

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# ETUDE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DES DEFORMATIONS MECANIKUES INDUITES PAR LE SOUDAGE

*CHARLINE TOUVREY<sup>1</sup>, VINCENT BRUYERE<sup>1</sup>, PATRICK NAMY<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Commissariat à l'Énergie Atomique, Centre de Valduc, 21120 Is sur Tille*

*<sup>2</sup> SIMTEC, 8 rue Duployé, 38100 Grenoble*

*[charline.touvrey@cea.fr](mailto:charline.touvrey@cea.fr), [patrick.namy@simtecsolution.fr](mailto:patrick.namy@simtecsolution.fr)*

Journée de la SNS

Maison de la mécanique - La Défense

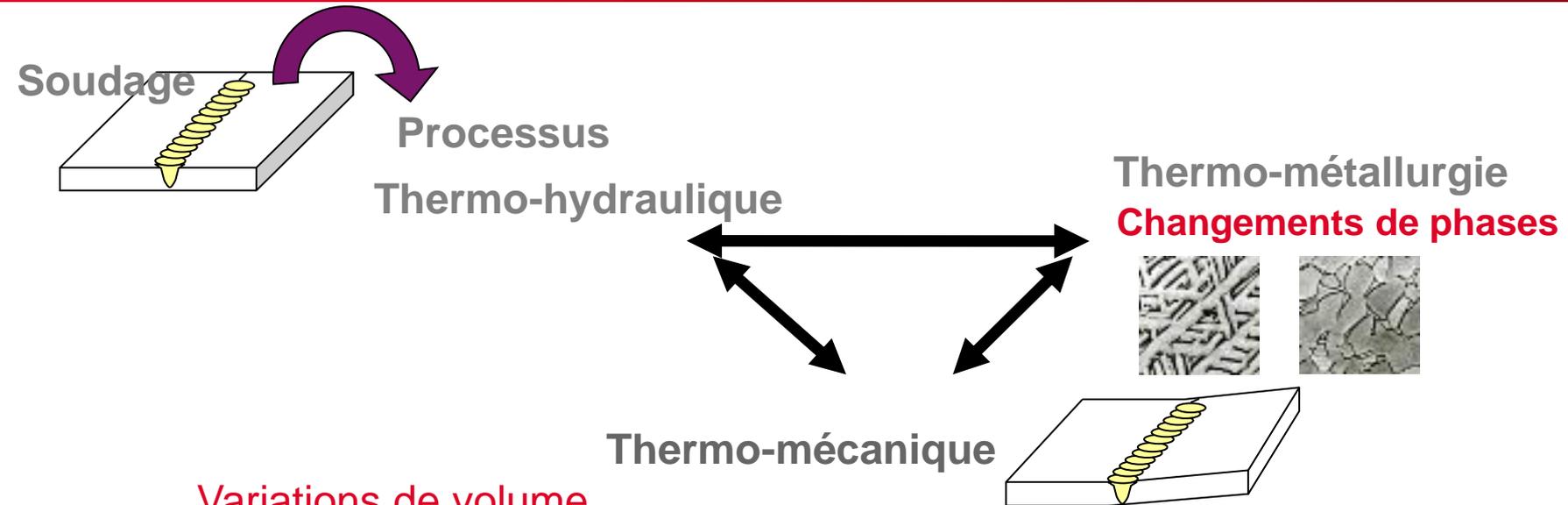
[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

**Le 27/03/2014**

1. Introduction / mécanismes physiques
2. La mesure expérimentale des déformations
3. La modélisation thermomécanique
4. Vers un modèle prédictif (n'ayant pas recours à l'essai)
5. Conclusions

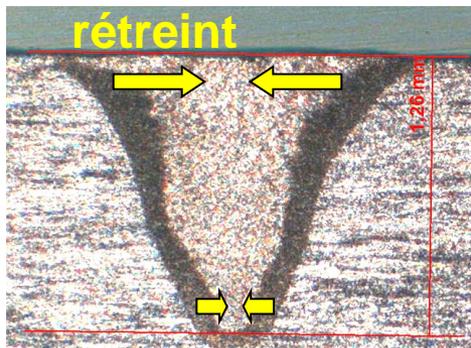
**Introduction :**  
**problématique / objectifs**

# Problématique



## Variations de volume

Plus de contraction lors du refroidissement que de dilatation à la chauffe temps d'accommodation plus long → effet de rétreint.



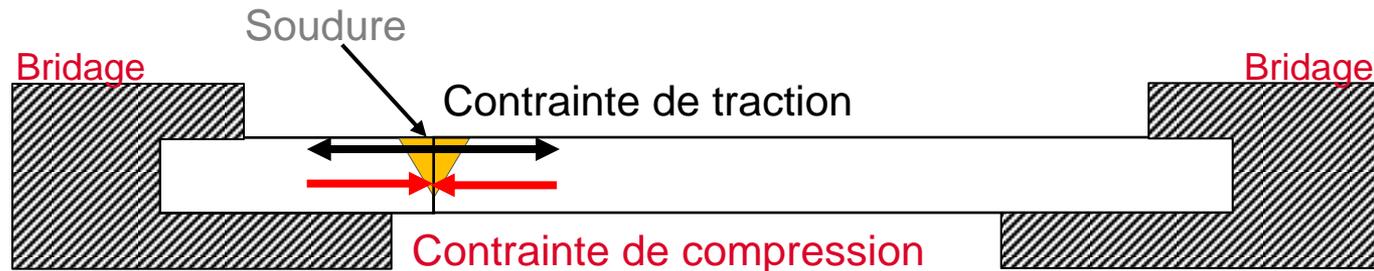
Soudure en V → rétreint plus important en partie supérieur du bain

Variation des propriétés du matériau à haute température

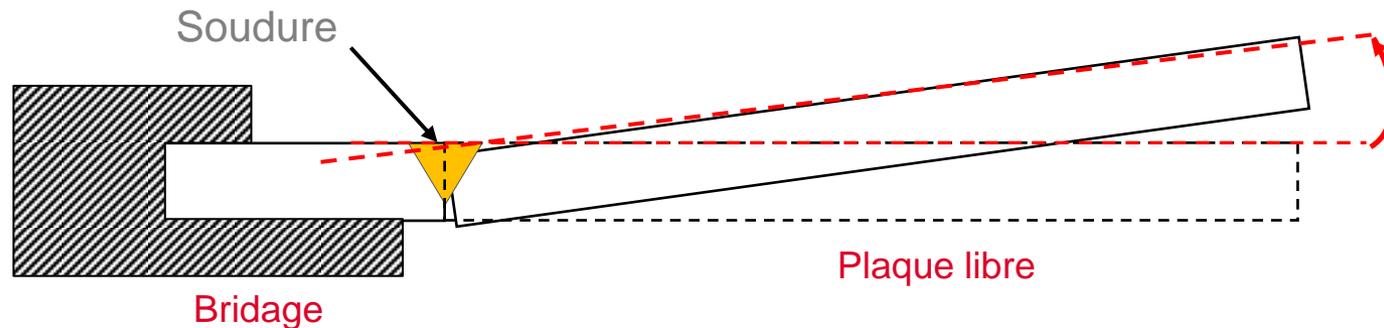
## Contraintes / Déformations

# Mécanismes physiques

Les contraintes résiduelles peuvent être très importantes à proximité du cordon ;



En l'absence de bridage, des déformations peuvent affecter l'assemblage.



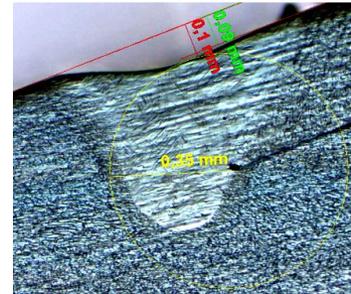
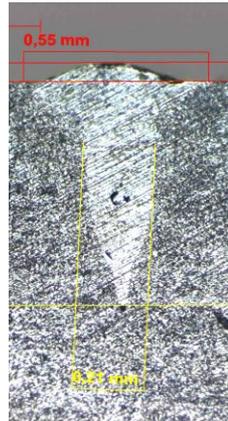
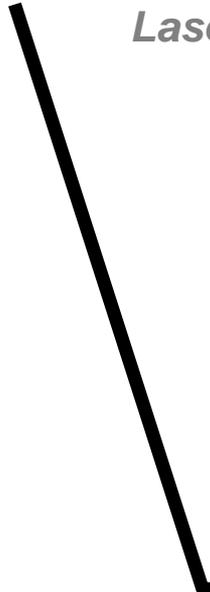
# Problématique

Pour minimiser les déformations induites



Types de procédé

*Laser fibre Trufiber400    TruPulse 62 Nd:YAG impulsionnel*



Types de plan de joint

*Plan de joint avec dégraissage*



15 µm

*Bord à bord classique*



**Objectif : Détermination des configurations optimales (minimum de déformations) par le calcul seul.**

**-Matériau coûteux ;**

**-Géométrie de structures peu propices aux essais  
(structures complexes → beaucoup de contraintes internes)**

## Etapes :

**Méthodologie pour appréhender les déformations sur un « cas d'école » :  
cordon pleine matière dans du TA6V, laser impulsionnel :**

- Mesures expérimentales**
- Calcul numérique**

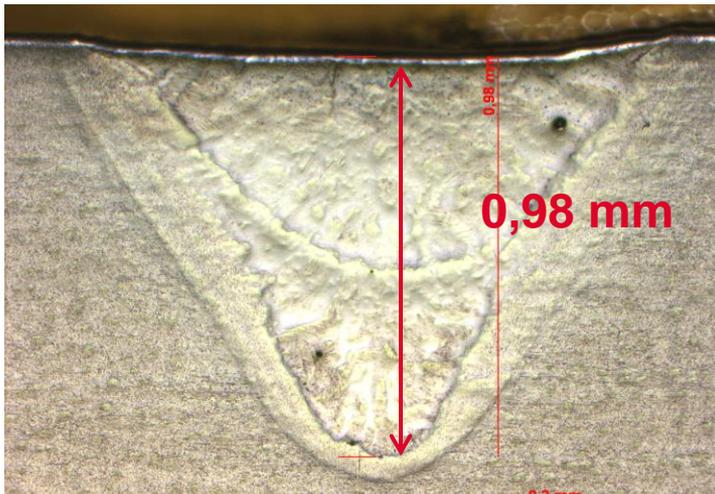
# La mesure expérimentale des déformations

# Configuration d'essai

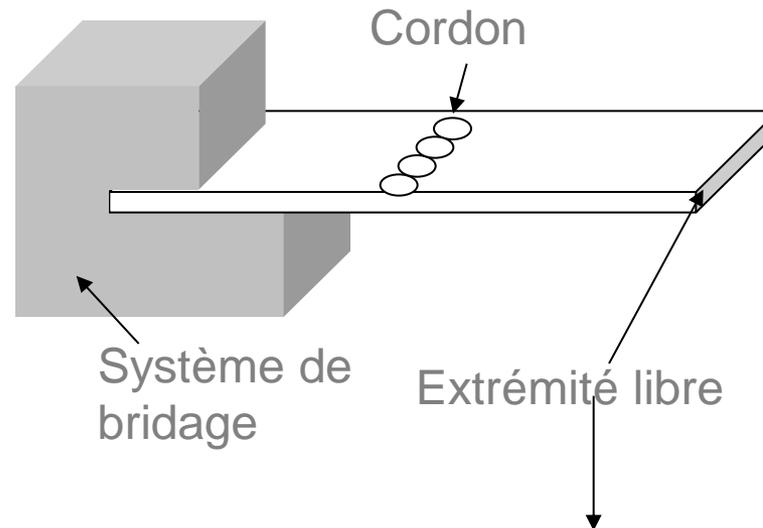
## Paramètres de soudage

### Laser impulsif TRUMPH506P

Puissance crête	1000 W
Durée d'interaction	12 ms
Pas d'avance	0,2 mm
Diamètre du spot	620 $\mu\text{m}$
Fréquence	2 Hz



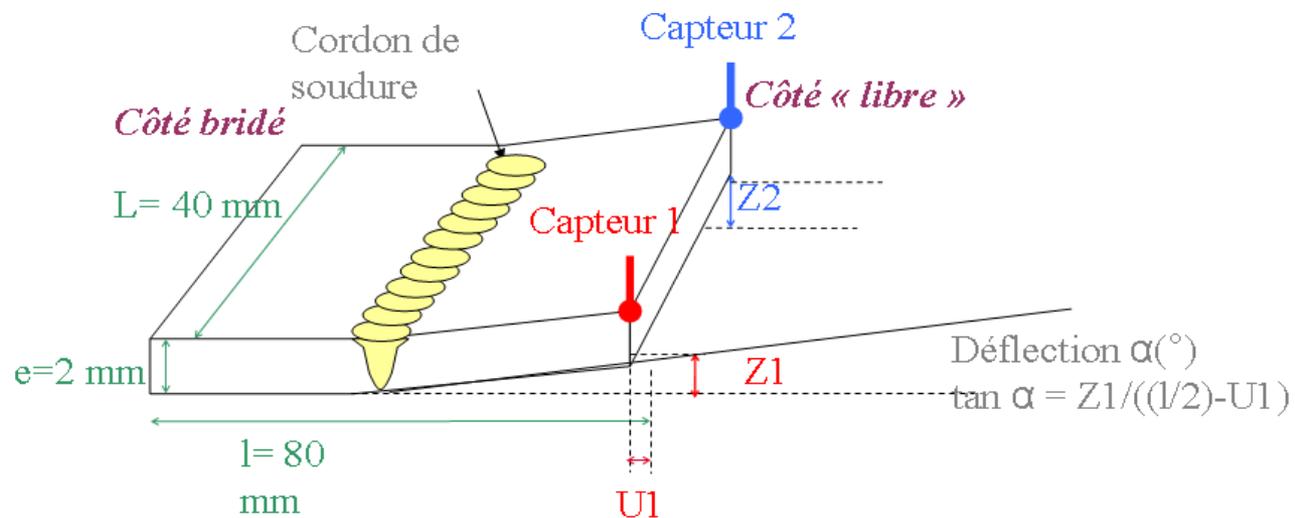
## Réalisation d'une ligne de fusion en pleine matière



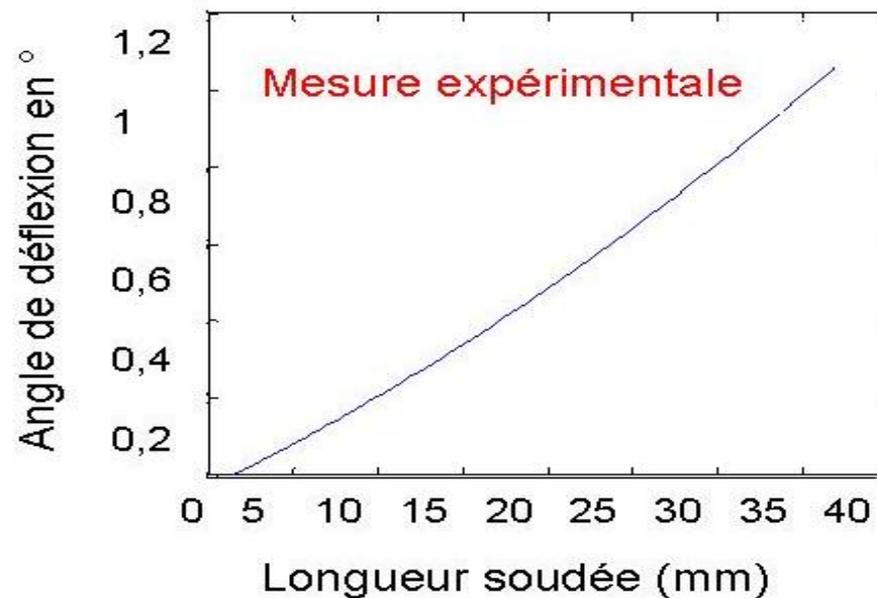
Le bridage est minimal  
 → commutation des contraintes en déformations (zones éloignées du cordon)

# Configuration d'essai

## Mesure de déformations



## Résultats

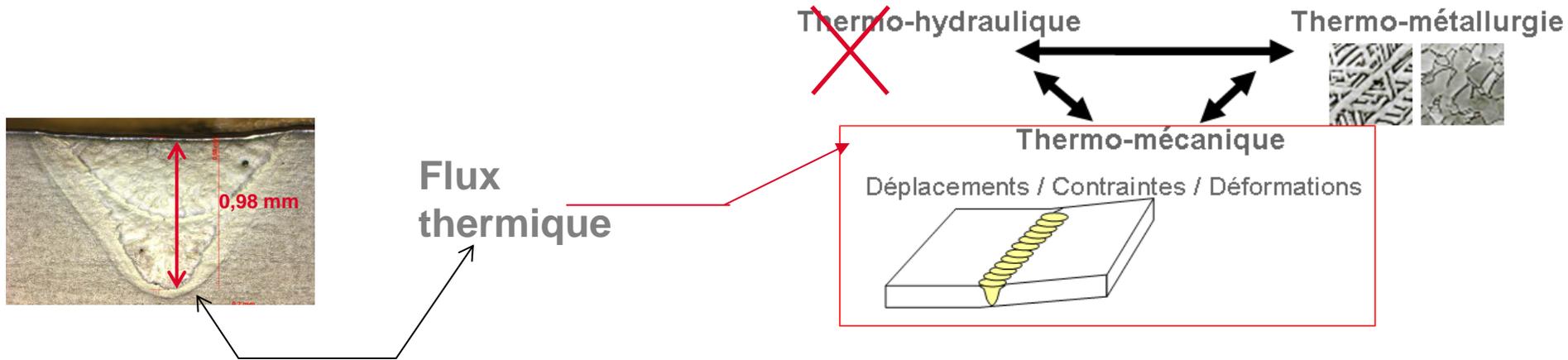


# La modélisation thermomécanique

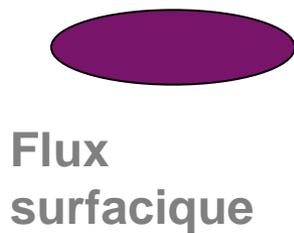
COMSOL Multiphysics

# Méthode globale

Essai (Micrographie) = donnée d'entrée  
→ Détermination d'un flux thermique équivalent



Procédure d'optimisation (modification itérative de différents paramètres de flux jusqu'à obtenir les bonnes formes de ZF et de ZAT)



Au bout de  
 $t_{\text{capillaire}}$



+



# Séquentiel de calcul / équations

Difficulté : annuler la contrainte, déformation totale et déformation plastique des points qui repassent à l'état liquide.

## Méthodologie

→ Calcul thermique :

$$\rho.Cp.\frac{\partial T}{\partial t} + \rho.Cp.u.\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + Q$$

Introduction d'une **nouvelle variable** qui permet de déterminer en chaque point **l'instant de la dernière solidification tps\_der\_solidif**.

→ Calcul thermo-mécanique : plasticité incrémentée si  $t > \text{tps\_der\_solidif}$

$$-\nabla.\sigma = Fv, \sigma = s$$

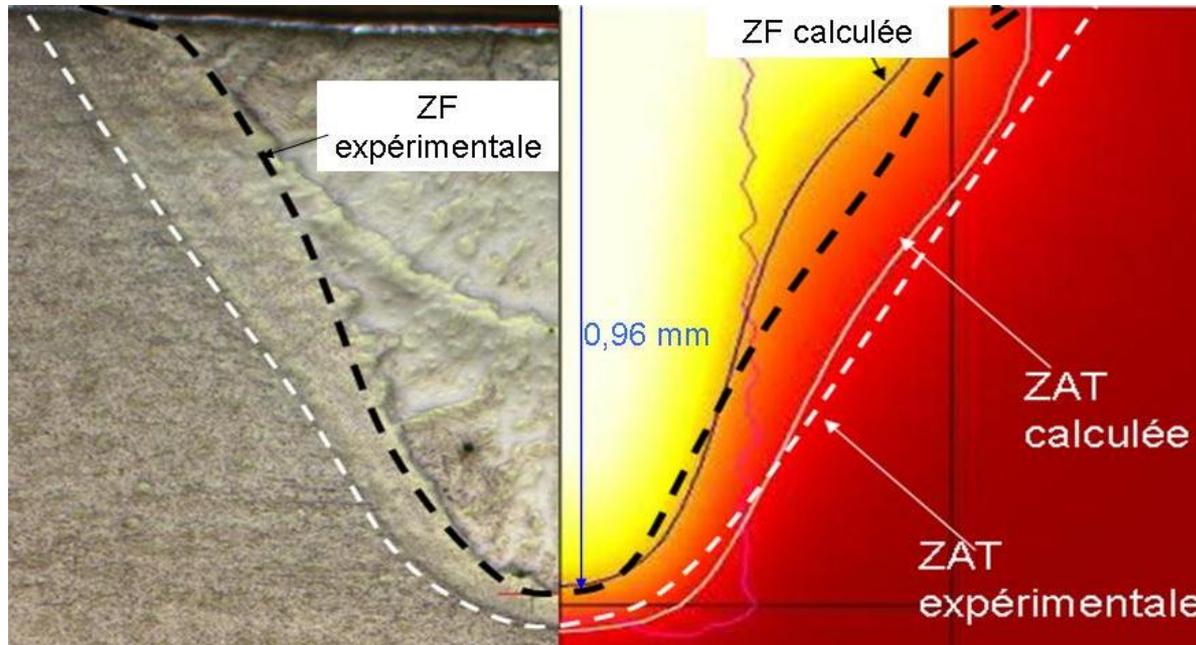
$$s - S0 = C : (\varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_{in\acute{e}lastique})$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[ (\nabla u_3)^T + (\nabla u_3) \right]$$

Critère de plasticité : contrainte de von Mises > limite élastique.

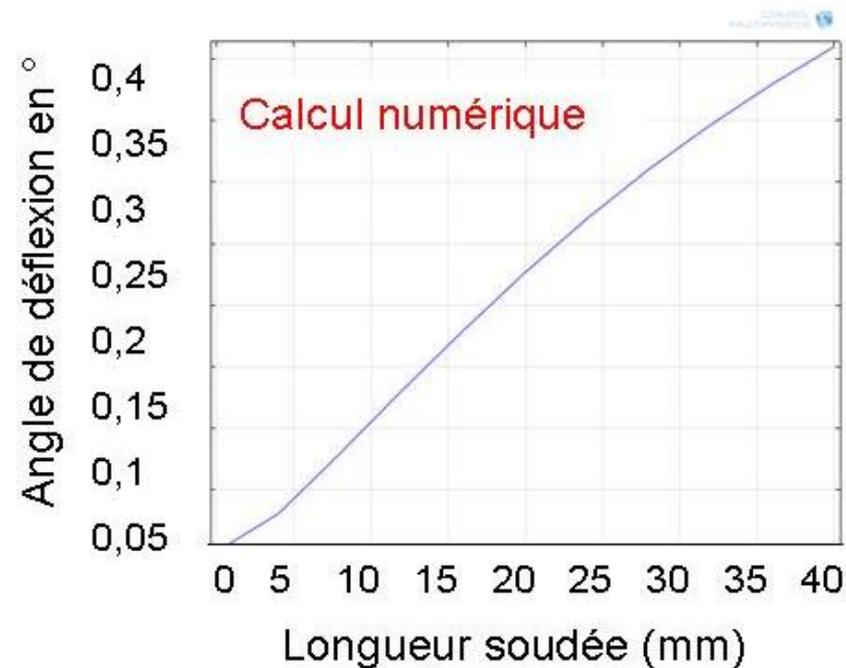
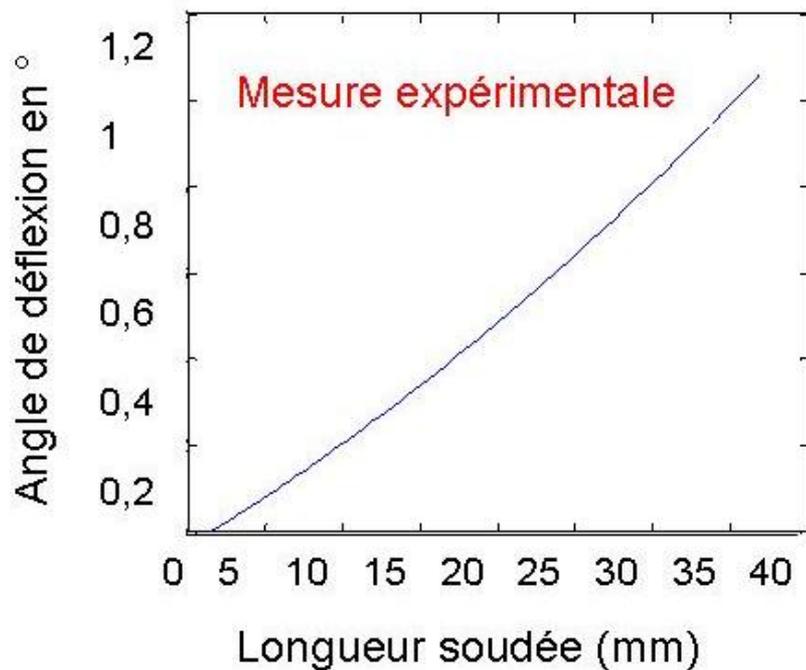
Ecrouissage isotrope.

# Résultat : optimisation du terme source thermique



Forme de zone fondue à l'issue de la procédure d'optimisation

## Résultat : angle de déflexion de la plaque libre



L'angle calculé est trois fois plus faible que l'angle mesuré ...

En cours d'étude : prise en compte d'un écrouissage cinématique, prise en compte des changements de phase ;

# Analyse des résultats

**Nous sommes au stade de la validation du modèle (aller-retour entre expérience et calcul pour identifier/modéliser les mécanismes prépondérants) :**

**Le modèle n'est pas mûr pour être exploité (estimation à priori des déformations sur des structures complexes).**

**Petit aparté : ce modèle se base sur une micrographie...donc sur l'essai....**

**Comment aller vers la prédictivité complète :**

**Paramètres du procédé → déformations induites**

**→ En traitant la thermo-hydraulique**

**Vers un modèle prédictif (n'ayant pas recours à l'essai)**

Travaux de post-doc de V.Bruyère

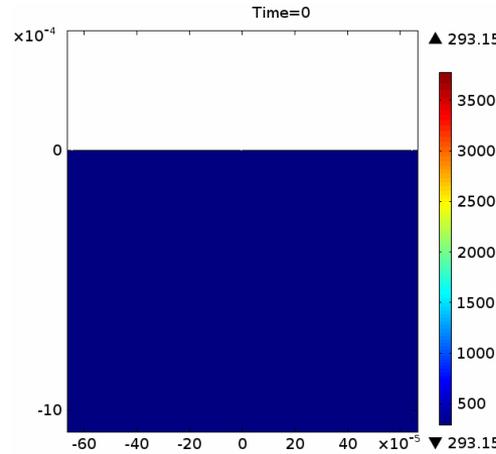
Paramètres du laser

Fusion, vaporisation du matériau cible

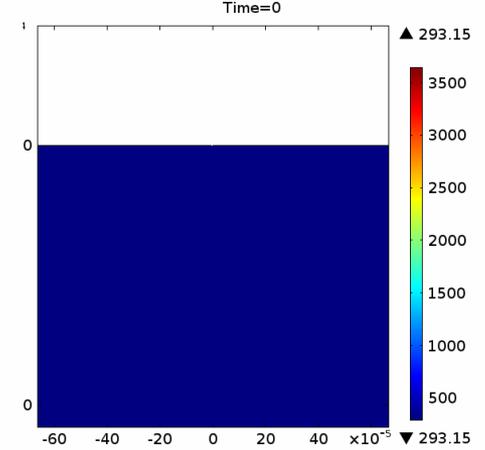
Création et croissance du capillaire de soudage

Fermeture du capillaire et refroidissement

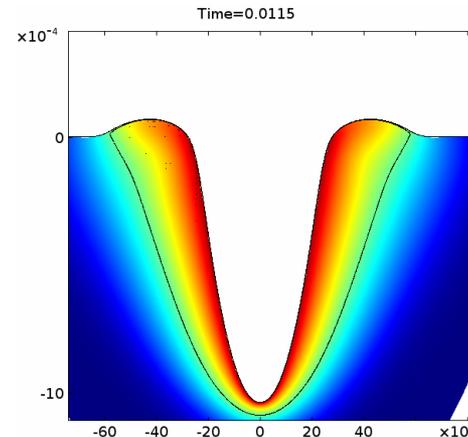
$P_c = 1000 \text{ W}$



$P_c = 1500 \text{ W}$



Écarts ZF calculées / expérimentales <5%

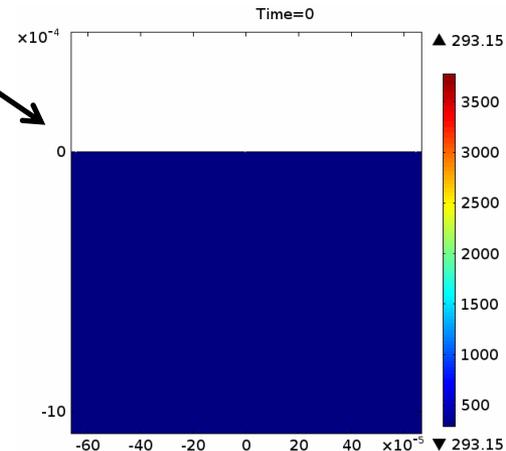
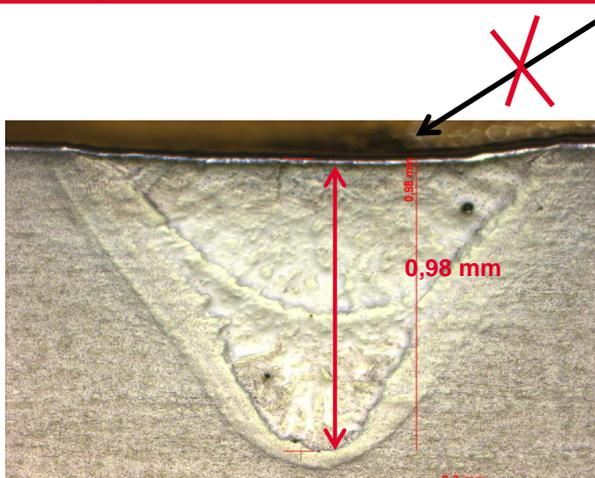


# Modélisation thermohydraulique prédictive de l'interaction faisceau-matière

1 calcul (interaction 10 ms + refroidissement 10 ms) :

Environ deux jours de calcul sur une machine 4 cœurs - 64 bits – 32 Go de Ram.

→ Pour traiter un assemblage complet, flux thermique équivalent à un calcul thermo-hydraulique (procédure d'optimisation)



# Conclusion

**L'essai est indispensable :**

- **Pour bâtir/recaler les modèles ;**
- **Pour les valider.**

**La modélisation du soudage est multi-physique, et sa modélisation fait intervenir un chaînage de modèles.**

**La validation d'un chaînage nécessite la validation de chaque maillon → instrumentations adéquates (mesure de température, forme de ZF, mesure de contrainte, déformation, validation des lois de comportement en relation avec la métallurgie locale).**

**Nous n'en sommes qu'au début de ce chaînage et à la validation indépendante de chaque maillon : l'essai de « calage » nous est indispensable ...**