Vers une simulation numérique liquide-solide couplée des procédés de soudage

J.-M.Bergheau

H. Sallem, Y. Saadlaoui, A. Delache, E. Feulvarch, J.-B. Leblond

De INZAT aux PPF puis SESSUR

- *INZAT*
  - *Programme de recherche pour le développement et la validation des modèles thermo-métallo-mécaniques mis en place par le professeur Jean-François Jullien*
  - *Essai INZAT*

- *Programme Pluri-Formation*
  - *« Simulation numérique des conséquence métallurgiques et mécaniques induites par les procédés mettant en jeu des hautes températures » (1999-2007)*
  - *« Couplages multiphysiques à hautes températures » (2007-2010)*
  - *Partenaires :*
    - *LTDS (ENISE, ECL), LaMCoS, MATEIS, CETHIL (INSA), PECM-LCG (ENSMSE) + LIMATB (UBS), IJLRDA (UPMC), LMGC (UM2)*
  - *Un séminaire par an*
  - *On continue avec le groupe **SESURR** : Simulation des procédés d'Elaboration, de Soudage, d'Usinage et des Risques de Rupture avec la participation d'industriels*

De INZAT aux PPF puis SESSUR

Objectifs

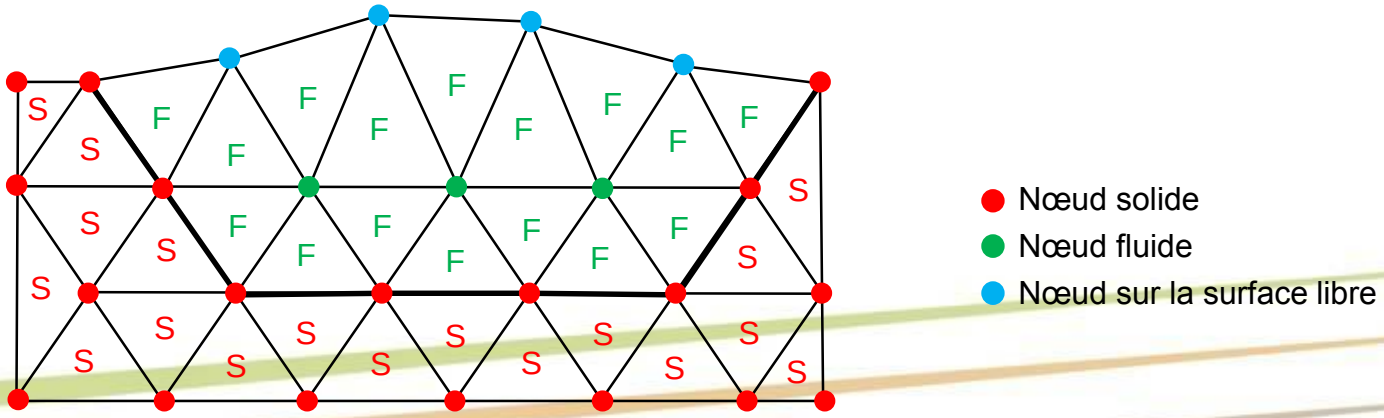
- *Simuler les écoulements de la matière dans un bain fondu qui se développe dans un solide qui se déforme*
  - *Simuler le comportement du matériau dans ses états liquide et solide*
  - *Mettre en place des outils numériques robustes susceptibles d'être utilisés dans des simulations plus simples*
  - *Travaux de thèse de T. Heuzé (FSSW) puis de H. Amin El Sayed et aujourd'hui de Y. Saadlaoui*

T. Heuzé, J.-B. Leblond, J.-M. Bergheau, « Modélisation des couplages fluide/solide dans les procédés d'assemblage à haute température », *Mécanique & Industries*, vol. 12, 2011, pp. 183-191.

Couplage solide-liquide

- *Approche proposée*
  - *A chaque instant*
    - *Détermination des domaines fluide et solide*
      - Critère sur la température moyenne de l'élément
      - Zone pâteuse considérée comme solide
        - » Comportement mécanique intermédiaire solide-liquide

$$\begin{array}{ll} T \geq T_L & fluide \\ - \; T_S \leq T \leq T_L & solide \\ T \leq T_S & solide \end{array}$$

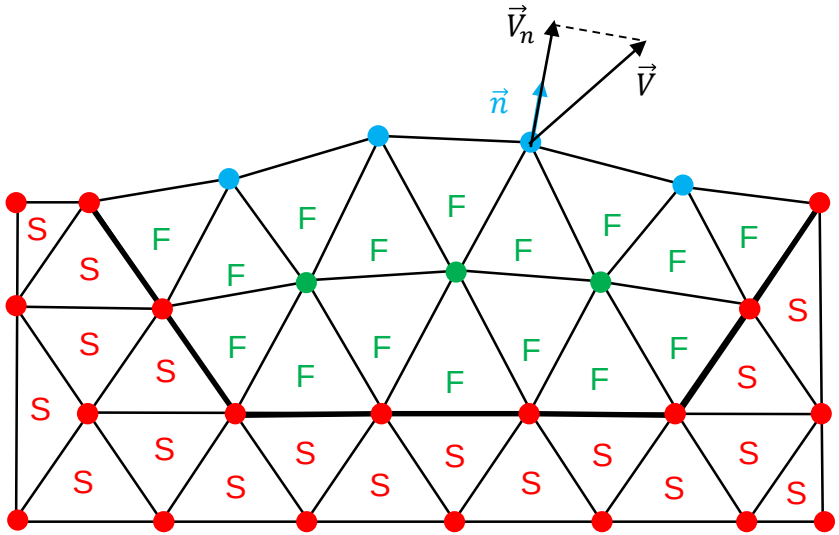


Couplage solide-liquide

- *Approche proposée*
  - *A chaque instant*
    - *Résolution ALE dans le fluide*
      - Ecoulement laminaire
      - Couplage thermomécanique fort : résolution de l'équation de la chaleur, des équations de Navier Stokes, de l'équation d'incompressibilité
      - Comportement de type fluide newtonien
      - Forces de flottabilité, tension de surface, pression…
      - Elément P1/P1+/P1 (Température/Vitesse/Pression)
    - *Résolution lagrangienne actualisée dans le solide*
      - Couplage thermomécanique : résolution de l'équation de la chaleur, des équations d'équilibre, du bilan de masse
      - Tout type de comportement élasto-(visco)plastique
      - Elément P1/P1/P1 (Température/Vitesse/Pression)
    - *Résolution en vitesse dans les 2 cas pour la compatibilité*

Couplage solide-liquide

- *Approche proposée*
  - *A chaque instant*
    - *Les nœuds de la zone fluide sont repositionnés à partir de l'interface liquide-solide et de la position actualisée de la surface libre (approche ALE)*



Couplage solide-liquide

Approche proposée

Equations résolues

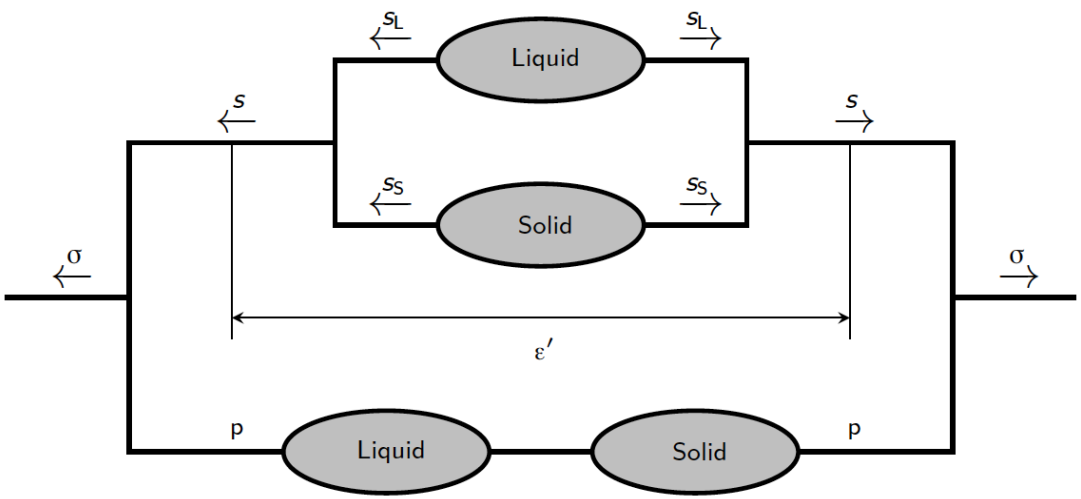
$$
(W)\begin{cases}
\text{Find } (T,\mathbf{v},p)\in(\mathcal{T}_{ad}\times\mathcal{V}_{ad}\times\mathcal{P}_{ad}),\ \forall t\in]0,T],\ \text{such that}\\
\forall(T^*,\mathbf{v}^*,p^*)\in(\mathcal{T}^0_{ad}\times\mathcal{V}^0_{ad}\times\mathcal{P}_{ad}),\\
\left|\begin{array}{l}
-\displaystyle\int_{\Omega_\chi}\lambda(T)\boldsymbol{\nabla}T\cdot\boldsymbol{\nabla}T^*\mathrm{d}\Omega+\int_{\partial\Omega_q}\phi^d T^*\mathrm{d}S+\int_{\Omega_\chi}\left\{\begin{array}{c}\sigma:\mathbf{D}\\ \beta\sigma:\mathbf{D}^p\end{array}\right\}T^*\mathrm{d}\Omega\\
\qquad=\displaystyle\int_{\Omega_\chi}\rho C\left(\left.\frac{\partial T}{\partial t}\right|_\chi+\left\{\begin{array}{c}\boldsymbol{\nabla}T\cdot(\mathbf{v}-\widehat{\mathbf{v}})\\ 0\end{array}\right\}\right)T^*\mathrm{d}\Omega \qquad \text{(energy)}\\
-\displaystyle\int_{\Omega_\chi}\left\{\begin{array}{c}2\mu(T,\mathbf{v})\mathbf{D}\\ \mathbf{s}(\mathbf{v}(\tau),\tau\le t)\end{array}\right\}:\mathbf{D}^*\mathrm{d}\Omega-\int_{\Omega_\chi}p\,\mathrm{div}\,\mathbf{v}^*\mathrm{d}\Omega+\int_{\partial\Omega_F}\mathbf{F}_d\cdot\mathbf{v}^*\mathrm{d}S\\
\qquad=\displaystyle\int_{\Omega_\chi}\rho\left(\left\{\begin{array}{c}\left.\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t}\right|_\chi+\boldsymbol{\nabla}\mathbf{v}\cdot(\mathbf{v}-\widehat{\mathbf{v}})\\ \mathbf{0}\end{array}\right\}\right)\mathbf{v}^*\mathrm{d}\Omega \qquad \text{(PVP)}\\
\displaystyle\int_{\Omega_\chi}p^*\left(\mathrm{div}\,\mathbf{v}-\left\{\begin{array}{c}0\\ \frac{\dot p}{k}+3\dot\varepsilon^{th}\end{array}\right\}\right)\mathrm{d}\Omega=0 \qquad \text{(internal constraint)}
\end{array}\right.\\
T(\mathbf{x},t=0)=T_0(\mathbf{x})\\
\mathbf{v}(\mathbf{x},t=0)=\mathbf{v}_0(\mathbf{x})
\end{cases}
$$

χ :ALEcoord., $\mathbf{v}$:material velocity, $\widehat{\mathbf{v}}$:mesh velocity

Méthodes numériques

Comportement de la zone pâteuse

- *Modèle simple : comportement d'un mélange solide-liquide*
  - *Transition continue entre les comportements solide et liquide*
  - *Modèle de fluide newtonien dans le liquide*
  - *Libre choix du modèle de comportement du solide*



$$\begin{array}{ll} f_L = 1 & T \geq T_L \\ f_L = f_L(T) & T_S \leq T \leq T_L \\ f_L = 0 & T \leq T_S \end{array}$$

$$\bar{\bar{s}} = f_L \bar{\bar{s}}_L + f_S \bar{\bar{s}}_S$$
$$p_L = p_S = p$$
$$\bar{\bar{\sigma}} = \bar{\bar{s}} + p\bar{\bar{I}}$$

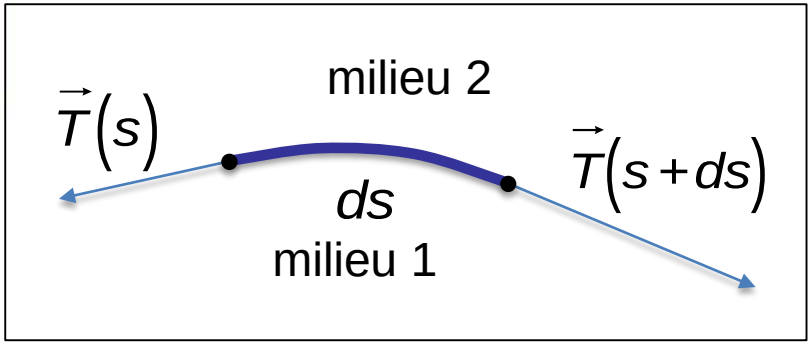
$$\langle X \rangle = \frac{f_S^*}{f_S} X^* + \frac{1}{2} \frac{f_S^* + f_S}{f_S} (X - X^*)$$

H. Amin El Sayed, E. Feulvarch, F. Boitout, J.B. Leblond, J.M. Bergheau, « A mechanical behaviour law for the numerical simulation of the mushy zone in welding », *Computational Plasticity XII - Fundamentals and Applications*, E. Onate, D.R.J. Owen, D. Peric and B. Suarez (Eds), Barcelone, 3-5 septembre 2013, pp.164-171.

Méthodes numériques

Tension superficielle

- *Les effets de la tension de surface sont équivalents à ceux d'une membrane étanche fictive située à l'interface de 2 milieux*



$$\vec{T}(s) = -\gamma(s)\vec{t}(s)$$

$$\vec{T}(s+ds) = \gamma(s+ds)\vec{t}(s+ds)$$

$\gamma(s)$: tension de surface à l'abscisse s

$$d\vec{f} = \vec{T}(s) + \vec{T}(s+ds) = \left(\frac{d\gamma}{ds}\vec{t}(s) + \gamma(s)\frac{d\vec{t}}{ds}\right)ds = \left(\frac{d\gamma}{ds}\vec{t}(s) + \frac{\gamma(s)}{R}\vec{n}\right)ds$$

$$\vec{\tau}(s) = \frac{d\vec{f}}{ds} = \frac{d\gamma}{ds}\vec{t}(s) + \frac{\gamma(s)}{R}\vec{n}$$

Effet Marangoni

Effet de courbure

Méthodes numériques

Tension superficielle

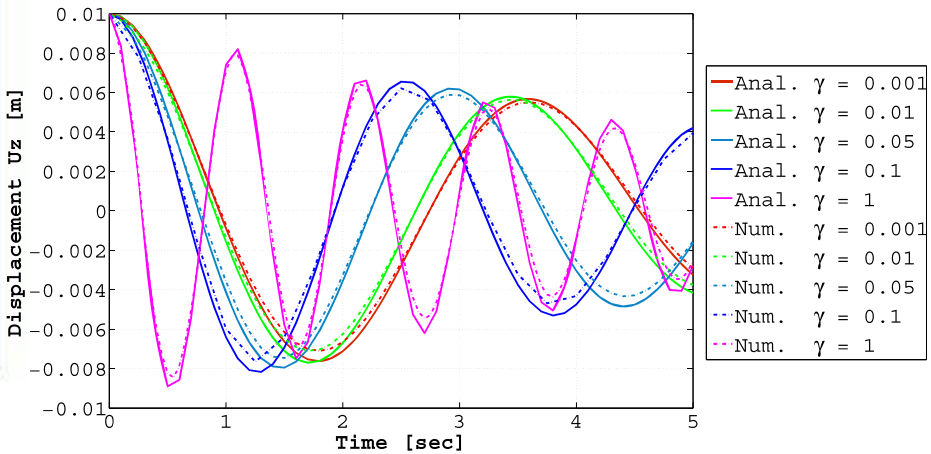
- Méthode habituelle
  - Introduction d'une densité surfacique d'effort tangentiel $\frac{d\gamma}{ds}\vec{t}(s)$ (effet Marangoni) et d'effort normal $\frac{\gamma(s)}{R}\vec{n}$ aux limites du domaine
  - Nécessite le calcul des courbures → délicat et imprécis (calcul de la normale en chaque nœud puis de $div\vec{n}$)
- Méthode utilisée
  - Introduction via un tenseur de contrainte imposé dans des éléments surfacique de membrane

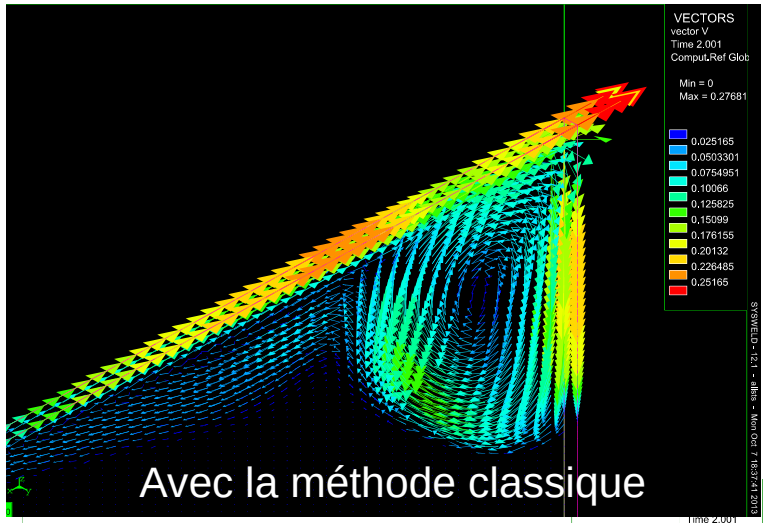
$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} \gamma(T) & 0 \\ 0 & \gamma(T) \end{bmatrix} \longrightarrow efforts\ nodaux\ \text{équivalents} : \int_S [B]^T\{\sigma\}ds$$

en chaque point d'intégration

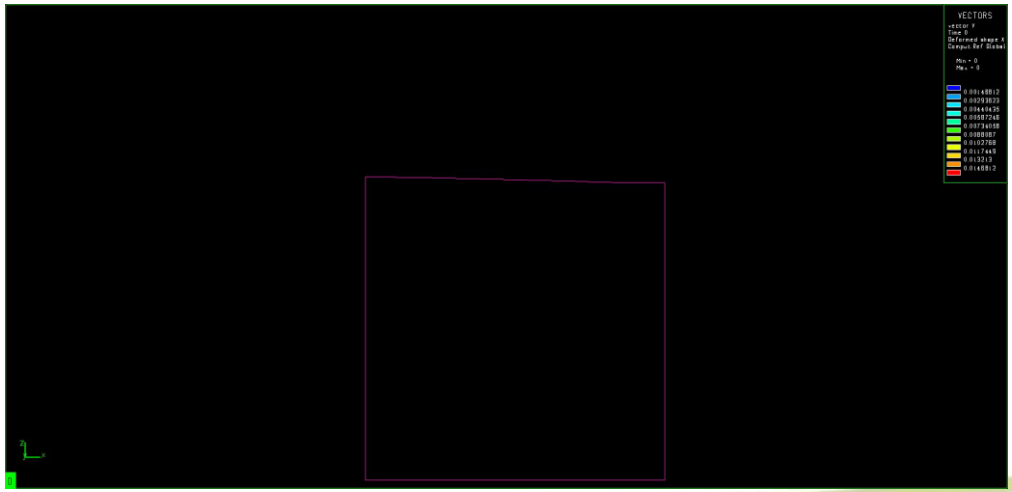
J.B. Leblond, H. Amin El Sayed, J.M. Bergheau, « On the incorporation of surface tension in finite-element calculations », *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 341, 2013, pp.770-775.

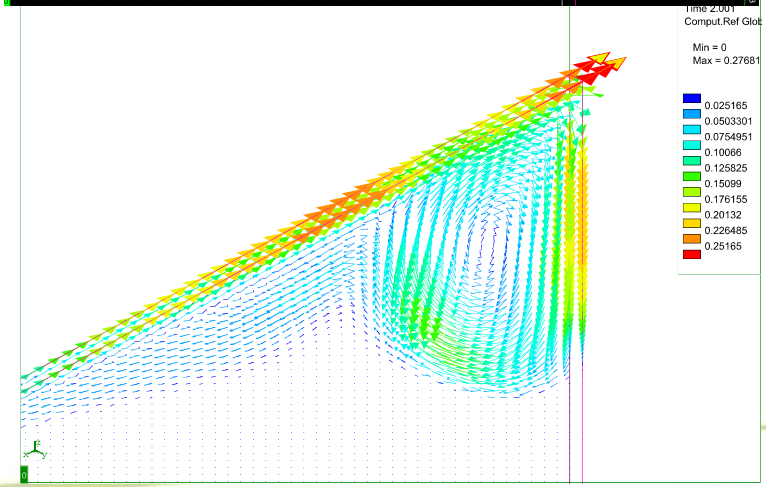
Méthodes numériques





Avec la méthode classique





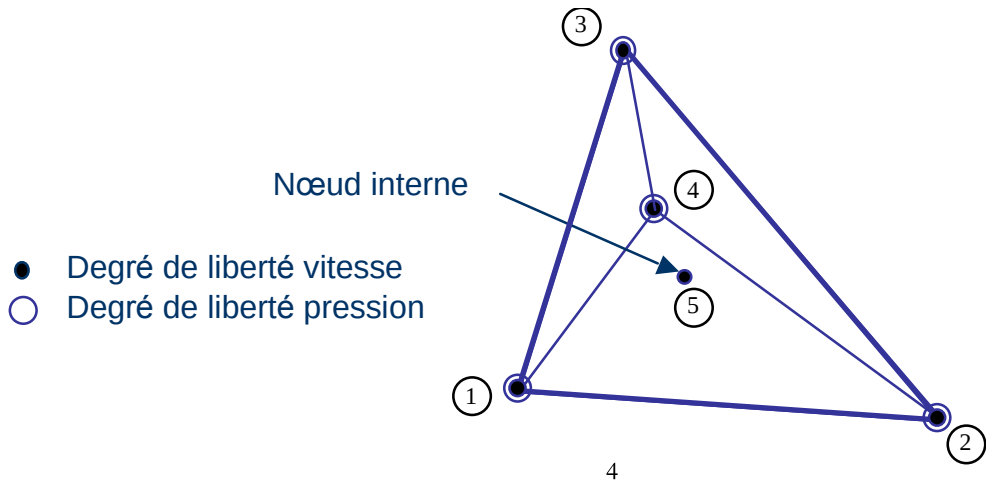
Avec des éléments de membrane

Problème de ballottement

Ecoulement d'un fluide chauffé non uniformément

Méthodes numériques

- *Choix d'éléments finis tétraédriques*
  - *Pour la facilité de réalisation des maillages*
  - *Eléments finis mixtes*
    - *Tétraèdre P1+P1 en vitesse-pression (mini element) et P1 en température*



$$N_1(x,h,V) = 1 - x - h - V$$

$$N_2(x,h,V) = x$$

$$N_3(x,h,V) = h$$

$$N_4(x,h,V) = V$$

$$N_b(x,h,V) = Min(N_1, N_2, N_3, N_4)$$

$$\vec{v}(\xi,\eta,\varsigma) = \sum_{s=1}^{4} N_s(\xi,\eta,\varsigma)\vec{v_s} + N_b(\xi,\eta,\varsigma)\vec{v_b}$$

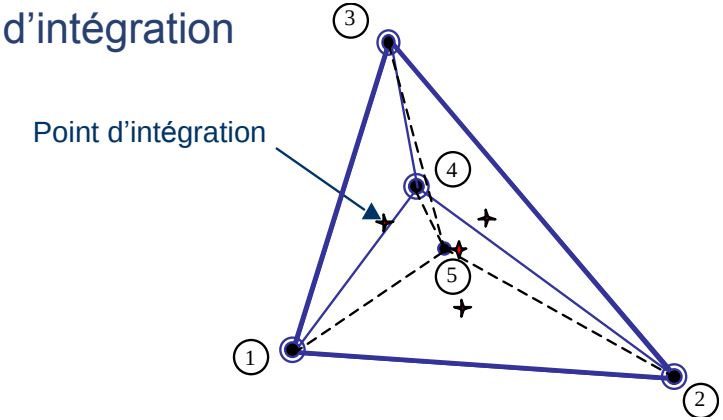
$$p(\xi,\eta,\varsigma) = \sum_{s=1}^{4} N_s(\xi,\eta,\varsigma)\, p_s$$

Méthodes numériques

Choix d'éléments finis tétraédriques

Eléments finis mixtes

- *Tétraèdre P1+P1 en vitesse-pression (mini element)*
  - Condensation du nœud interne au niveau élémentaire
    - » Dans le cas incompressible, la présence d'un nœud interne conduit à stabiliser l'élément et à relaxer la condition d'incompressibilité sur le champ de vitesse défini à partir des nœuds sommets
  - 4 points d'intégration



  - Utilisé pour le problème fluide
  - Utilisation délicate en élasto-(visco)plasticité
    - » Nécessite des opérateurs tangents (méthode de Newton) pour converger – BFGS ne permet pas de converger
    - » Pose des difficultés de convergence à hautes températures

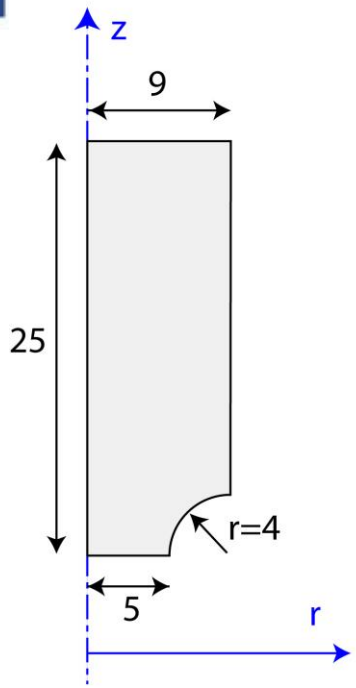
Méthodes numériques

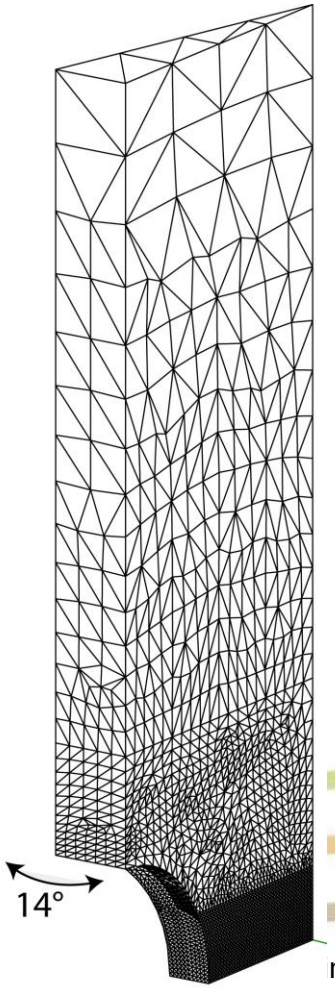
- *Choix d'éléments finis tétraédriques*
  - *Eléments finis mixtes*
    - *Tétraèdre P1P1 en vitesse-pression*
      - Même approximation pour les champs de vitesse et de pression
      - Ne fonctionne pas dans le cas d'un comportement incompressible
      - Fonctionne dans le cas d'un comportement **élasto**-(visco)plastique
      - Efficace :
        - » 1 seul point d'intégration
        - » Possibilité d'utiliser BFGS à condition de réactualiser la matrice de temps en temps
        - » Converge nettement mieux que l'élément P1+P1
        - » → beaucoup plus rapide (3 à 4 fois) que l'élément P1+P1
        - » Temps de calcul comparable au Q1P0
      - Demande à être stabilisé pour éviter les oscillations de pression

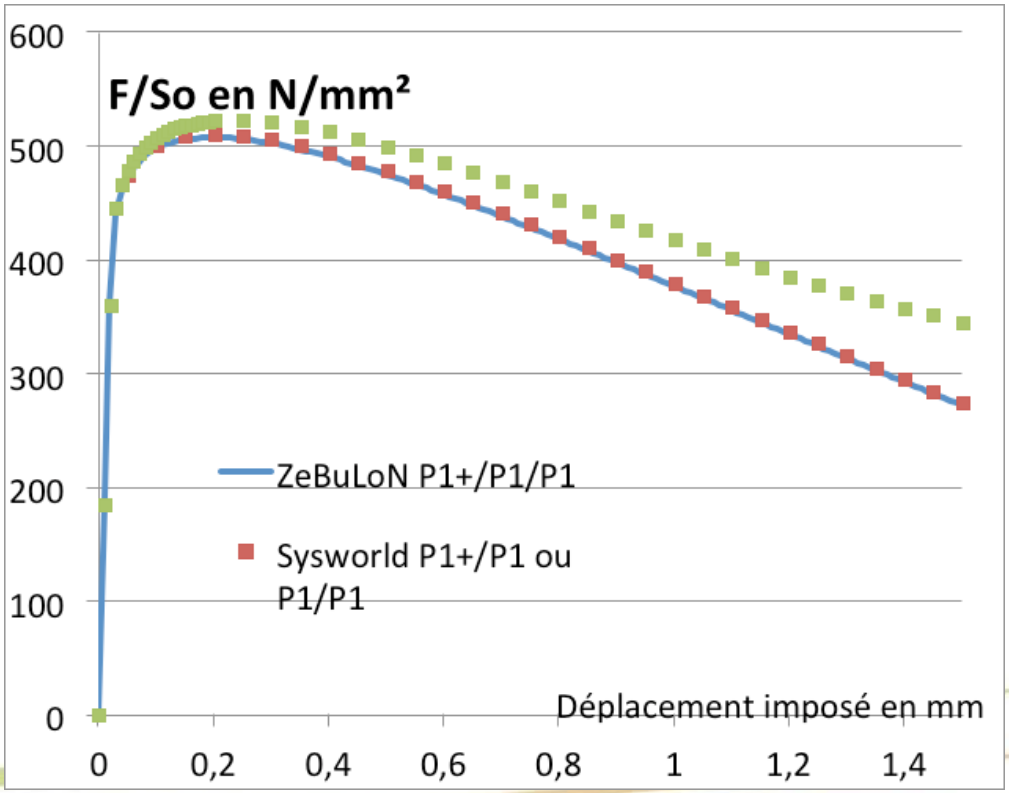
E. Feulvarch, H. Amin El Sayed, J.-C. Roux, J.-M. Bergheau, « A stabilized P1/P1 finite element for the mechanical analysis of solid metals », *International Journal of Material Forming*, 2017,, Volume 10, Issue 1, pp 3–14.

Méthodes numériques

- *Eléments finis pour les calculs élastoplastiques*
  - *Eléments finis mixtes*
    - *Comparaison des tétraèdres P1, P1P1 et P1+P1*





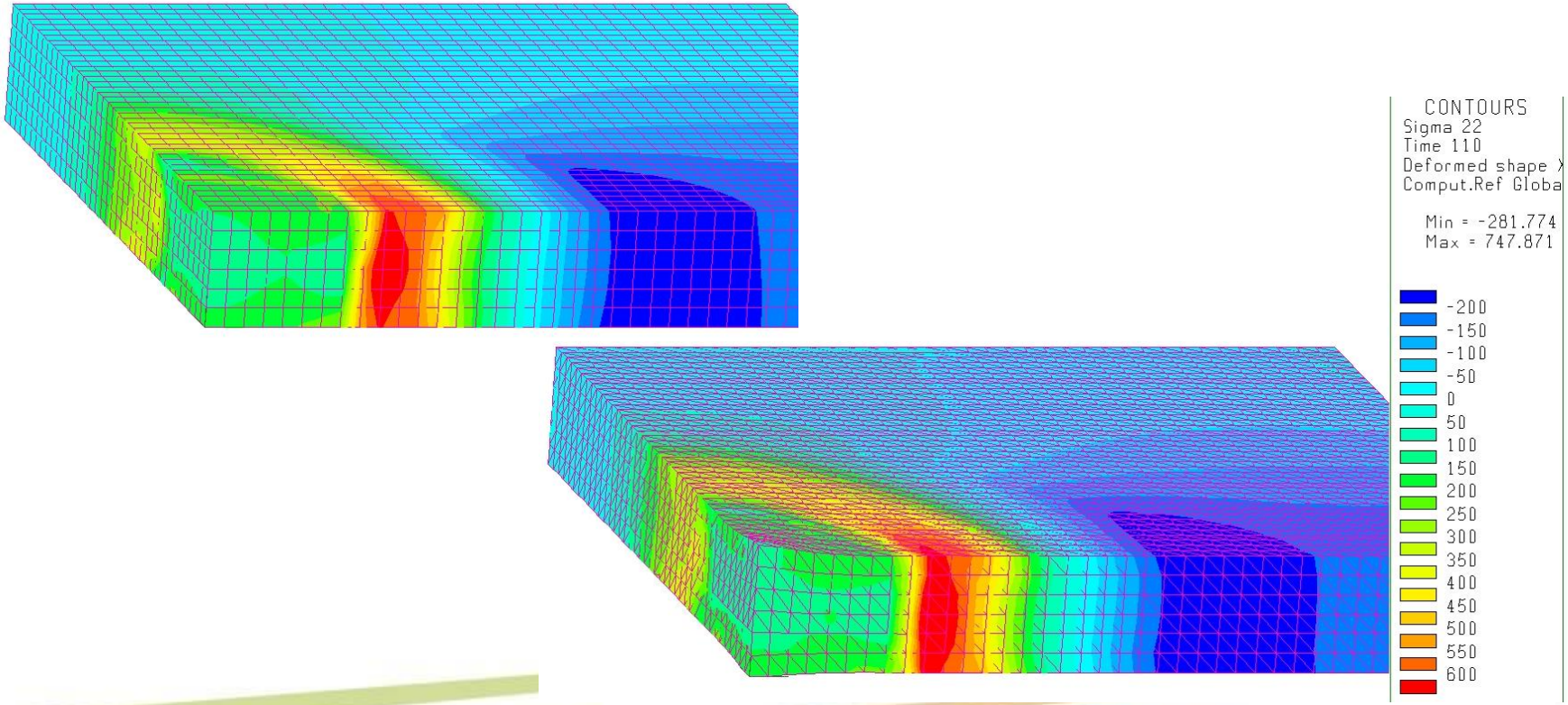


7530 nœuds
33185 éléments

Eprouvette entaillée en grandes déformations élastoplastiques

Méthodes numériques

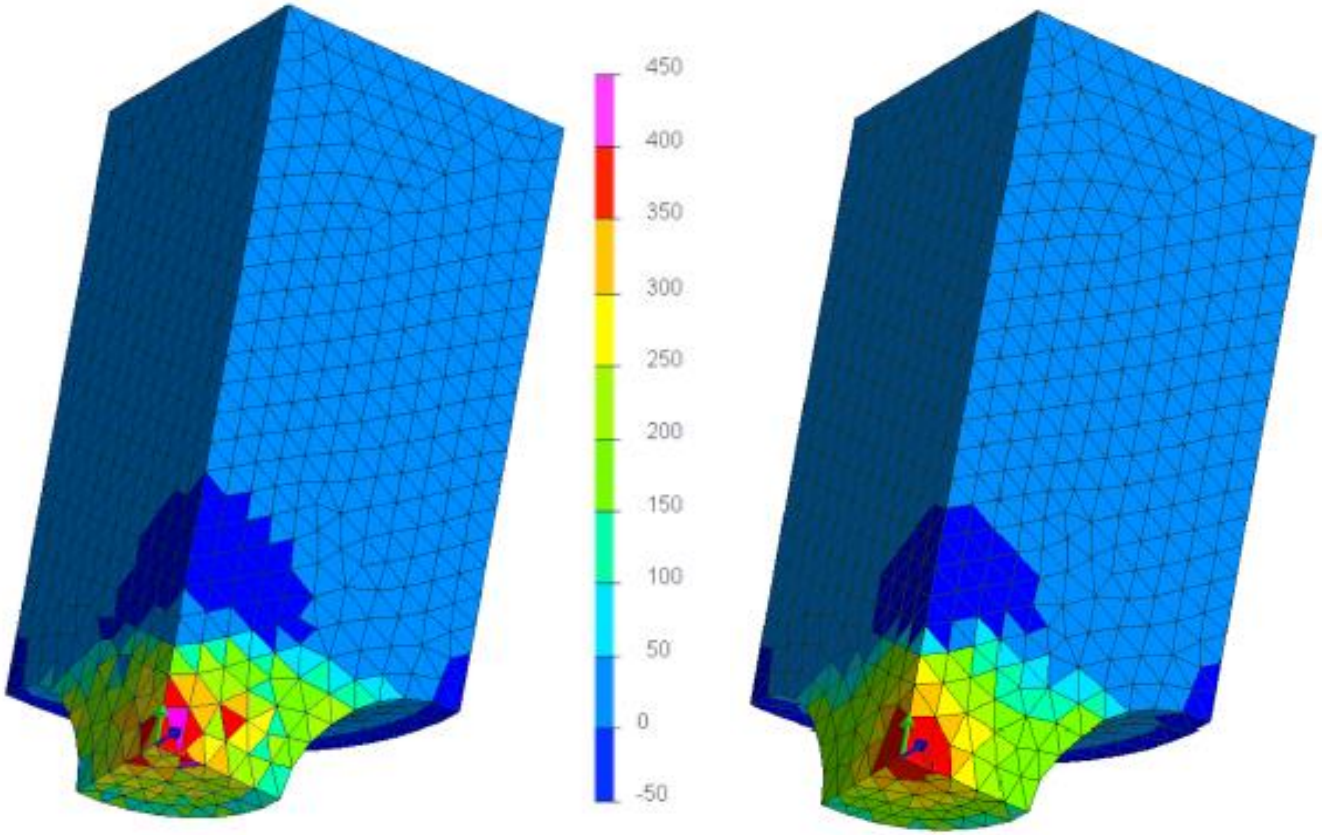
- *Eléments finis pour les calculs élastoplastiques*
  - *Comparaison Q1P0 – P1P1 dans le cas d'une plaque chauffée en son centre*



Distribution de contrainte résiduelle Syy

Méthodes numériques

- *Eléments finis pour les calculs élastoplastiques*



Sans stabilisation

Avec stabilisation

Distribution de pression dans une éprouvette entaillée
Comportement élastoplastique parfait

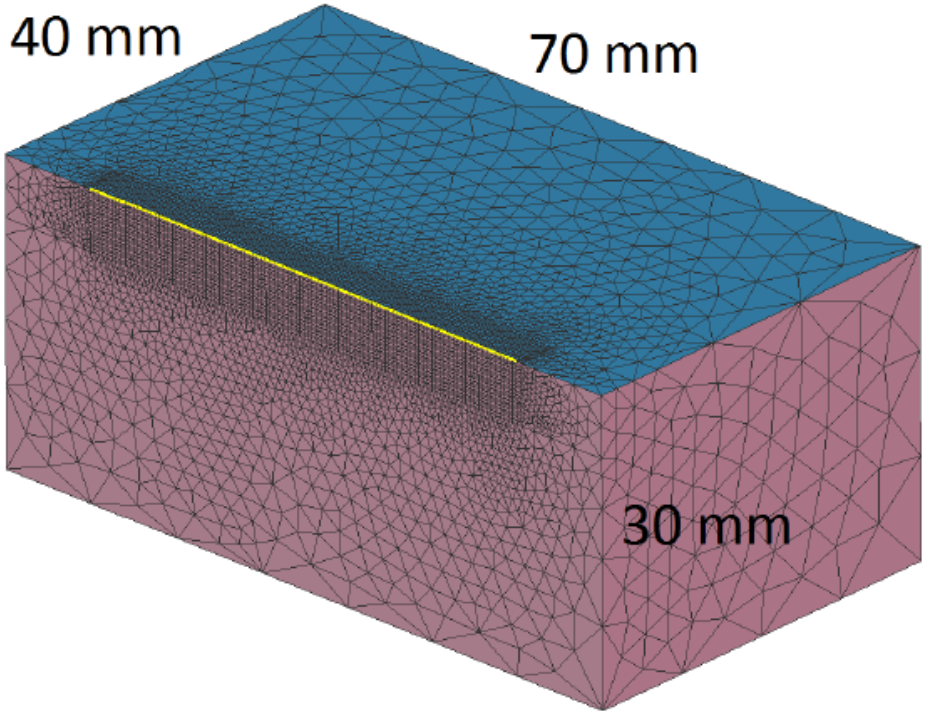
Convergence des calculs

- *Approche solide-liquide fortement couplée*
  - *Ecoulements dans le bain fondu couplés aux déformations du solide dans un même calcul au même instant*
    - ***→Convergence difficile voire impossible à atteindre***
  - *Nécessité d'un nouvel algorithme*
    - *Découplage des calculs fluide et solide à chaque pas de temps*
    - *En cours d'implémentation*

- *Développement d'approches simplifiées*
  - *Découplage des problèmes fluide et solide*
    - *Les déformations du solide n'interfèrent pas avec les écoulements fluides → approche classique*
  - *Bain fondu modélisé comme un fluide newtonien mais sans moteur d'écoulement*
    - *Approche strictement lagrangienne*
    - *Propriétés du matériau entrées de la température ambiante à la zone pâteuse (thèse de L. Bouffier, 2013 pour l'inconel 600)*
    - *Nécessité d'introduire une tension de surface pour stabiliser le bain fondu*

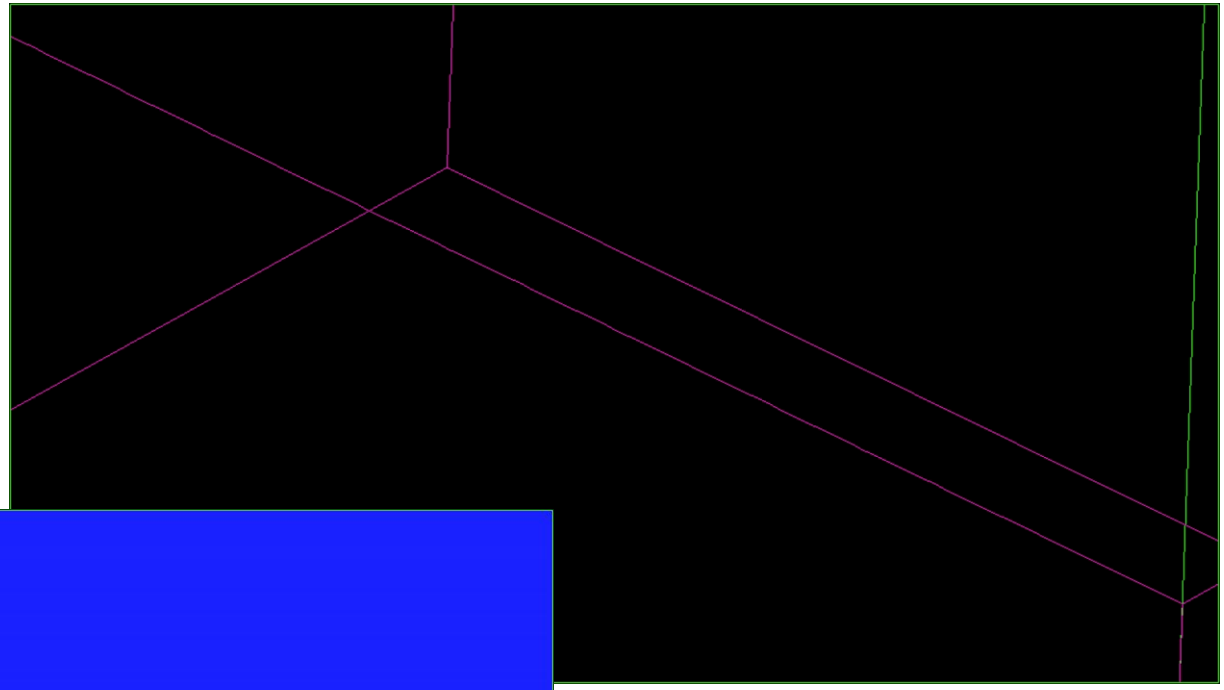
Soudage hybride Laser-Arc

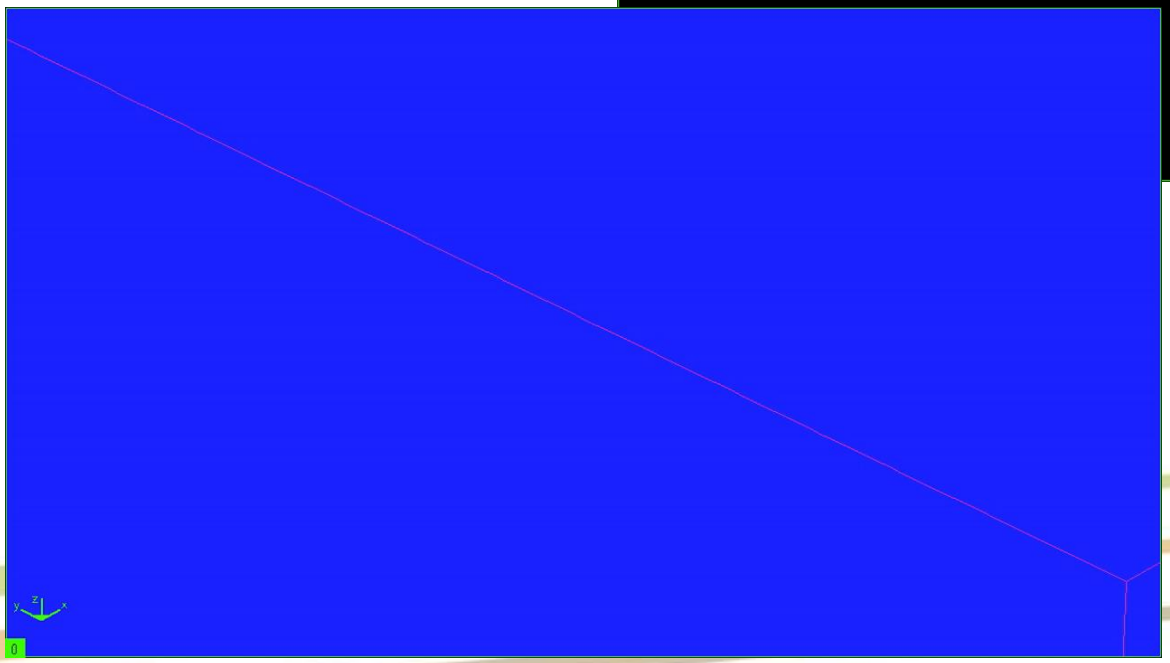
- *Comparaison de 2 approches*
  - *Approche thermo-métallo-fluide découplée du problème solide*
    - *Acier S355J2G3*
    - *Transformations métallurgiques*
      - ferrite→austénite
      - austénite → bainite
      - Austénite→ martensite
    - *33897 nœuds et 187939 éléments*
      - P1+/P1 → fluide
      - P1/P1 → solide
    - $\frac{d\gamma}{dT} > 0$ → *bain pénétrant*
  - *Approche thermo-métallo-mécanique classique*
    - *Sans prise en compte des écoulements*



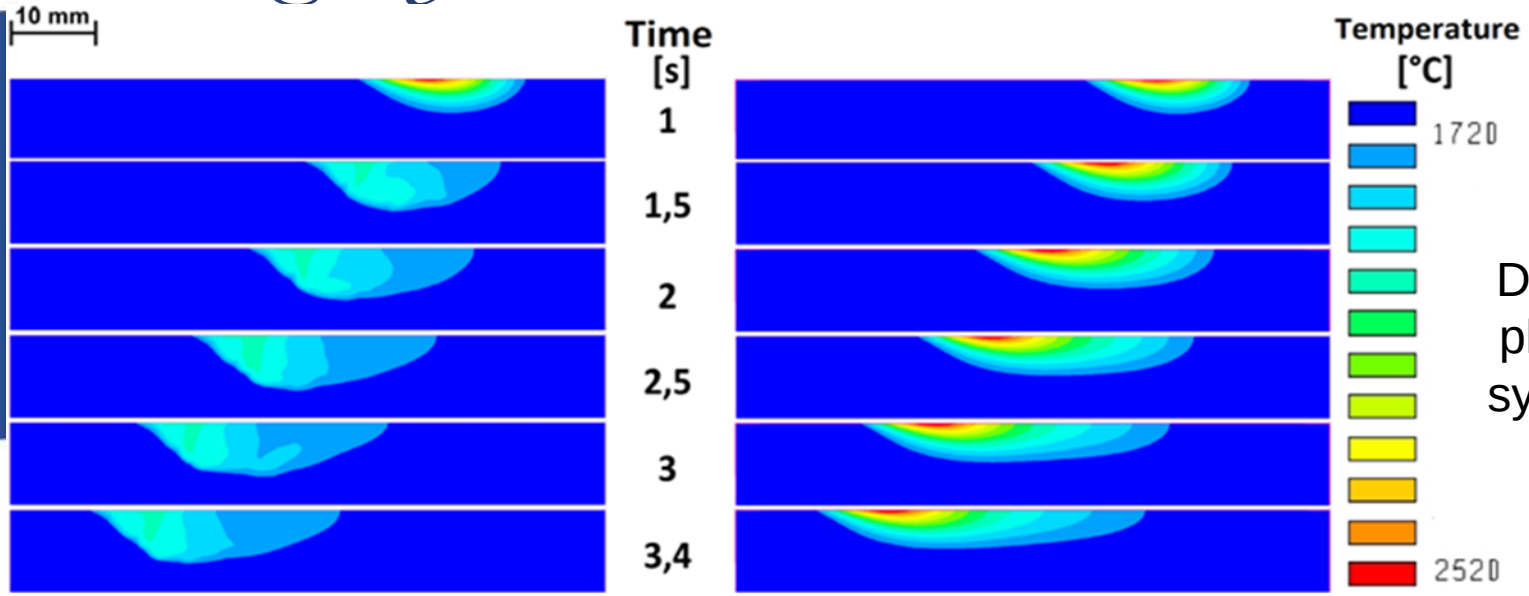
Travail réalisé dans le cadre du projet ANR SISHYFE

Soudage hybride Laser-Arc

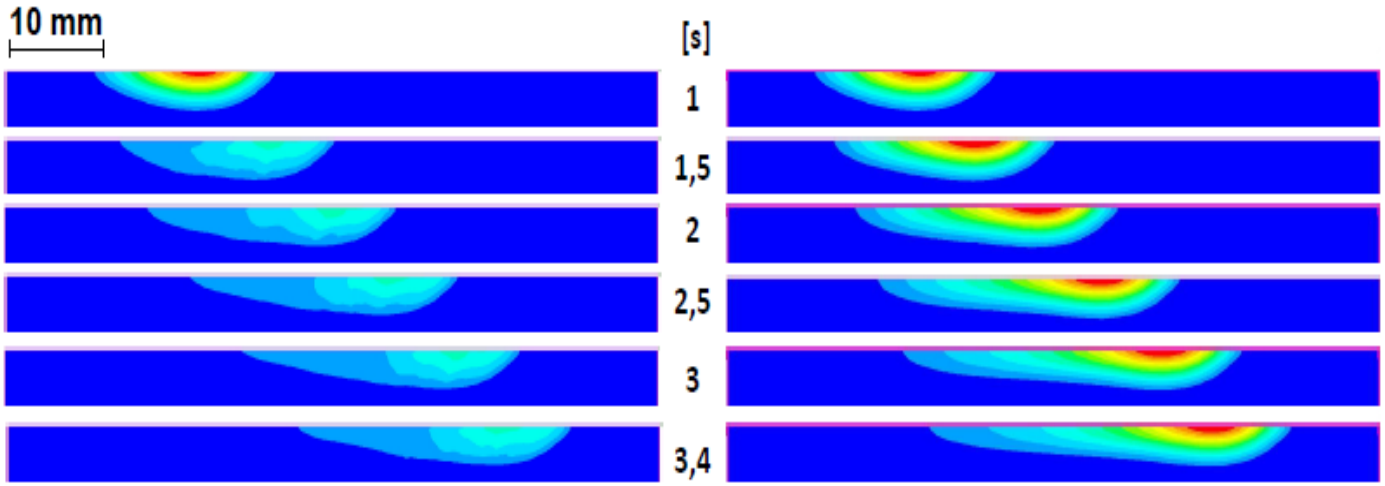




Soudage hybride Laser-Arc



Dans le plan de symétrie



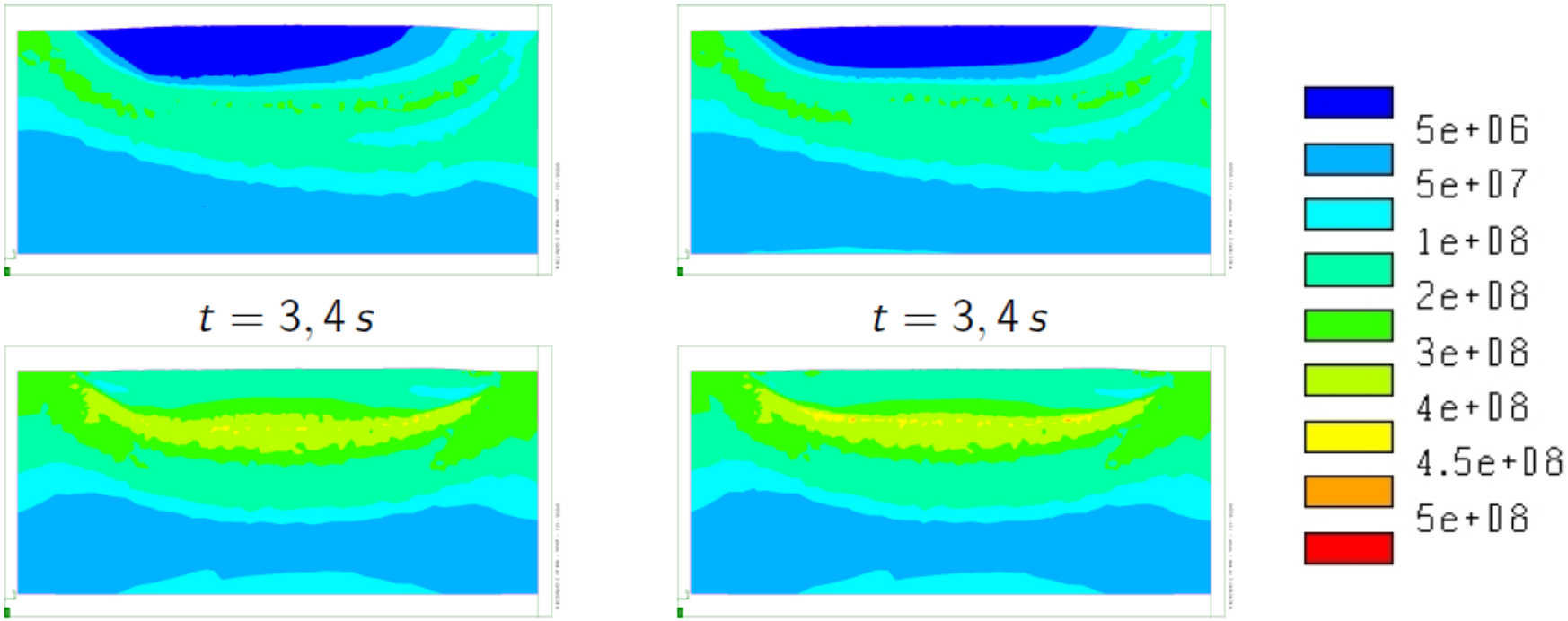
Sur la surface supérieure

Influence des écoulements sur le champ de température

Soudage hybride Laser-Arc

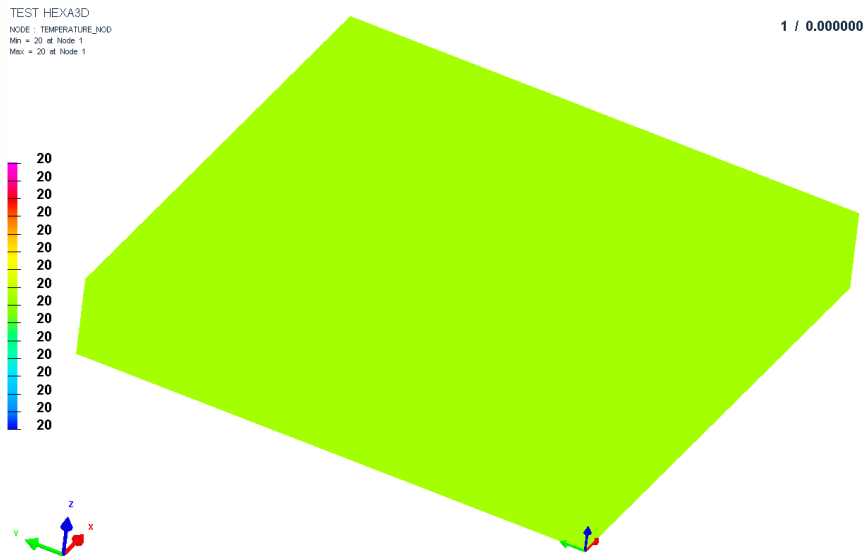
Avec écoulements

Sans écoulements

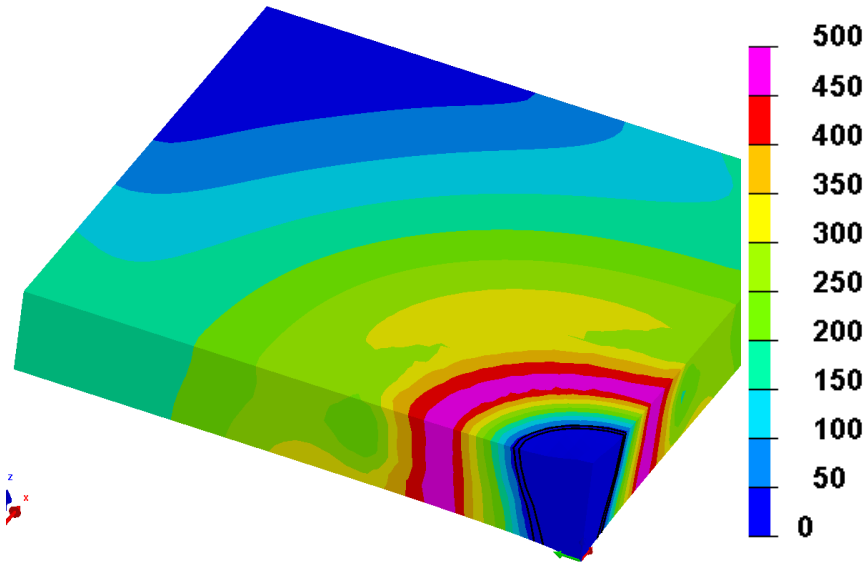


Influence des écoulements sur les distributions de contrainte équivalente de von Mises

Approche simplifiée



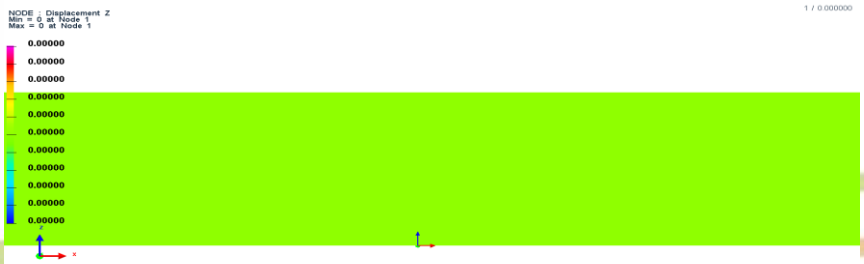
Distributions de Température au cours du temps

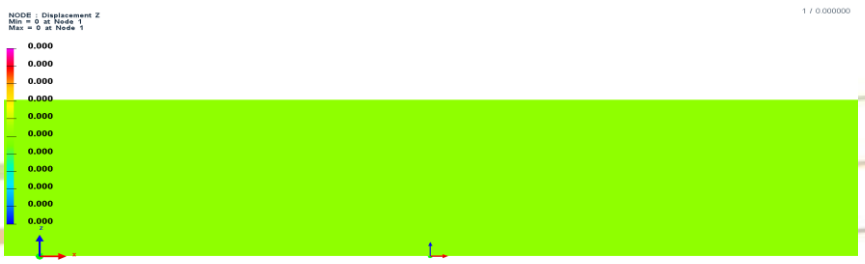


Contrainte de von Mises en fin de chauffage

$\gamma = 0$

$\gamma = 0.002$ Nmm-1





Effet de la tension de surface sur la forme du bain fondu

Travail réalisé dans le cadre du projet FUI MUSICAS

Conclusion

- *Nouvelles approches numériques*
  - *Modèle de comportement dans la zone pâteuse assurant une transition continue entre les comportements solide et liquide*
  - *Modélisation numérique simple et efficace des effets de tension de surface (effort normal et Marangoni)*
  - *Développement et mise en œuvre d'un élément fini tétraédrique adapté aux calculs élasto-(visco)plastiques*
- *Couplage écoulements dans le bain fondu – déformations du solide*
  - *Convergence des calculs très délicate*
  - *Implémentation d'un nouvel algorithme découplant les calculs fluide et solide à chaque pas de temps*
    - *En cours*
  - *Intérêt pour certains procédés (FSSW, Fabrication additive…) sans doute limité pour d'autres*
  - *Mise en œuvre d'approches simplifiées*