



# Cenaero



**Solution par Morfeo d'un problème de propagation de fissure influencé par les contraintes résiduelles d'un soudage par faisceau d'électrons**



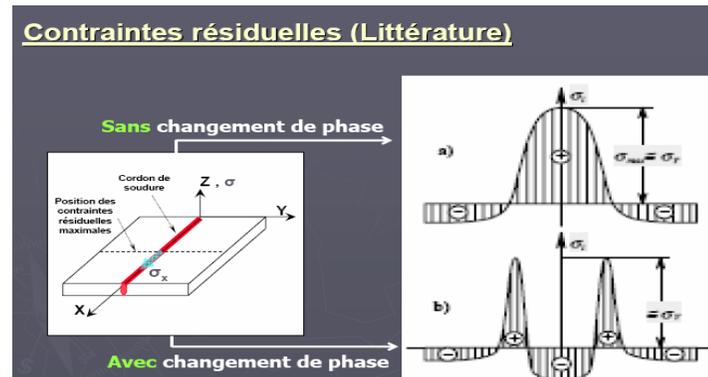
**Sneema**  
Groupe SAFRAN

**Amine Ghouali, Alain Pyre**  
**Marc Duflot, Nicolas Poletz, Laurent D'Alvise**

- **Position du problème**
- **Morfeo/Welding**
- **Morfeo/Crack**
- **Faisabilité d'un chaînage soudage + fissuration**
  - Cas de 2 cylindres soudés par faisceau d'électrons
  - Différentes positions de fissure

# Modélisation numérique du soudage FE

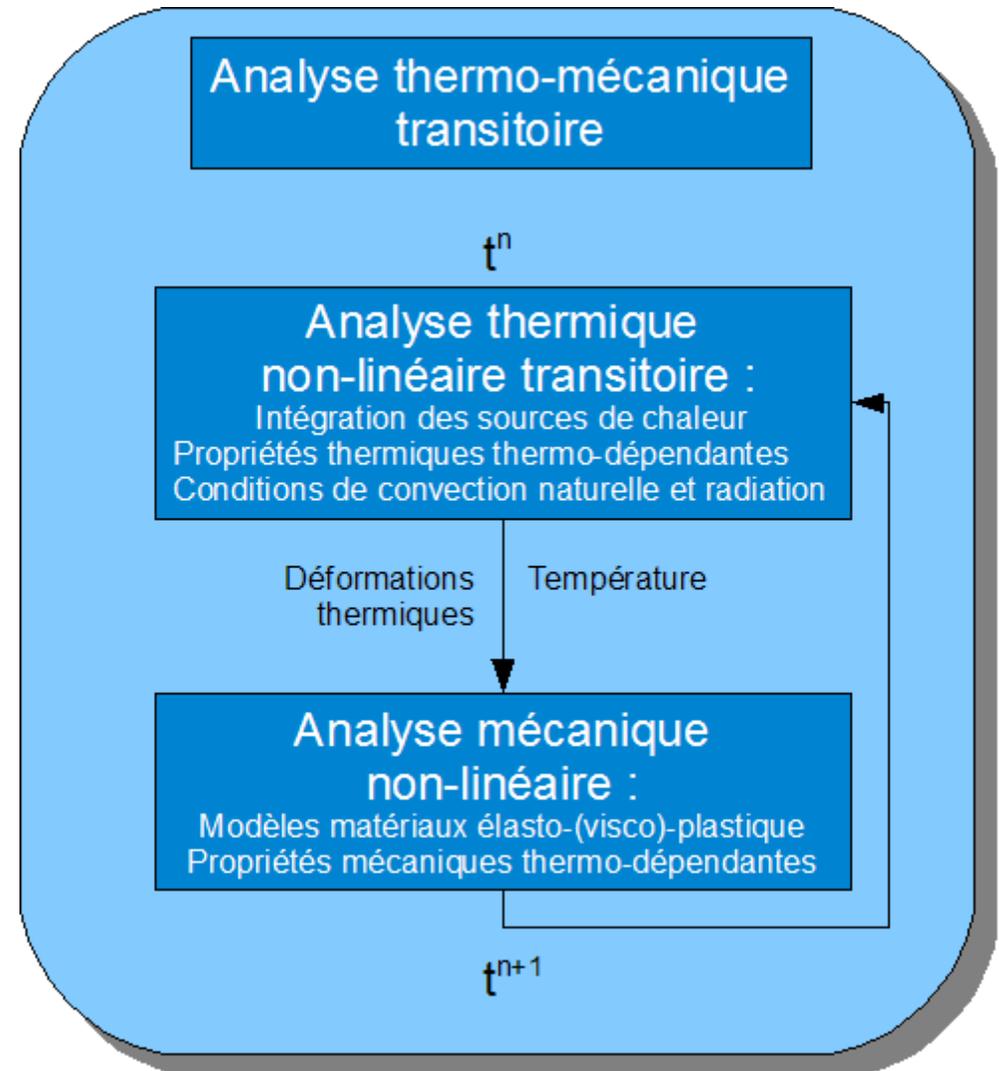
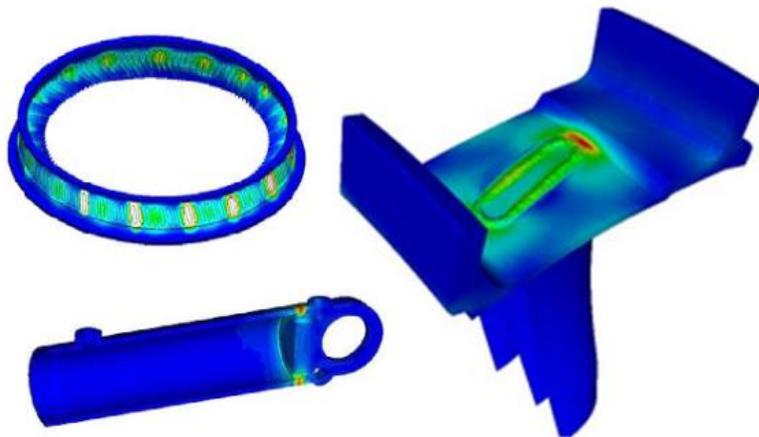
- Phénomènes induits par le soudage
  - Plastifications locales qui évoluent jusqu'en fin de refroidissement.
  - Pour certains matériaux : changements de phases à l'état solide



- Conséquences pour les structures
  - Déformations résiduelles → Défaut d'alignement des pièces
  - Contraintes résiduelles → Fragilisation mécanique et rupture prématurée en fatigue

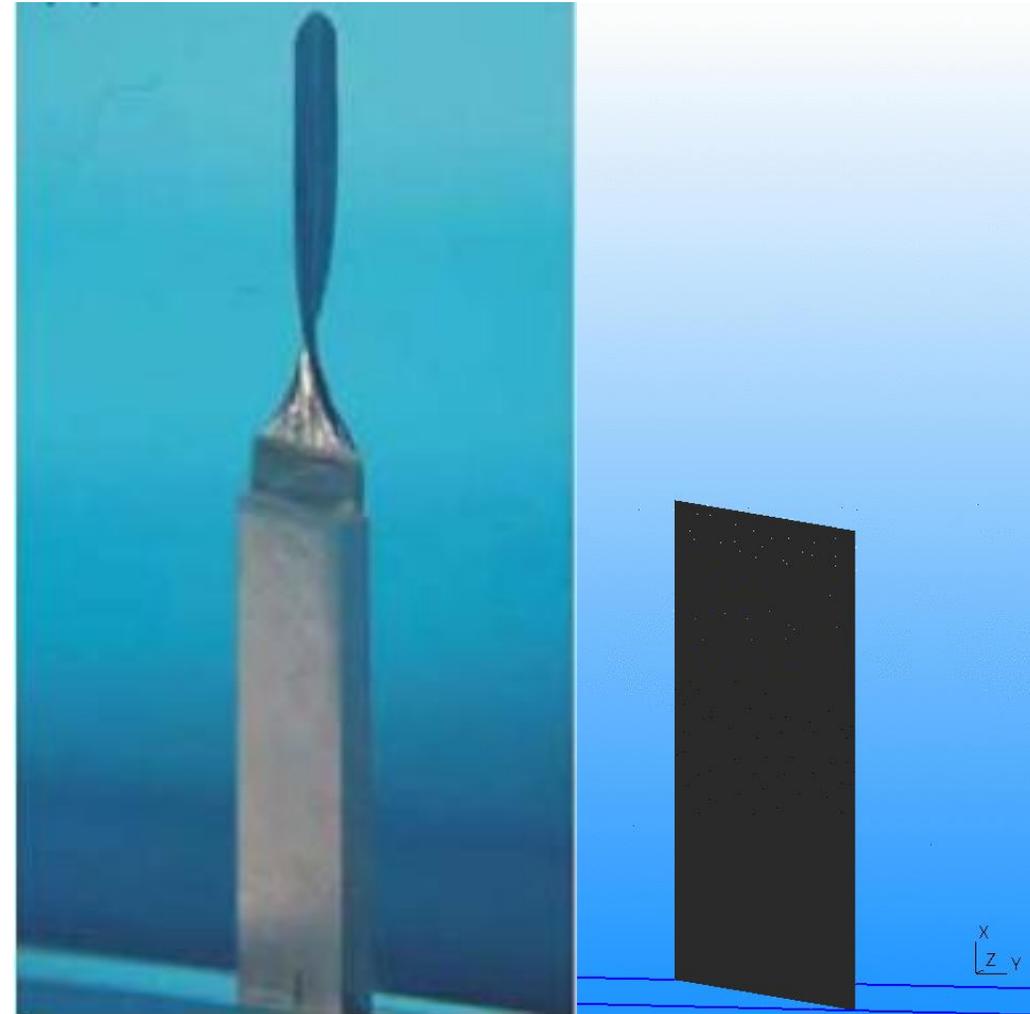
# Modélisation numérique du soudage avec Morfeo

- Calcul thermo-mécanique étagé
- Calcul parallèle sur pièces industrielles intégrales et complexes
- Sources de chaleur volumiques définies dans un repère local à la trajectoire de soudage
- Prise en compte du système de fixation dans toute sa complexité
- Prédiction des contraintes résiduelles et des distorsions
- Module métallurgique disponible

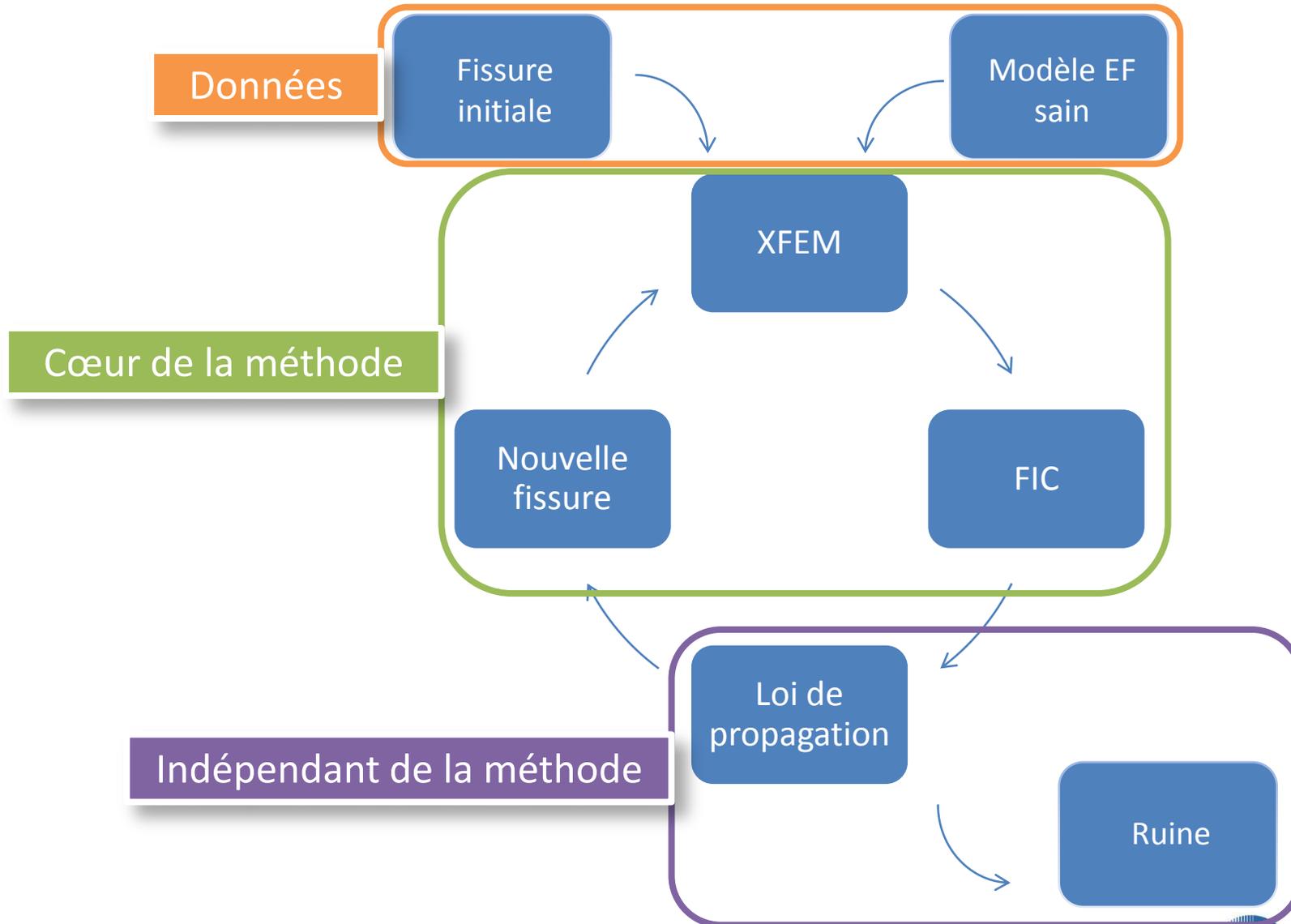


# Modélisation numérique de la fissuration avec Morfeo

- Basé sur XFEM
- Fissuration sans remaillage : la fissure *traverse* les éléments
- Fissures 3D multiples de géométrie quelconque
- Calcul de facteurs d'intensité de contrainte
- Stabilité de fissure
- Propagation par fatigue
- Durée de vie
- Morfeo/Crack connecté à
  - Abaqus
  - Samcef



# Modélisation numérique de la fissuration avec Morfeo



# Prise en compte des contraintes initiales dans XFEM

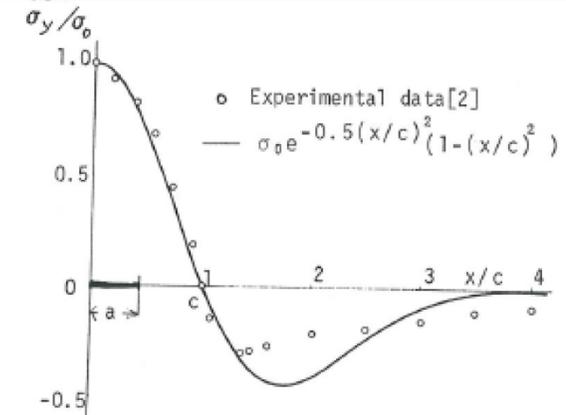
- Influence de  $\sigma_0$  dans
  - dans le vecteur de charge
  - le calcul de l'intégrale J

$$J = \int_{\Gamma_J} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \, d\Gamma$$

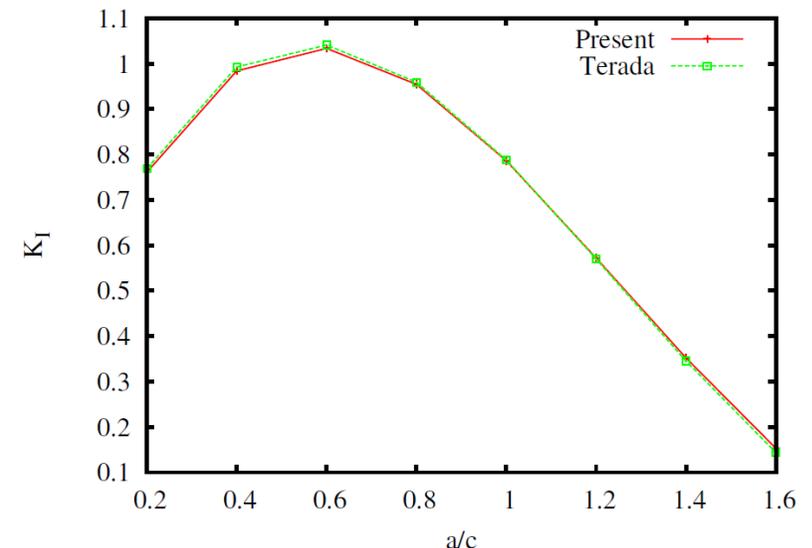
$$\mathbf{P} = W_m \mathbf{I} - (\nabla \mathbf{u})^T \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

$$\begin{aligned} W_m(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_T, \boldsymbol{\sigma}_0) &= \int_{\boldsymbol{\varepsilon}_T}^{\boldsymbol{\varepsilon}} \boldsymbol{\sigma} \, d\boldsymbol{\varepsilon} \\ &= \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma}_0) : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_T) \end{aligned}$$

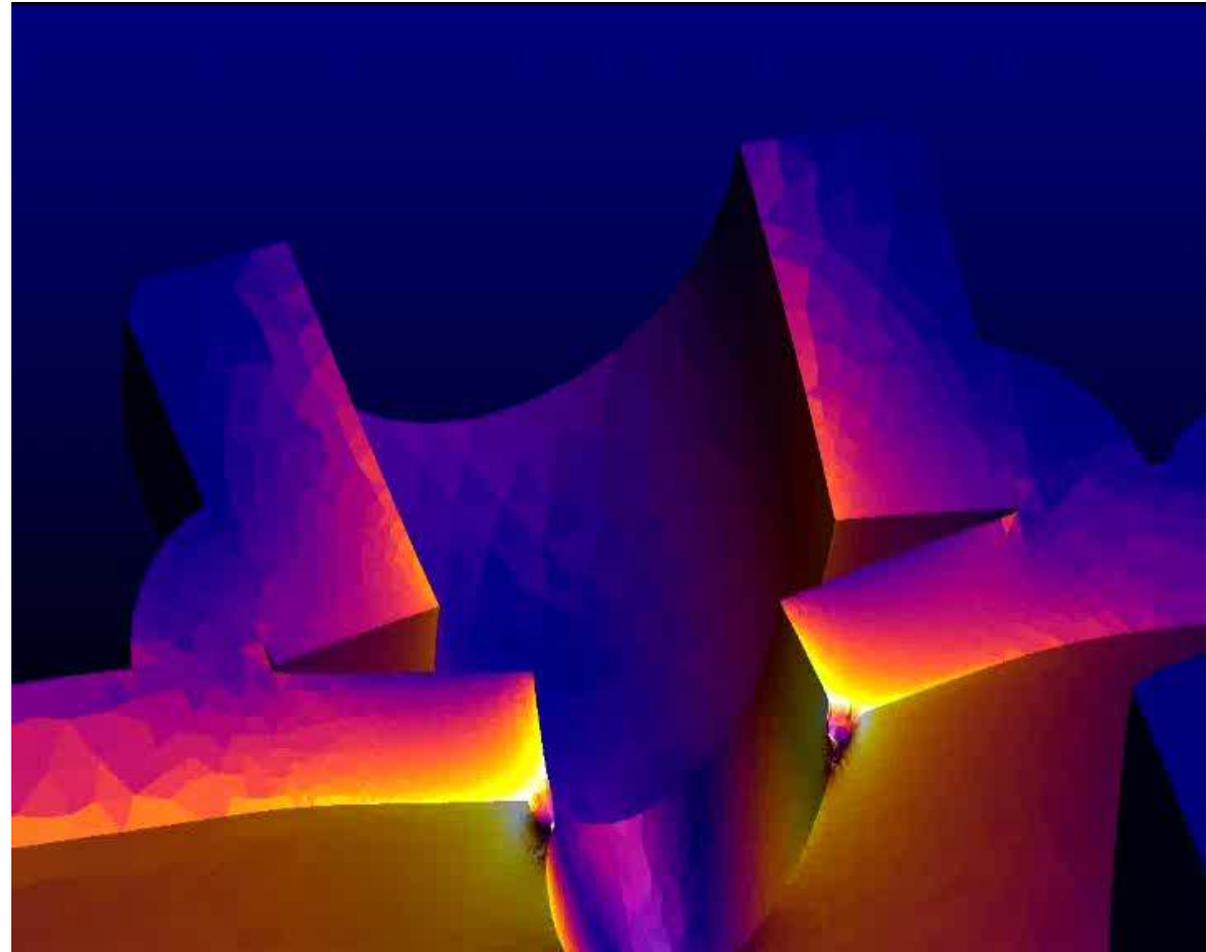
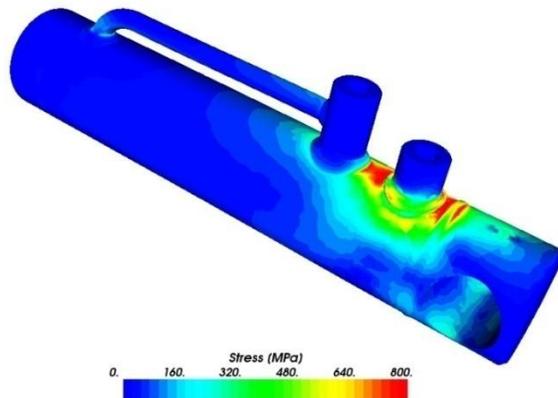
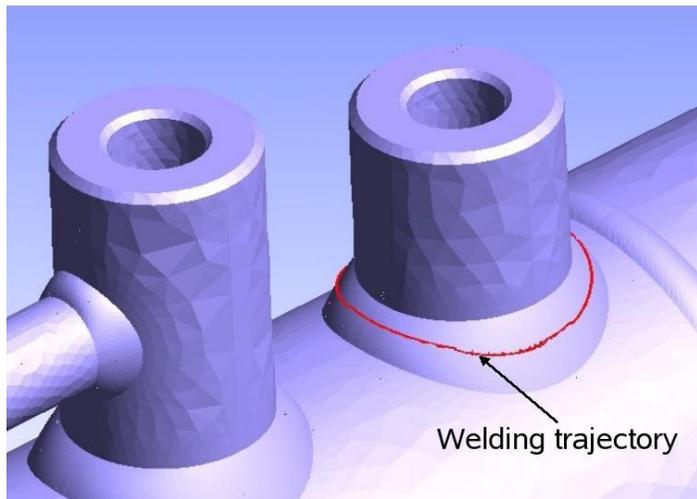
- Validation : Fissure droite 2D perpendiculaire au joint de soudure



$\sigma_0$  : maximum tensile stress at  $x=0$   
 $c$  : coordinate where original distribution changes its sign  
 $2a$  : crack length



## Soudage laser (cylindre hydraulique)



# Soudage FE de cylindres coaxiaux

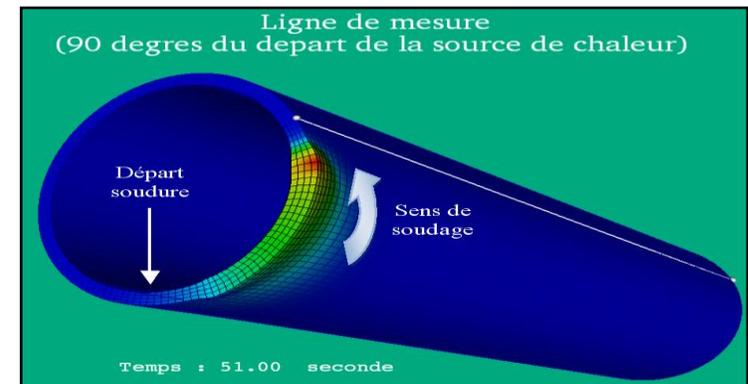
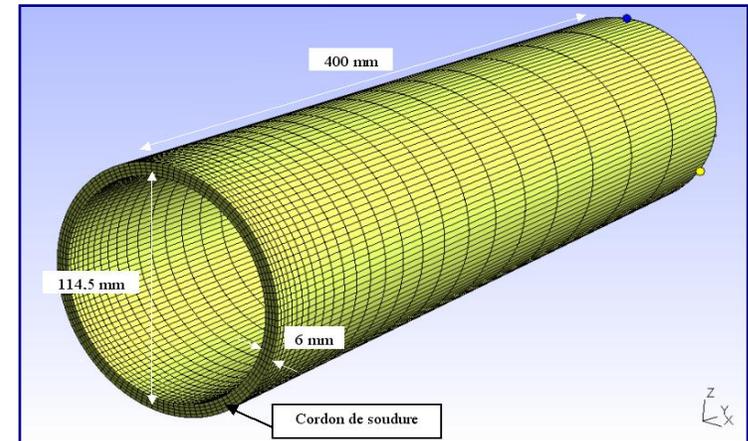
## Soudage FE de deux tubes coaxiaux : Modèle 3D symétrique

### Conditions limites :

- Blocage de la translation suivant l'axe de révolution Y des nœuds du plan de symétrie.
- Élimination des derniers modes rigides sur deux points opposés au plan de symétrie (blocage du déplacement suivant l'axe Z du nœud bleu et blocage suivant X et Z du nœud jaune)

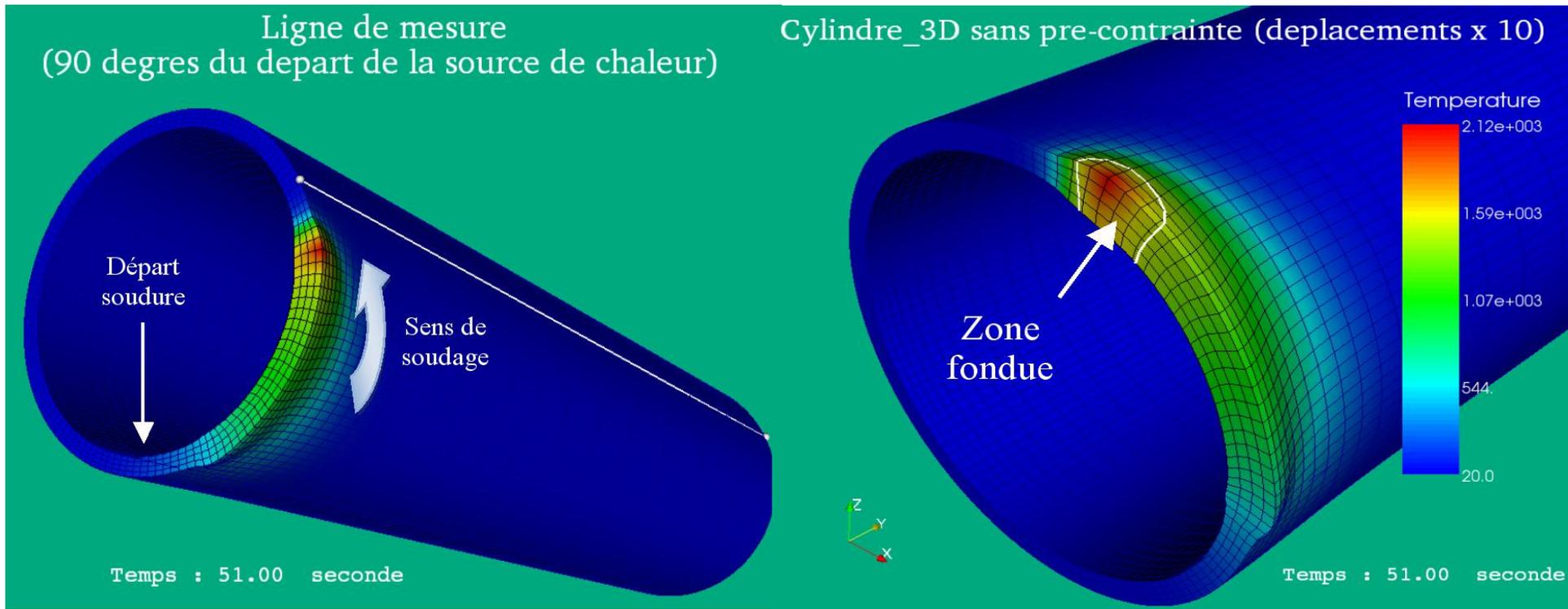
### Soudage sur un tour complet de pièce:

1. Début de chauffe : 0 s.
2. Fin de chauffe / Début de refroidissement : 270 s.
3. Fin de refroidissement : 3600 s



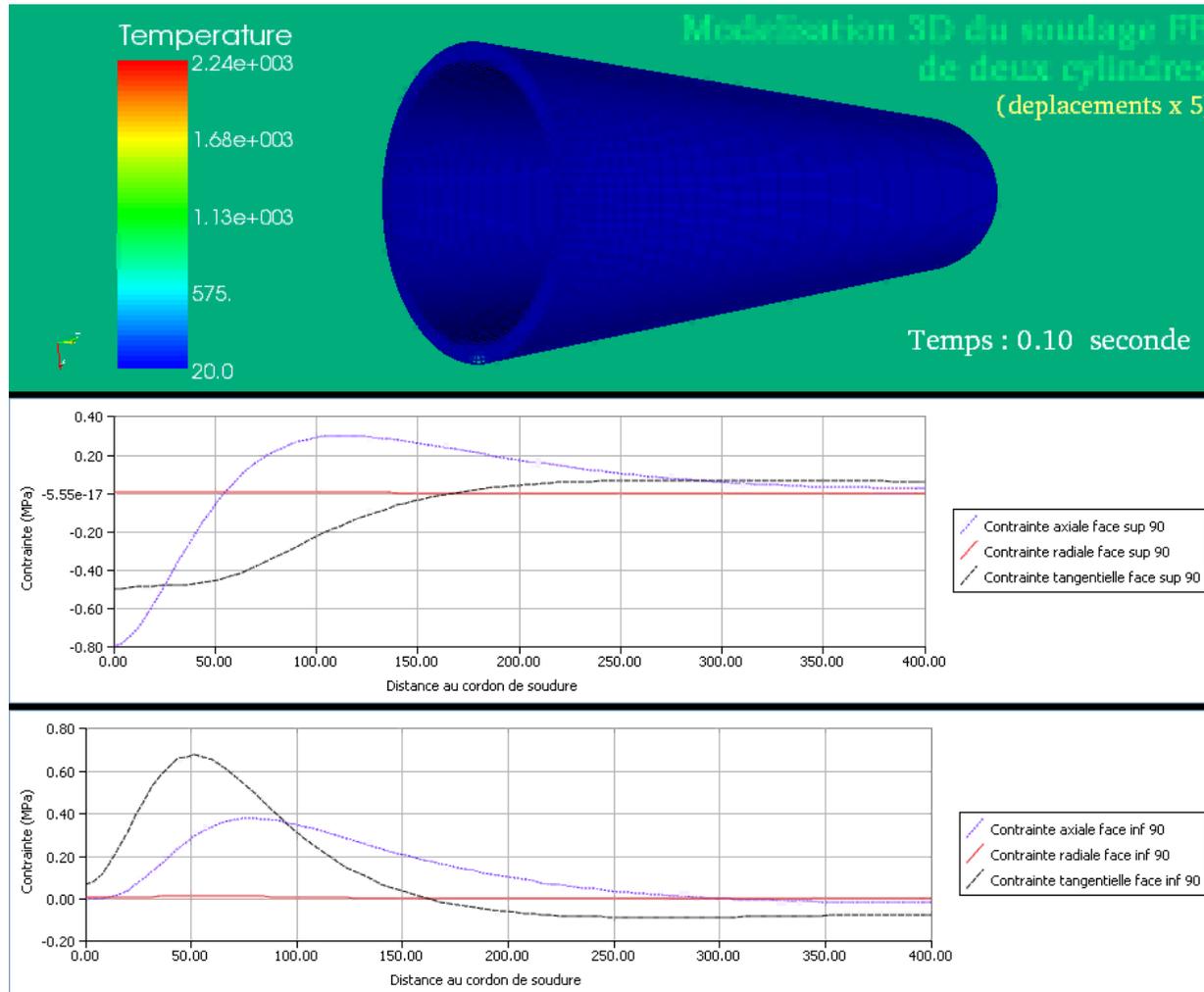
# Soudage FE de cylindres coaxiaux

## Contraintes résiduelles associées au soudage des deux tubes



# Soudage FE de cylindres coaxiaux

## Contraintes résiduelles associées au soudage des deux tubes

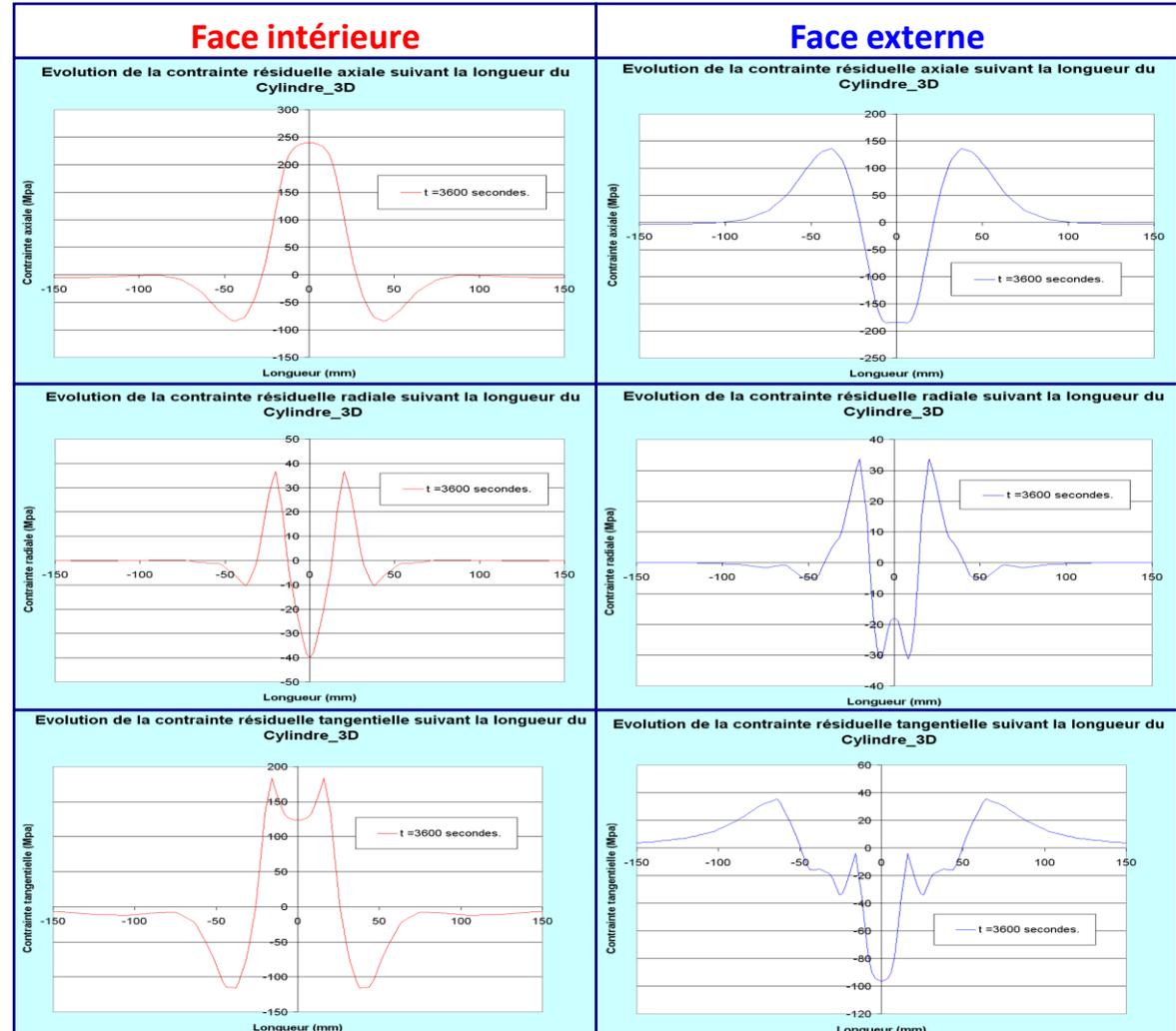


# Soudage FE de cylindres coaxiaux

## Contraintes post-soudage en fonction de la distance au joint

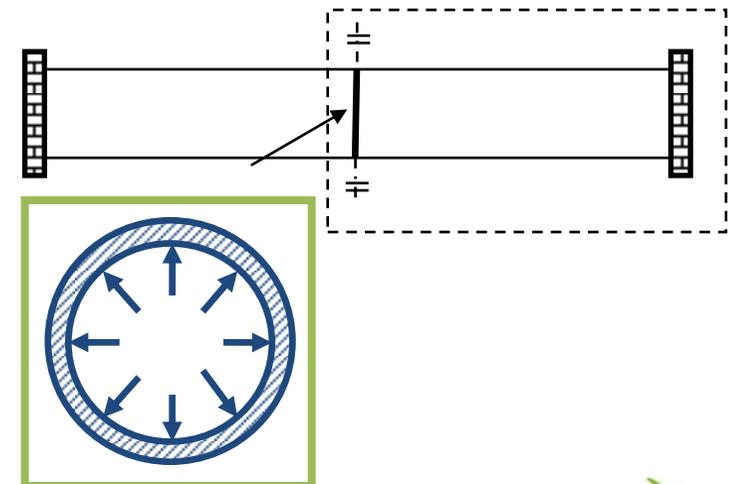
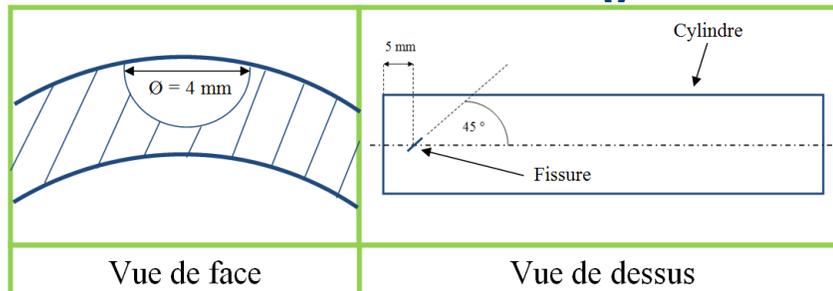
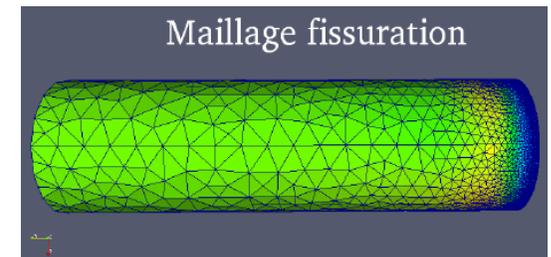
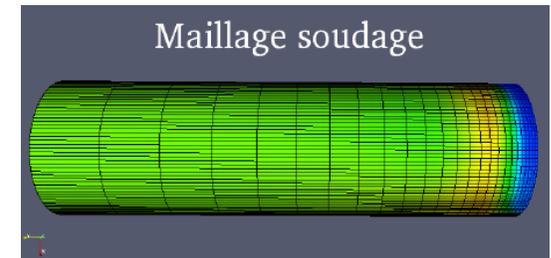
- **Axiales:**
  - Compressives à l'extérieur
  - En traction à l'intérieur
- **Tangentielles:**
  - Même tendance que axiales

Bon accord avec une solution de la littérature [Deng et al., 2006]



# Principe du chaînage soudage-fissuration

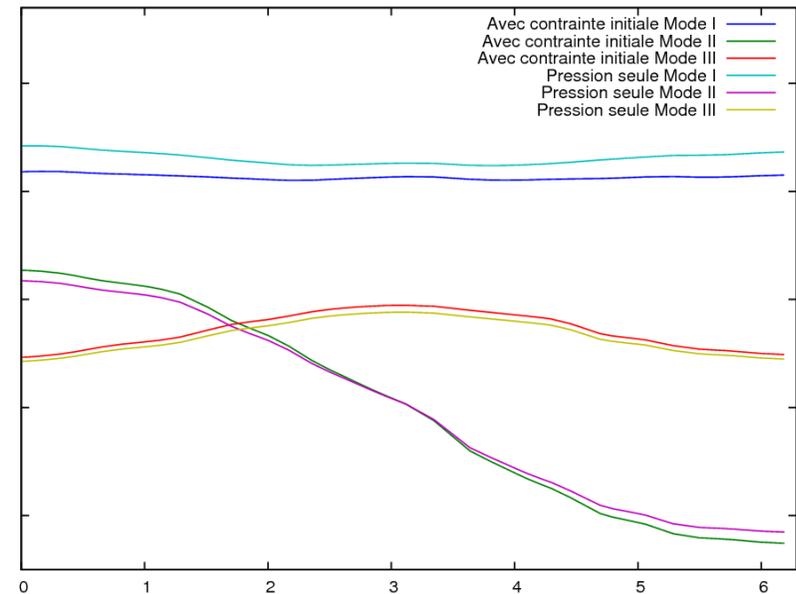
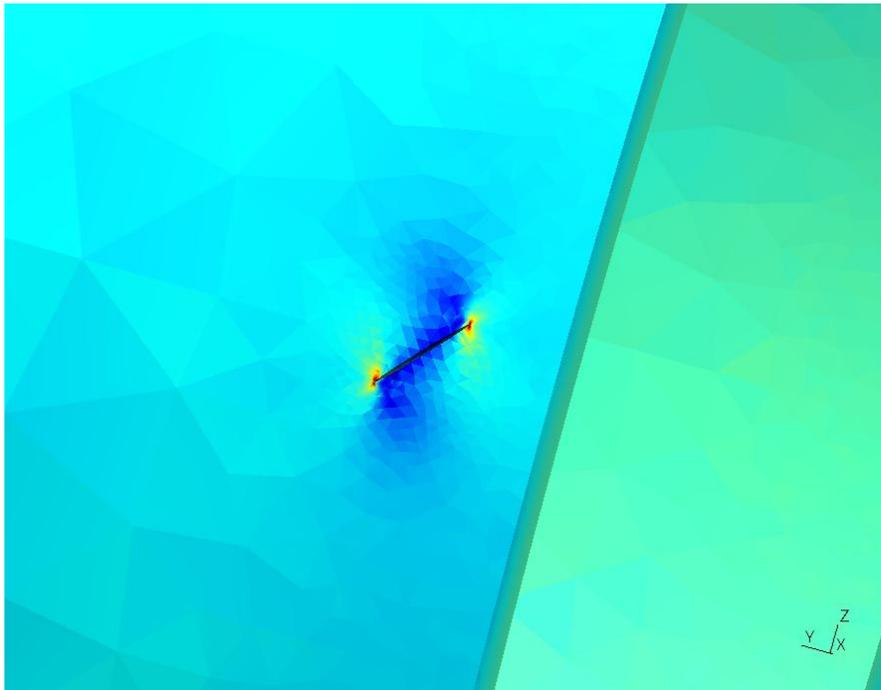
- **Projection du champ de contrainte initial**
  - depuis le maillage hexa du calcul soudage
  - vers le maillage tétra dense dans la zone de la fissure initiale
- **Fissure semi-circulaire à 45° par rapport à l'axe du cylindre supposée *a priori***
- **Pression interne +  $\sigma_0$**



# Résultats calcul fissuré

## Fissure sur la peau extérieure

Fissure semi-circulaire inclinée sur la peau extérieure  
Pression seule / pression + contrainte initiale

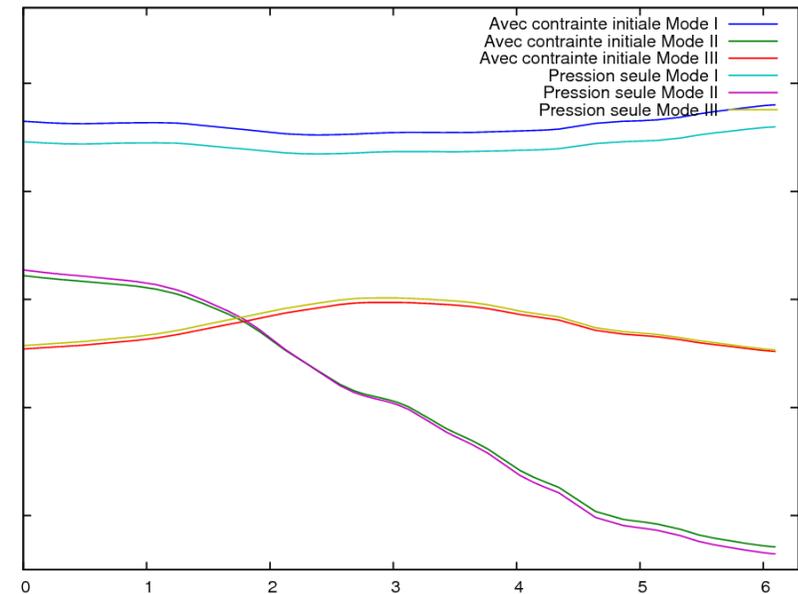
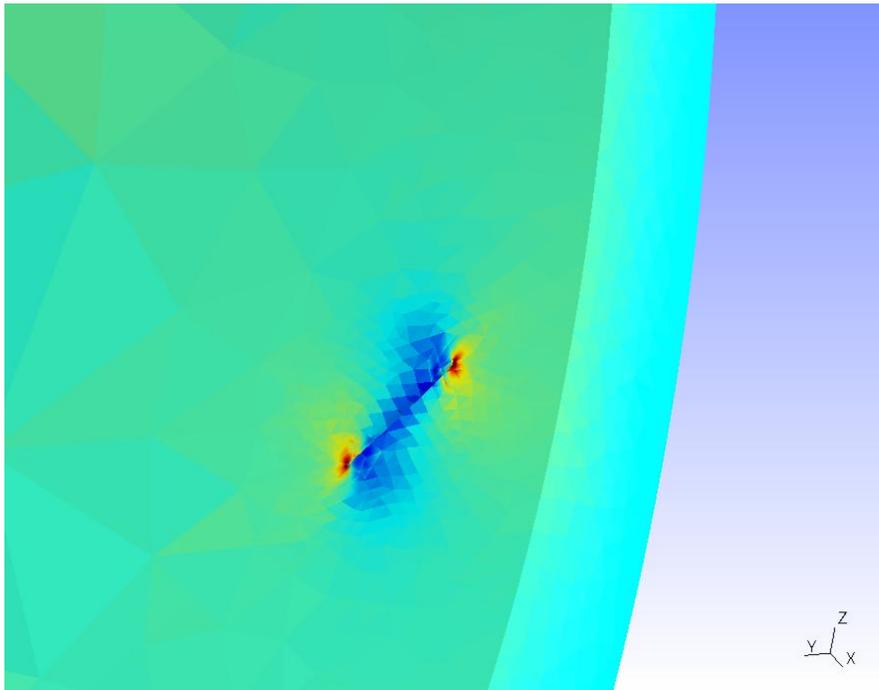


FIC le long du front

# Résultats calcul fissuré

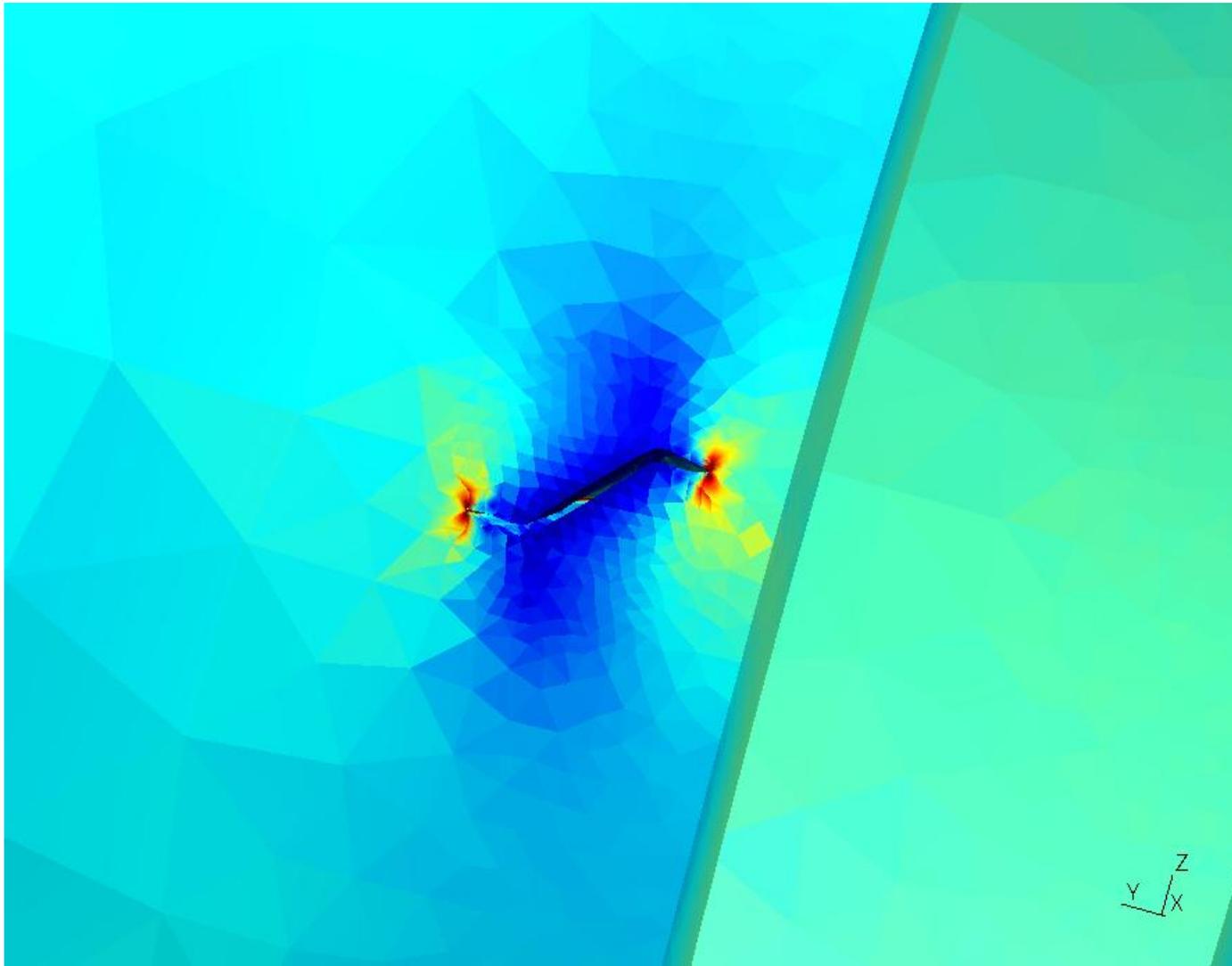
## Fissure sur la peau intérieure

Fissure semi-circulaire inclinée sur la peau intérieure  
Pression seule / pression + contrainte initiale



FIC le long du front

# Résultats calcul fissuré Propagation



- Faisabilité acquise
- Snecma : « *MORFEO : outil très performant et complet de simulation procédés / Chainages (durée de vie) »* »
- Nombreuses perspectives:
  - Simulation sur pièces de moteurs de fusées
  - Modèle pour prendre en compte  $\sigma_0$  dans l'apparition de la fissure