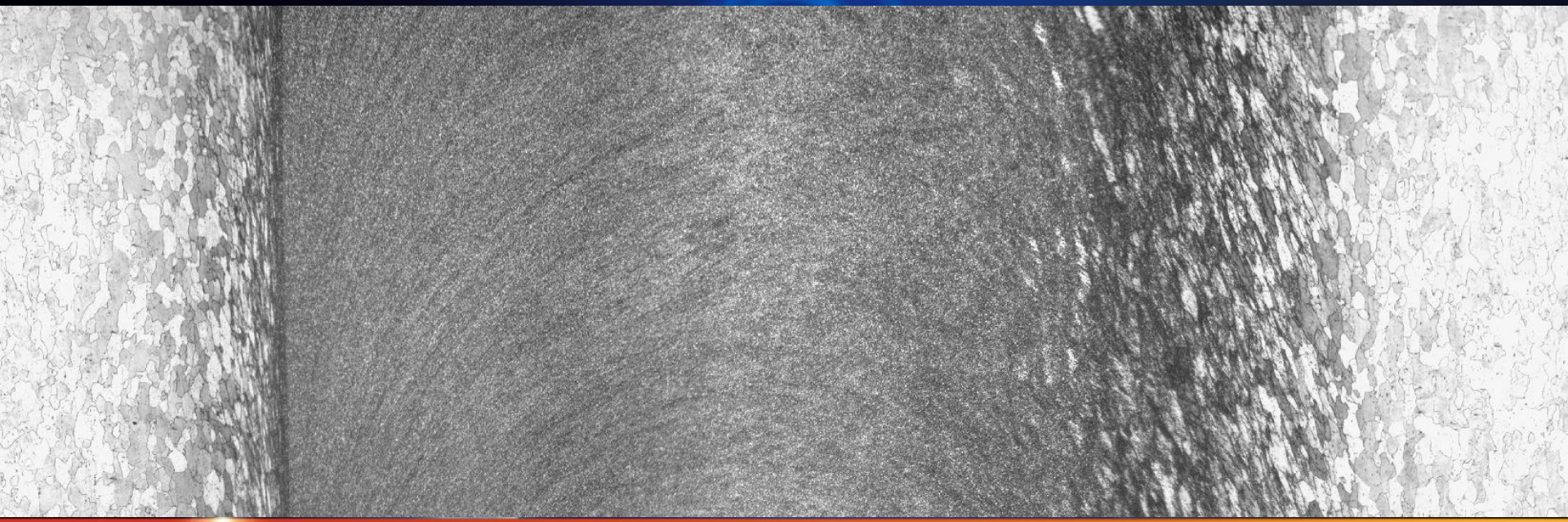
Simulation du FSW pour l'application à l'industrie aéronautique

Dominique DELOISON[1], Christophe DESRAYAUD[2]

[1] EADS Innovation Works, Suresnes

[2] Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint- Etienne



EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Contenu

→ Quelques rappels sur le FSW

→ Objectifs de la simulation

→ Collaboration EADS/ENSMSE

→ Simulations mises en œuvre :

- Procédé (interaction outil/matière)
- Soudage (distorsions/contraintes résiduelles/métallurgie)

→ Conclusion :

- Bilan de 10 années de simulation
- Collaboration EADS/ENSMSE

© EADS 2011

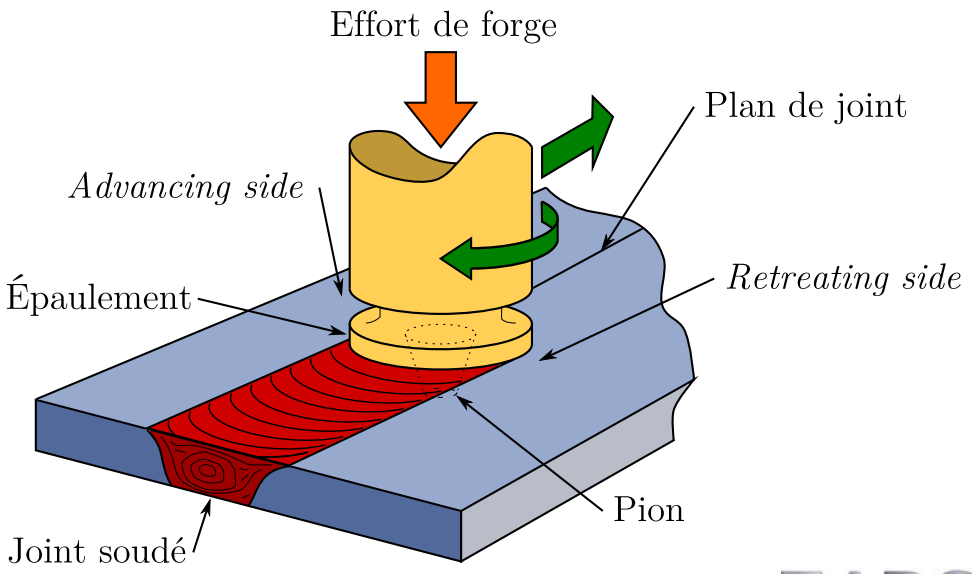
EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Rappels sur le FSW

- Procédé de soudage en phase solide
- Intérêt initial pour l'aéronautique : remplacement du rivetage sur alliages d'aluminium (2XXX - 7XXX) sujets aux "brûlures" en procédés de fusion
- Consiste à déplacer un outil rotatif non consommable, équipé d'un pion et d'un épaulement, le long du joint à souder
  - Génération de chaleur par frottement sous l'épaulement
  - Malaxage du matériau rendu pâteux sous l'effet du pion
  - Consolidation du joint soudé par application d'un effort de forge
- Paramètres clés du procédé
  - Vitesse de rotation Vr
  - Vitesse d'avance Va
  - Effort de forge F_f



© EADS 2011

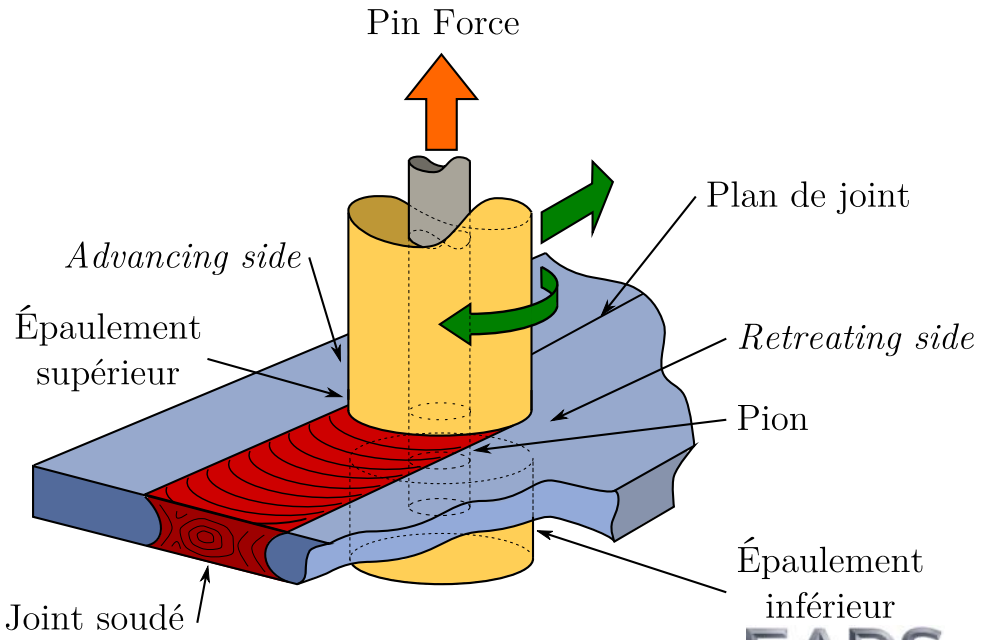
EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Procédé FSW avec Bobbin Tool

- Evolution du procédé conventionnel, reposant sur l'utilisation d'un outil de soudage avancé de type bobine
  - Epaulement supérieur alesé
  - Epaulement inférieur fixé au pion
- Avantages du Bobbin Tool
  - Efforts de soudage restent dans la tête, pas de barre support, flexibilité accrue
  - Soudure traversante et symmétrique
  - Pas de risque de défaut de racine
- Paramètres clés :
  - Vr, Va, effort de soudage F_p



© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Attentes exprimées il y a 10 ans vis-à-vis de la simulation

- Compréhension du procédé
- Détermination des paramètres de soudage:
  – Vitesse de rotation, Vitesse d'avance, Efforts à appliquer

Simulation du procédé

- Optimisation des géométries d'outil
  – Diamètre d'épaulement, diamètre de pion, filetage, méplats, inclinaison

- Prédiction des distorsions, des contraintes résiduelles, des propriétés post-soudage (dureté, micro-structure)

Simulation des conséquences du procédé

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

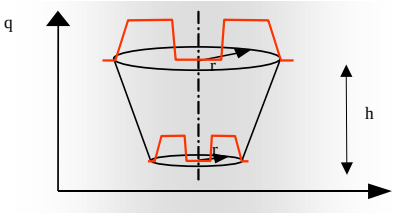
Premières simulations FSW (2002-2005)

- Directement dérivées des simulations des procédés de soudage plus conventionnels

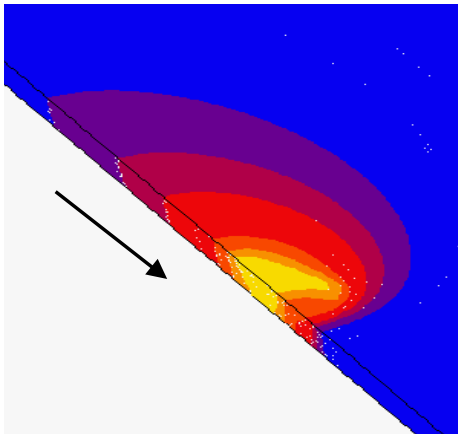
→ Source de chaleur mobile. Puissance calibrée sur les mesures de température

→ Simulations thermo-mécanique découplées

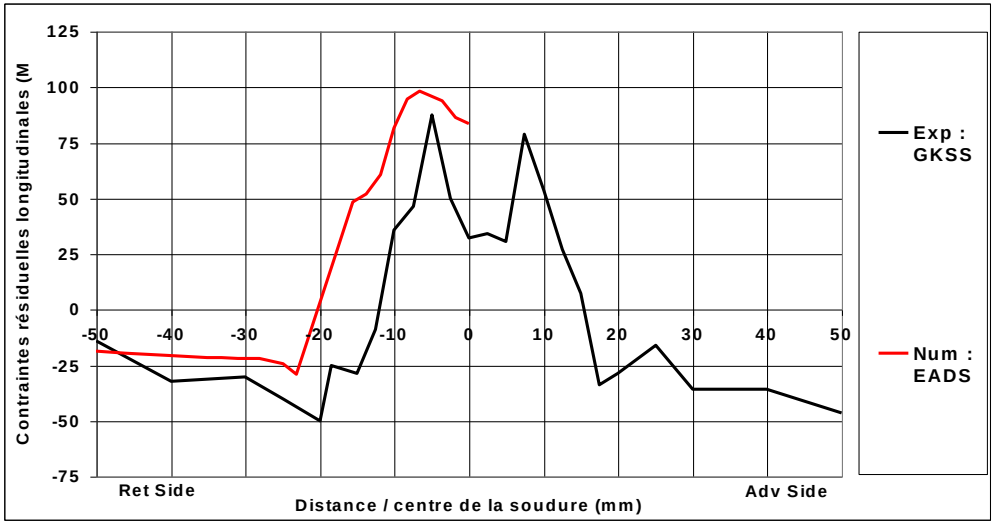
→ Ni l'outil, ni le mouvement de matière ne sont pris en compte



Heat source model



Temperature Field



Contraintes résiduelles mesurées et simulées

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

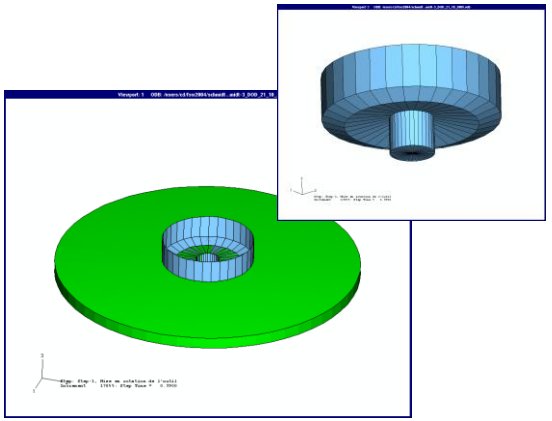
Vers une simulation « complète » du procédé

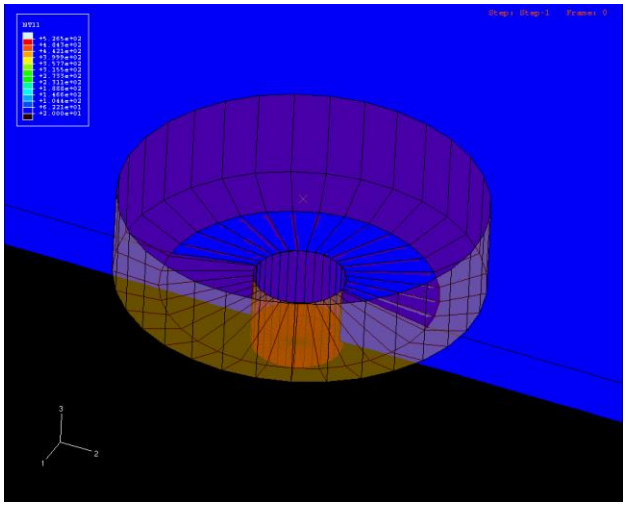
Exemple de Schmidt: 1ère simulation interaction outil/matière

H. Schmidt and J. Hattel, « A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding », Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 13 (2005) 77–93

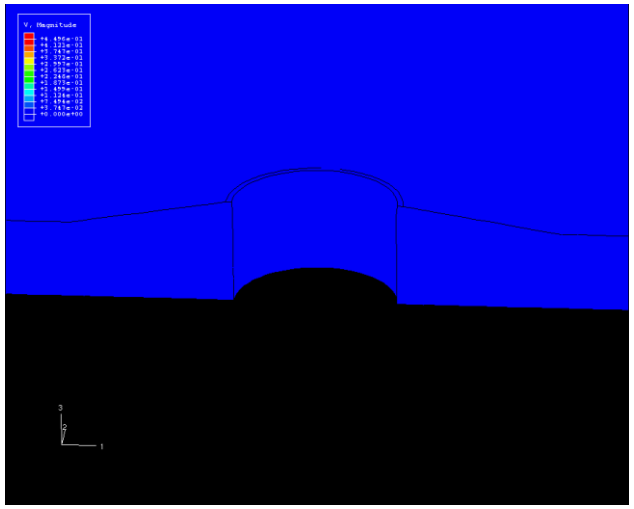
Travaux reproduits par EADS

- Outil tournant explicitement représenté
- Chaleur créée par frottement et dissipation plastique
- Formulation ALE (mouvement de matière)





Champ de température



Champ de vitesse

© EADS 2011

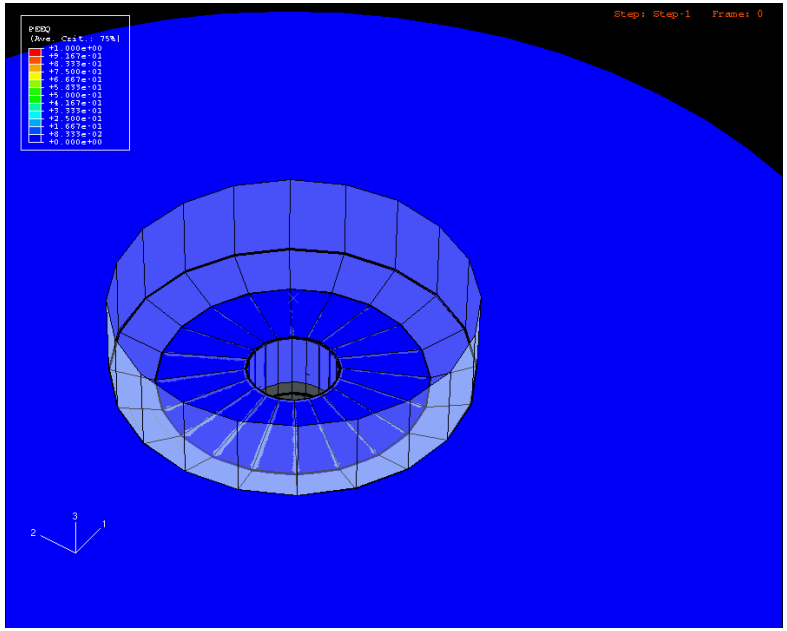
EADS

EADS INNOVATION WORKS

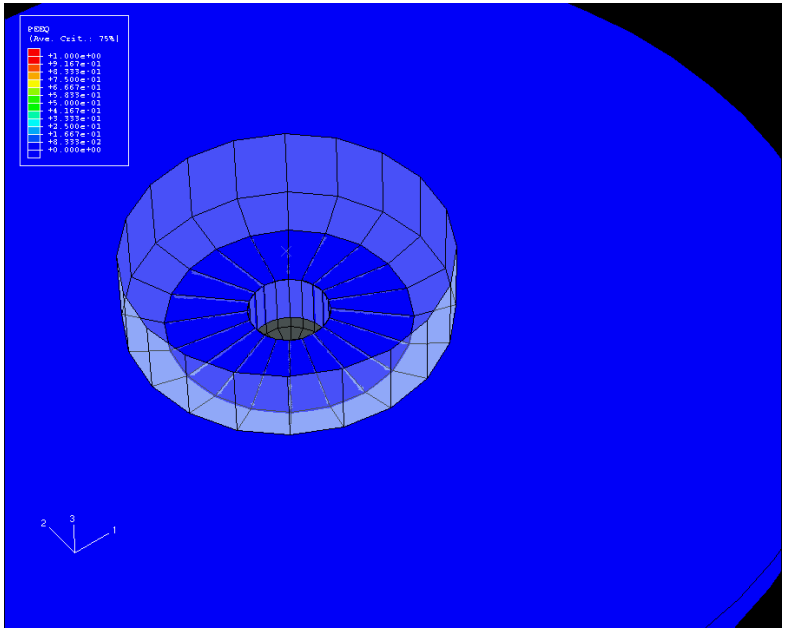
Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Vers une simulation « complète » du procédé

- Pas de condition imposée à l'interface outil/matière



Soudure réussie



Défaut de soudage

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Vers une simulation « complète » du procédé

- Inconvénients:
  - → Temps de calculs : 15 jours (1 CPU) pour 30s de soudage physique (2005)
  - → Robustesse des calculs : arrêts intempestifs
  - → Tentatives infructueuses pour étendre au Bobbin-Tool

- Un modèle équivalent a été développé au CEMEF (Fourment, Guerdoux)
  développement spécifique (ALE)

- La modélisation complète du procédé est limitée par
  * l'intensité des gradients thermiques et mécaniques
  * la complexité géométrique des outils
    (maillage du pas vis pour gestion du contact non réaliste)

- Abandon de l'approche pour passer à des modèles plus simples

© EADS 2011
EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation du procédé FSW

Collaboration EADS – ENSM Saint-Etienne

Projet ASA (RNMP) aspects métallurgiques du FSW
Recristallisation dynamique précipitation
P. Heurtier (doc), M Jones (post doc)

Projet Deepweld (Strep EC)
Modélisation thermomécaniques couplée (faiblement) aux évolutions métallurgiques

Projet « Bobbintool »
Prise en compte des configurations spécifiques de FSW « Bobbintool »
Baptiste Guerin (doc) N. Pierron (Post doc)

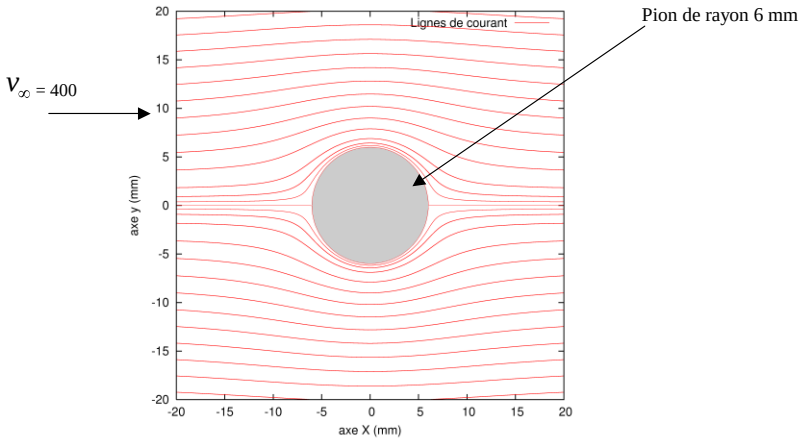
Projet Innoform (ANR RNMP)
Formage de structures soudées
Modélisation thermomécaniques pour propriétes locales des joints soudés
modélisation mécanique de formage de structures soudées
N. Pierron (post doc)

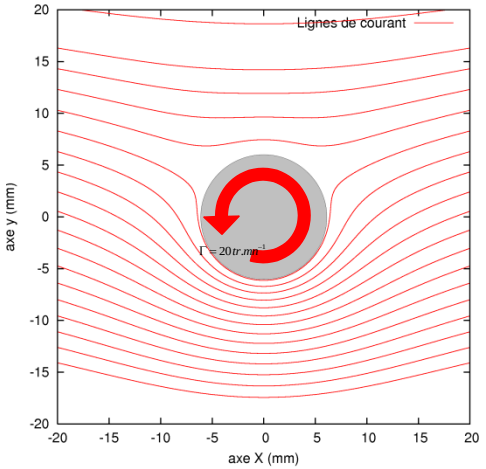
© EADS 2011
EADS

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Calcul thermofluide avec un champ de vitesse paramétrable

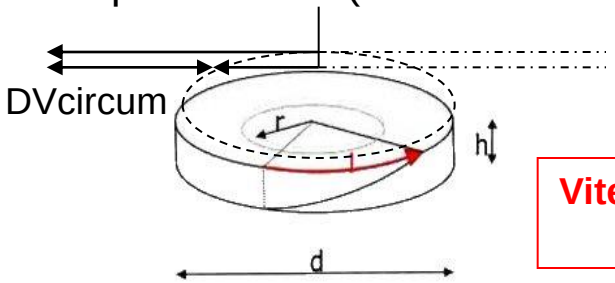
1)Champ de contournement avec prise en compte de l'entrainement circonférentiel



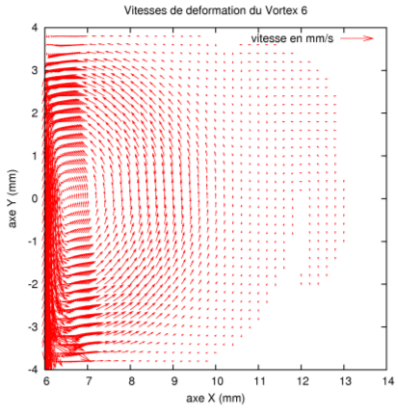


3) Vortex axysymmetrique (pas de vis)

2)Champ de torsion (cisaillement en sous surface)



Vitesse de glissement autorisée



d = diamètre épaulement

h = 1/5 eme épaisseur de tôle

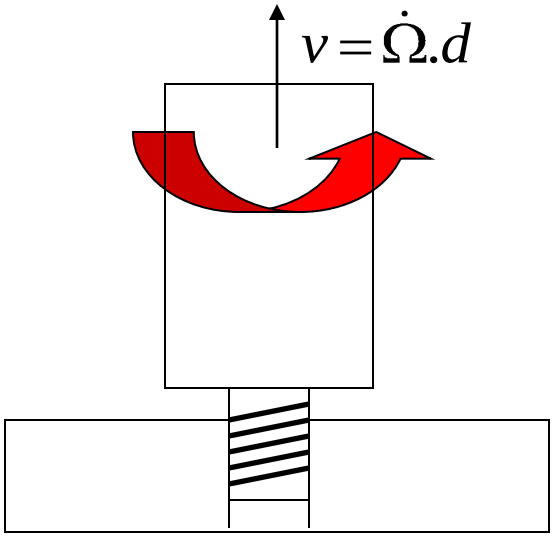
© EADS 2011

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Prise en compte de la géométrie locale de l'outil : pas de vis

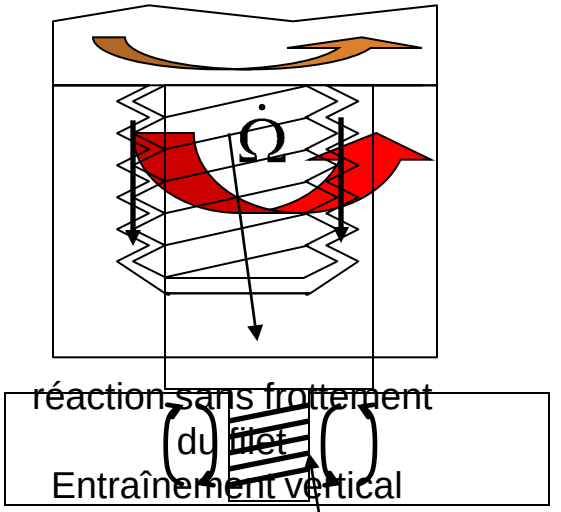
Effet du pas de vis (pion) et de la spirale (scroll sur l'épaulement)

Amélioration du mélange et de la qualité du joint par le pas de vis du pion (Elangovan, 2007)



d = pas de vis

« Métal virtuellement rigide »



Vitesse verticale prescrite $v = \dot{\Omega}.d$

« Métal visco-plastique»

Le glissement relatif est nécessaire pour l'entraînement vertical de la matière améliorant le mélange

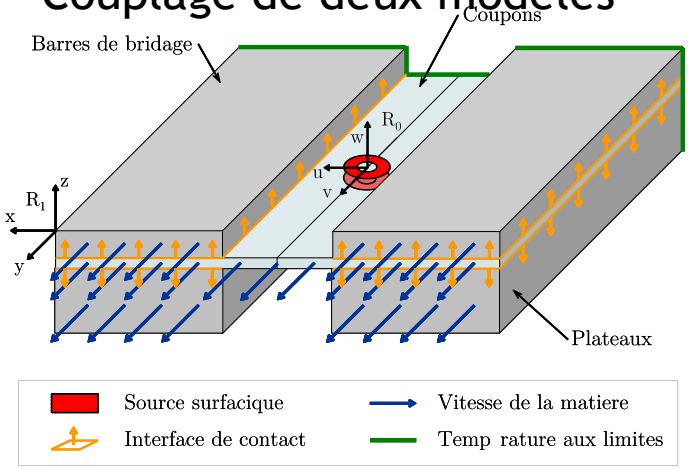
© EADS 2011

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

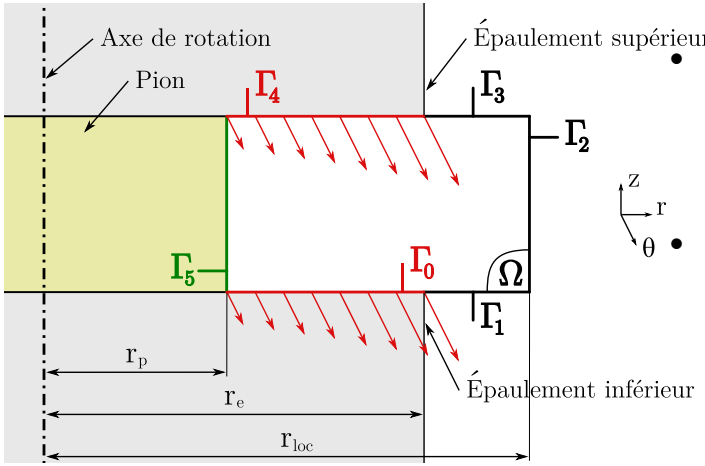
Simulation du procédé FSW Bobbin Tool

- Prise en compte de drainage par l'épaulement. thèse B. Guérin
  - Couplage de deux modèles



– Modèle thermique global 3D pseudo stationnaire
  - Résolution de l'équation de la chaleur
  - A partir de la puissance imposée en entrée, calcul de la température en tout point
  - Prise en compte des échanges avec l'outillage

– Modèle thermo-fluide local 2D axisymétrique
  - Résolution successive d'un problème de mécanique des fluides et de l'équation de la chaleur
  - Loi de comportement de type Norton Hoff



- A partir des conditions aux limites, calcul de la vitesse en tout point et de la puissance

$$\sigma = K\bar{\varepsilon}^{m}\exp\left(\frac{mQ}{RT}\right)$$

© EADS 2011

EADS

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Conditions limites

Exchanges with backing bar and atmosphere

$$-\frac{\partial T}{\partial n}(r,\theta,z) = h\left(T(r,\theta,z) - T_{ext}\right)$$

h_{air}= 30 W /m2 /°C $h_{backing\ bar}$= 200 - 1000 W /m2 /°C

Contact with the tool: thermal flux

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{b_{mat}}{b_{mat}+b_{out}} \iint \frac{\bar{m}}{\sqrt{3}} \sigma \Delta V_{circum} \quad ds$$

© EADS 2011

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

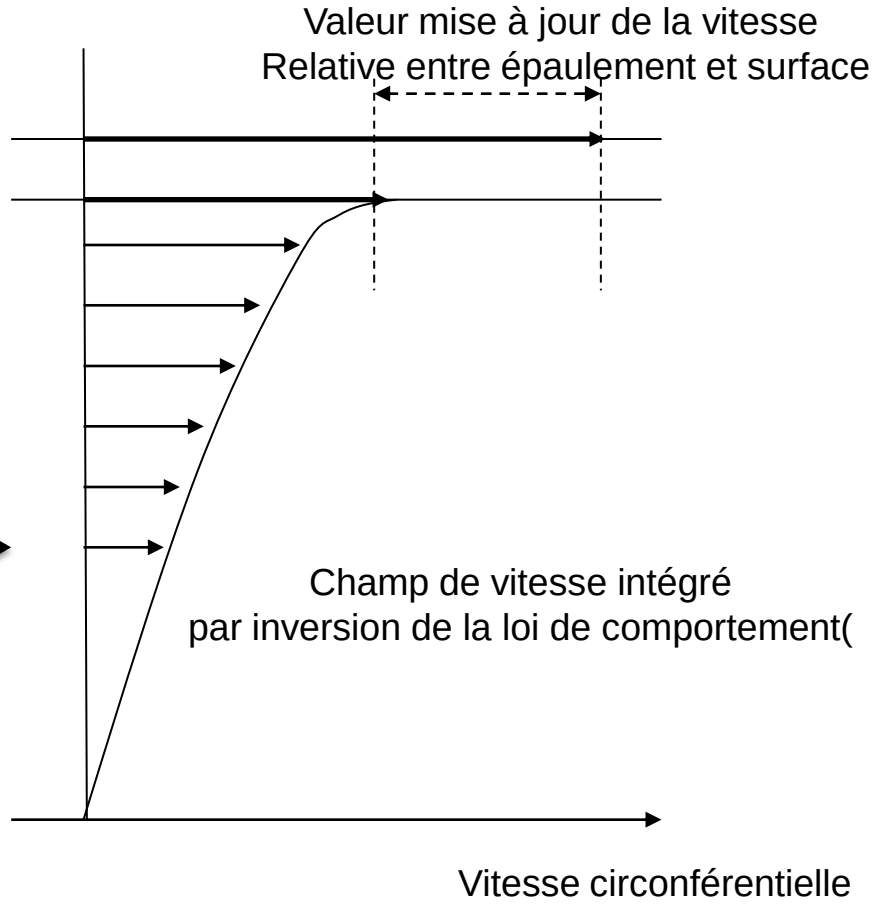
Exemple de routine de contact en 1 dimension

Champ de température et
contrainte moyenne
repris du modèle
a chaque itération

↓

Hypothèse de contrainte
constante dans l'épaisseur

→

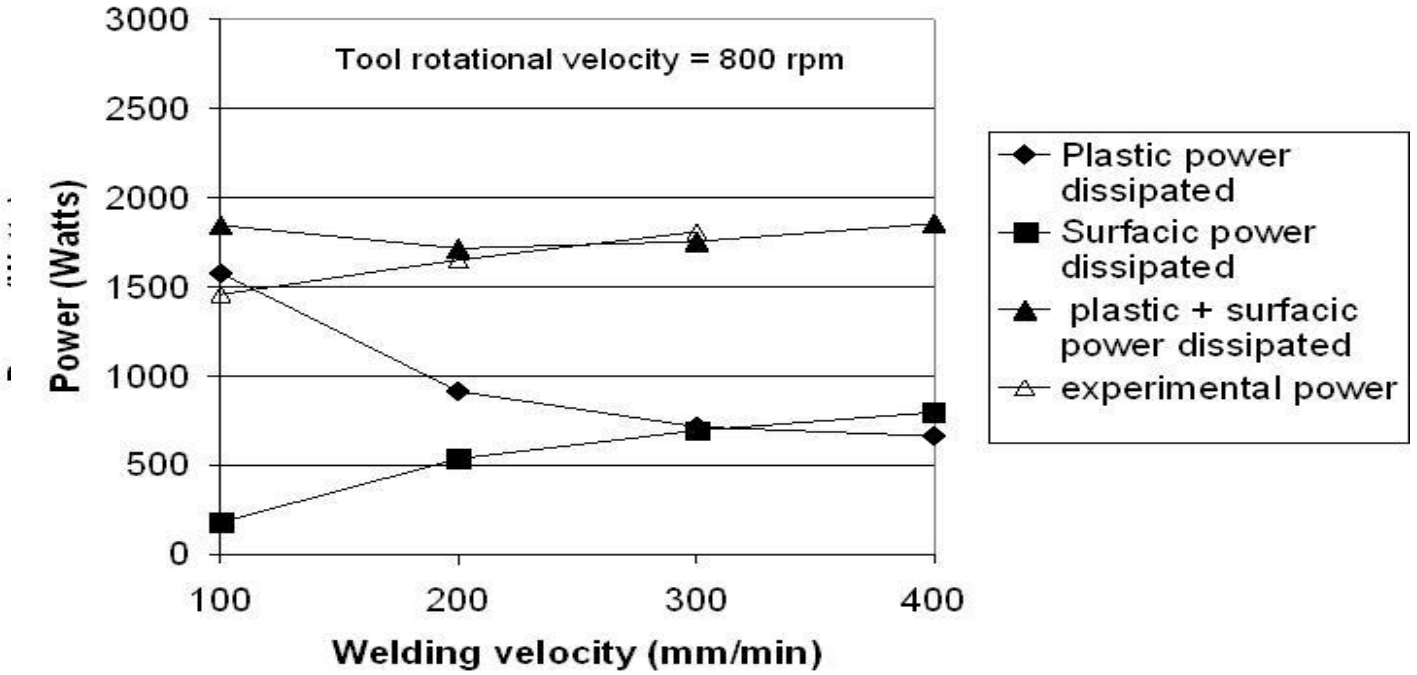


Calibration sur le choix de la contrainte de référence

© EADS 2011

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Analyse du procédé par l'intermédiaire de Bilans de puissance



Influence de la vitesse de rotation et d'avance sur le partage de puissance
2024 T351 3 mm
Soudage classique

© EADS 2011

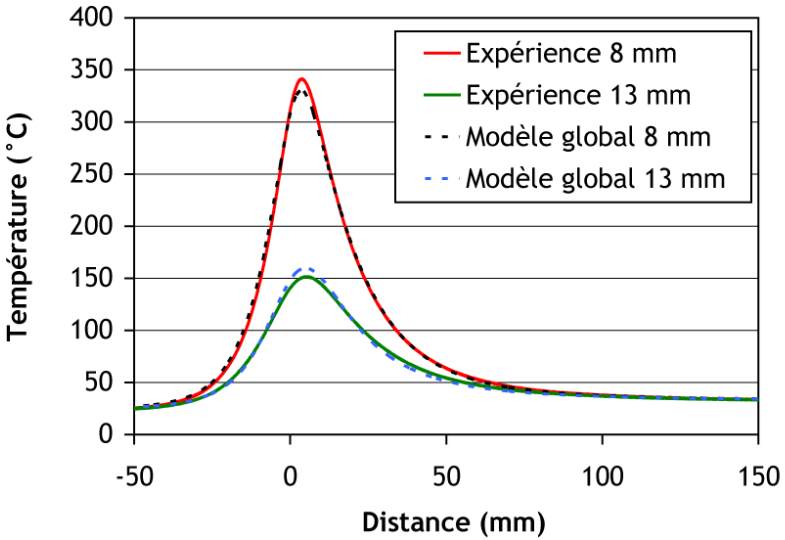
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation du procédé FSW Bobbin Tool

- Par approche inverse, détermination de la puissance expérimentale

Matériau	Paramètres de soudage		Puissance
	Vr (tr.min^{-1})	Va (mm.min^{-1})	P (W)
2139	400	200	829
	600	100	829
	600	200	889
2198	600	200	748



- Bonne corrélation entre températures expérimentale et simulée

- Détermination du coefficient de frottement empirique f tel que

$$P = \int_S r\omega\tau_{contact} dS \quad \text{avec} \quad \tau_{contact} = f\frac{F_p}{S}$$

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Modélisation du domaine de soudabilité

Utilisation du modèle global de simulation

- Rappel des paramètres d'entrée nécessaires et des résultats

Vitesse d'avance V_a
Vitesse de rotation V_r
Pin Force F_p
Coefficient de frottement f
Loi de comportement
Propriétés thermiques
Géométrie

Modèle Global

Température
Puissance
Vitesse, Rapport des débits

- Critères de soudabilité basés sur
  - La température
    - Corrélée aux paramètres de soudage, à la puissance.
    - Dans la bibliographie, 0.6xTf à 0.9xTf
  - Le rapport des débits
    - Critère physique permettant de quantifier le malaxage du matériau.
    - Le rapport des débits minimal est fixé à 1.

© EADS 2011

EADS

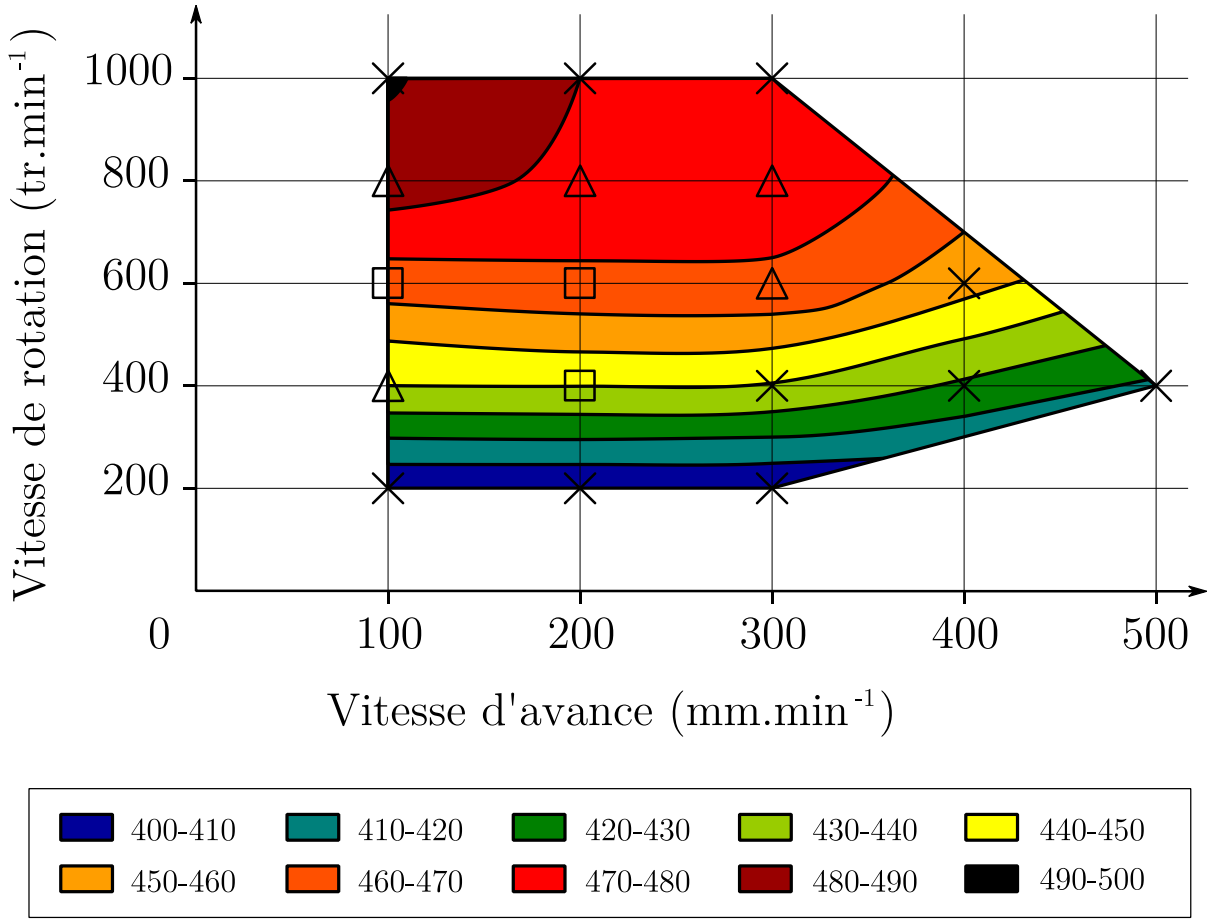
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation du domaine de soudabilité

Evaluation des résultats sur le domaine de modélisation

- Température moyenne entre les épaulements (°C)



© EADS 2011

EADS

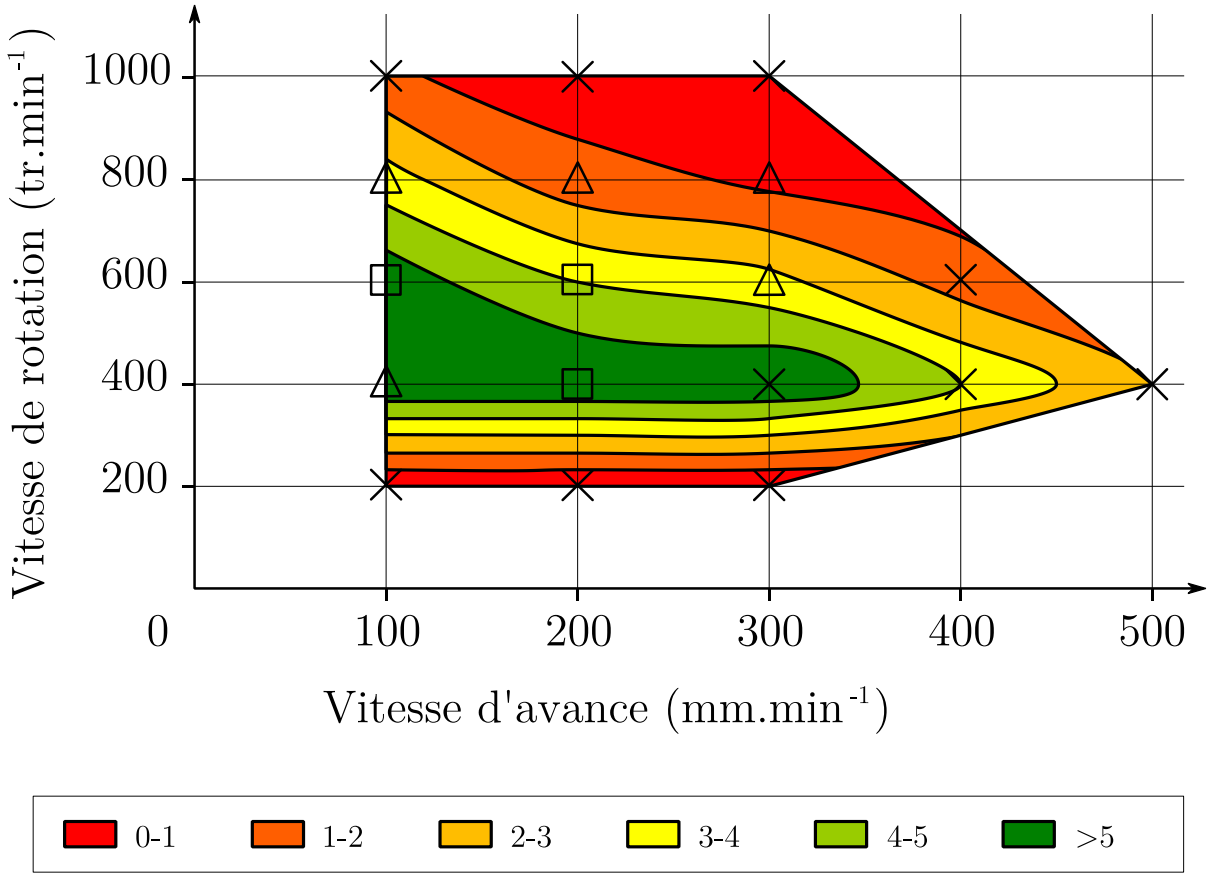
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation du domaine de soudabilité

Evaluation des résultats sur le domaine de modélisation

- Rapport des débits



© EADS 2011

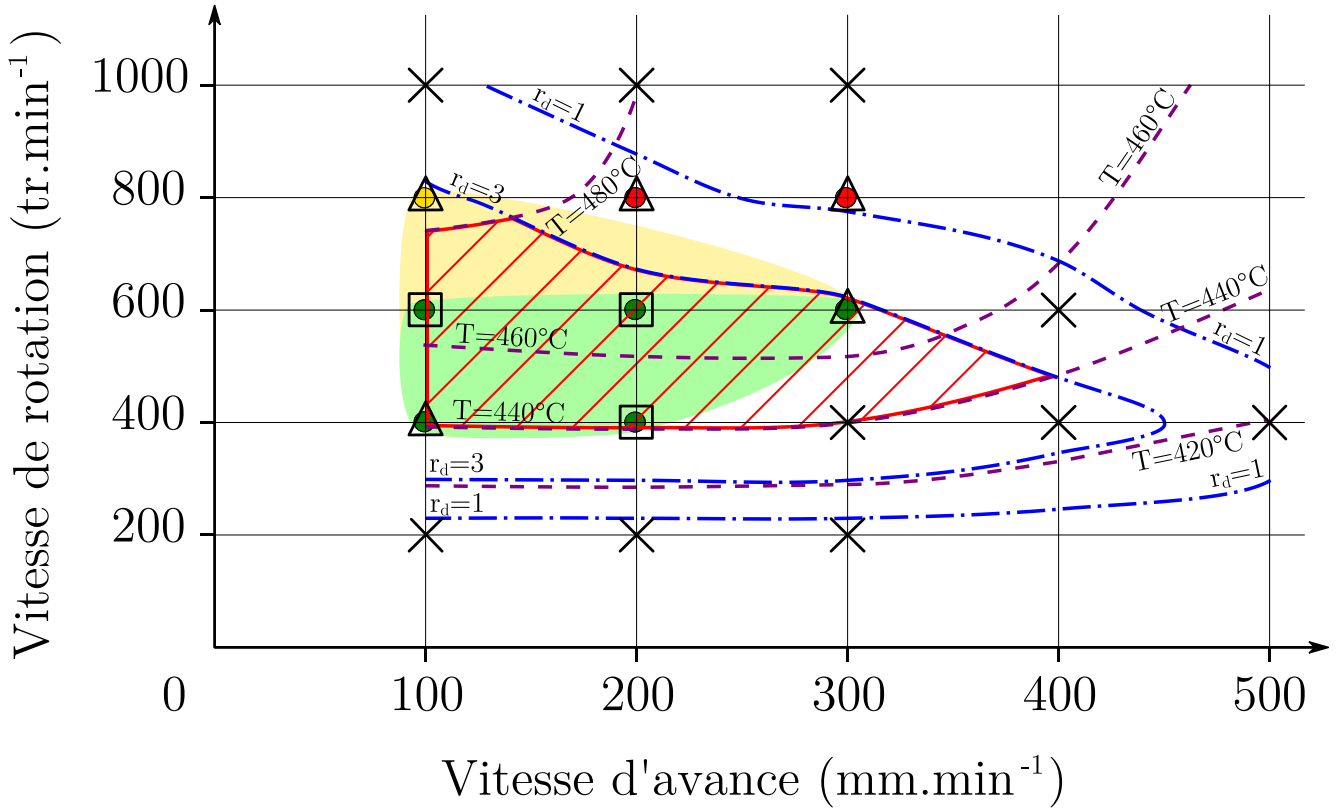
EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation du domaine de soudabilité

Comparaison des résultats au domaine de soudabilité expérimental

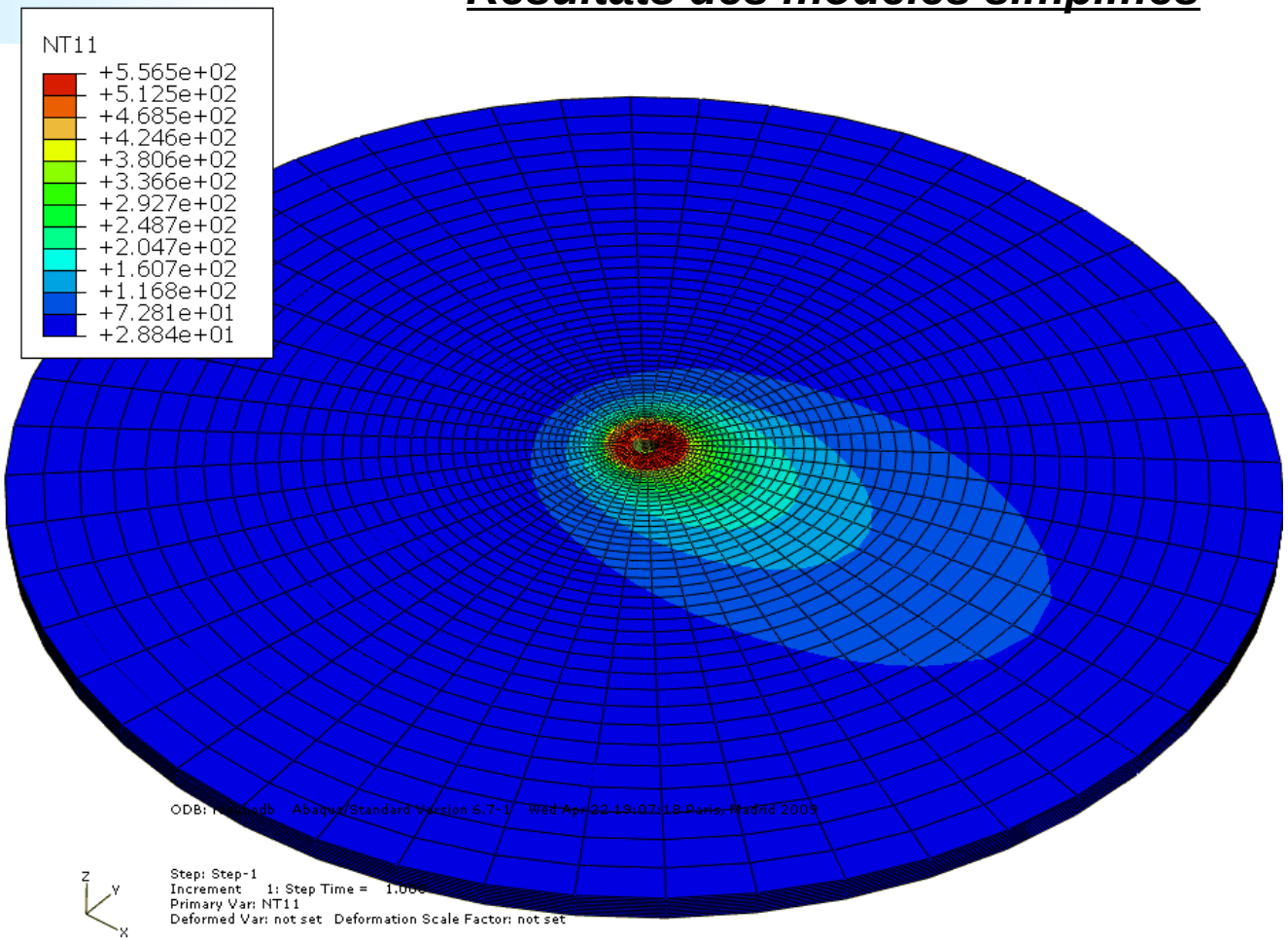


© EADS 2011

EADS

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Résultats des modèles simplifiés



ANR
INNOFORM

AA2198 T8
3.8 mm

- 1200 rpm
- 500 mm/min

1 heure(PC 3 GHz)

- Augmentation de la taille du modèle
- raffinement nécessaire par biais au niveau de l'outil

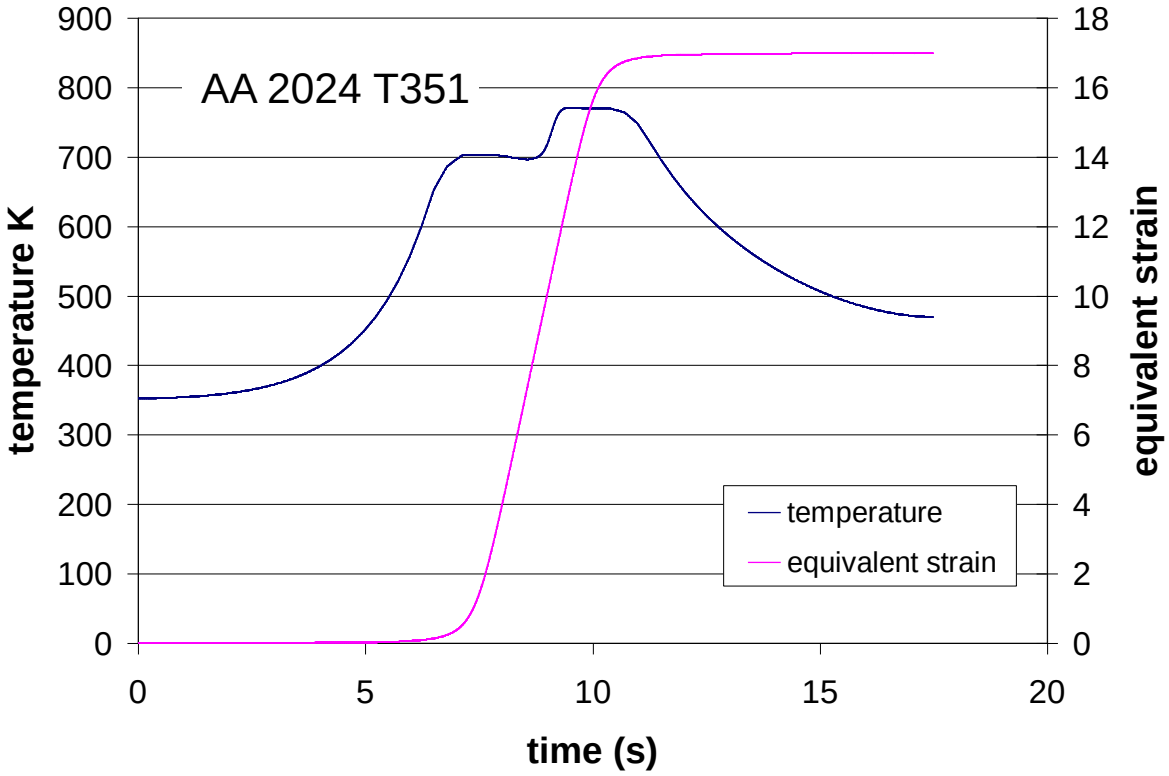
© EADS 2011

EADS

Simulation du procédé FSW simplification du champ de vitesse

Résultats des modèles simplifiés

Résultats du projet
STREP DEEPWELD
EC - FP6



Histoire thermomécanique d'un élément de matière dans le noyau

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ $\bar{\varepsilon}$ et T données d'entrée d'un modèle microstructural

© EADS 2011

EADS

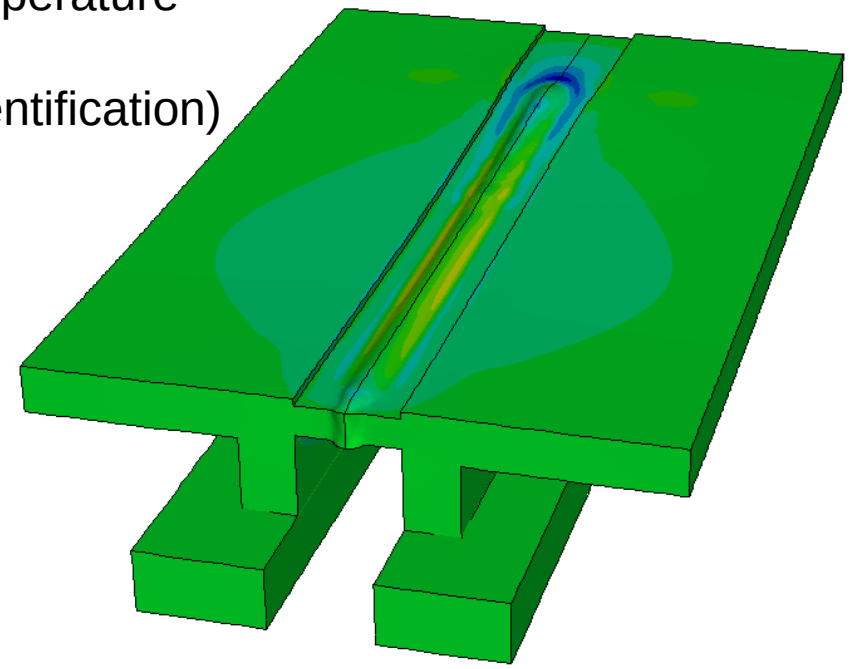
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé

Projet européen DEEPWELD 2006-2008

- Simulation thermomécanique découplée
- Source calibrée sur mesures de température
- Echange de chaleur avec outillages: résistance thermique de contact (identification)



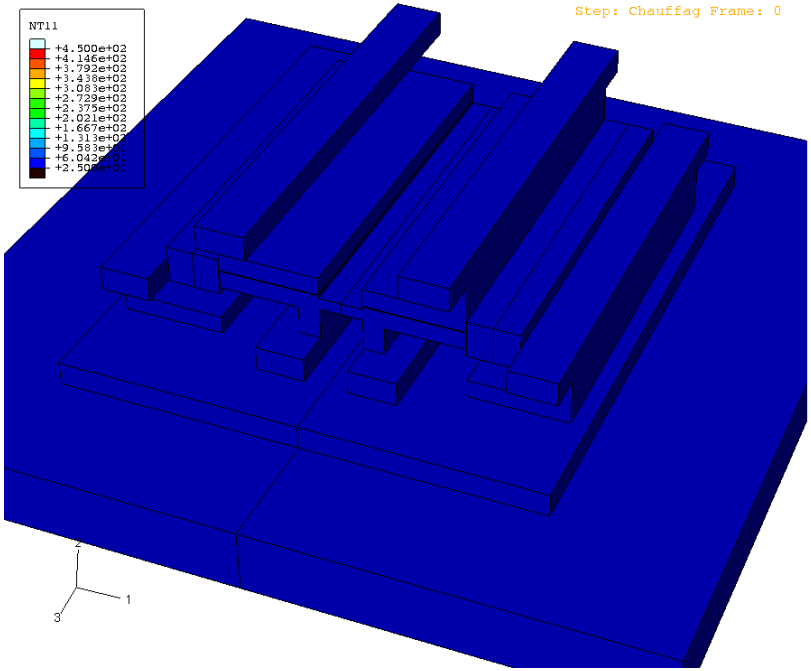
© EADS 2011

EADS

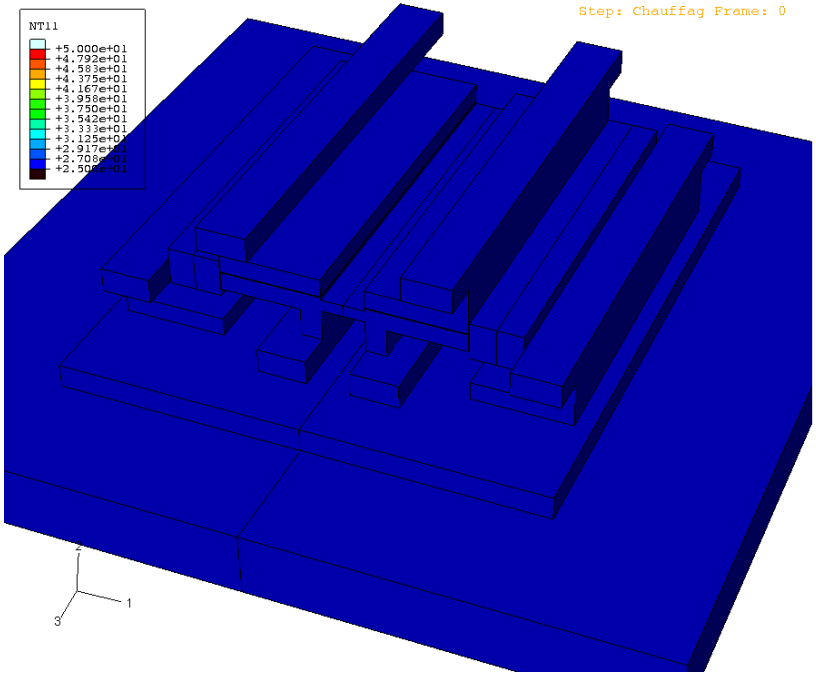
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé



Température
(zones chaudes)



Température
(zones froides)

Mise en évidence des échanges thermiques avec l'outillage

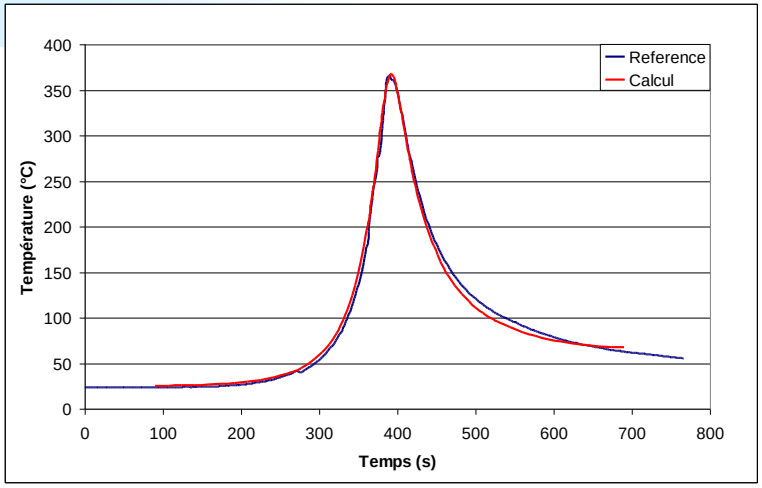
© EADS 2011

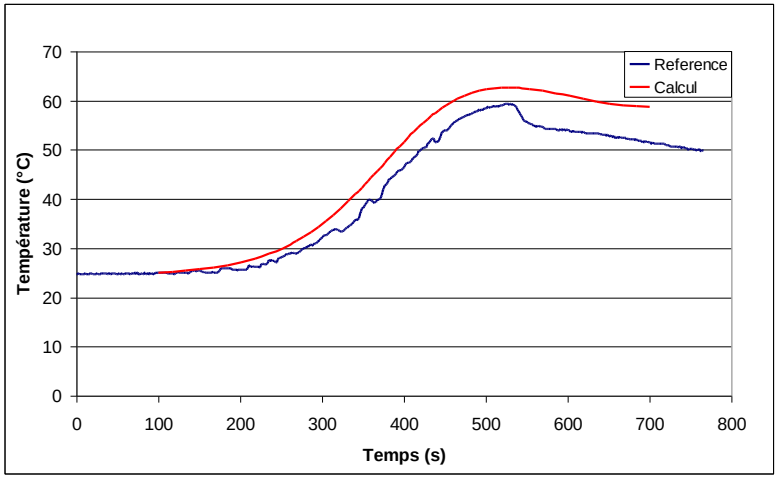
EADS

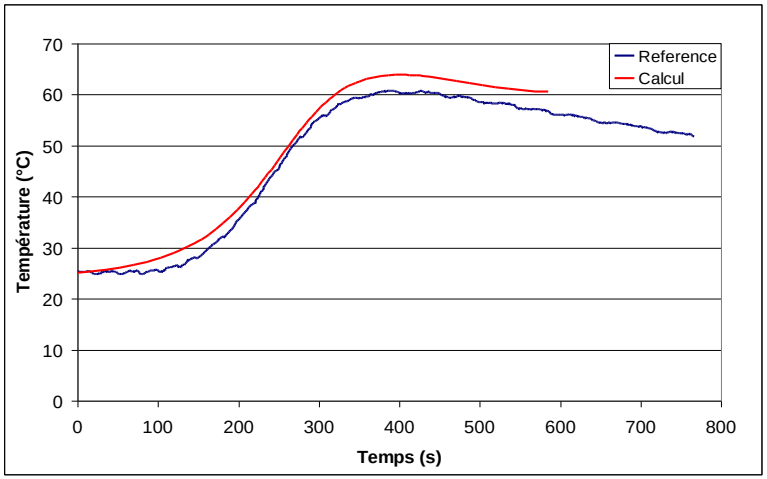
EADS INNOVATION WORKS

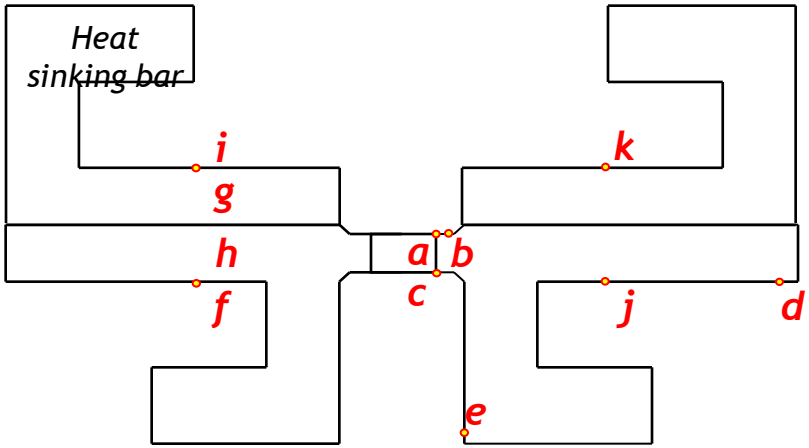
Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé









Comparaison simulation/expérience (après identification thermique)

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé

Enchainement des simulations

Distorsions fonction des conditions de soudage
Peut-on expliquer ceci par la simulation?

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

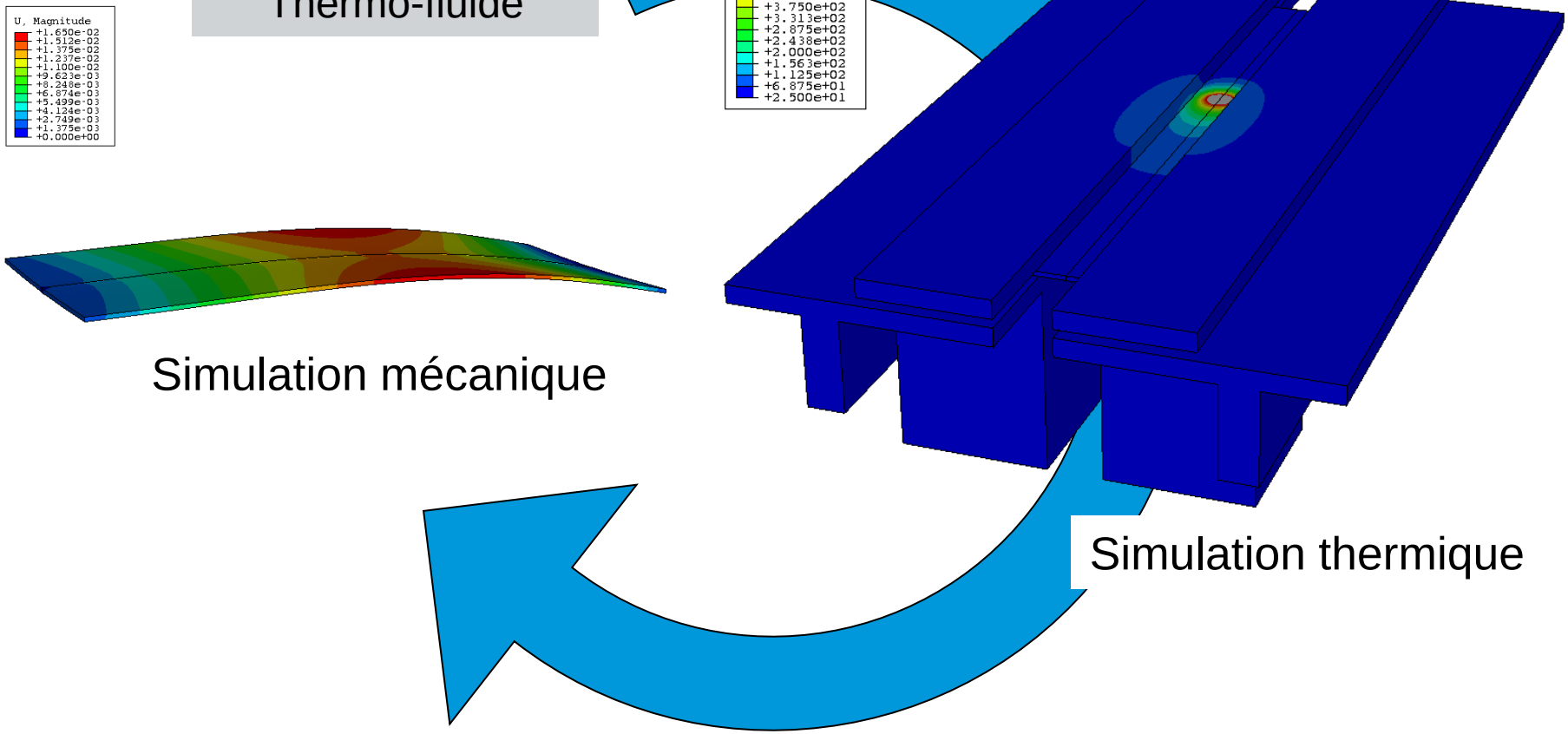
Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé

Enchainement des simulations

Simulation

Thermo-fluide



Simulation mécanique

Simulation thermique

© EADS 2011

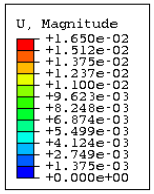
EADS

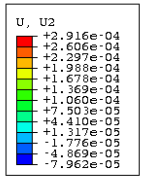
EADS INNOVATION WORKS

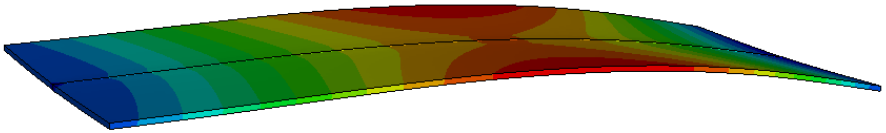
Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des conséquences du procédé

Enchainement des simulations







Flèche 16 mm

Flèche < 1mm

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation des distorsions

→ Une simulation précise requiert des efforts importants:

- Caractérisation du matériau (propriétés thermo-mécaniques),
- Identification de la thermique (expériences)
- Coût du logiciel (logiciel dédié ou développement de routines spécifiques)
- Temps

→ Quand cet effort ne peut être fait et qu'une estimation des distorsions est requise, on peut utiliser une méthode simplifiée: « inherent strain method ».

Principe:

→ Souder un coupon dans les mêmes conditions que la structure visée (matériau, épaisseur, paramètres de soudage, environnement thermique)

→ Mesurer les distorsions

→ Calibrer une déformation thermique introduite dans un modèle de l'éprouvette pour retrouver les distorsions expérimentales

→ Appliquer cette déformation thermique dans le modèle de la structure

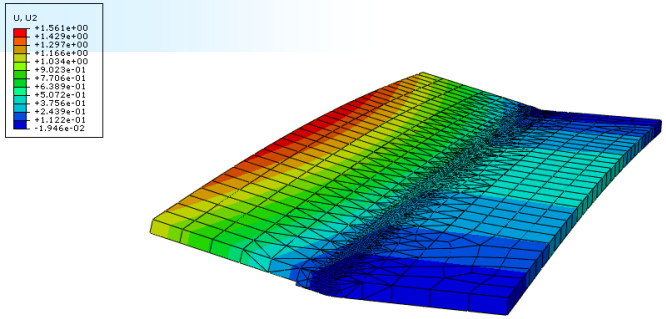
© EADS 2011

EADS

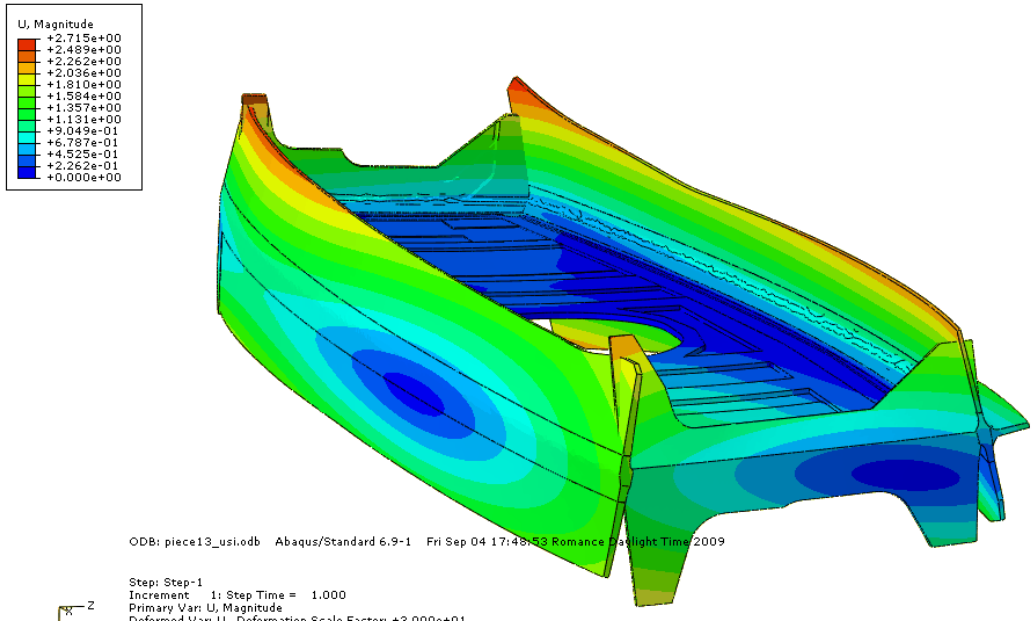
EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Simulation simplifiée des distorsions



Calibration sur coupon



Application sur structure

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Enchainement de simulations

- Formabilité de tôles soudées FSW ANR INNOFORM 2008-2010

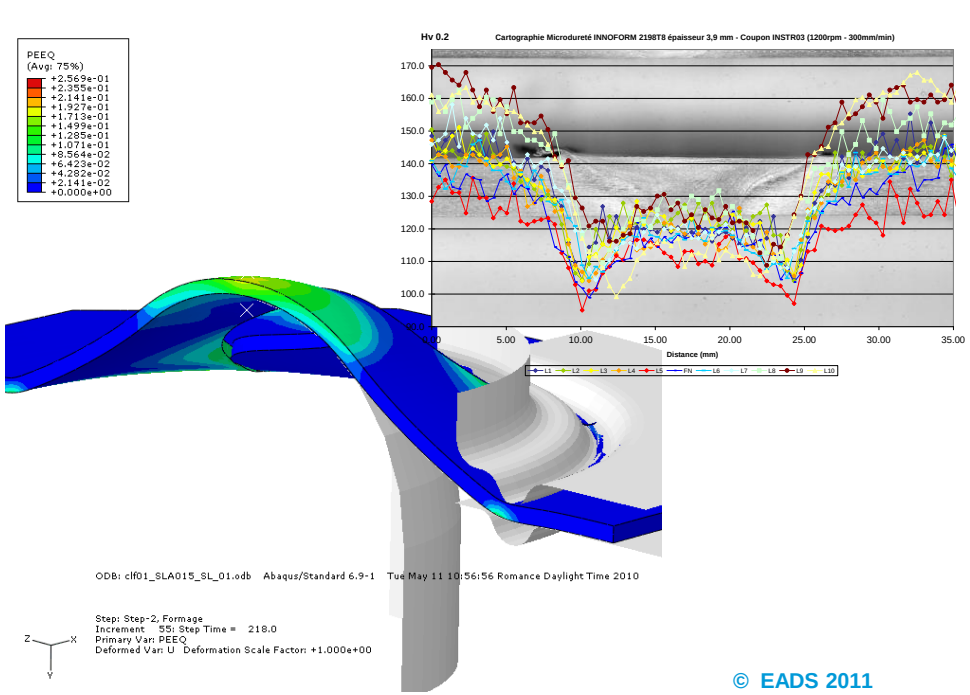
→ Simulation thermo-fluide

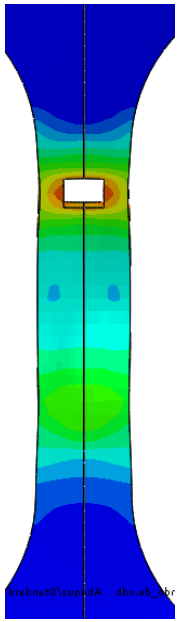
→ Historique thermique

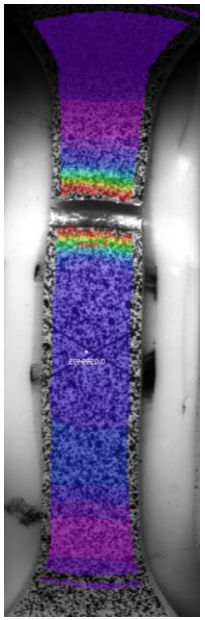
→ Traitements thermiques

→ Propriétés mécaniques

→ Simulation du formage d'éprouvettes CLF (jusqu'à rupture)







© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Enchainement de simulations

Propagation de fissure dans tôles soudées

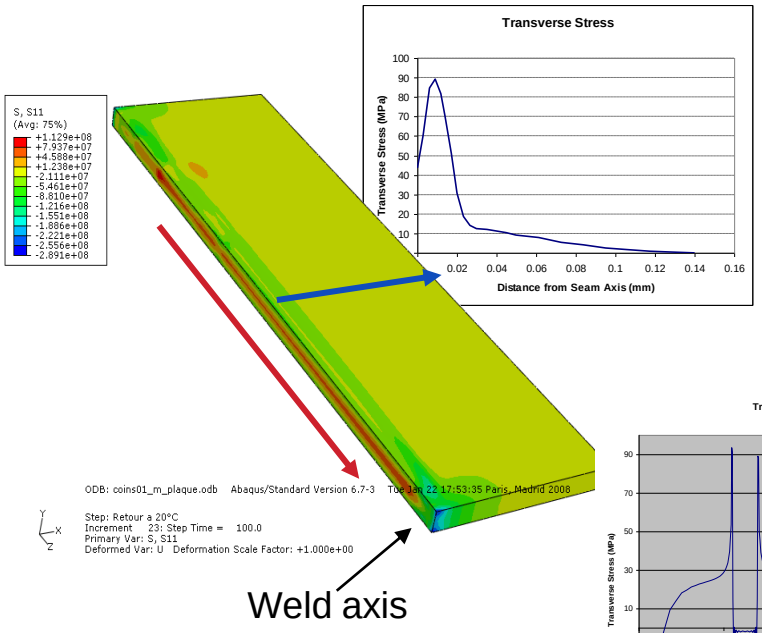
FP7 COINS, ANR ALICANDTE

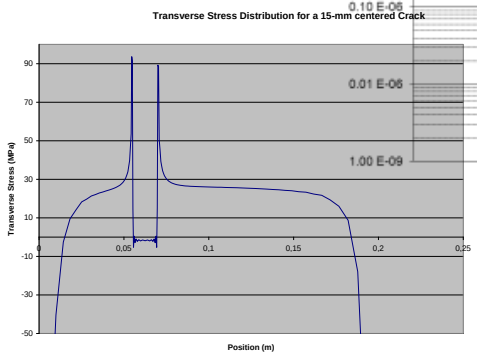
→ Simulation du soudage

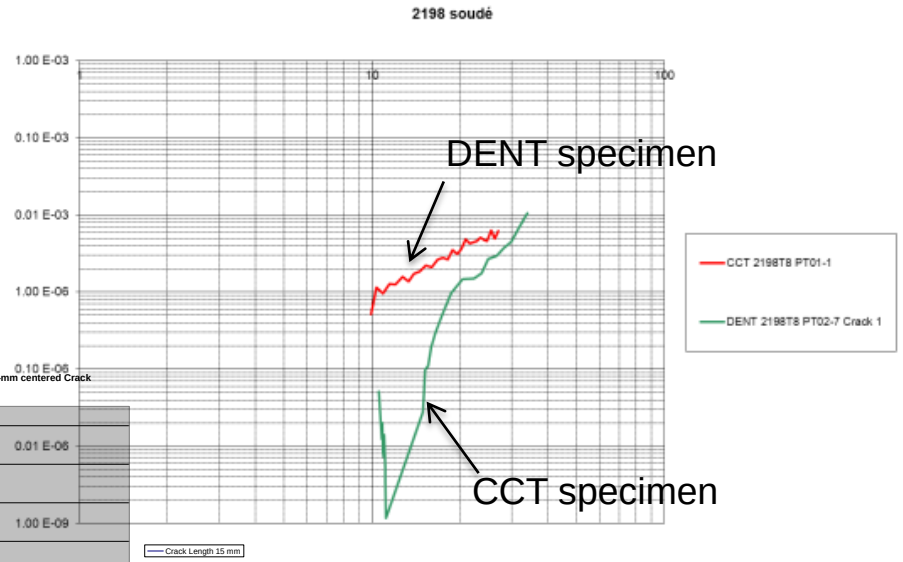
→ Introduction fissure

→ Etude l'état de contrainte en fond de fissure

→ Aide au choix d'éprouvette pour la caractérisation







© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Bilan/Attentes vis-à-vis de la simulation

- Détermination des paramètres de soudage:
  - Vitesse de rotation, Vitesse d'avance, Efforts à appliquer

Simulation du procédé

- Optimisation des géométries d'outil
  - Diamètre d'épaulement, diamètre de pion, filetage, méplats, inclinaison

- Prédiction des distorsions, des contraintes résiduelles, des propriétés post-soudage (dureté, micro-structure)

Simulation des conséquences du procédé

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Bilan/Attentes vis-à-vis de la simulation

- Détermination des paramètres de soudage:
  - Vitesse de rotation, Vitesse d'avance, Efforts à appliquer

Eléments de réponse

Simulation du procédé

- Optimisation des géométries d'outil
  - Diamètre d'épaulement, diamètre de pion, filetage, méplats, inclinaison

- Prédiction des distorsions, des contraintes résiduelles, des propriétés post-soudage (dureté, micro-structure)

Simulation des conséquences du procédé

Eléments de réponse

© EADS 2011

EADS

EADS INNOVATION WORKS

Ecole Nationale Supérieure des Mines SAINT-ETIENNE

Bilan

→ Evolution conséquente des modèles utilisés sur 10 ans
- Pas seulement en terme de DDL mais en terme de caractéristiques (modèles locaux, représentation thermique, chainage de calcul, …)

→Des calibrations restent nécessaires pour tous les modèles thermiques

→ Une simulation thermo-mécanique précise est possible. Le prix à payer est élevé (caractérisation et identification).

→ Des modèles simples peuvent être utilisés pour estimer les distorsion

→ Collaboration EADS/ENSME fructueuse

→ Intérêt d'une collaboration académique/industrie sur le long terme (autre expérience réussie avec INSA Lyon sur le soudage laser)

© EADS 2011

EADS