

SIMULATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR LORS DU SOUDAGE
FSW D'UN JOINT HETEROGENE AA2XXX/AA7XXX

H. ROBE, C. CLAUDIN, J.-M. BERGHEAU, E. FEULVARCH



Contexte industriel

- Justification des matériaux

Alliages d'aluminium à durcissement structural :

Série 2xxx et série 7xxx → très hautes performances

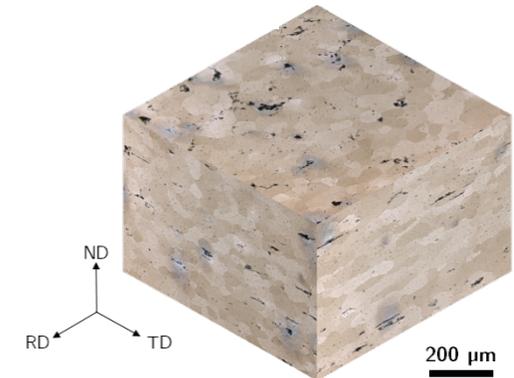
Difficulté de mise en forme / assemblage

Gros enjeux pour l'assemblage hétérogène 2xxx / 7xxx

- **AA2139-T8** Al-Cu-Mg-Ag

T8 : trempe, écrouissage, vieillissement artificiel

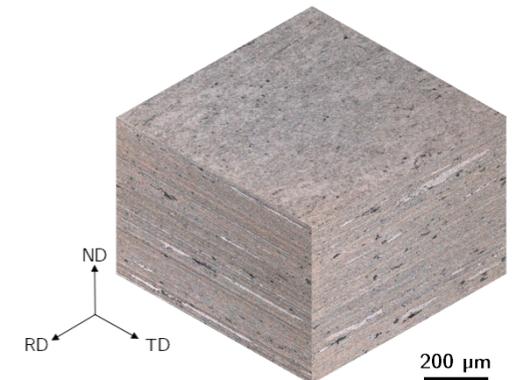
Résistance mécanique
Fuselage, intrados, résistance dynamique (blast)
Stabilité thermique
Résistance à la corrosion



- **AA7020-T651** Al-Zn-Mg

T651 : trempe, vieillissement artificiel, détensionnement par traction

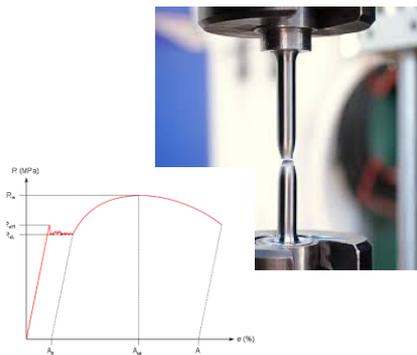
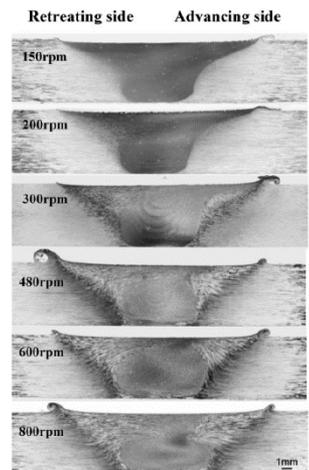
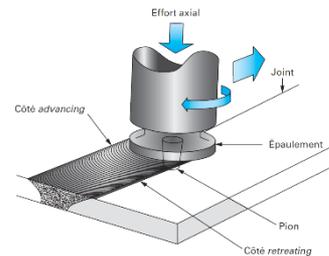
Résistance à la corrosion
Mécano-soudure
Pièces de structure
Sensibilité au survenu



État de l'art procédé FSW

Beaucoup de développements récents : laboratoires + industrie
Process mature en configuration homogène sur alliages d'aluminium

Enjeux encore nombreux sur la maîtrise des assemblages hétérogènes



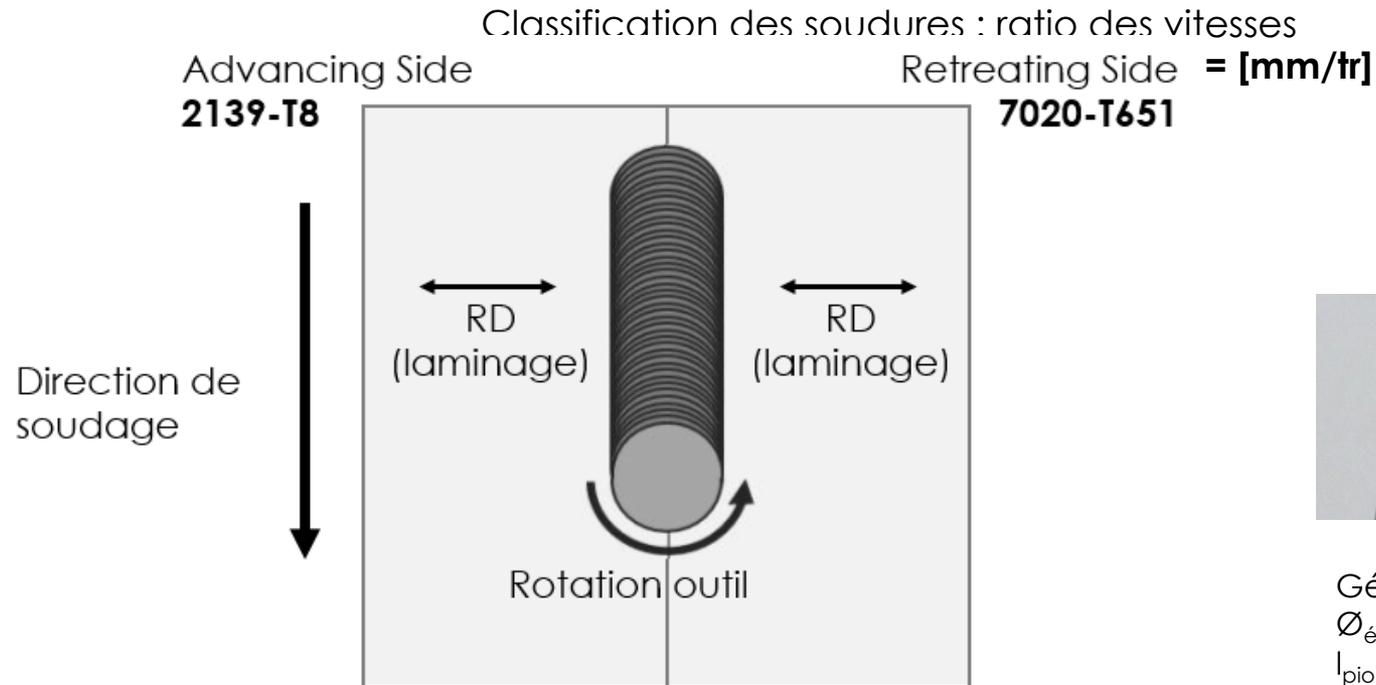
Étude expérimentale

- Soudage

Soudage bout à bout – Configuration hétérogène

Matériaux : épaisseur 5 mm

2139-T8 : Advancing Side (AS) / **7020-T651** : Retreating Side (RS)

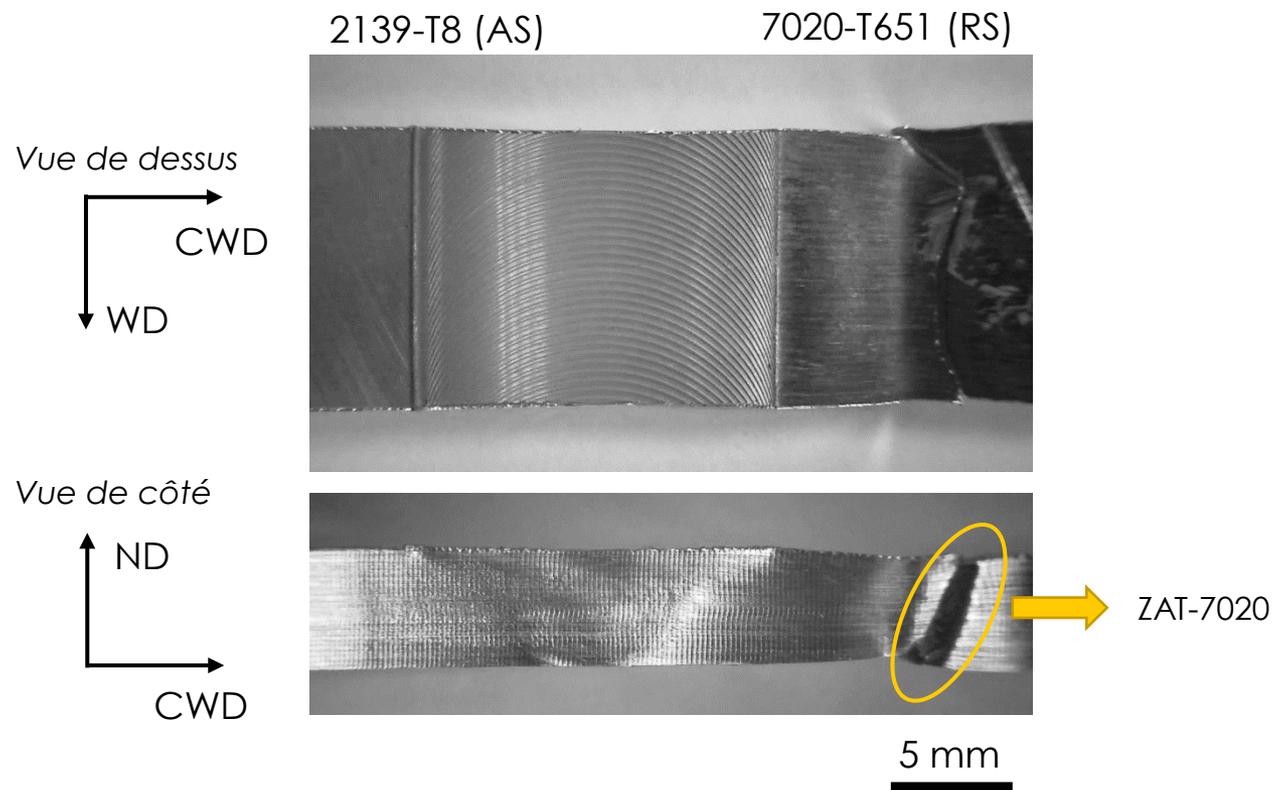


Outil de soudage
Géométrie Triflat
 $\varnothing_{\text{épaulement}} = 15\text{mm}$
 $l_{\text{pion}} = 5\text{mm}$

Caractérisation mécanique

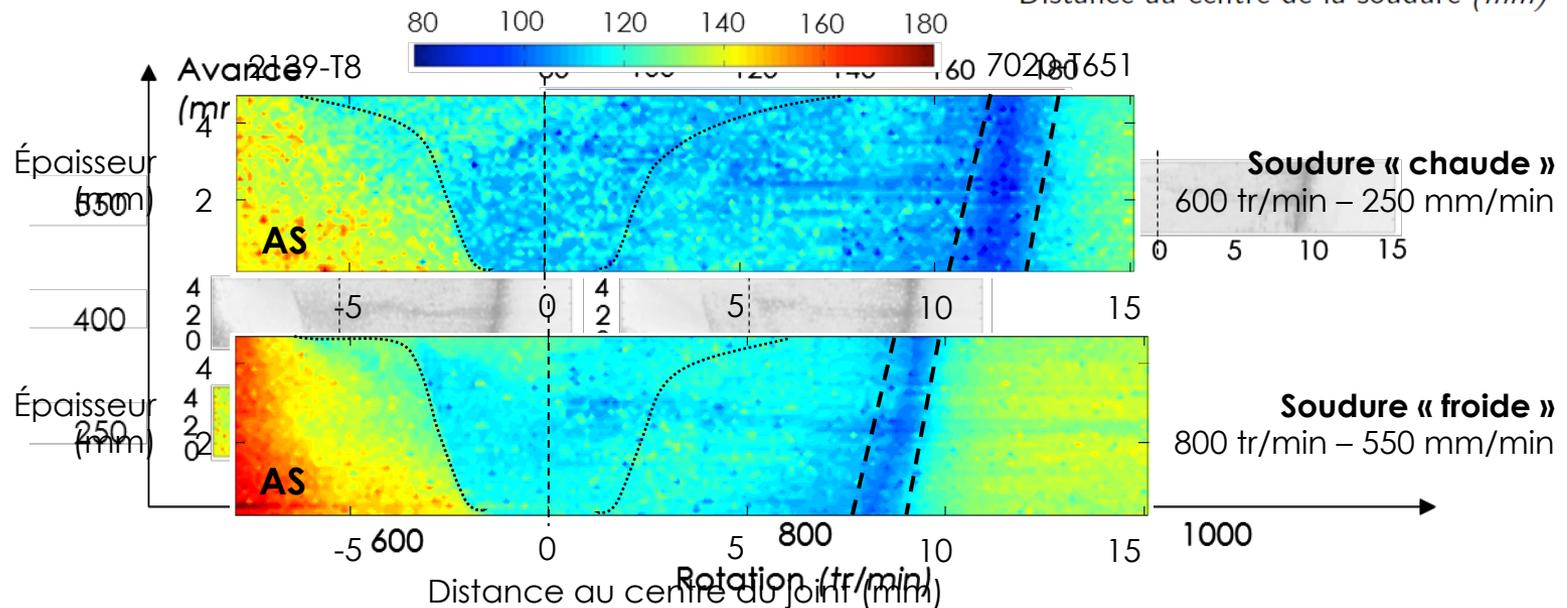
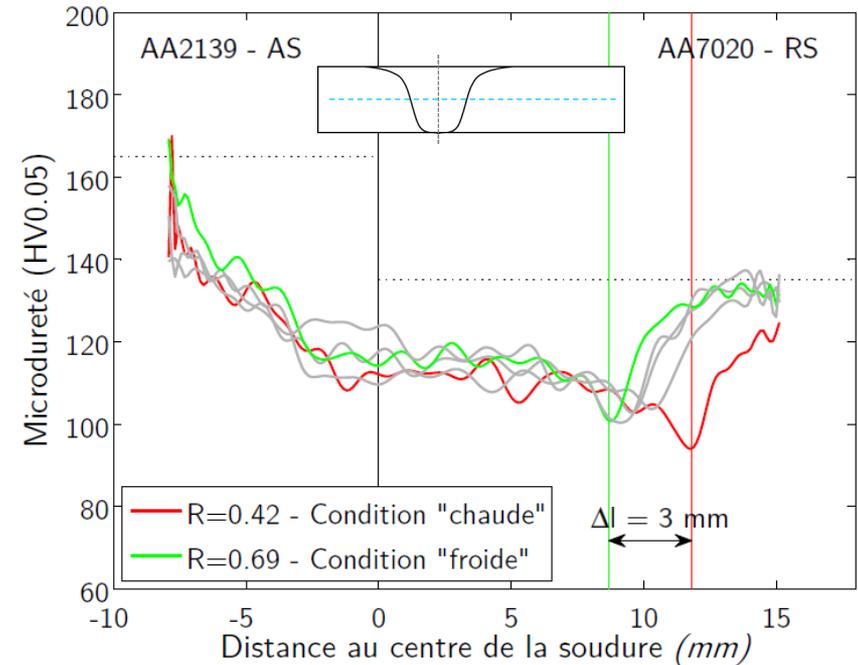
- Essais macroscopiques : zones de rupture
Rupture en ZAT côté 7020

Conditions : 600 tr/min – 250 mm/min (soudure « chaude »)



Étude expérimentale

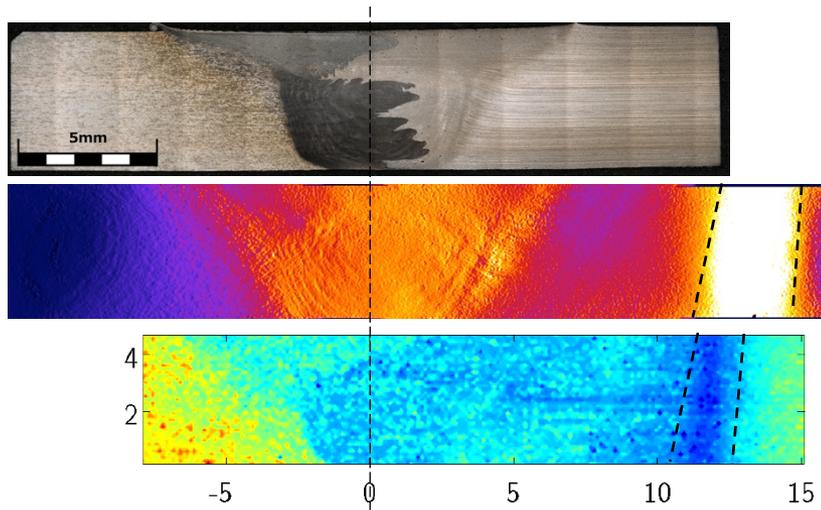
- Dureté
- Multi-filiations microdureté Vickers HV0,05 sur coupe transverse des joints



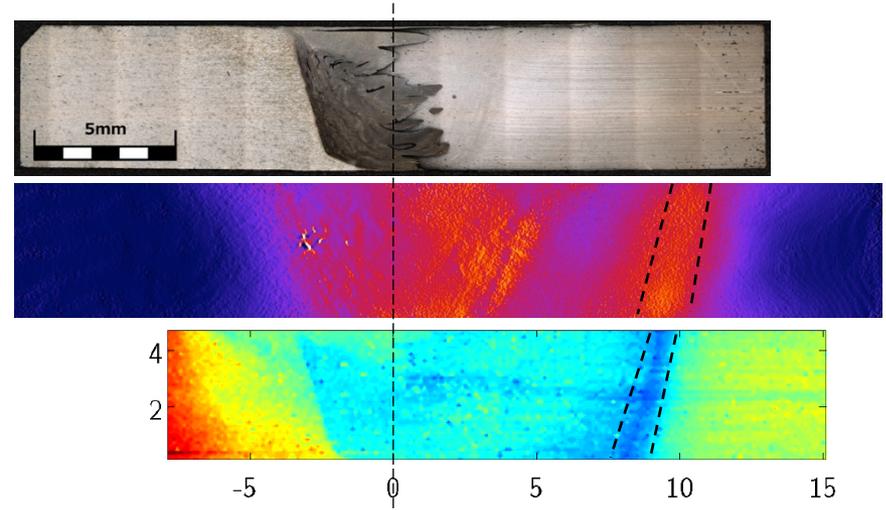
Étude expérimentale

- Caractérisation mécanique : *Optical High Resolution Digital Image Correlation*

Conditions : 600 tr/min – 250 mm/min
(soudure « chaude »)



Conditions : 800 tr/min – 550 mm/min
(soudure « froide »)



Soudure « froide » :

- Minimise la largeur de la zone adoucie
- Minimise la striction associée
- Augmente les performances mécaniques

Simulation numérique

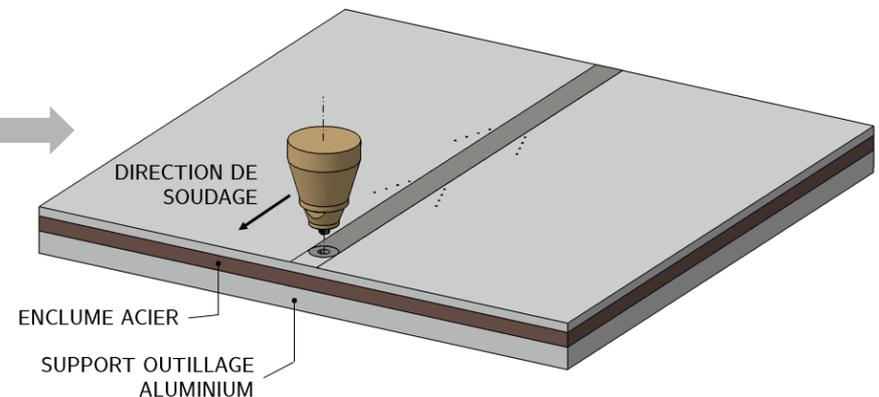
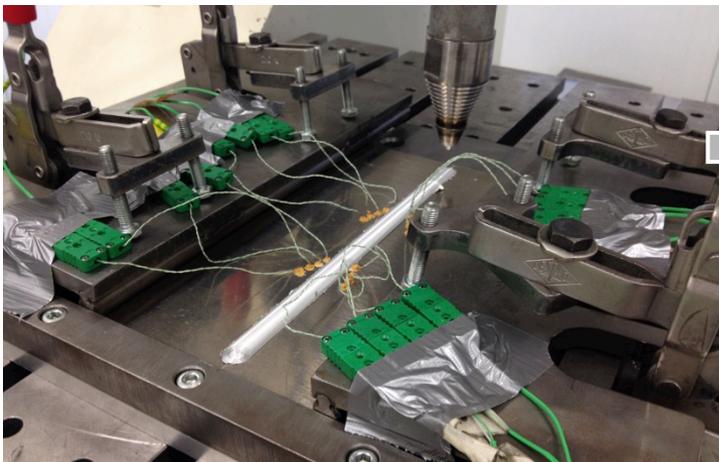
- Objectifs :

Contraintes industrielles

- Dupliquer configuration réelle : outil, bridage...
- Paramètres de soudage réels et industriels
- Temps de calcul de quelques heures → calcul paramétrique
- Calibration réduite

Simulation en **homogène** uniquement

Avoir un modèle robuste et prédictif → Diminution des essais expérimentaux

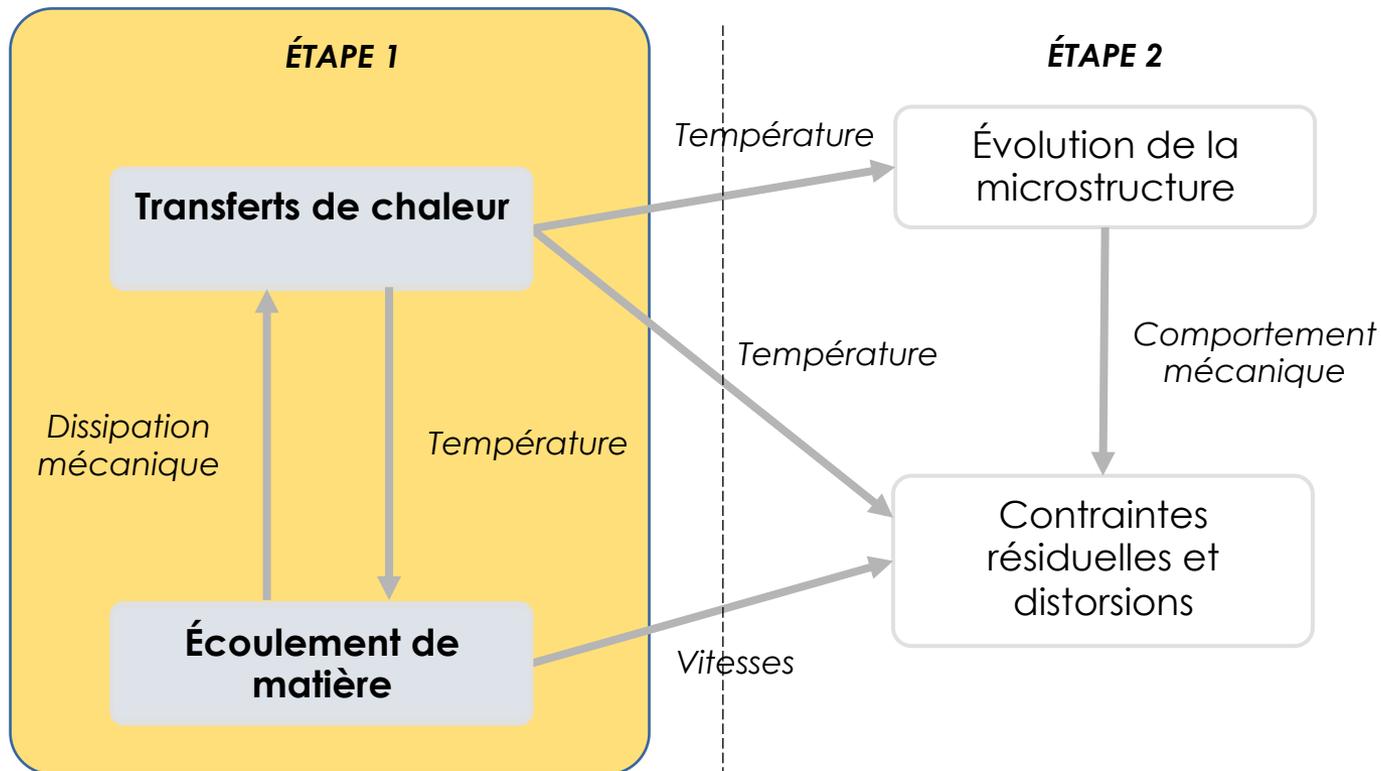


État de l'art simulation procédé FSW

Séparation en 2 étapes pour simulation complète :

1 – Phase de soudage

2 – Effets résiduels



Modélisation numérique

Modélisation 3D – Calcul thermique et mécanique simultané

Modélisation fluide visqueux incompressible – Loi de comportement viscoplastique

- Mécanique

$$\mathbf{div}(\boldsymbol{\sigma}) = \mathbf{div}(2\mu\mathbf{D} - p\mathbf{I}) = \mathbf{0}$$

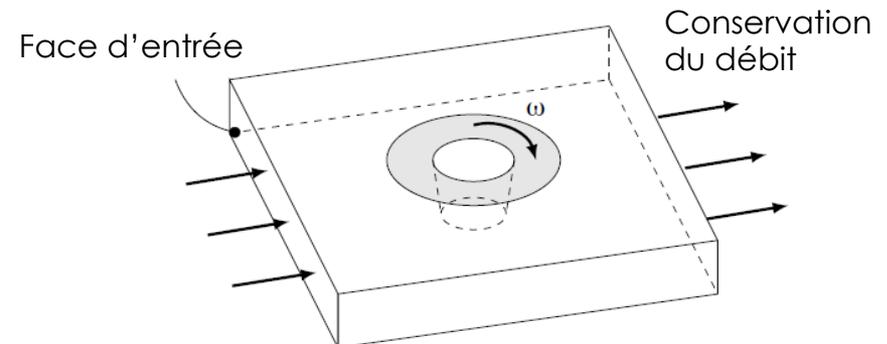
- Thermique

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v}_{cv} \cdot \mathbf{grad}\theta \right) = \mathbf{div}(\lambda \mathbf{grad}\theta) + \alpha_{dissipation} \mathbf{S} : \mathbf{D}$$

Loi de comportement : Norton-Hoff

où K et m sont des paramètres thermo-dépendants

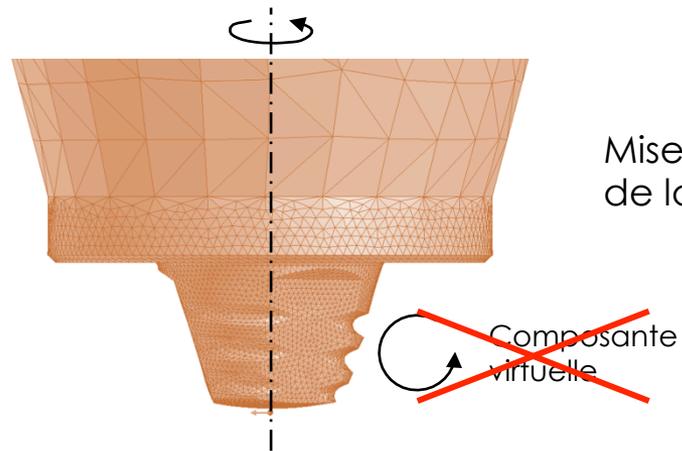
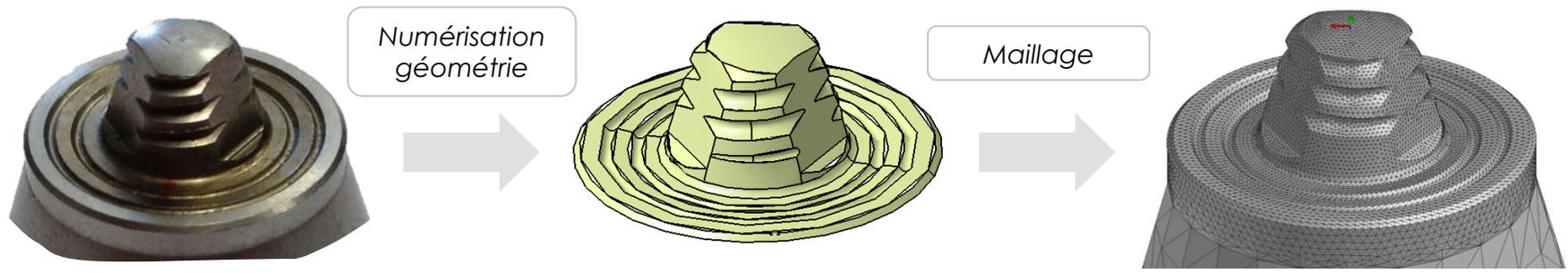
$$\mu = K(\sqrt{3}D_{eq})^{m-1}$$



Construction modèle numérique

- Géométrie d'outil

Outil Triflat® à géométrie complexe utilisé expérimentalement

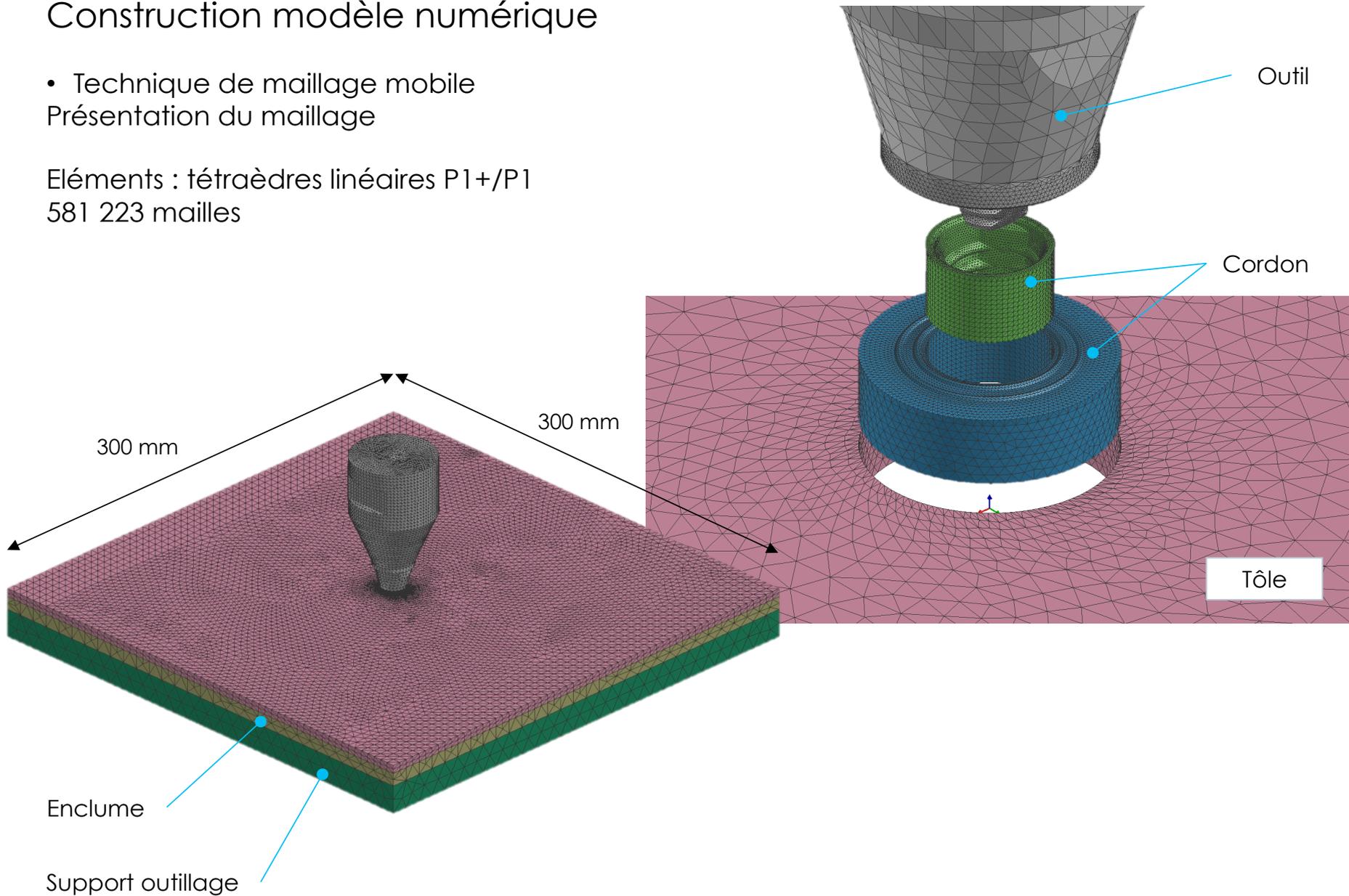


Mise en avant de l'influence de la géométrie d'outil?

Construction modèle numérique

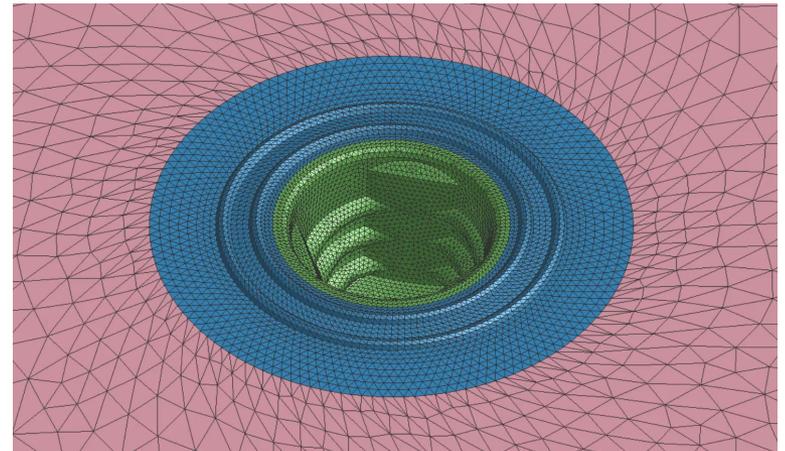
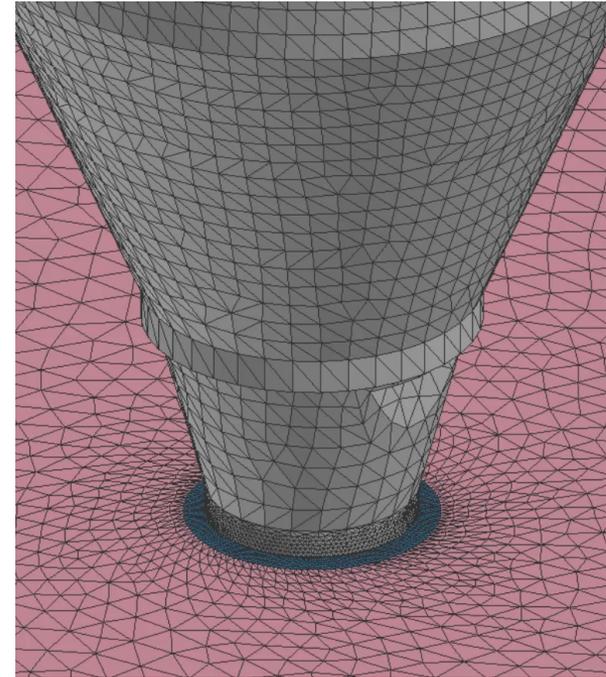
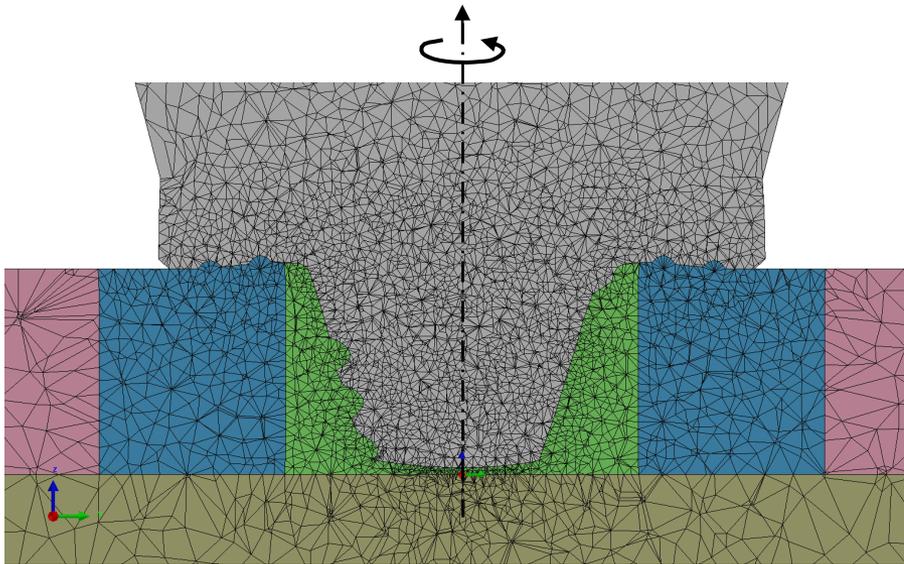
- Technique de maillage mobile
- Présentation du maillage

Éléments : tétraèdres linéaires P1+/P1
581 223 mailles



Construction modèle numérique

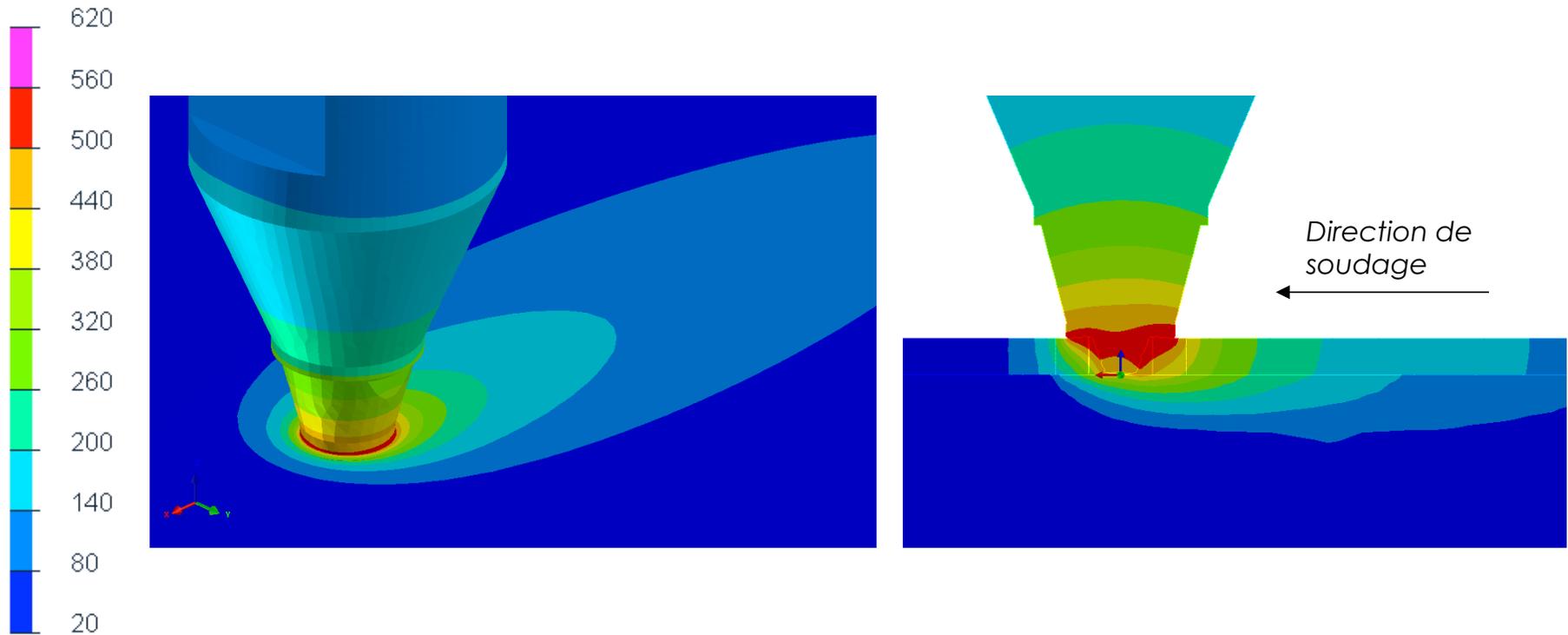
- Technique de maillage mobile
Décomposition des différentes parties du modèle



Construction modèle numérique

- Résultats de calcul

Conditions : 800 tr/min – 550 mm/min



Réduction des temps de calcul

Validité globale de l'approche?

Erreur ϵ_{quad} dans tout le modèle

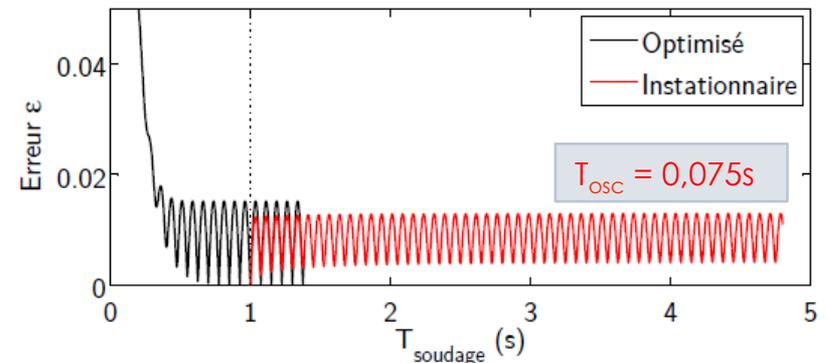
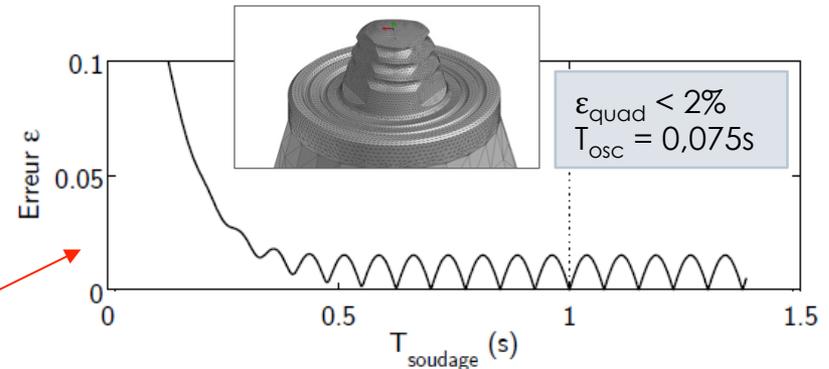
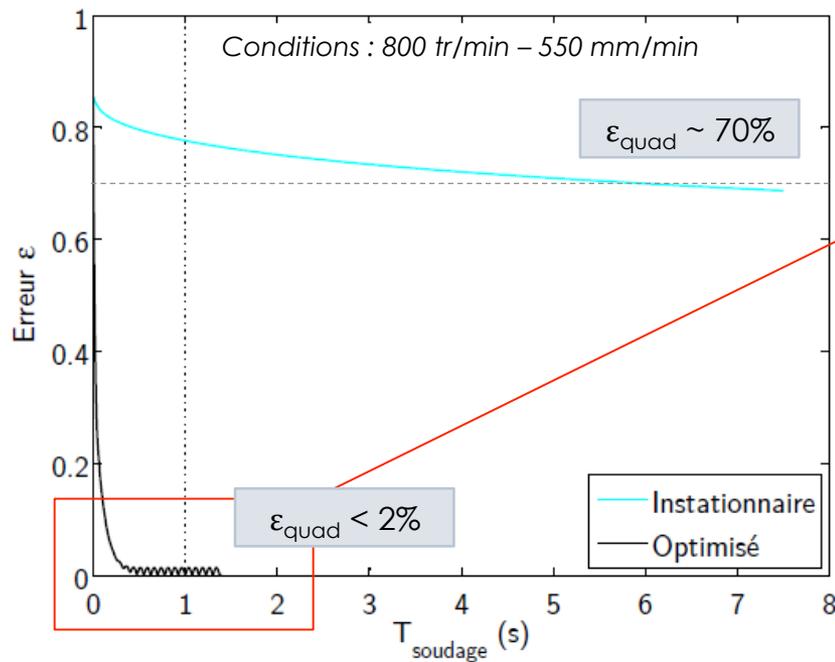
Comparaison à température de référence θ_{ref} à $t=1s$

$$\epsilon_{quad}(t) = \frac{\sqrt{\int_V (\theta(t) - \theta_{ref})^2 dV}}{\sqrt{\int_V \theta_{ref}^2 dV}}$$

Convergence des 2 modèles vers la même température?

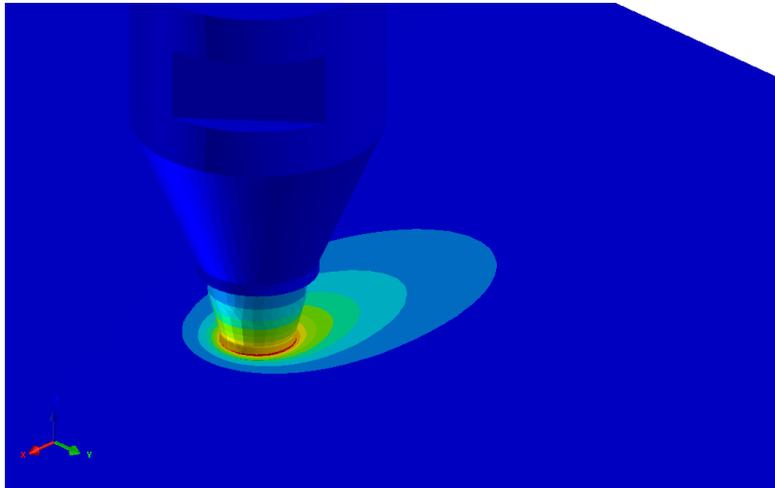
Reprise de calcul : Optimisé \rightarrow Instationnaire

0,5s de soudage simulé pour atteindre l'état stationnaire

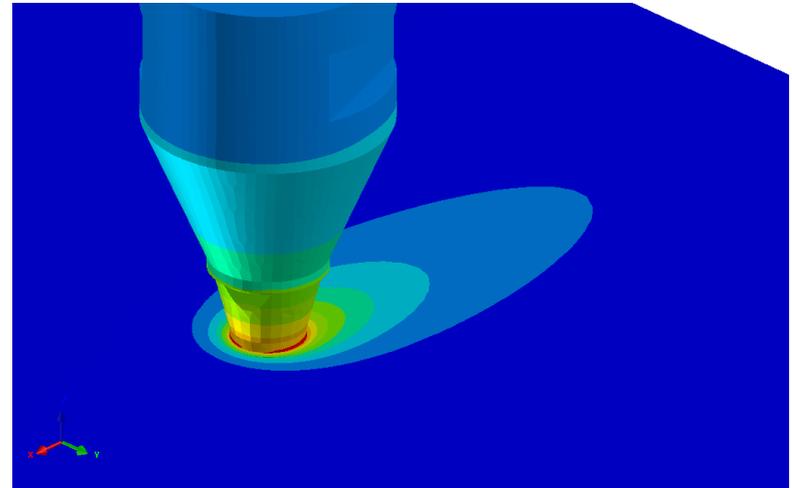


Réduction des temps de calcul

- Erreur entre approche locale et globale



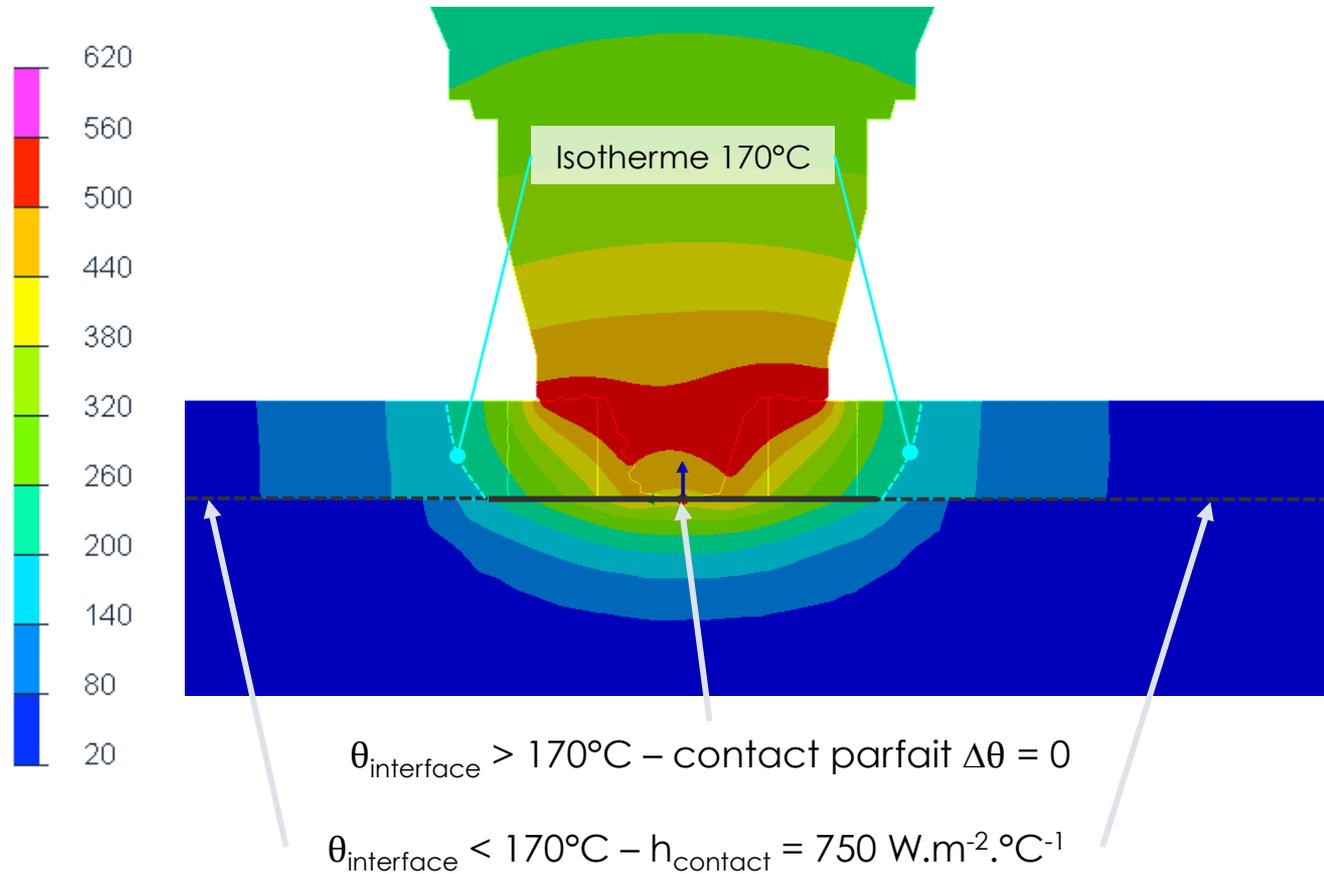
Modèle instationnaire



Modèle optimisé

Corrélation résultats expérimentaux-numériques

Développement d'une condition de contact tôle / enclume spécifique

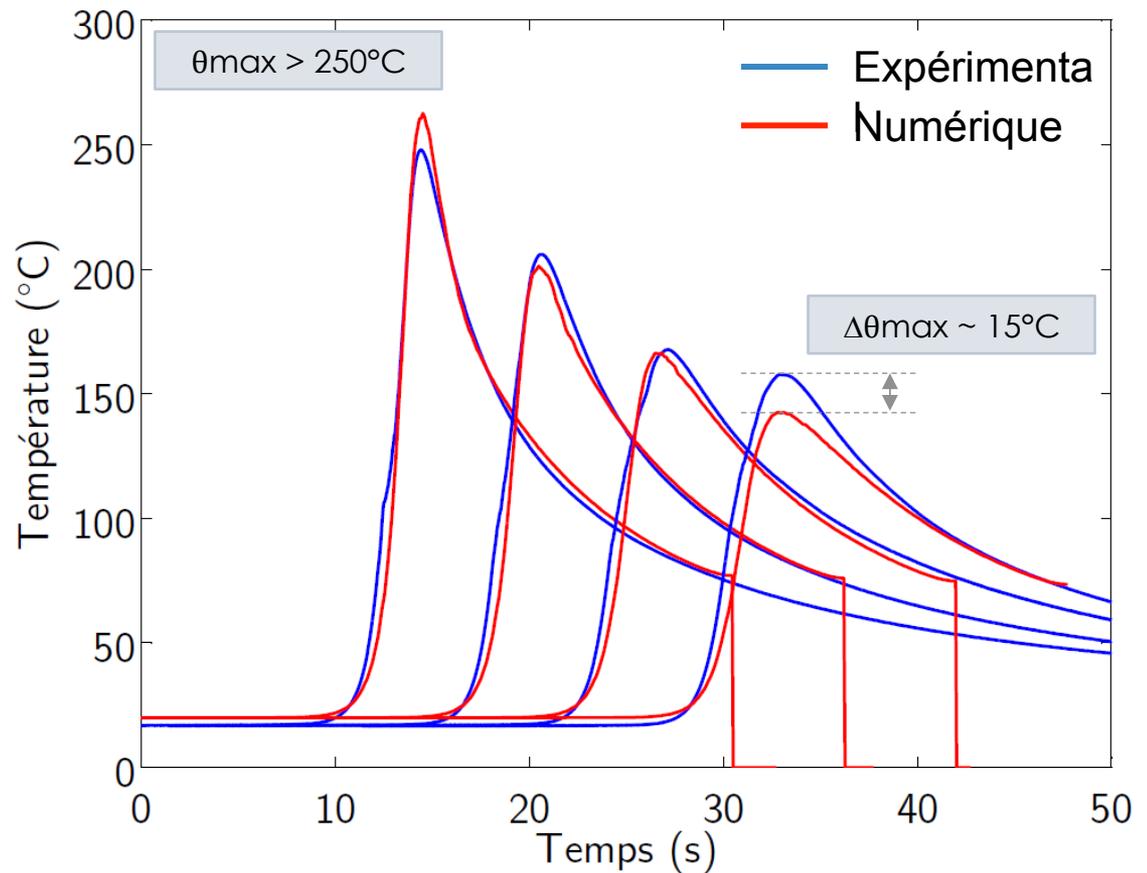
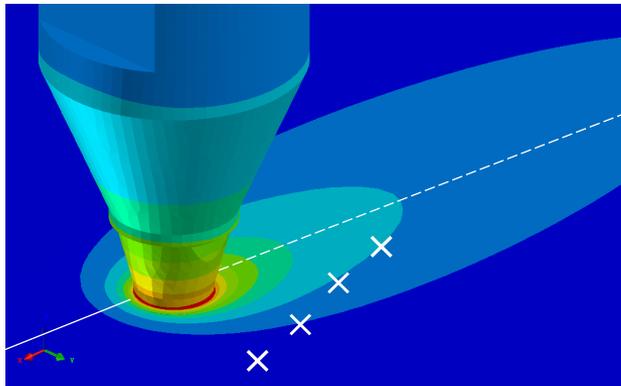
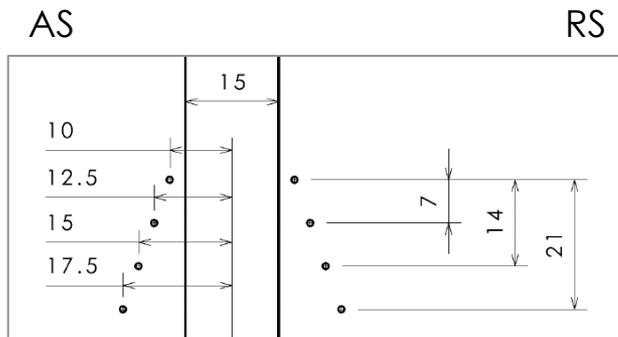


Corrélation résultats expérimentaux-numériques

Matériau : **7020-T651 homogène**

Conditions : 800 tr/min – 550 mm/min (soudure « froide »)

Comparaison entre TC expérimentaux et TC « numériques » en ZAT

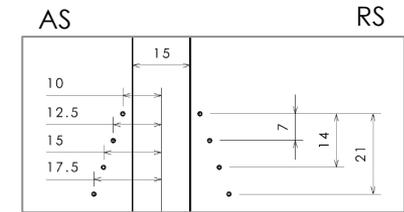


Robustesse du modèle

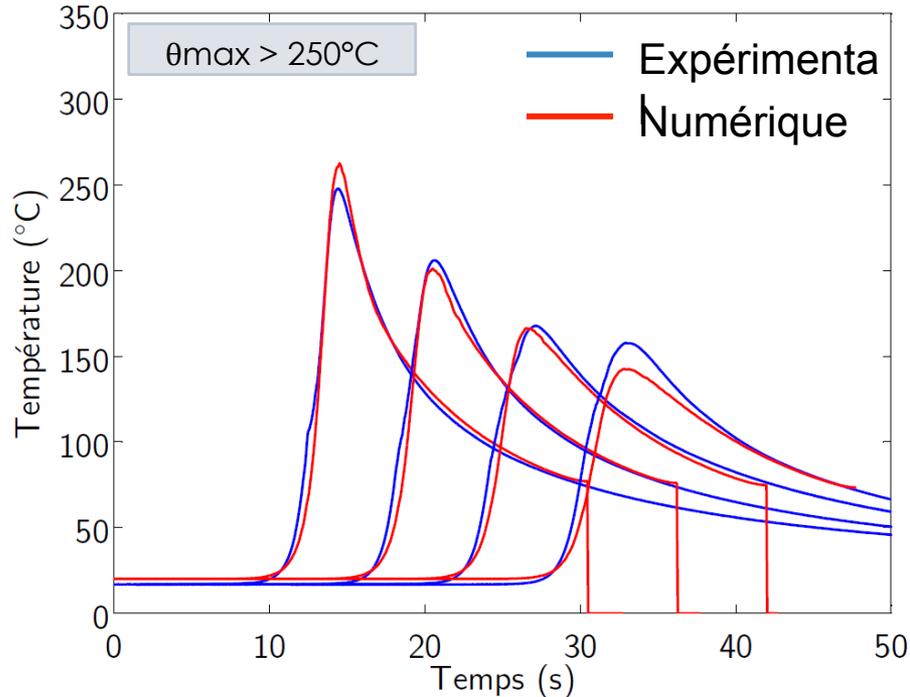
Matériau : **7020-T651 homogène**

Conditions : 600 tr/min – 250 mm/min (soudure « chaude »)

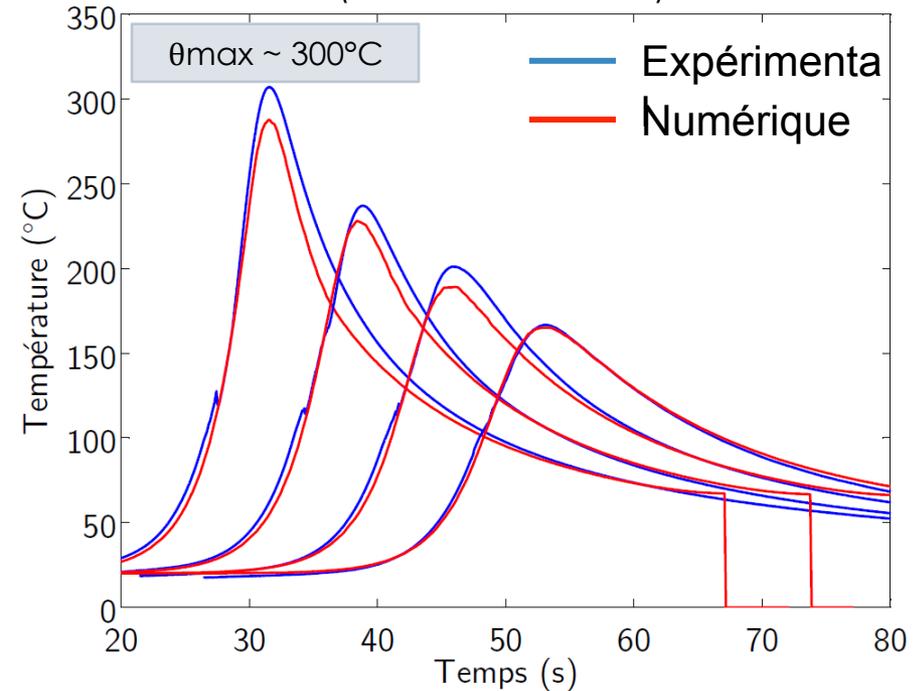
Paramètres de calcul identiques



Conditions : 800 tr/min – 550 mm/min
(soudure « froide »)



Conditions : 600 tr/min – 250 mm/min
(soudure « chaude »)



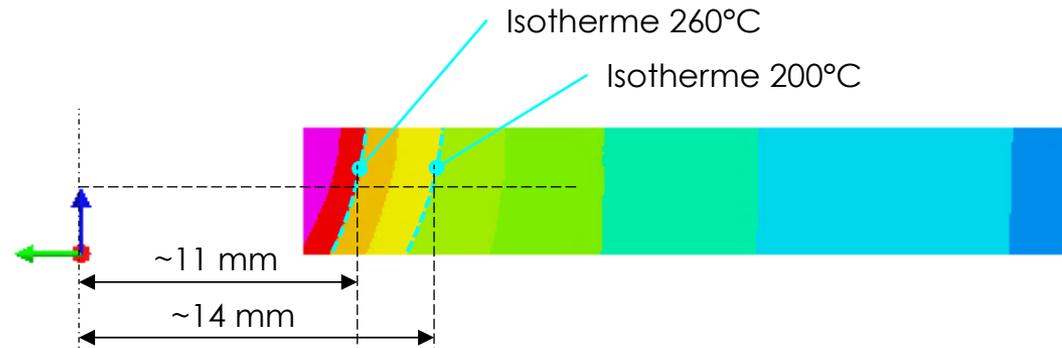
Simulation numérique

- Aspect prédictif du modèle

Corrélation par approche inverse

Conditions : 600 tr/min – 250 mm/min (soudure « chaude »)

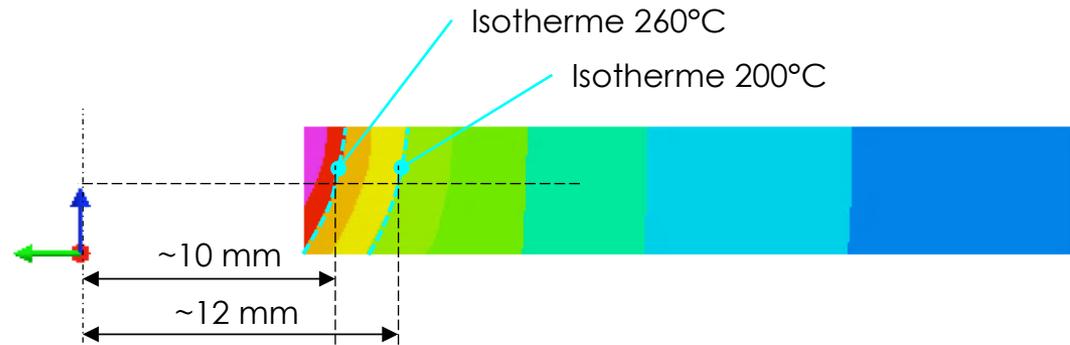
Simulation numérique



Simulation numérique

- Aspect prédictif du modèle
Corrélation par approche inverse
Conditions : 800 tr/min – 550 mm/min (soudure « froide »)

Simulation numérique



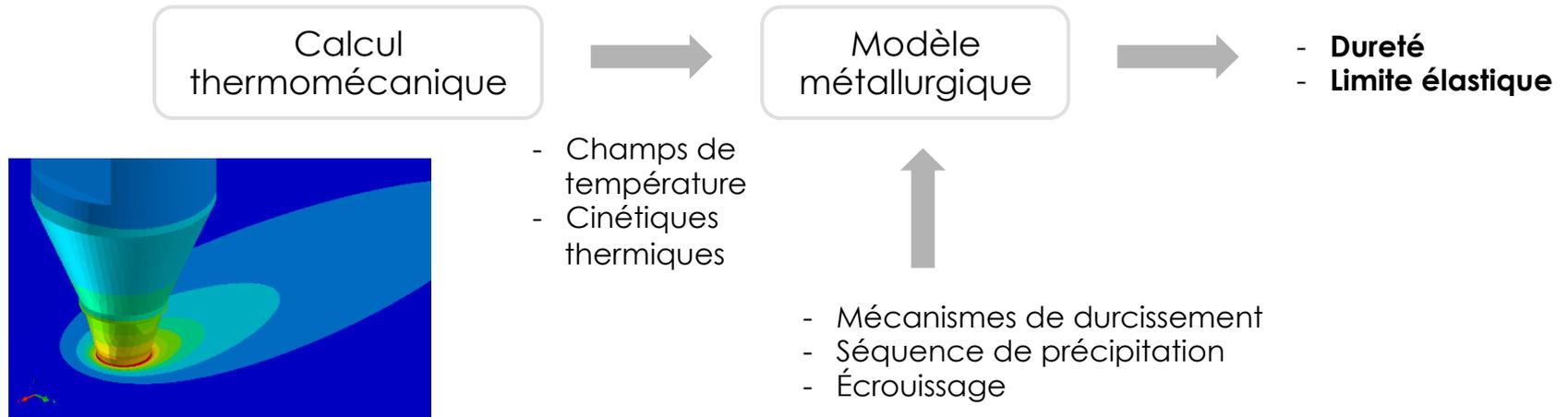


CONCLUSION GÉNÉRALE

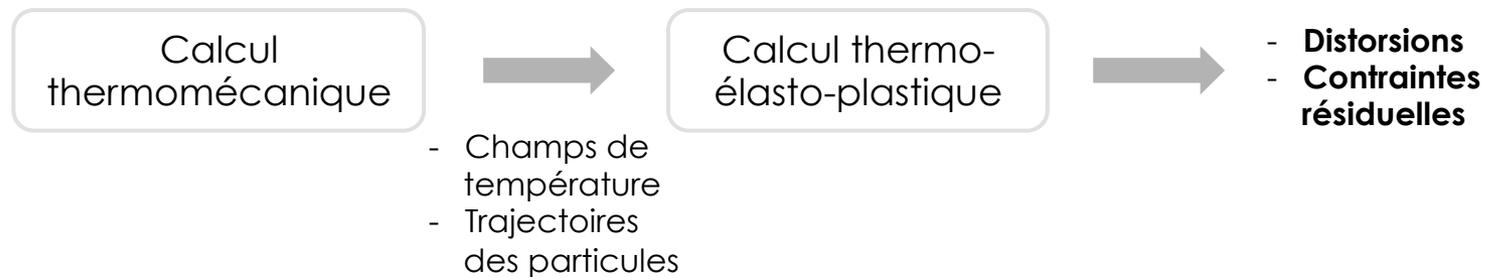
Perspectives

Simulation chaînée

1/ Modèle métallurgique



2/ Modèle de prédiction des distorsions et contraintes résiduelles



Merci de votre
attention

