



LA FATIGUE THERMIQUE DANS LES ZONES DE MÉLANGE, ANALYSE CHAÎNÉE HYDRO-THERMO- MÉCANIQUE -Du fluide aux fissures -

C. Gourdin, S. Chapuliot CEA/DEN/DM2S/SEMT/LISN
J.P. Magnaud CEA/DENDM2S/SFME/LTMF
A. Monavon Université Paris 6

Objectif général

- Analyse du chargement thermique dans les tuyauteries du au mélange turbulent
- Compréhension des mécanismes d'initiation et de propagation de fissures pour ce type de chargement
- Explication du cas particulier de CIVAUX ou la fissuration est apparue rapidement et de l'essai FATHER

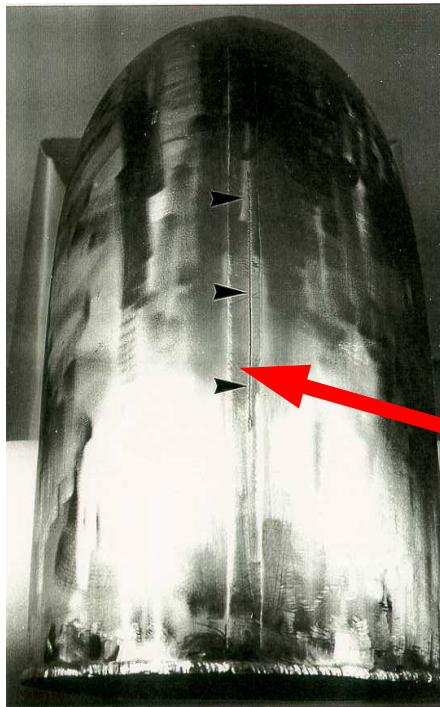
Approche en 3 étapes

- Analyse mathématique et physique du problème : origine potentielle des fluctuations thermiques, réponse thermique fréquentielle de la structure, estimation de la vitesse de propagation de fissures
- Développement de modèles Hydro-Thermo-Mecanique dans CAST3M
- Analyse des cas CIVAUX et FATHER pour apporter des éléments de compréhension sur la propagation ou l'initiation des fissures observées

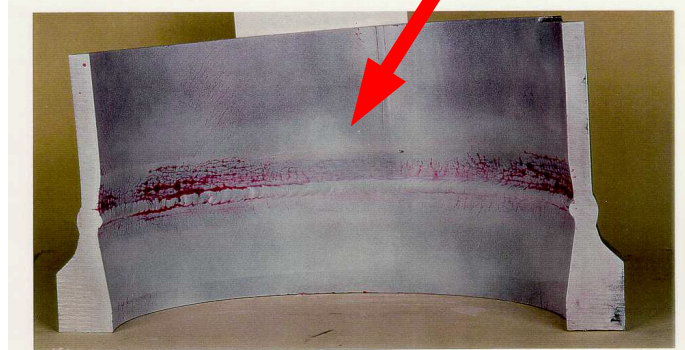
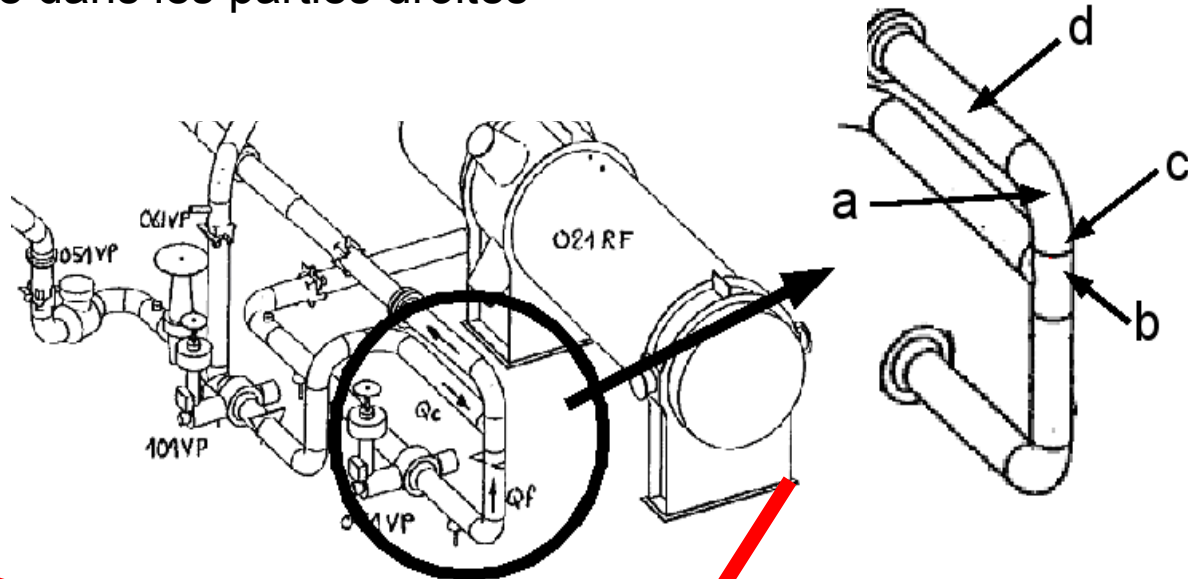
Fatigue thermique dans les zones de mélange

Apparition d'une fuite due à une fissure après 1500 heures

- Fissure longitudinale à l'extrados du coude (longueur : 180mm)
- Faïençage thermique et fissures dans le té de mélange et à la jonction Té-coude
- Faïençage thermique dans les parties droites



RHRS CIVAUX 1



Deux questions importantes :

- Comment la fissuration est apparue aussi rapidement ?
- Comment, pour certaines fissures, la propagation a été aussi profonde, jusqu'à traverser le composant ?

➔ *Analyse numérique peut apporter des éléments de réponse à cette problématique*

Fatigue thermique dans les zones de mélange

L'initiation des fissures et le faïençage thermique (dommage de surface) sont des phénomènes connus et liés aux fluctuations de températures

- La différence de température entre les fluides chaud et froid dans le Té de mélange sont conséquente (jusqu'à 160°C)
- Le mélange est turbulent et met du temps à s'établir
- Observation de dommage en "peau d'éléphant"

Ce type de dommage est compris et expliqué par la différence importante de température entre les fluides

La propagation des fissures

- Avant l'incident de CIVAUX, il était admis que le faïençage thermique conduit à des fissurations de faibles profondeurs, et que la propagation s'arrête après 1 à 2mm
- **Une meilleure connaissance du chargement thermique est la clef de voûte du problème de fatigue thermique**
- **En particulier, les basses fréquences sont responsables de la propagation rapide des fissures au travers le composant**
- **Mais, quelle est l'origine de ces chargements à basses fréquences ?**

Fatigue thermique dans les zones de mélange

La recherche et la connaissance du chargement thermique guide la démarche de travail de l'analyse numérique chaînée Thermo-hydraulique / Thermo-mécanique, en particulier la recherche des chargements thermiques 3D à basse fréquence :

- Analyse numérique de deux cas :
 - Aspect propagation de fissures: Mise en évidence de la particularité de la configuration de CIVAUX
 - Aspect initiation de fissures : Interprétation de l'essai FATHER

Analyse numérique du cas CIVAUX

Compréhension de la rapide propagation de fissures

- Pourquoi des fissures ont été observées dans certaines zones, en particulier à l'extrados du coude de sortie ?
- Quel type de chargement thermohydraulique est à l'origine ?

Quels sont les mécanismes naturels (turbulence, instabilités et pulsation) pouvant causer des chargements thermiques conséquent à basse fréquence

Analyse complète Hydro-Thermo-Mécanique avec le code Cast3M

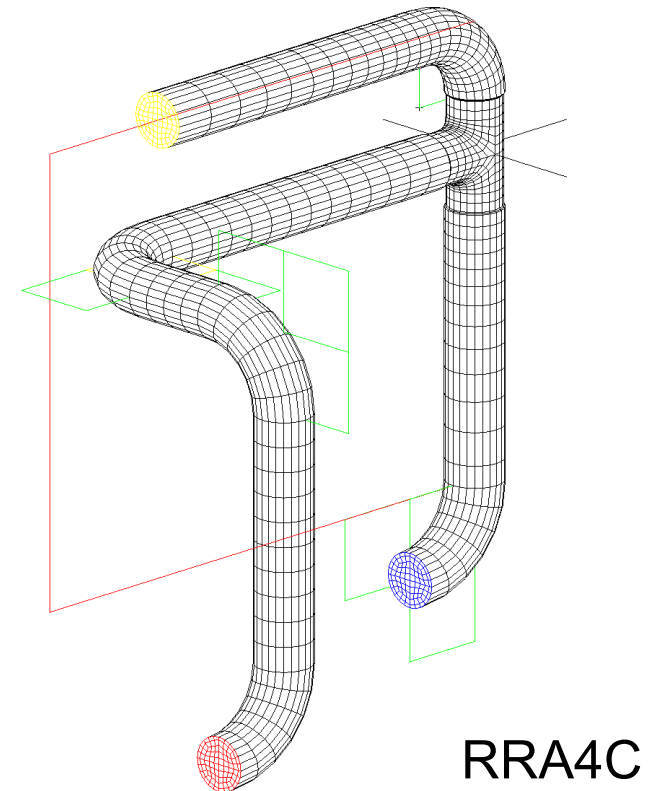
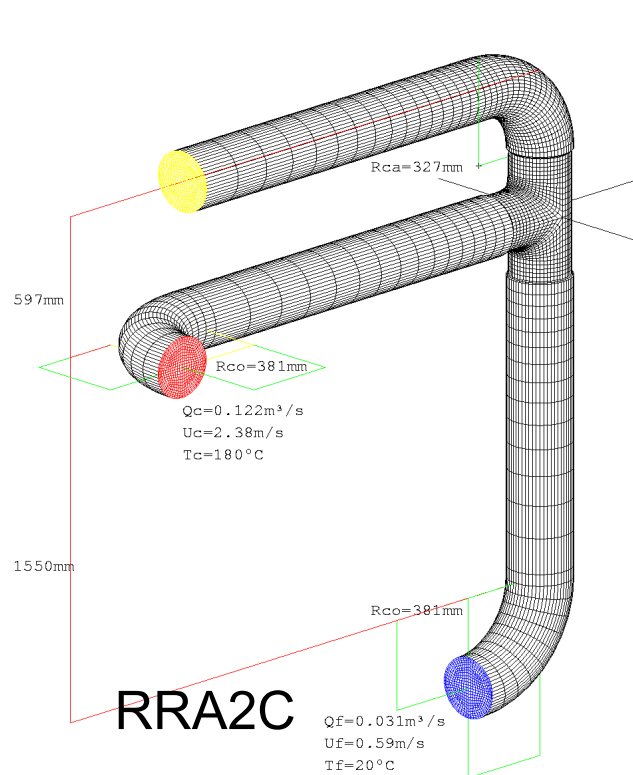
- Modélisation L.E.S. pour la thermo-hydraulique
- Calculs thermo-élastique des contraintes et mécanique de la rupture pour la thermo-mécanique
- Définition simultanée des modèles géométriques fluide et solide
- Parfaite communication des informations fluide vers le solide (température)

Fatigue thermique dans les zones de mélange

Les chargements thermiques à basse fréquence peuvent être induit par une instabilité globale de l'écoulement

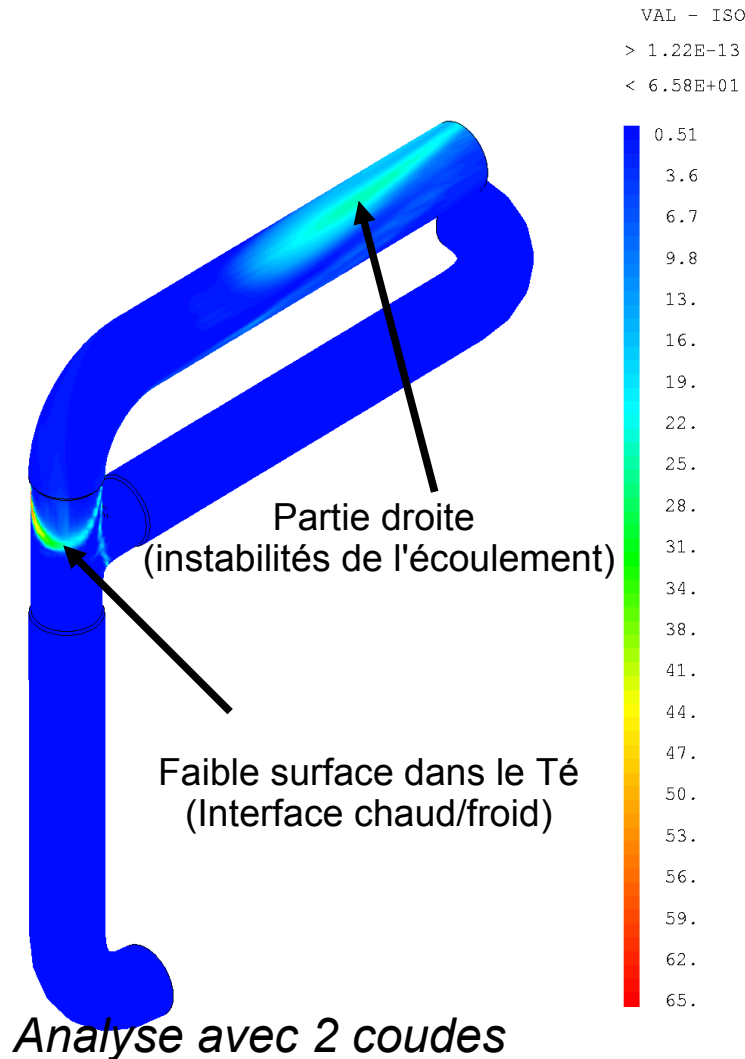
L'objectif de l'analyse thermo-hydraulique est d'évaluer la stabilité de l'écoulement ?

- Analyse des conditions aux limites en imposant un bruit blanc sur les vitesses d'entrées des fluides (5% and 2.5%)
- Etude de l'effet de la géométrie amont sur la stabilité de l'écoulement



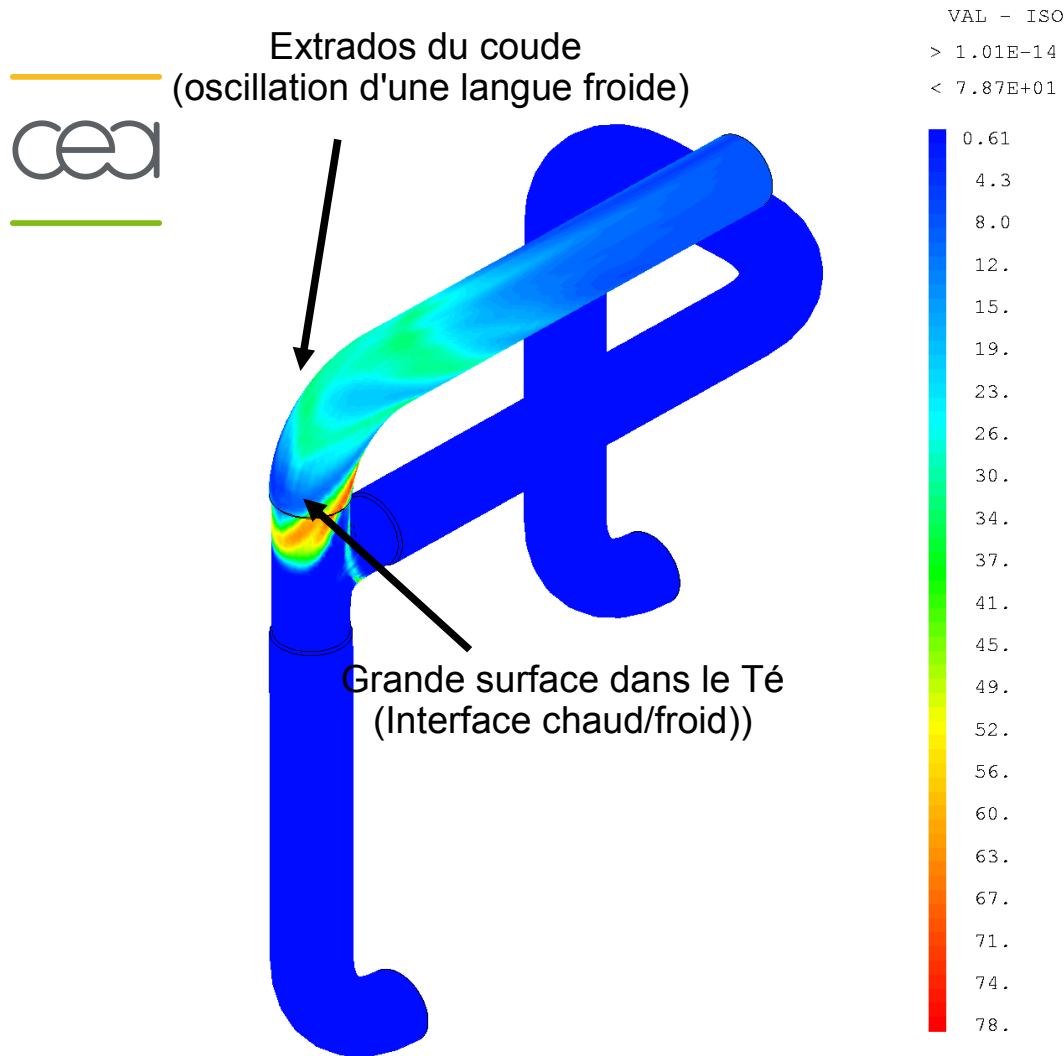
Fatigue thermique dans les zones de mélange

Détermination de la variation maximum de température :



Fatigue thermique dans les zones de mélange

Détermination de la variation maximum de température :



Analyse avec 4 coudes

Conclusions de l'analyse thermo-hydraulique

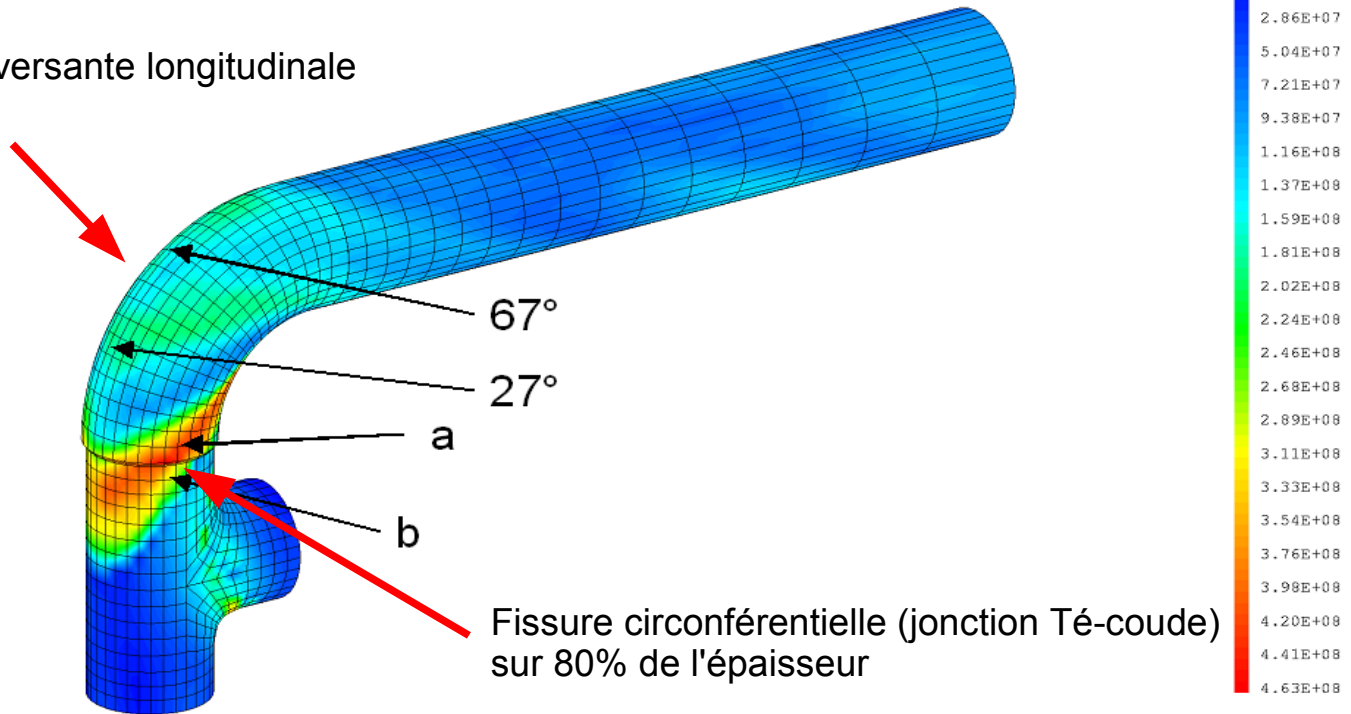
- La turbulence est la cause du faïençage thermique
- Mais, elle ne peut, à elle seule, expliquer la propagation importante des fissures
- La turbulence et la géométrie particulière de l'écoulement est la cause naturelle probable à l'origine des instabilités à grandes échelles
- De manière générale, les instabilités à grandes échelles peuvent être atténuées (écoulement stable) ou amplifiées avec le géométrie de l'écoulement (enchaînement de différents coudes)

Fatigue thermique dans les zones de mélange

Analyse thermo-mécanique



Fissure traversante longitudinale



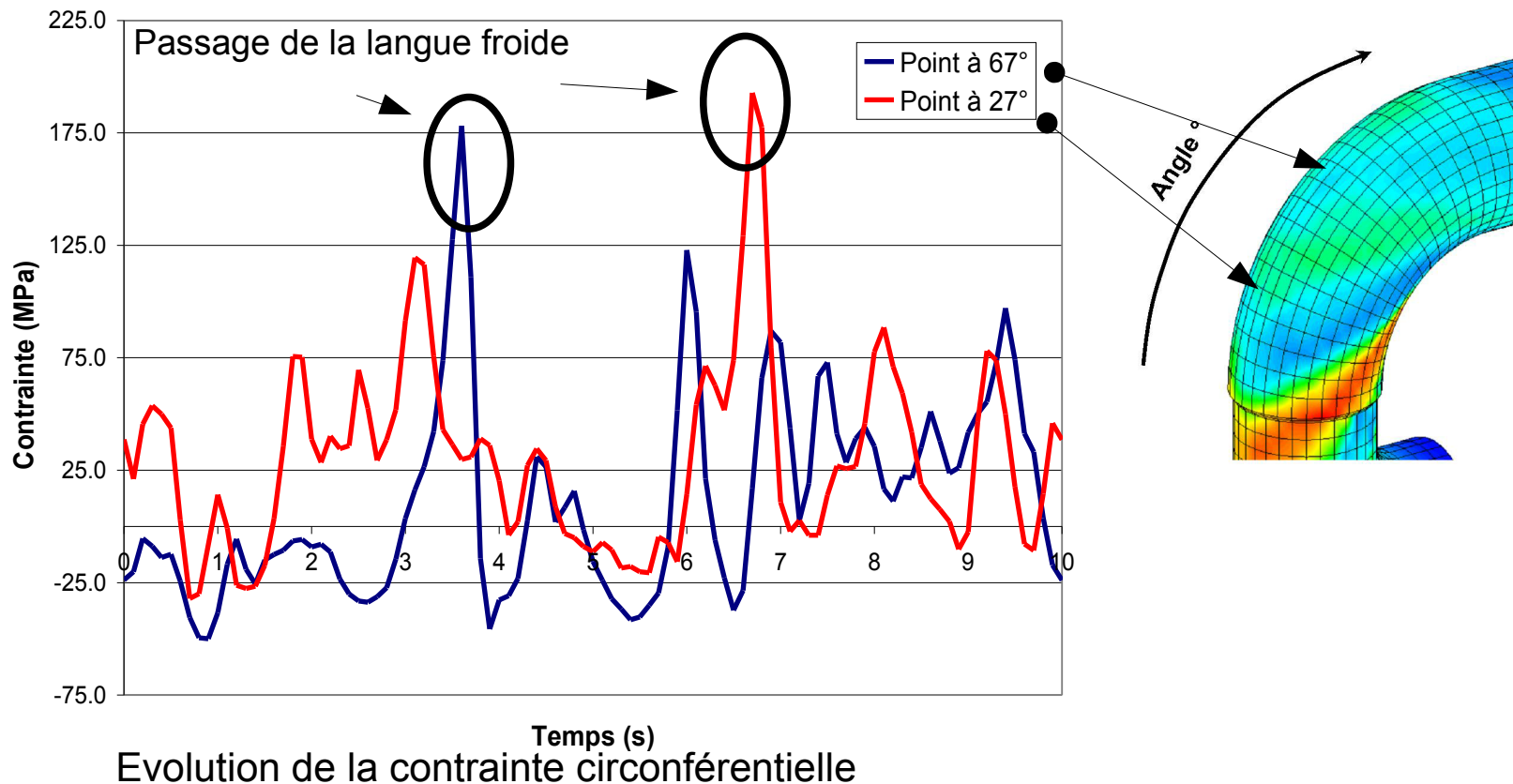
Contrainte moyenne : $\sigma_{\max} = 358 \text{ MPa}$

Variation maximum de contrainte : $\Delta\sigma = 467 \text{ MPa}$

Fatigue thermique dans les zones de mélange

Analyse mécanique de l'extrados du coude

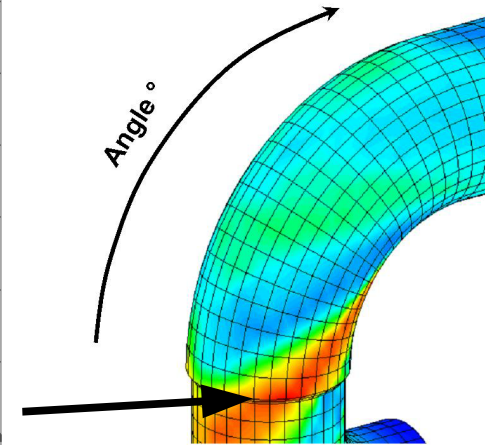
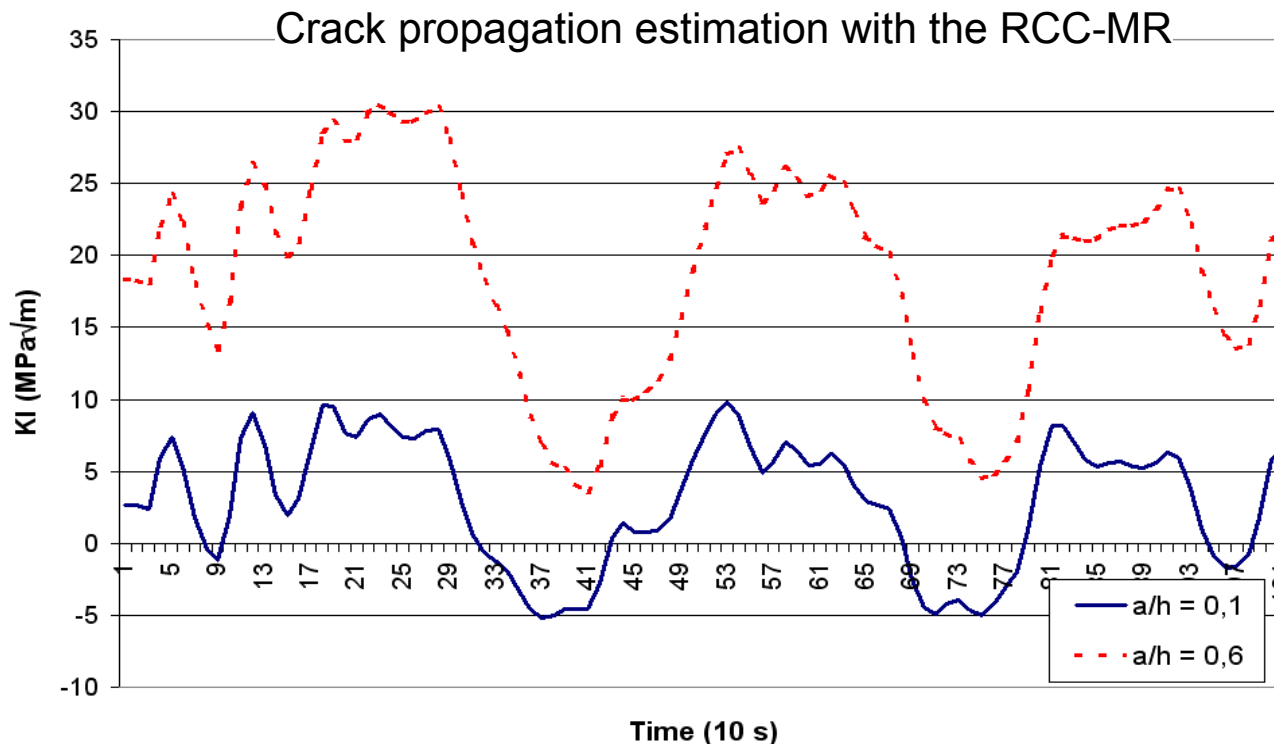
- Variation de contrainte jusqu'à 200MPa à basse fréquence (contrainte de membrane dominante)
- En présence de singularités géométriques, telle que la soudure non arasée, la variation de contrainte est suffisante pour initier des fissures



Fatigue thermique dans les zones de mélange

La variation du facteur d'intensité des contraintes est déterminée sur la séquence

- Observation d'une variation à basse fréquence de K_I
- Pour les petites fissures ($a = 0.6 \text{ mm}$), ΔK_I est suffisant pour propager ($\Delta K_I = 15 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)
- Avec des contraintes de membrane et de flexion importantes, ΔK_I reste important pour des fissures profondes (jusqu'à $30 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)
- Pour la séquence calculée, la durée de propagation de la fissure à l'extrados du coude ($a/h = 0.1$ to 0.8) est de 517Heures



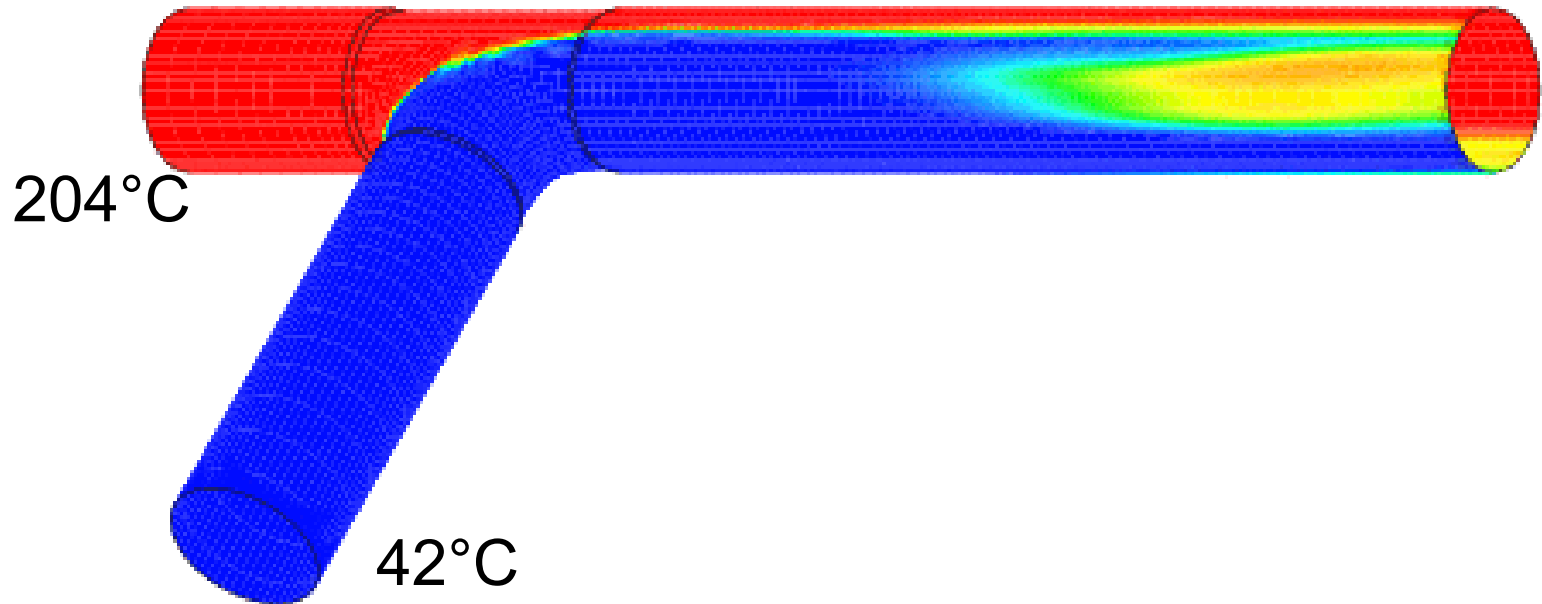
Conclusions de l'analyse numérique de la zone de mélange du cas CIVAUX



- Cette étude apporte des éléments de compréhension sur la propagation rapide des fissures survenu durant l'incident de CIVAUX (particulièrement à l'extrados du coude)
- La turbulence est probablement à l'origine des instabilités à grandes échelles de l'écoulement
- Les études thermo-hydrauliques paramétriques ont montré que les instabilités à grande échelle peuvent être **atténuées** ou **amplifiées** en fonction de la géométrie de l'écoulement
- Un chargement thermique à basse fréquence induit des variations de contraintes de membrane et de flexion conséquentes, et par conséquent il fait propager des fissures

Interprétation de l'essai FATHER

Analyse chaînée hydro-thermo-mécanique



Carte de température instantanée de l'essai FATHER

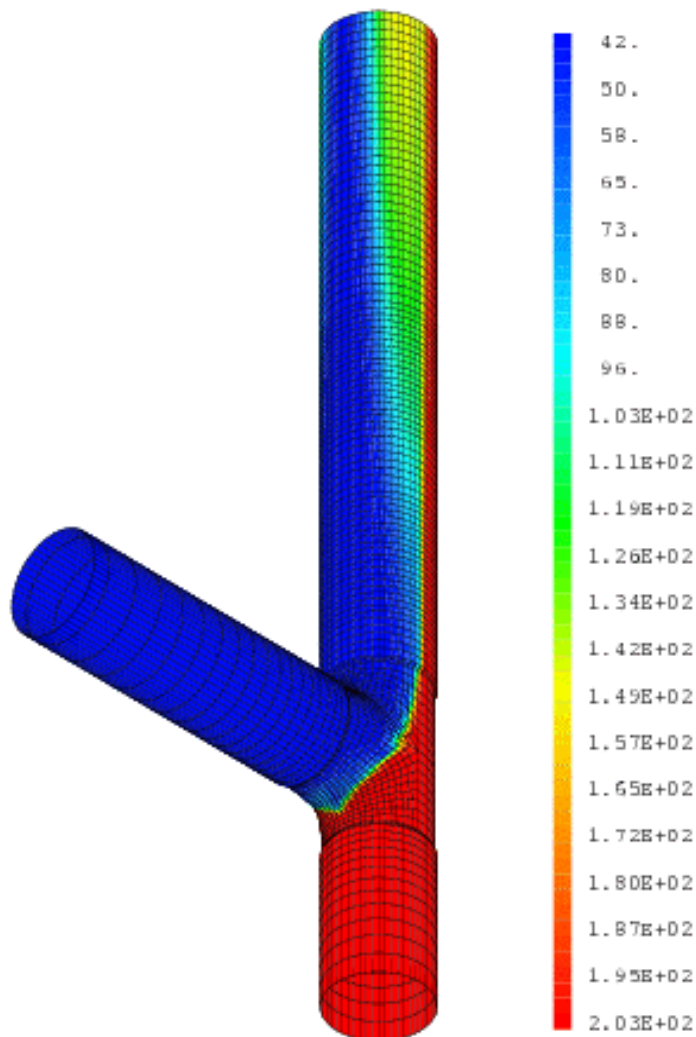
Les modèles géométriques fluides et solides sont définis en même temps

Communication parfaite des données fluide vers le solide

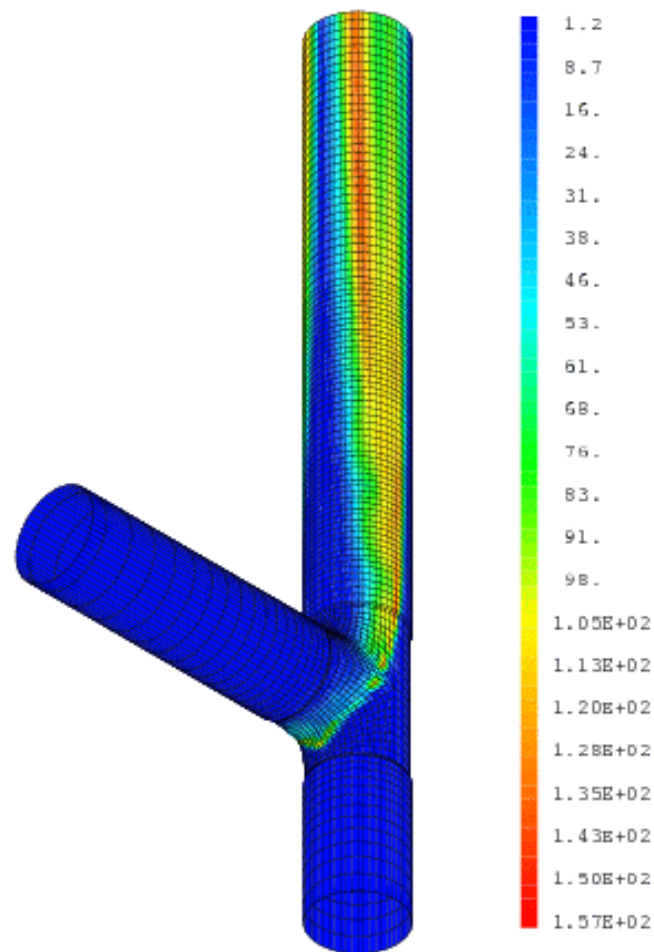


- Analyse numérique chaînée hydro-thermo-mécanique de l'essai FATHER
- Post-traitement mécanique : Détermination du taux d'usage à l'amorçage :
 - Introduction de la méthode de comptage de cycles RAINFLOW pour des CHPO
 - Détermination du taux d'usage à l'amorçage suivant le code RCC-MR

Fatigue thermique dans les zones de mélange



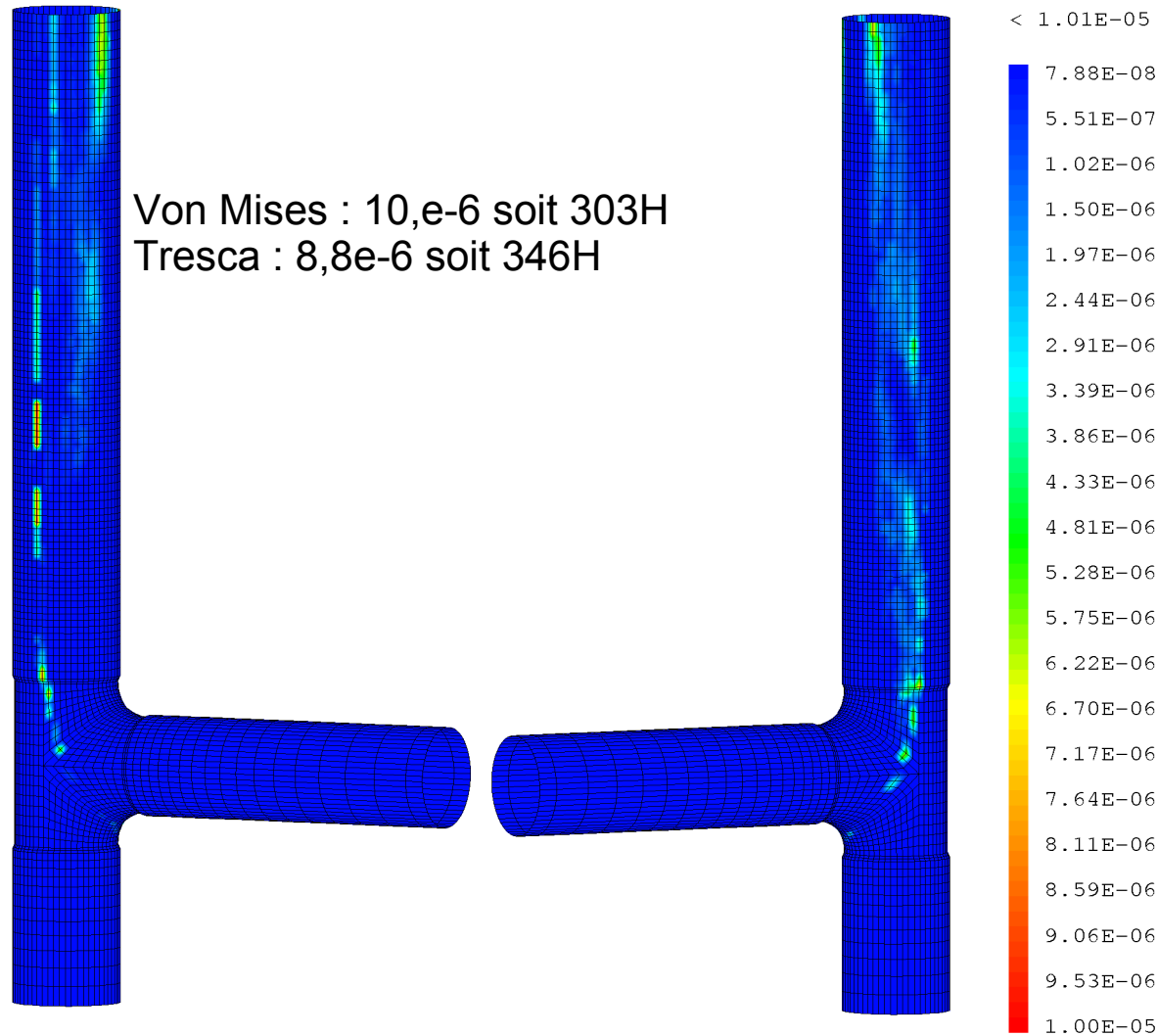
Carte de température moyenne
en peau interne de la structure



Carte de la variation maximale de température
en peau interne de la structure

Fatigue thermique dans les zones de mélange

Estimation du taux d'usage à l'amorçage suivant le RCC-MR



Conclusions de l'analyse hydro-thermo-mécanique de l'essai FATHER



D'un point de vue thermo-hydraulique, l'écoulement est beaucoup plus stable que le cas CIVAUX (un seul coude en amont avec des dispositifs d'homogénéisation), influence de la gravité

D'un point de vue mécanique : Estimation d'une durée d'amorçage de fissures ainsi qu'une carte de dommage sur toute la structure (mise en place de procédures de comptage de cycles RAINFLOW et d'estimation du taux d'usage)

Confrontation avec les expertises des maquettes et la réalisation d'un dernier essai FATHER instrumenté de manière ad'hoc : à venir