

Simulation thermomécanique du soudage : Modèles, Méthodes et Perspectives

J.-M. Bergheau

*Université de Lyon – ENISE
LTDS, UMR5513 CNRS*

■ *Bref historique*

- ❑ *Le nucléaire dans les années 1980 puis l'automobile, l'aéronautique souvent avec des procédés, des matériaux et des problématiques différents*

■ *Problèmes posés*

- ❑ *Tenue mécanique d'un joint soudé*
 - *Connaissance de la microstructure et des contraintes induites*
- ❑ *Faisabilité d'un assemblage*
 - *Connaissance des distorsions induites*
 - *Optimisation d'une séquence de soudage et des conditions de bridage*

■ *La simulation numérique du soudage*

- ❑ *Un problème multiphysiques*
- ❑ *Un problème multiéchelles*
- ❑ *Qui nécessite des méthodes d'analyse adaptées au contexte*
 - *Nécessité de mettre en place des approches numériques permettant de traiter efficacement les problèmes industriels*

■ *Deux approches*

□ *Formation du joint soudé*

■ *Physique associée à l'apport de chaleur*

- Interaction Arc électrique-bain fondu (procédé TIG, MIG...)
- Interaction laser-matière
- Effet Joule (soudage par résistance)
- Frottement et malaxage (FSW)
- ...

■ *Écoulement dans le bain fondu*

- Navier-Stokes
- Tension de surface (Marangoni)
- Interactions thermo-mécaniques

□ *Conséquences induites*

■ *Approche Solide*

■ *Apport de chaleur*

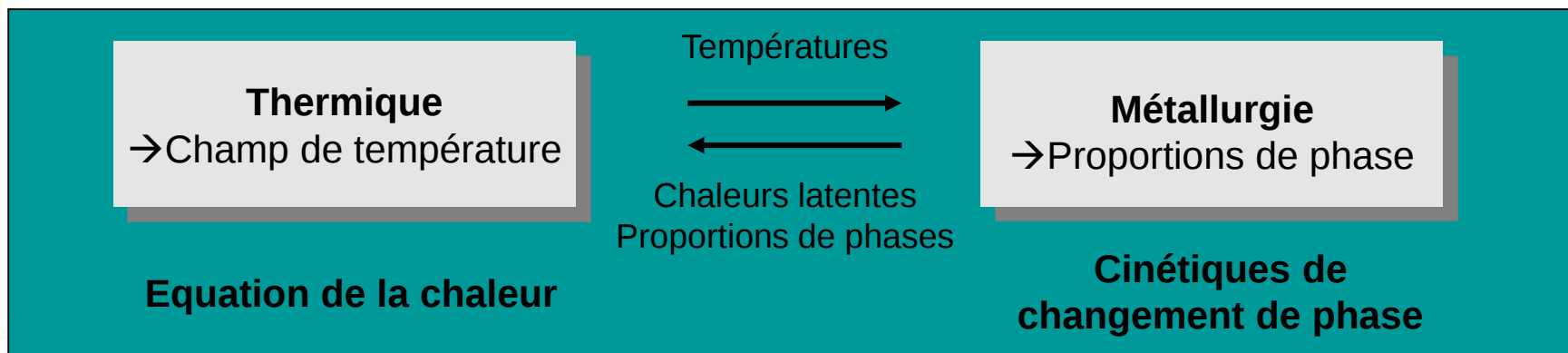
- Représenté par une source équivalente

■ *Couplages thermo-métallo-mécaniques*

□ *Équipes différentes sur les 2 sujets*

- *On se focalise sur les conséquences induites dans la suite*

Un problème multiphysiques



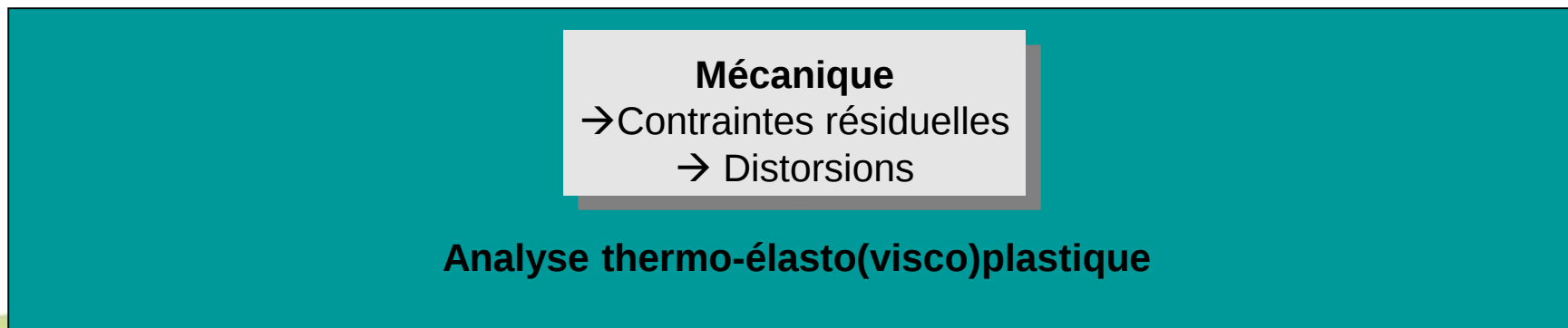
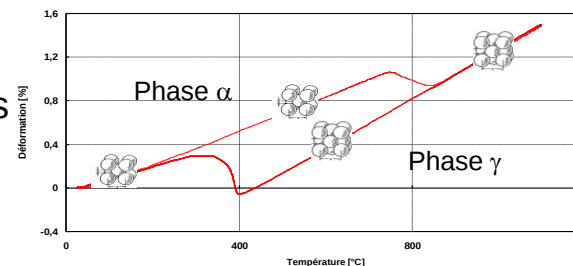
Phénomènes négligés

Dissipation mécanique négligée

Influence de l'état mécanique sur les transformations de phase

Températures

Proportions de phases



Problèmes physiques couplés

Matériau

Microstructure prise en compte via des modèles homogénéisés

- Cinétiques de changement de phase
- Comportement mécanique multiphasique, plasticité de transformation

Joint soudé

Quelques cm
Adaptée au calcul des contraintes résiduelles

Structure

Quelques mètres
Incorpore plusieurs joints soudés
Nécessaire pour la détermination des distorsions

NRC POSTWELD HEAT TREAT
STRESSES_ELE_Von Mises(L1)
min=0.027 at SHELL 7054
max=486.079 at SHELL 1416

500.000
470.000
440.000
410.000
380.000
350.000
320.000
290.000
260.000
230.000
200.000
170.000
140.000
110.000
80.000
50.000

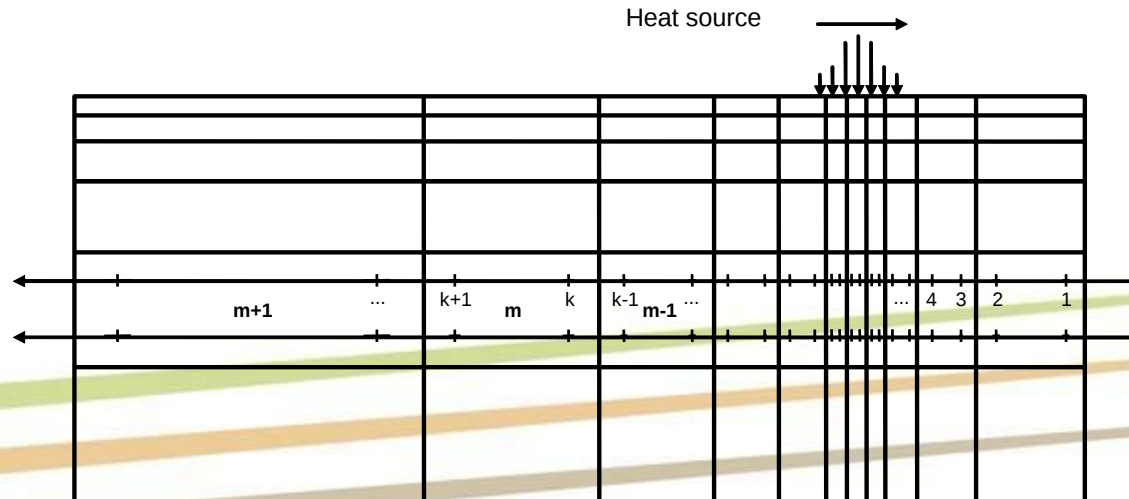


■ Échelle du joint soudé

□ Généralement suffisante pour évaluer les contraintes résiduelles

□ Mouvement de la source

- Analyse transitoire pas à pas – Eléments volumiques 3D ou 2D
- Résolution en régime stationnaire
 - Intégration des cinétiques de transformation et des lois de comportement le long des lignes de courant
 - » Éléments finis classiques
 - » Lignes de courant prédéfinies (translation, rotation, hélice)



■ *Échelle de la structure*

- *Nécessaire pour quantifier les distorsions et valider/optimiser une séquence de soudage*

- *Deux types de problèmes à résoudre*

 - *Taille*

 - *Problématique d'assemblage*

 - *une soudure vient figer d'éventuels défauts d'alignement*

- *Méthodes numériques*

 - *Analyse transitoire pas à pas*

 - *Approche 3D ou coque pour les structures minces ou couplée coque-massif*

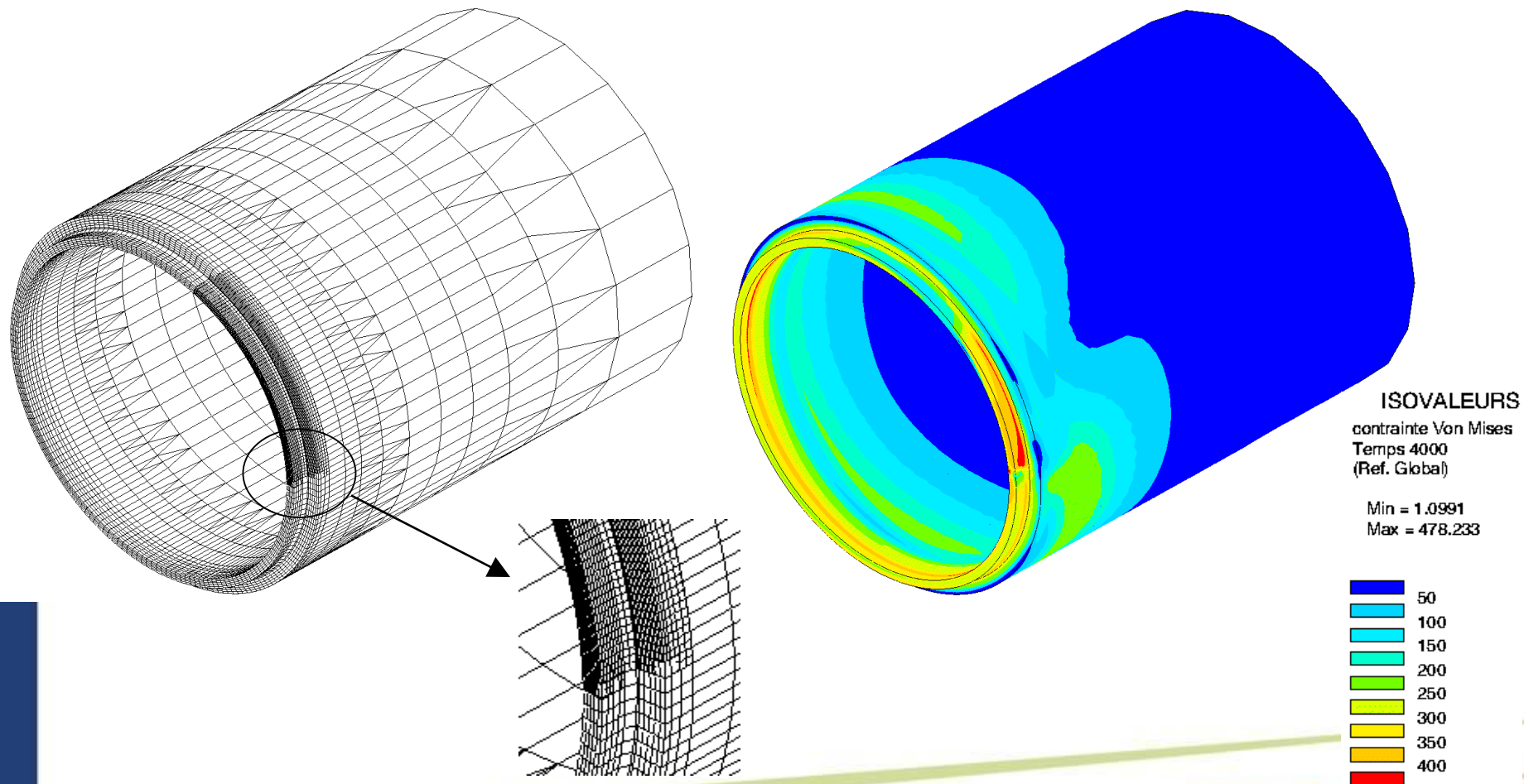
 - *Maillage adaptatif*

 - » *Raffinement au niveau de la source de chaleur*

 - *Méthode locale-globale*

 - *Méthode simplifiée*

 - *Applicable sur de très grandes structures comportant de nombreux joints soudés*



Soudage multipasses par une approche adaptative

P. Duranton, J. Devaux, V. Robin, P. Gilles, J.M. Bergheau, "3D modelling of multipass welding of a 316L stainless steel pipe", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, Nov. 2004, pp. 457-463.

Hypothèse : Les déformations plastiques de soudage sont supposées ne dépendre que des conditions thermiques et mécaniques locales

Modèles locaux

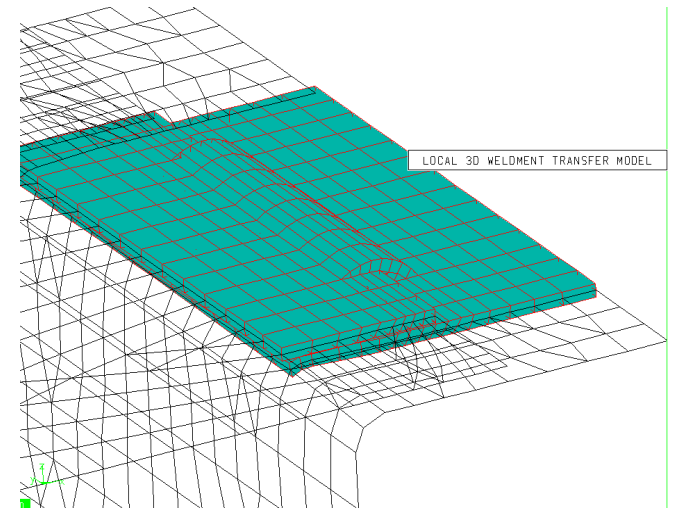
Autant de modèles locaux que de types de joints soudés
Simulation thermo-métallo-mécanique
Maillage fin

Définition d'un macroélément

$$\varepsilon_i^p \quad \downarrow \quad \Delta K_i$$

Modèle global

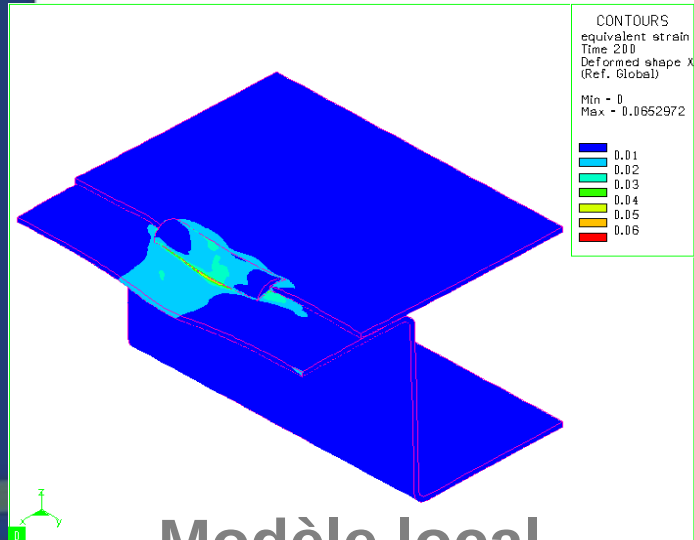
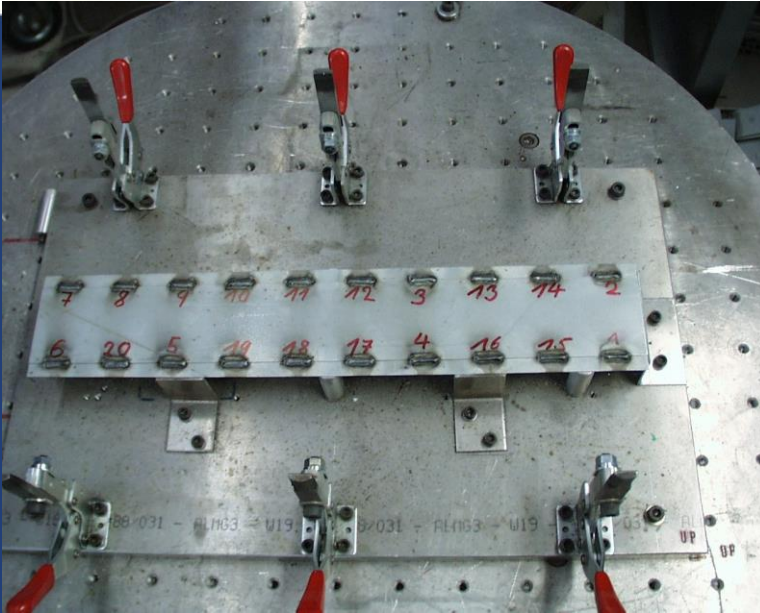
Résolutions élastiques
Maillage grossier



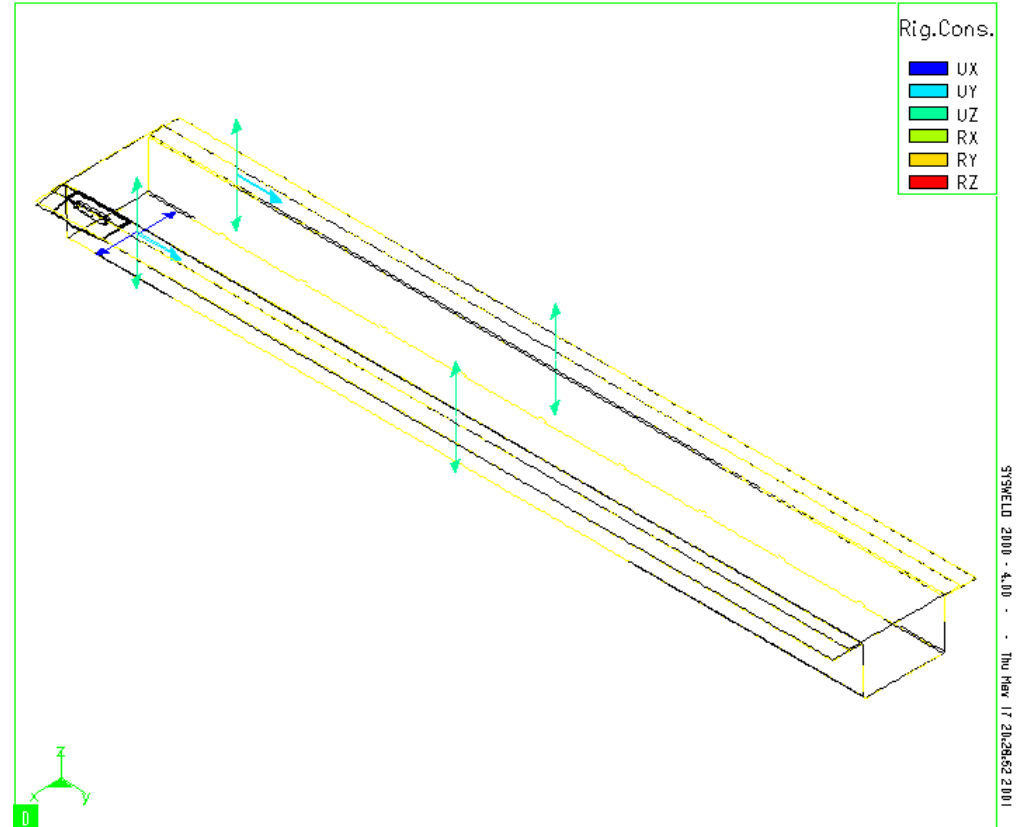
$$\left(K_0 + \sum_{j=1}^i \Delta K_j \right) \Delta U_i = \Delta F_i \quad U = U_n = \sum_{i=1}^n \Delta U_i$$

Approche locale/globale

B. Souloumiac, F. Boitout, J.M. Bergheau, « A new local global approach for the modelling of welded steel component distortions », *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6*, edited by Pr. H. Cerjak, Maney Publishing, London, ISBN 1-902653-56-4, 2002, pp. 573-590.



Modèle local



Modèle global

■ *Vademecum G-FEM*

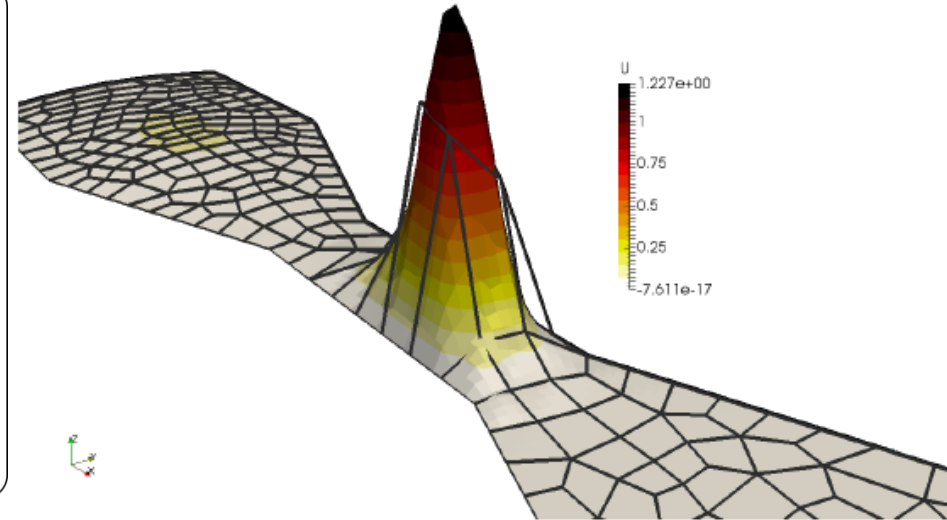
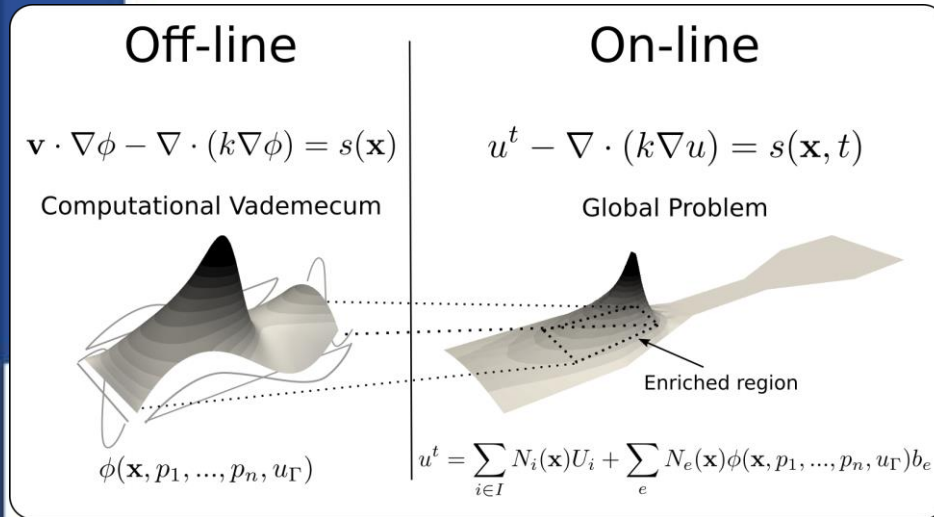
- ❑ *Travaux réalisés à l'EC-Nantes dans le cadre de la chaire ESI-EC-Nantes*
- ❑ *Tirer parti de la Proper Generalized Decomposition pour paramétrer un enrichissement de la solution*
 - *Paramétrage réalisé a priori (off-line) en fonction des conditions aux limites et des paramètres de la source de chaleur*

■ *Éléments finis tétraédriques*

- ❑ *Éléments finis mixtes déplacements-pressure $P1+P1$ ou $P1P1$ stabilisé*
 - *surcote lié à la présence de degrés de liberté de natures différentes (→ difficultés de convergence avec des solveurs de type BFGS) ou à la présence de ddl internes*
- ❑ *Approche nodale*
 - *Degrés de liberté de même nature*

■ *Calcul dans le repère lié à la source de chaleur*

- ❑ *Sur la base de l'approche nodale*



$$\phi = \sum_{k=1}^N F^k(\mathbf{x}) \prod_i P_i^k(p_i) \prod_j A_j^k(a_j)$$

p_i Paramètres du procédé

a_j Coefficients du polynôme donnant u_Γ

Comparaison V-GFEM et FEM

Vademecum-GFEM

D. Canales, A. Leygue, F. Chinesta, D. Gonzalez, E. Cueto, E. Feulvarch, J.-M. Bergheau, A. Huerta,
« Vademecum-based GFEM (V-GFEM): Optimal Enrichment for transient problems », *Int. J. for Numer. Meth. In Engng.*, 2016, Vol. 108, pp. 971-989..

Approche nodale

■ Principe de base

□ Choix des nœuds comme points d'intégration

■ Pas de blocage en élastoplasticité de von Mises

- Problème à N nœuds et donc $3N$ degrés de liberté
 - » 1 conditions d'incompressibilité résolue en chaque nœud
 - » $2N$ ddl pour résoudre l'équilibre de la structure

□ Idée qui n'est pas nouvelle

■ Travaux de (Dohrman et al., 2000), (Krysl & Zhu, 2008)

- Déformation nodale définie par la moyenne des déformations dans les éléments contenant le nœud

■ Idée reprise en dynamique explicite par (Bonet et al., 2001)

■ Méthodes sans maillage

- Technique d'intégration SCNI (Stabilized Conforming Nodal Integration) de Chen (Chen et al., 2001), (Chen et al., 2002), (Elmer et al., 2012)
 - » Technique très précise et peu dépendante de la position des points
- Utilisation combinée de la MEF et de la technique SCNI a été développée en 2D sur la base de maillages en triangle (Quak et al., 2011), (Canales et al., 2016)

□ Approche nodale

- Code de calcul par éléments finis reposant sur l'intégration nodale et la méthode SCNI s'appuyant sur un maillage tridimensionnel quelconque en tétraèdres.

Approche nodale

■ Intégration nodale (en mécanique)

□ Principe des Puissances Virtuelles

$$\forall \vec{v}^* \quad \int_{\Omega} \vec{v}^* \cdot \vec{f}_v dx + \int_{\partial\Omega} \vec{v}^* \cdot \vec{T}_d dx - \int_{\Omega} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx = 0$$

□ Calcul des intégrales

$$\int_{\Omega} \bar{\bar{\varepsilon}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx \quad \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \quad \begin{array}{l} \int_{\Omega} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx = \sum_{\text{éléments finis}} \int_{\Omega^e} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx \\ \text{avec } \int_{\Omega^e} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx = \sum_{\text{points de Gauss}} \bar{\bar{d}}_g^* : \bar{\bar{\sigma}}_g \omega_g \\ \text{Méthode des éléments finis classique} \\ \int_{\Omega} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx = \sum_{\text{noeuds}} \int_{\Omega_n} \bar{\bar{d}}^* : \bar{\bar{\sigma}} dx = \sum_{\text{noeuds}} \bar{\bar{d}}_n^* : \bar{\bar{\sigma}}_n \omega_n \end{array}$$

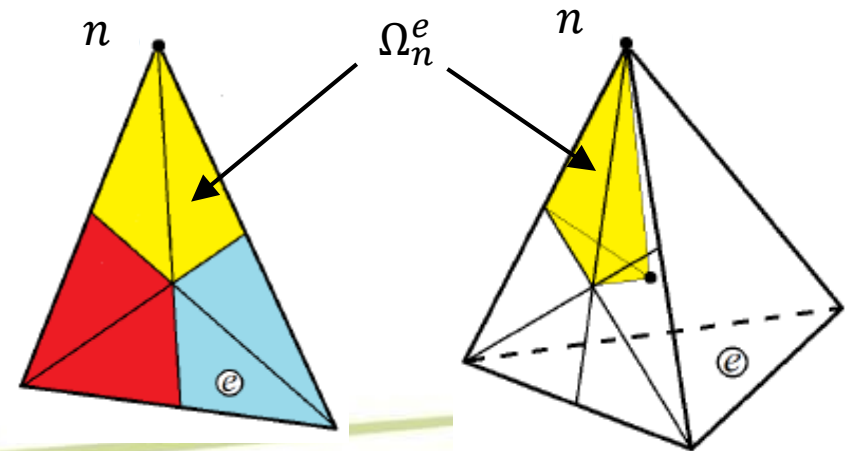
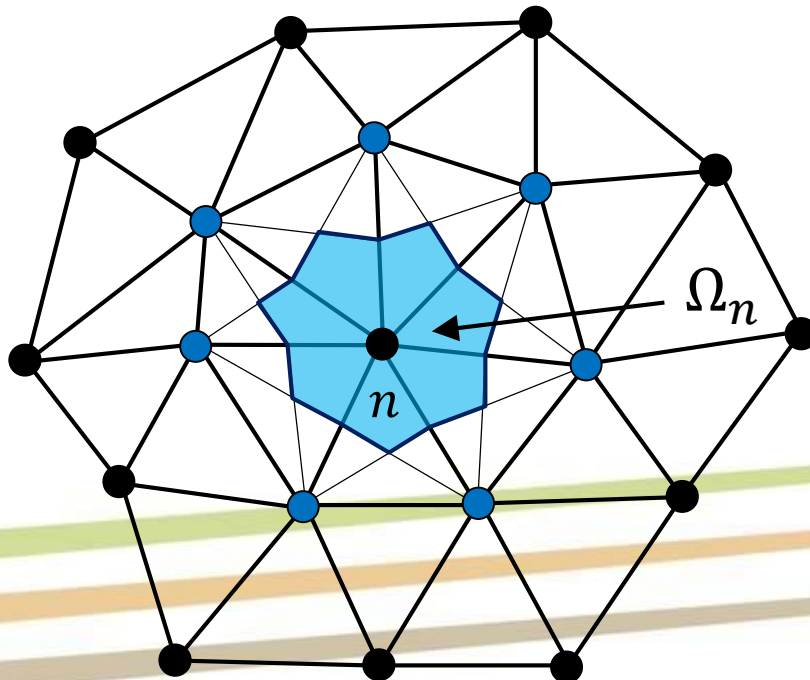
Intégration nodale

Approche nodale

■ Intégration nodale...

□ Choix des domaines nodaux

- Les domaines Ω_n doivent constituer une partition de Ω ($\Omega = \bigcup_{\text{noeuds}} \Omega_n$), et être disjoints ($\Omega_n \cap \Omega_m = \emptyset$)
- On part d'un **maillage en triangles ou tétraèdres linéaires quelconque** du domaine d'étude
- Le domaine associé à un nœud n est alors constitué par la réunion des sous domaines Ω_n^e définis ci-dessous pour tous les éléments finis e contenant le nœud n



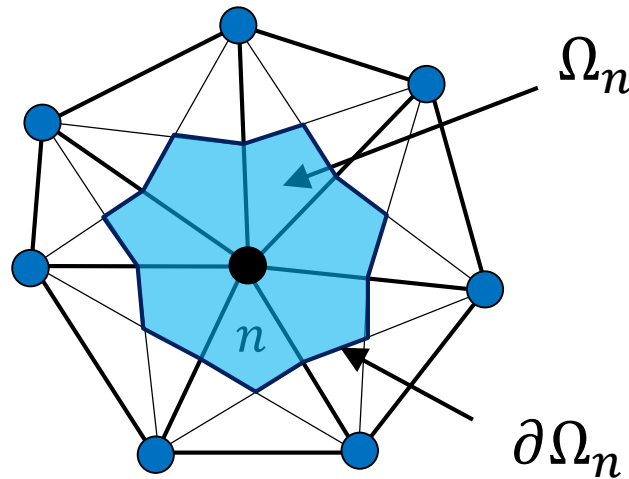
$$\Omega_n = \bigcup_{\substack{\text{éléments} \\ \text{connectés} \\ \text{au nœud } n}} \Omega_n^e$$

Approche nodale

■ Intégration nodale...

□ Définition des déformations nodales

- Technique SCNI (Chen et al.)



$$\begin{aligned}\varepsilon_{n_{ij}} &= \frac{1}{\omega_n} \int_{\Omega_n} \varepsilon_{ij} dv \\ &= \frac{1}{\omega_n} \int_{\Omega_n} \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) dv \\ &= \frac{1}{\omega_n} \int_{\partial\Omega_n} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) ds\end{aligned}$$

Calcul d'une déformation en moyenne sur le domaine nodal

□ Calcul des contraintes et variables internes associées au comportement

- Disposant des déformations nodales, le calcul des contraintes et des variables internes est maintenant réalisé aux nœuds du maillage par la résolution des équations constitutives du comportement du matériau

Approche nodale

■ Avantages

□ Attendus

- Maillage automatique en triangles ou tétraèdres de pièces complexes
- Pas de blocage en élasto(visco)plasticité de von Mises
- Le calcul des déformations nodales par la méthode SCNI → moindre sensibilité des résultats à la position des nœuds (distorsion des éléments)

□ Inhérents à la méthode

- Toutes les grandeurs mécaniques étant connues aux nœuds
 - Transport des résultats entre 2 maillages facilité
 - Dépouillement des résultats également facilité

■ Inconvénients

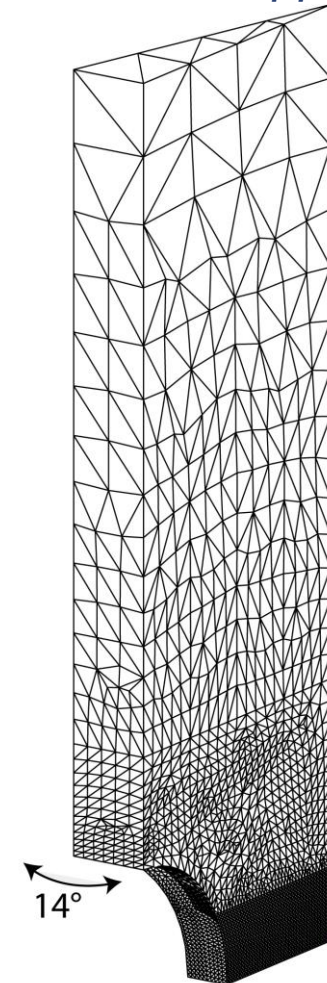
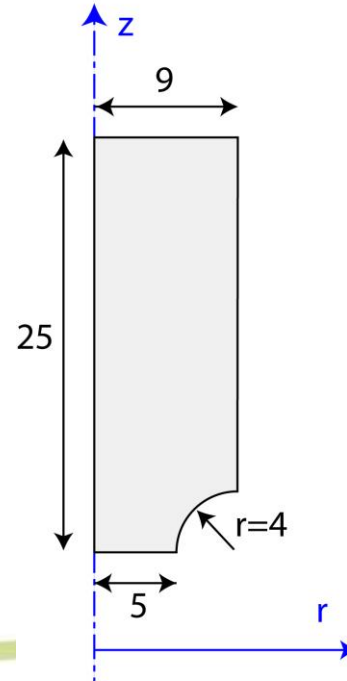
□ Inhérents à la méthode

- L'approche nodale engendre des couplages entre les seconds voisins de chaque nœud alors que la MEF classique n'engendre des couplages qu'entre les premiers voisins
 - Matrice premier membre contenant plus de termes non nuls
 - On pourrait donc s'attendre à des calculs plus longs

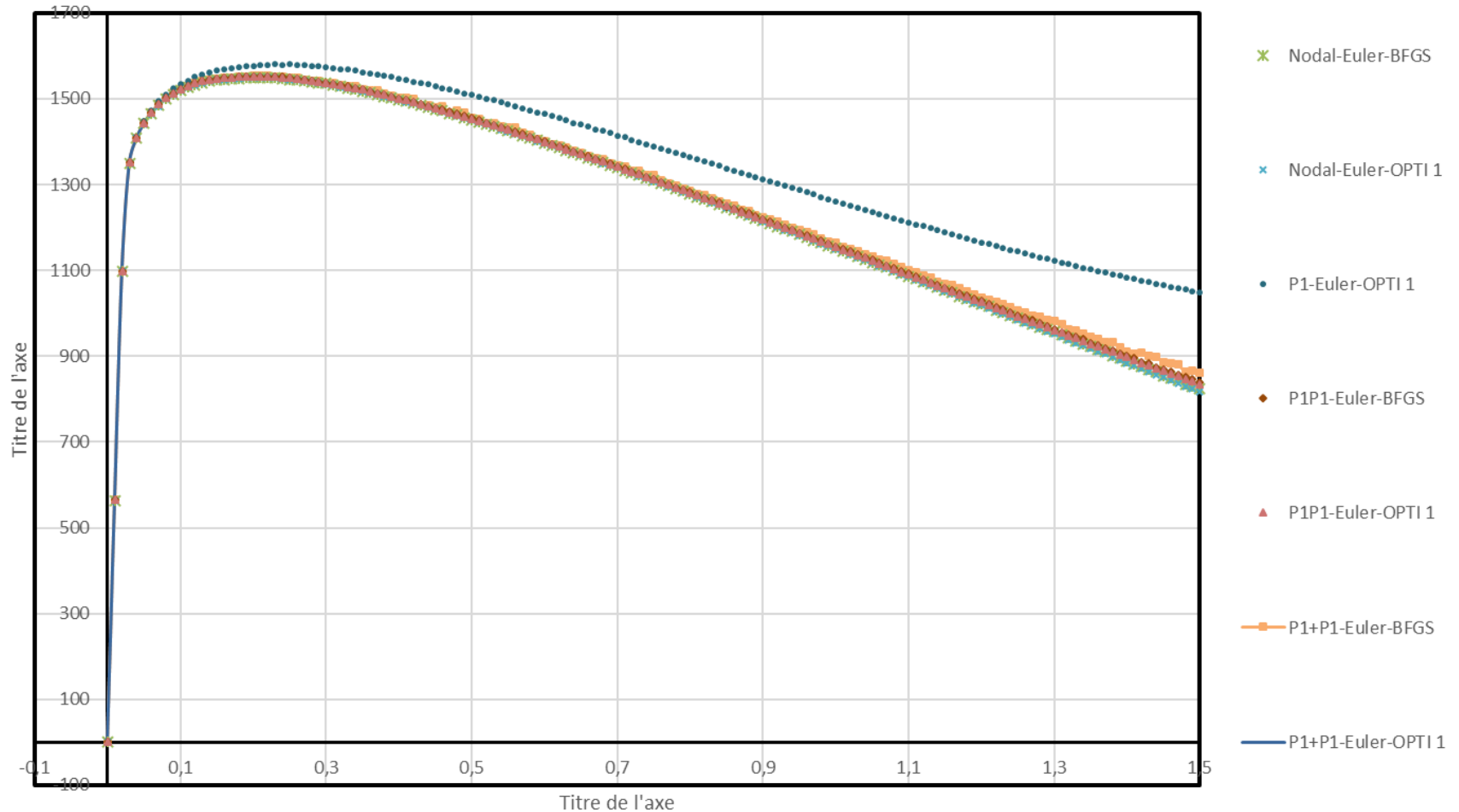
- *Eléments finis pour les calculs thermo-élastoplastiques*
 - *Eléments finis tétraédriques*
 - *Comparaison des tétraèdres P1, P1P1, P1+P1 et approche nodale*

Eprouvette entaillée en
grandes déformations
élastoplastiques

7530 nœuds
33185 éléments

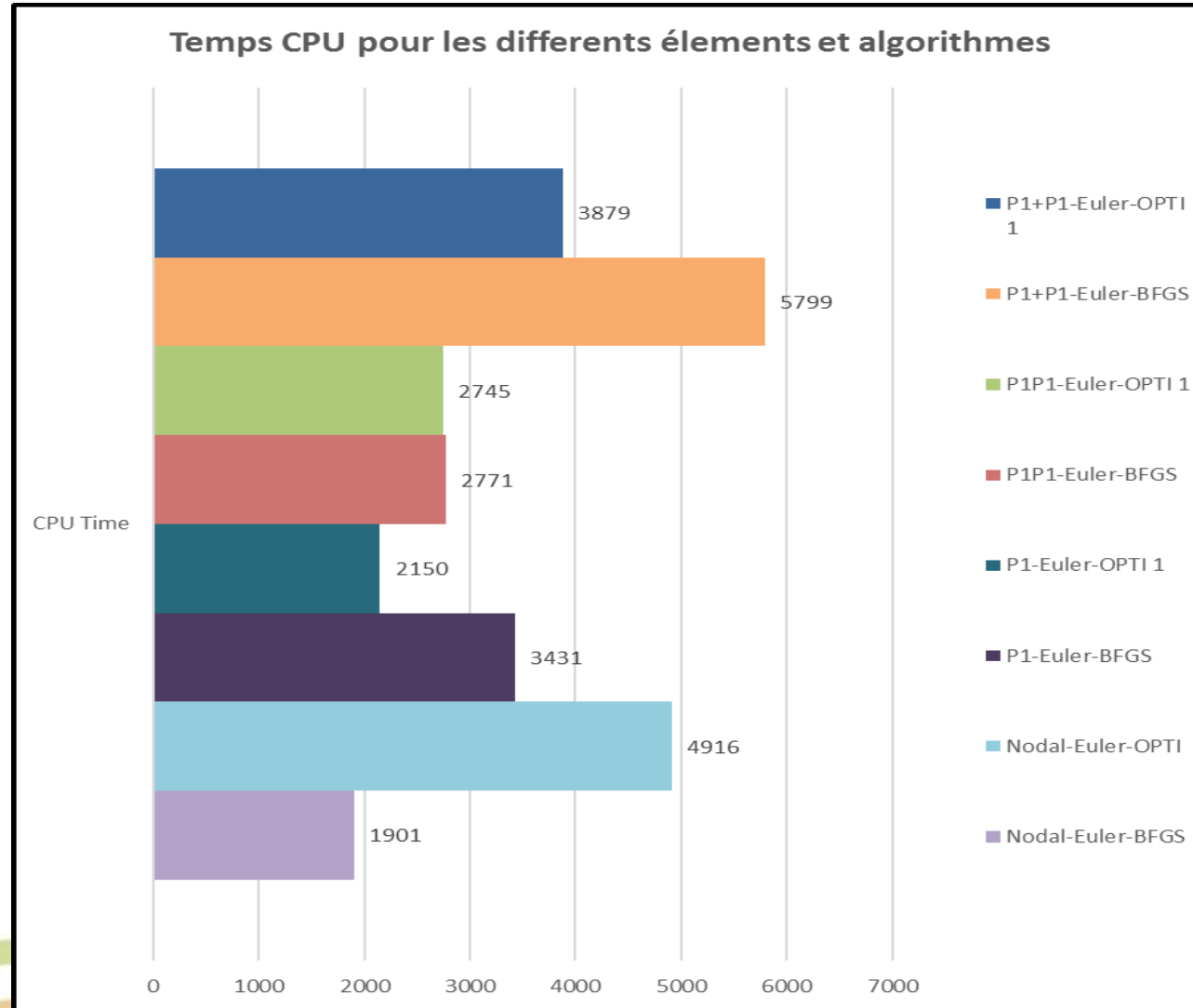


Comparaison des résultats pour différent types d'éléments



E. Feulvarch, J.-C. Roux, J.-M. Bergheau, P. Gilles, "A stable P1/P1 finite element for finite strain von Mises elasto-plasticity", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, Vol. 324, pp. 537-545

Bergheau J.-M., Leblond J.-B., 2017, A novel finite element method based on a nodal integration technique for nonlinear problems of solid mechanics, *XIV International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications*, 05/09/2017 07/09/2017, Barcelone



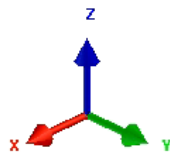
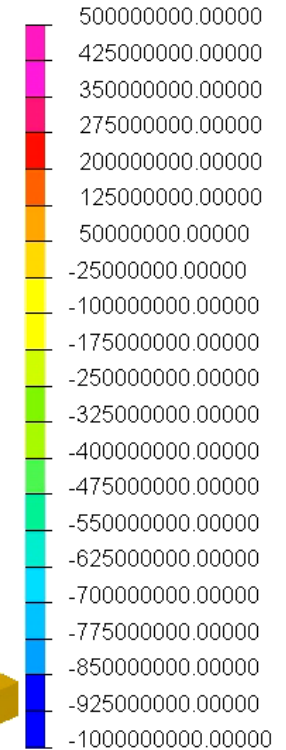
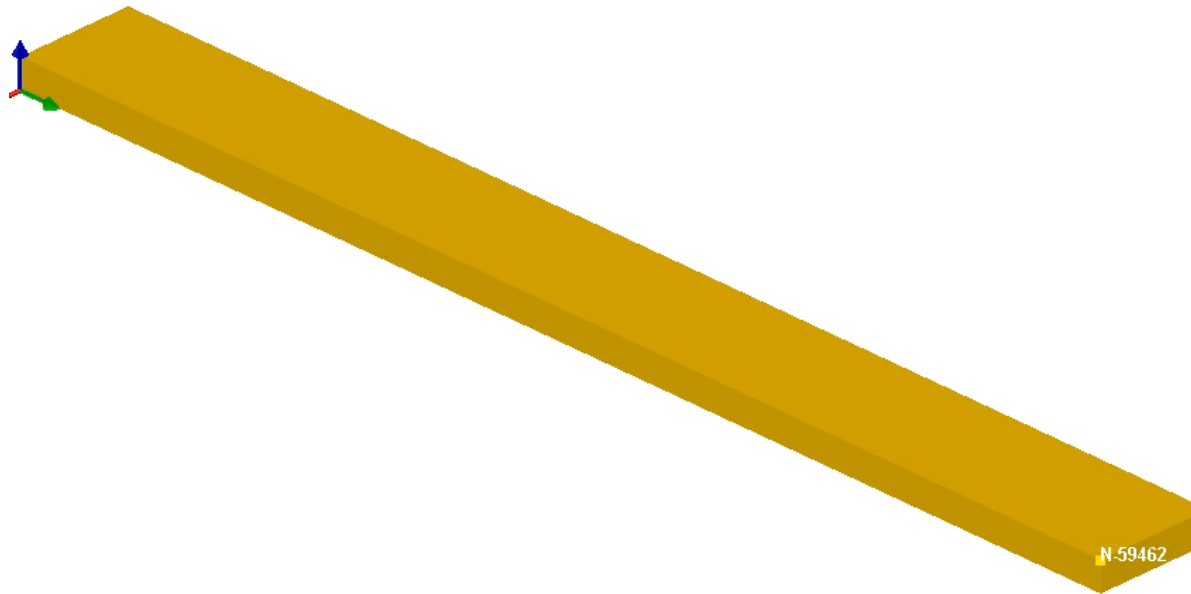
CALCUL TRANSLATION

NODE : CONTRAINTE_NOD YY

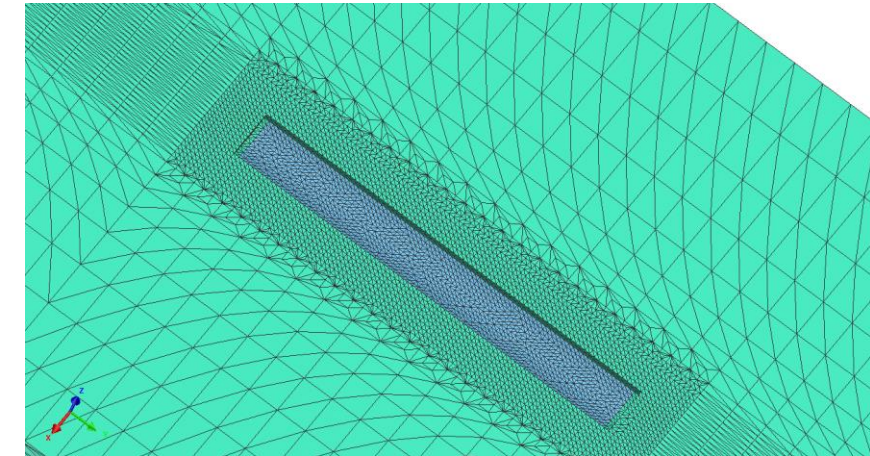
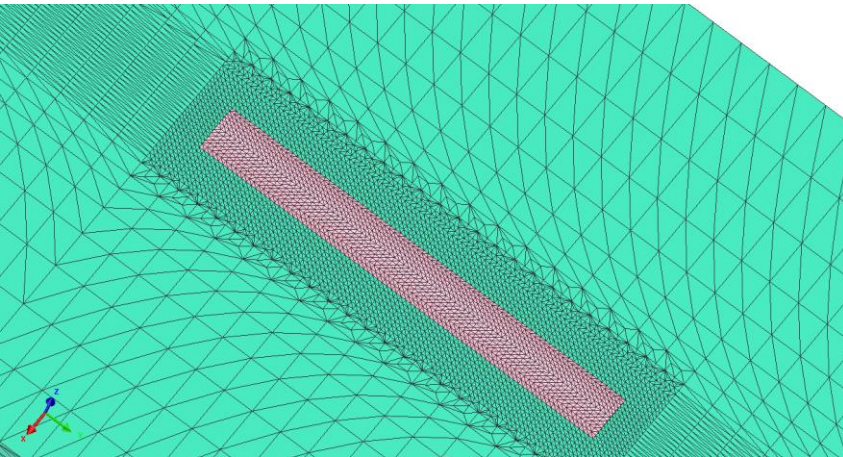
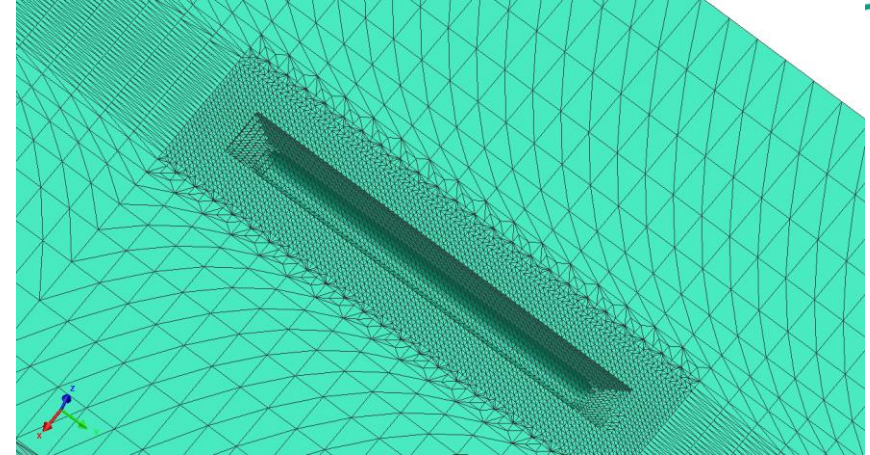
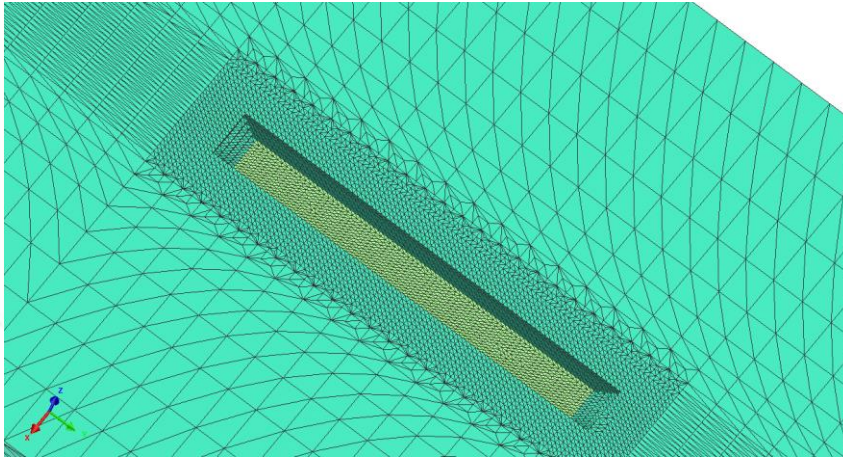
Min = 0 at Node 59462

Max = 0 at Node 59462

1 / 0.000000



Application à la simulation du soudage



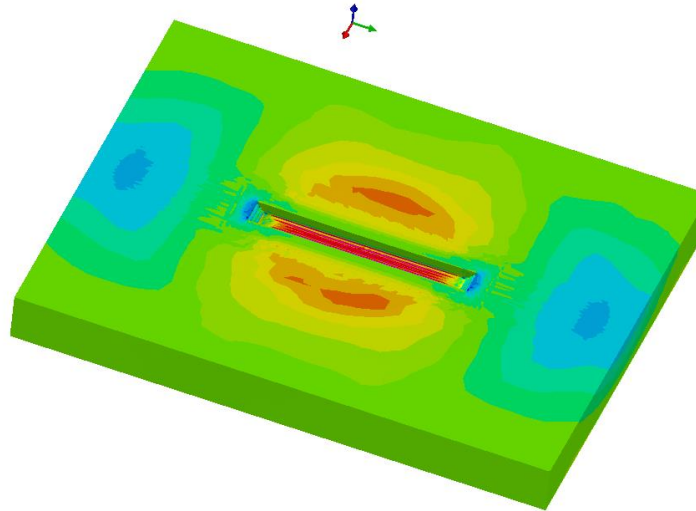
**Application à la simulation
du soudage multipasses**

58139 nœuds – 322887 éléments

27/06/2018

TG4_W1

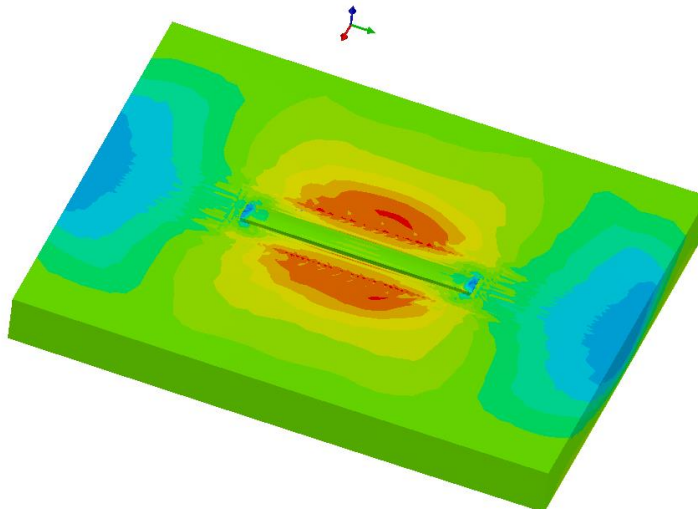
NODE : Stress_NOD XX
Min = -442.898 at Node 27697
Max = 574.733 at Node 35853



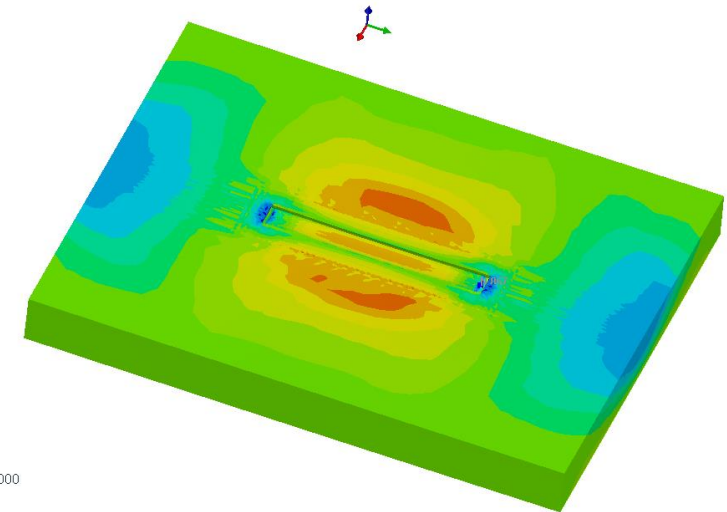
1 / 1000.000000

TG4_W3

NODE : Stress_NOD XX
Min = -1191.01 at Node 27641
Max = 411.043 at Node 13299



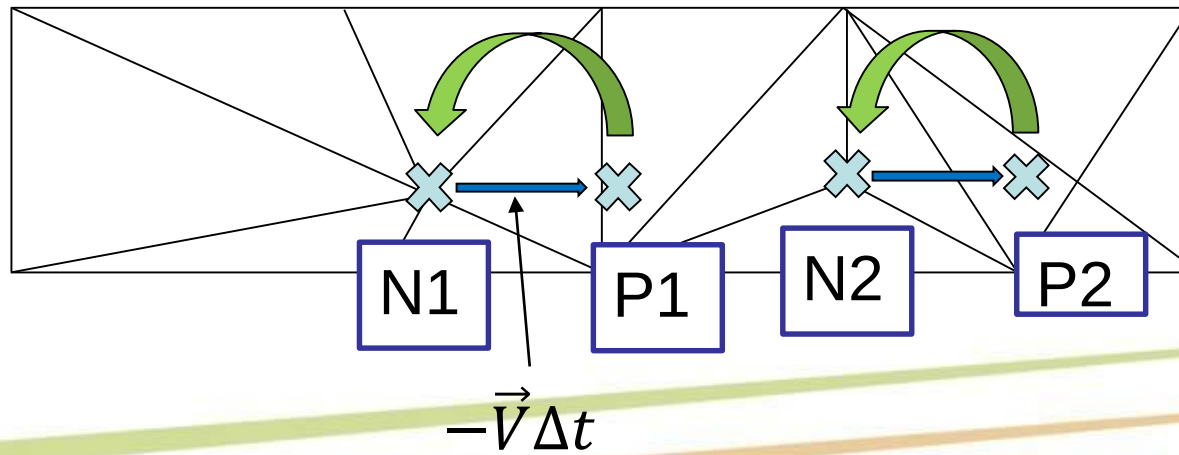
1 / 3000.000000



1 / 2000.000000

Application à la simulation du soudage multipasses

- *Simulation des états transitoires et stationnaires dans un repère lié aux sollicitations mobiles par rapport à la matière*
 - *Repose sur l'approche nodale*
 - *Simulation du déplacement de matière*
 - *Calcul incrémental dans le temps*
 - *A chaque instant de calcul $t+\Delta t$*
 - L'état mécanique initial (à t) de chaque nœud N1 est l'état mécanique à t du point P1 qui le précède de $-\vec{V}\Delta t$



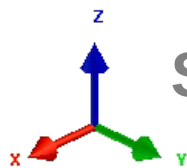
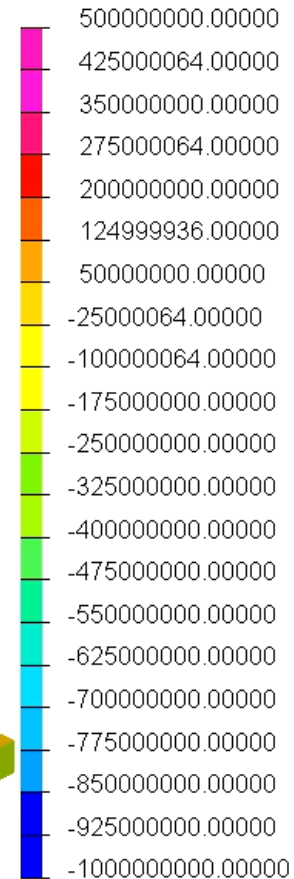
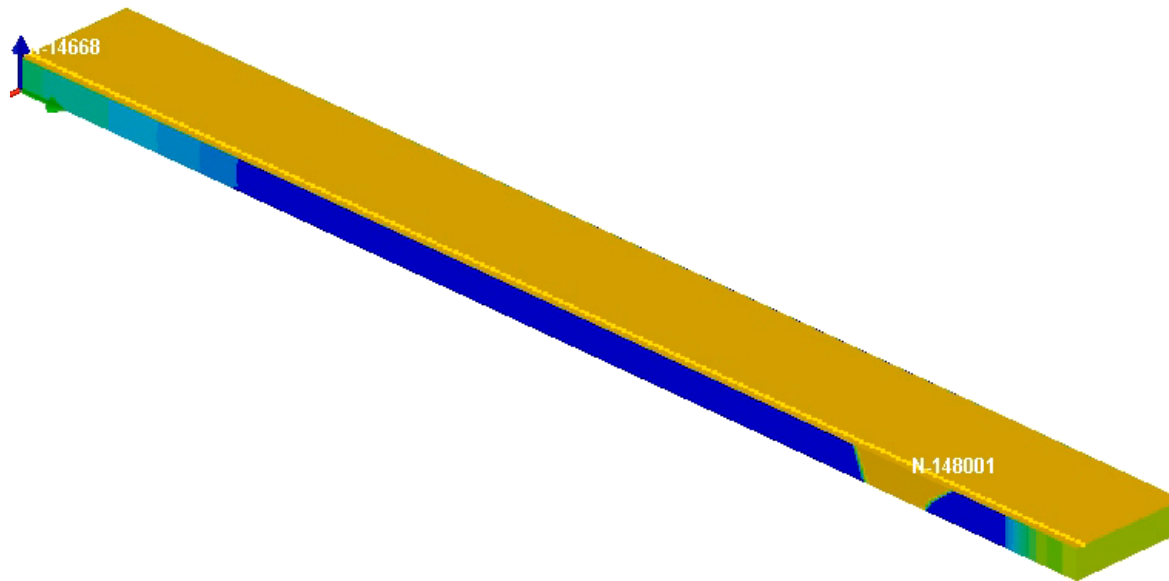
CALCUL TRANSLATION

NODE : CONTRAINTES_NOD YY

Min = -6.5127e+009 at Node 148001

Max = 0 at Node 14668

1 / 0.000000



Simulation du soudage dans le repère lié à la source de chaleur

■ Bilan

□ Prédiction des contraintes résiduelles

- *Bien maîtrisé sous réserve de disposer*
 - D'une bonne modélisation de l'apport de chaleur
 - D'une caractérisation correcte des matériaux (surtout aux basses températures)

□ Prédiction des distorsions

- *Les méthodes actuelles donnent des résultats satisfaisants*

■ Perspectives

□ Soudage et fabrication additive métallique reposent sur les mêmes phénomènes physiques

- *Possibilité de transposer les approches numériques*

□ Vers l'amont

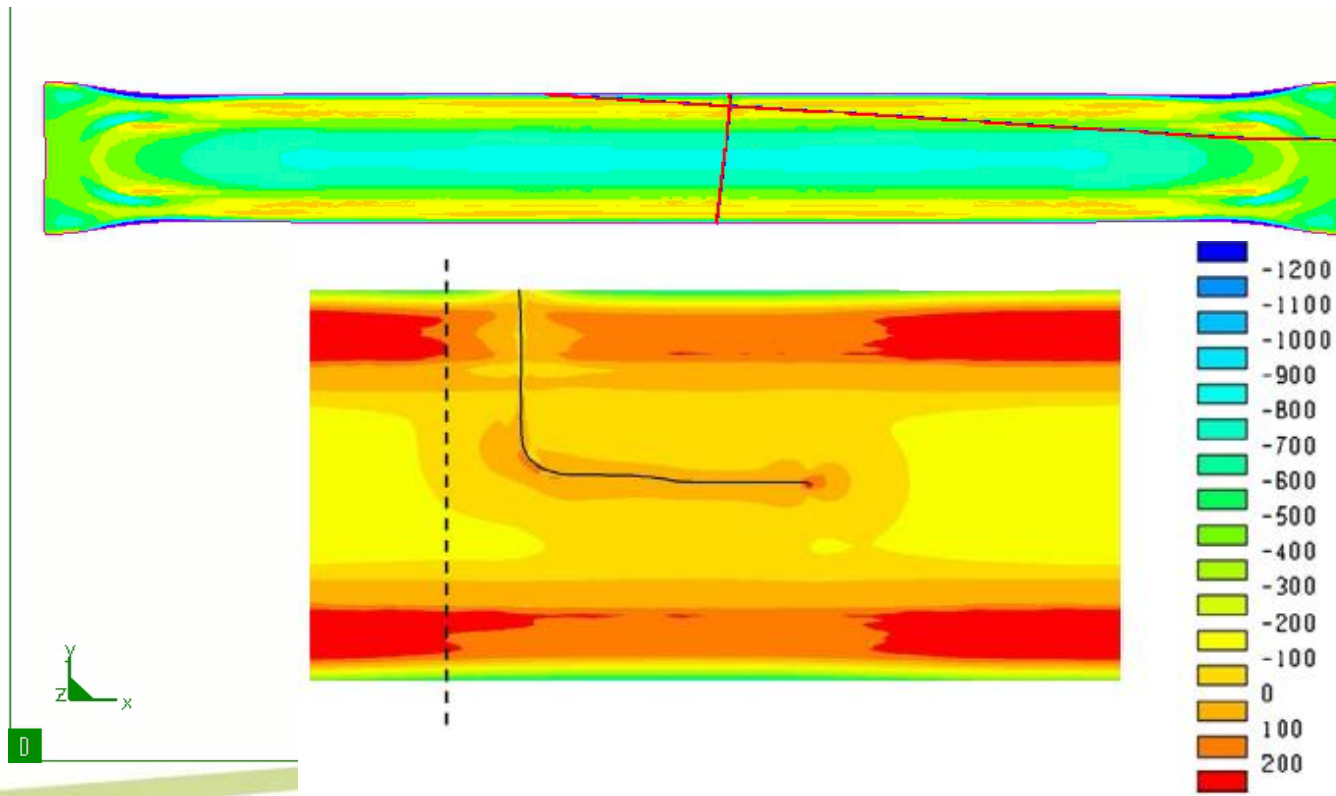
- *Couplage de formulations fluide et solide*
- ...

□ Vers l'aval

- *Des contraintes résiduelles à la tenue en service*
- ...

Propagation de fissure dans une plaque trempée

- Simulation numérique des couplages thermo-métallo-mécaniques
- Propagation de fissure dans le champ de contrainte résiduel de trempe par la méthode XFEM



E. Feulvarch, M. Fontaine, J.M. Bergheau, « XFEM investigation of a crack path in residual stresses resulting from quenching », *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 75, 2013, pp. 62-70.