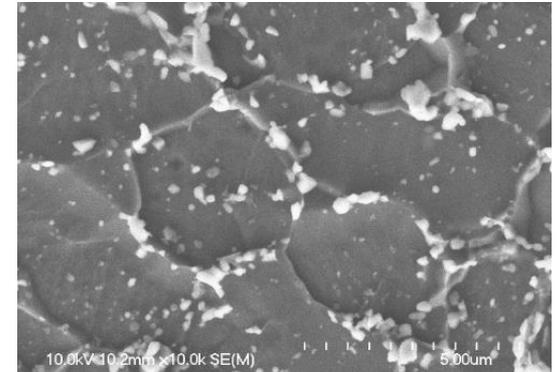
	Min	Max
—	15°	180°
—	5°	15°

- Cycle thermique de soudage + traitement thermique post soudage (PWHT) modifie distribution :

- Dissolution non complète des carbures pendant le soudage,
- Grossissement des carbures pendant le PWHT.

→ **formation d'une bande étroite à faible résistance = la ZAT (HAZ)**

- Microstructure ICHAZ =
 - petits grains équiaxes (taille 5-6μm)
 - Grains constellés par des particules aux joints de grains
 - Grains à forte désorientation cristallographique



[P. Mayr et al., Long-term creep behaviour of 9% Cr steel weldments, Proc. of CREEP8, July 22-26, 2007, San Antonio, Texas]

→ **Sensibilité de l'ICHAZ à la fissuration aux joints de grains**

Détermination de D_c et de la courbe limite

1. a/ Utilisation de la vitesse minimale de déformation pour déterminer la contrainte correspondant au changement de mécanisme de fluage

→ loi puissance de type Norton

→ Changement de pente =
Changement valeur exposant $p(T)$

→ Obtention de σ_{lim}

$$\dot{\epsilon}_{min} = a(T) \sigma^{p(T)}$$

[L. Kloc and V. Sklenicka, Transition from power-law to viscous creep behaviour of P-91 type heat-resistant steel, *Materials Science and Engineering*, A234-236 (1997) 962-965]

b/ Utilisation de l'énergie d'activation

$$Q_a = - \frac{\partial \ln(\dot{\epsilon}_{min})}{\partial (1/RT)}$$

2. Simulation essai de fluage à la contrainte déterminée

3. Ajustement de D_c pour obtenir $t_R(\epsilon = \epsilon_c) = t_R(D = D_c)$ à σ_{lim}

