

# Contribution numérique pour l'optimisation d'un mode opératoire de soudage – Identification d'une source de chaleur équivalente

Evelyne Guyot, Jeanne Schroeder, Philippe Gilles, Simon Morville  
**AREVA NP**

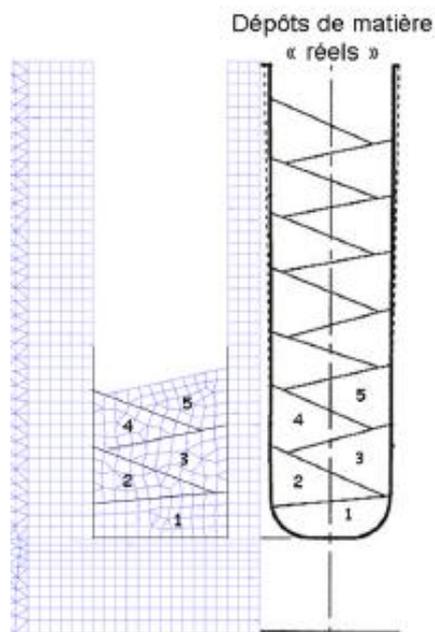
[simon.morville@areva.com](mailto:simon.morville@areva.com)

Danièle Ayrault, Olivier Asserin  
**CEA**

[olivier.asserin@cea.fr](mailto:olivier.asserin@cea.fr)

## Géométrie de l'assemblage

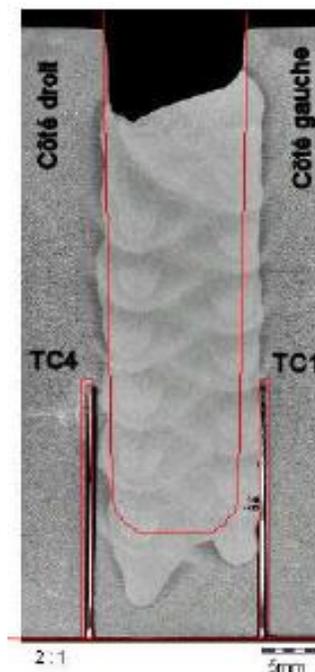
- Chanfrein étroit profond (< 90 mm)
- Matériau : 16MND5
- Soudage à plat



Séquence des dépôts

## Procédé de soudage

- Arc électrique
- Soudage multi-passe
- 2 passes / couche



Exemple de macrographie

## Objectif

- Développer un mode opératoire de soudage pour le procédé chanfrein étroit 2 passes par couches

## Contraintes

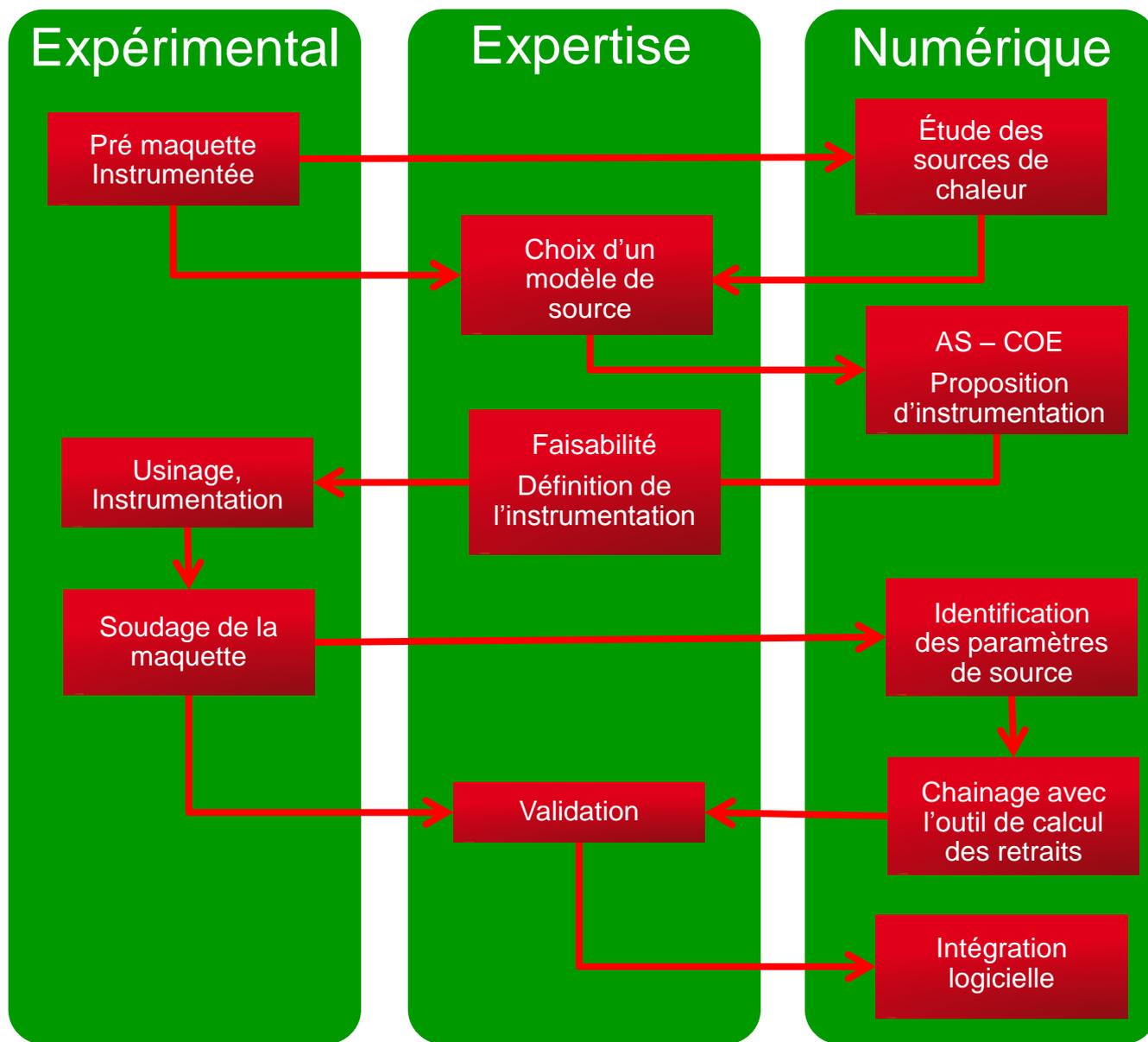
- Garder une largeur de chanfrein constante (passage torche)
- Soudure sans défauts

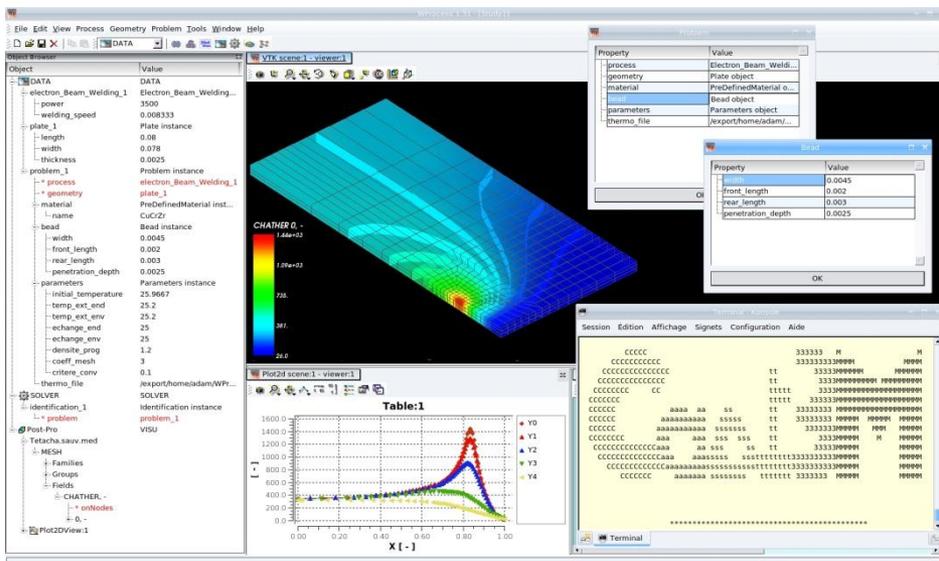
## Solutions

- Modifier la pente du chanfrein
- Ajuster les paramètres de soudage

## Moyens

- Développer un outil numérique représentatif (procédé, géométrie, matériau) et capable de rendre compte des principaux phénomènes physiques en jeu (transfert de chaleur, métallurgie, mécanique) afin de prédire les caractéristiques finales de la soudure (contraintes résiduelles, déformations, ...)





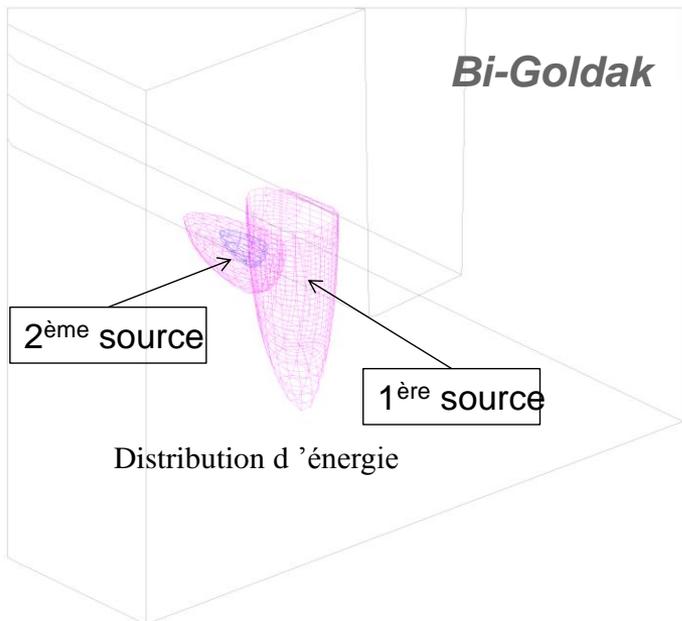
- Réalisation CEA, initiée en 2006 par le projet MUSICA
- Capitaliser nos développements SNS dans un outil logiciel
- Plateforme Salomé (pré et post-traitement, visualisation)
- Solver Cast3M (simulation thermique, mécanique et fluide)
- Bibliothèque d'optimisation sous Python



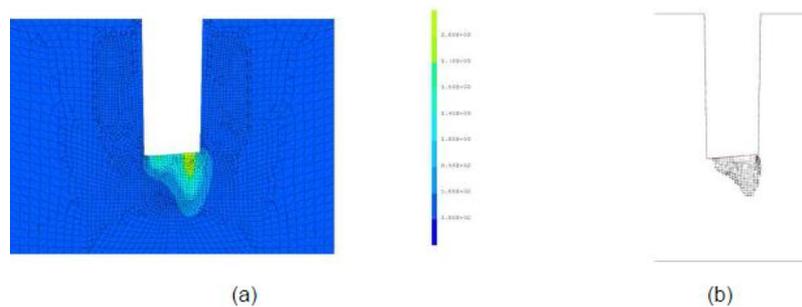
### Fonctionnalités :

- Conception Optimale d'Expérience (définition de l'instrumentation)
- Calculs thermiques (évaluation des températures dans la pièce)
- Calculs fluides (évaluation précises des formes de bain, pénétration)
- Analyse de sensibilité (affiner le modèle)
- Pré et post traitement des calculs (analyse, préparation du modèle, visualisation)
- Détermination de la source de chaleur à partir de thermogrammes ou d'une macrographie ou seulement des « données soudeurs » en vue d'un calcul TmM

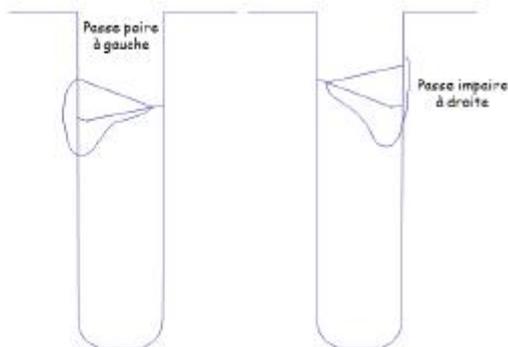
# CHOIX D'UN MODÈLE DE SOURCE



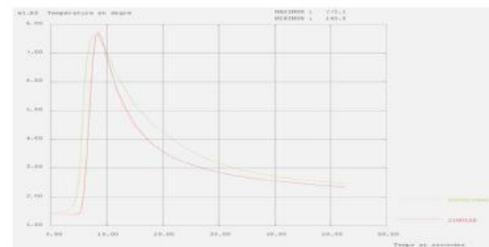
Modèle	Types de sources	Nombre de paramètres
A	2 Goldak	$5 + 5 = 10$
B	2 Goldak + pariétale	$5 + 5 + 2 = 12$
C	2 CIN	$4 + 4 = 8$
D	2 CIN + pariétale	$4 + 4 + 2 = 10$
E	2 Cylindriques	$3 + 3 = 6$
F	2 Cylindriques + pariétale	$3 + 3 + 2 = 8$



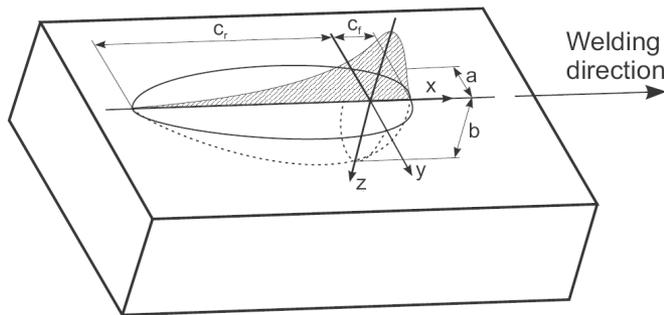
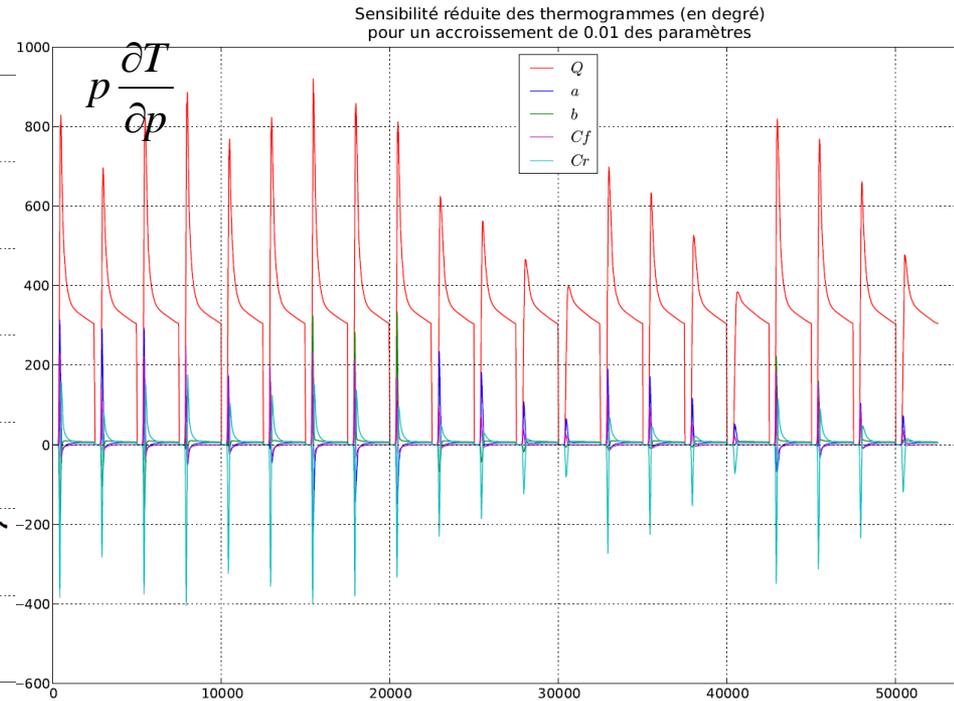
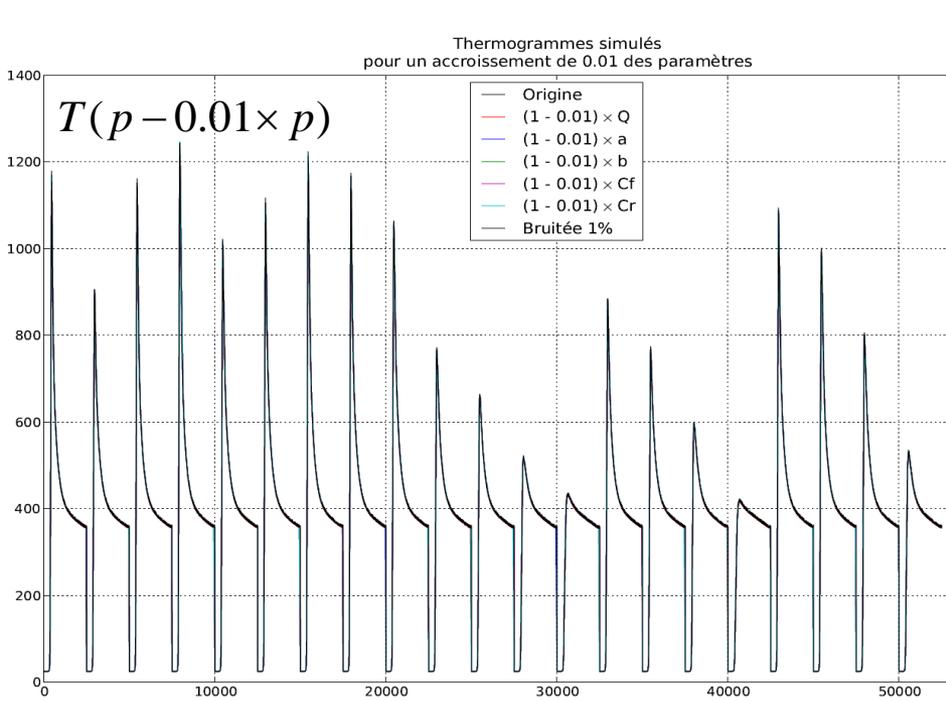
(a)



(b)

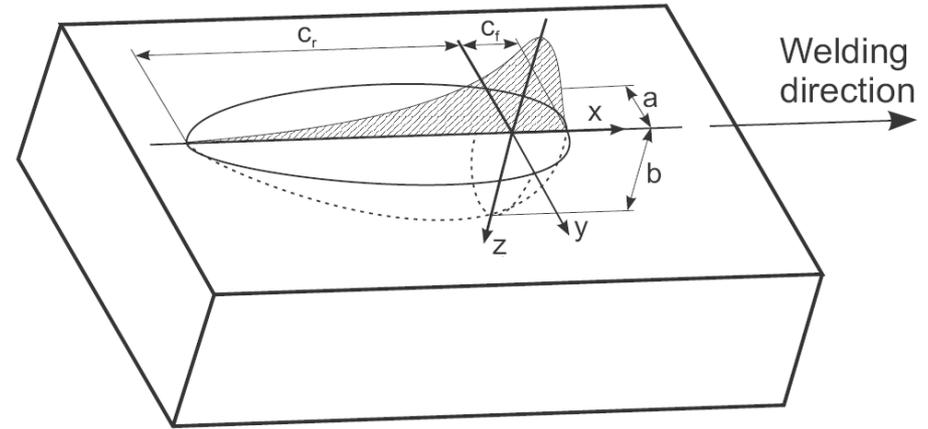
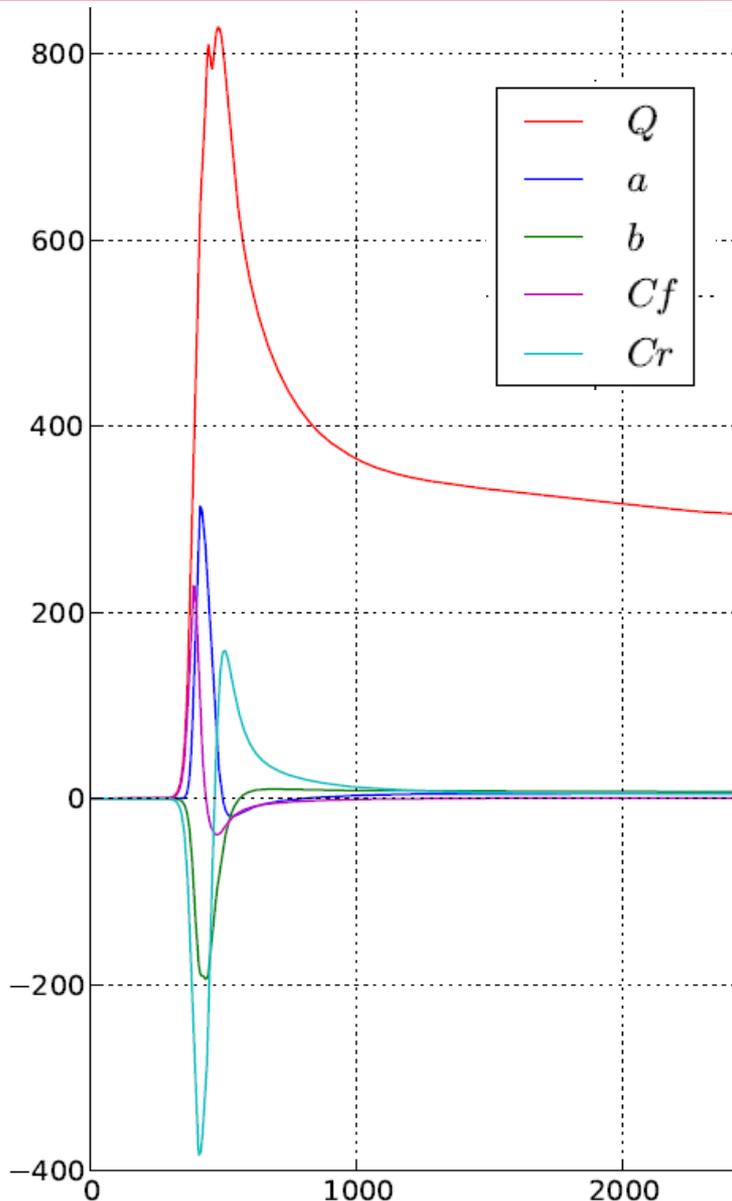


(c)



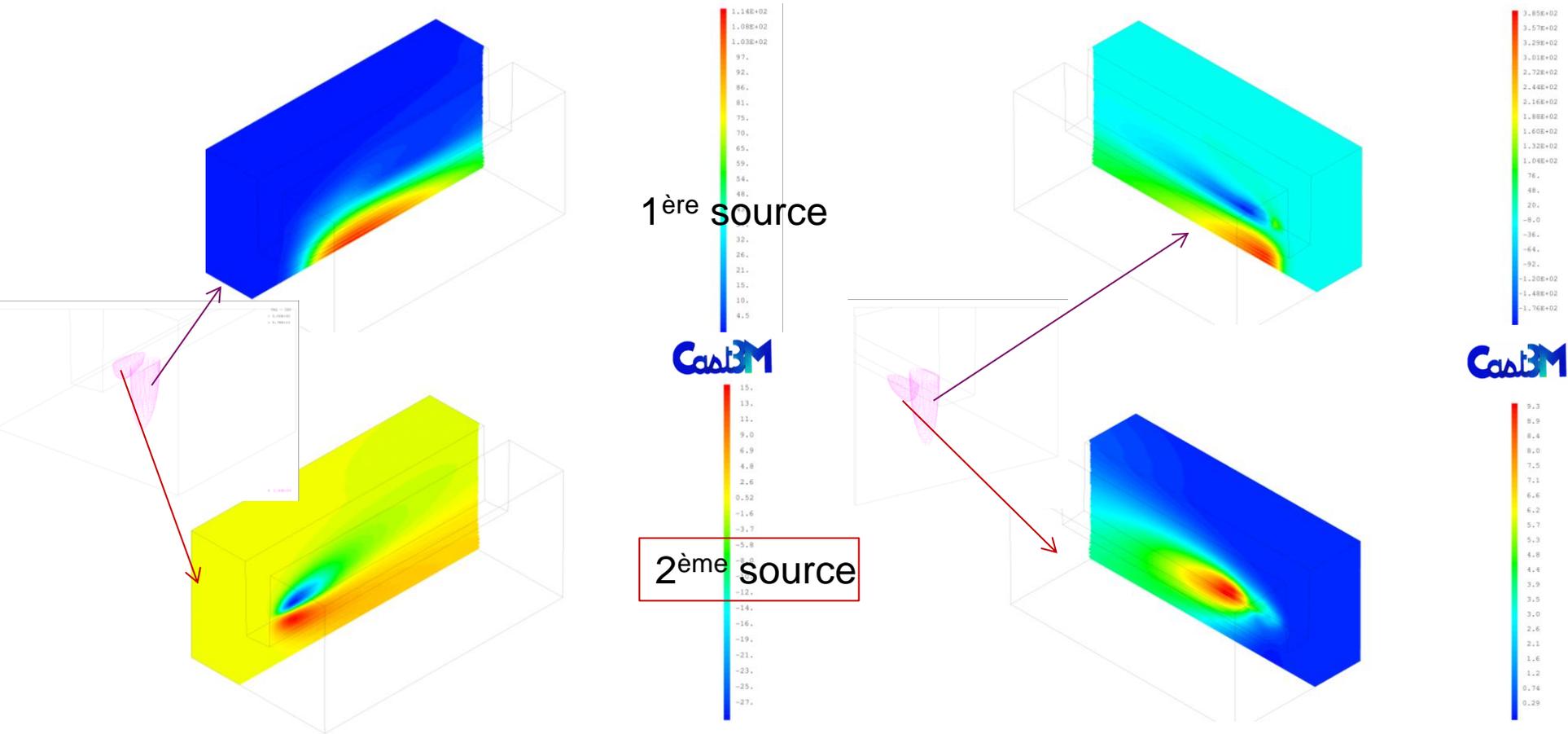
$$q(x, y, z) = r_f \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2} ab C_f} e^{-\frac{3x^2}{C_f^2}} e^{-\frac{3y^2}{a^2}} e^{-\frac{3z^2}{b^2}}$$

$$q(x, y, z) = r_r \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2} ab C_r} e^{-\frac{3x^2}{C_r^2}} e^{-\frac{3y^2}{a^2}} e^{-\frac{3z^2}{b^2}}$$

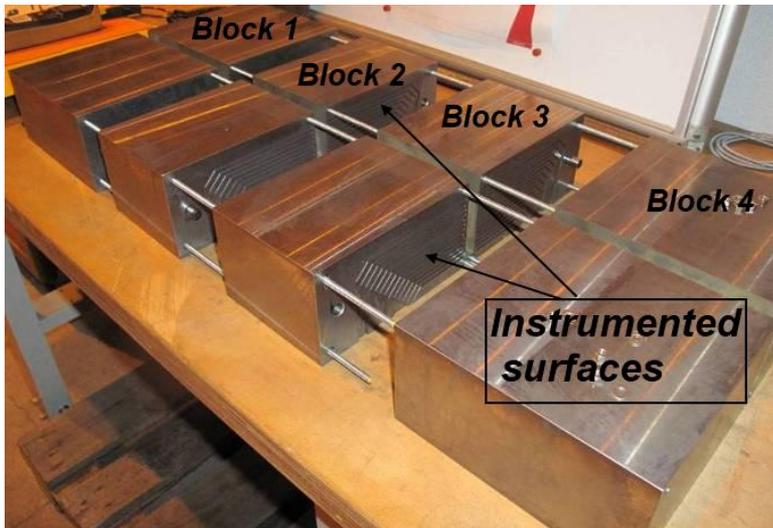


$$q(x, y, z) = r_f \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2} ab C_f} e^{-\frac{3x^2}{C_f^2}} e^{-\frac{3y^2}{a^2}} e^{-\frac{3z^2}{b^2}}$$

$$q(x, y, z) = r_r \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi^{3/2} ab C_r} e^{-\frac{3x^2}{C_r^2}} e^{-\frac{3y^2}{a^2}} e^{-\frac{3z^2}{b^2}}$$



*l'AS montre que dans la zone « instrumentable » en TC, la 2ème source est très peu sensible (20 x moins que la 1ère source), son identification sera difficile, dans ce cas la macrographie est fort utile.*



- Bloc : 600 x 350 x 90 mm<sup>3</sup>
- Chanfrein : 80 x 12 mm<sup>2</sup>
- 2 faces instrumentées 54 thermocouples
- Points de fusion aux interfaces des blocs
- Tiges longitudinales + bridage transversal

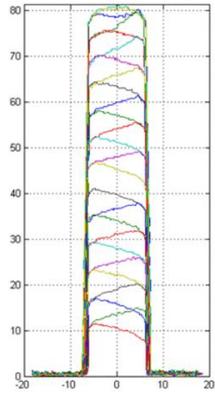
- TC type K –  $\Phi_{\text{fil}} = 50 \mu\text{m}$
- $\Phi_{\text{trou}} = 0,6 \text{ mm}$
- Perçage : 1 mm

# SOUDAGE DE LA MAQUETTE INSTRUMENTÉE

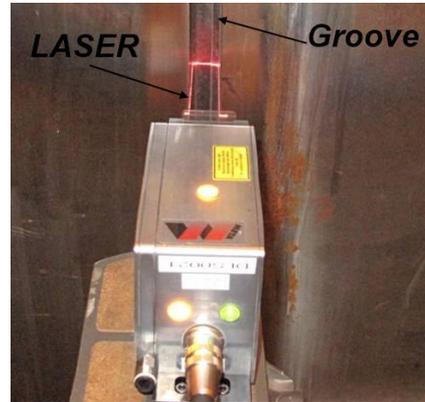
## Acquisition et dépouillement

■ Essais réalisés par le centre technique d'AREVA à Chalon/Saint Marcel

Reconstruction



Profilométrie laser



(DLS 200 Metavision)

Acquisition température et paramètres électriques



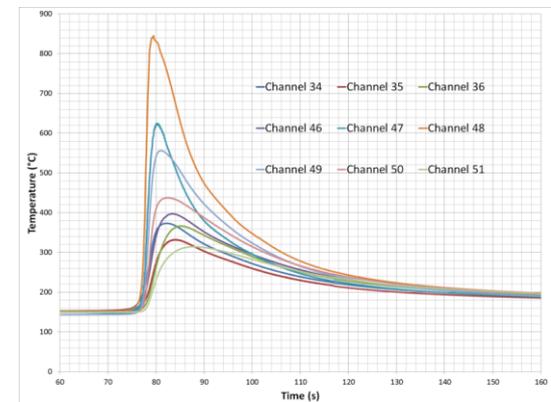
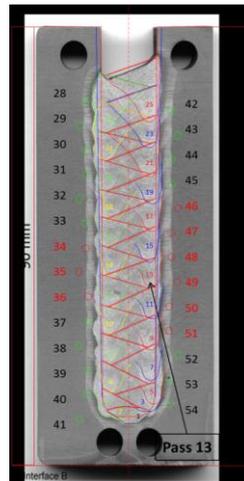
(carte PCXI – 500 Hz ; carte PCI – 10 kHz)

Retrait

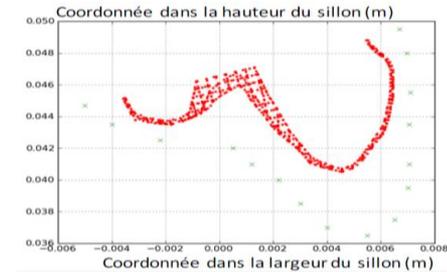
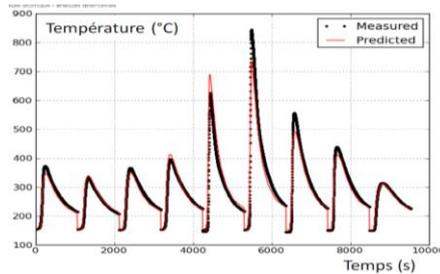
Macrographie

Limite de zone fondue

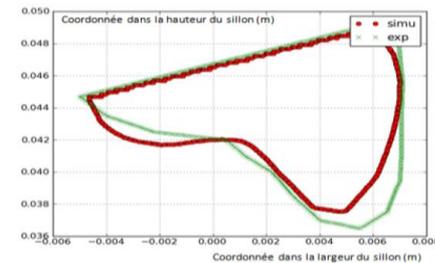
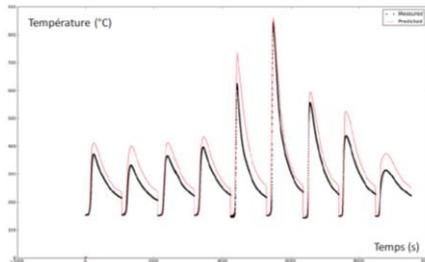
Position réelle TC



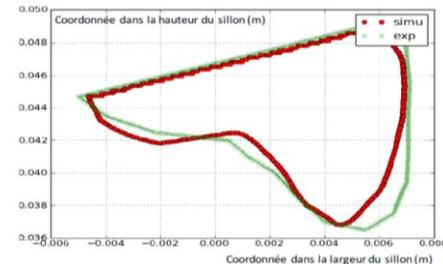
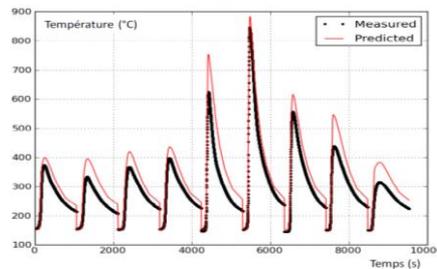
## Optimisation à partir des thermocouples seuls



## Optimisation à partir de la macrographie seule



## Optimisation à partir des thermocouples ET de la macrographie



WProcess 2.3 - [Study1]

File Edit View Visualization Representation Tools Window Help

Object Browser

Name	Value
Post-Pro	VISU
DATA	DATA
KT156_01_20122011	Experiment in...
processes	
[0]	MIO instance
welding_speed	0.0058333
voltage	31.6
current	340
shielding_gaz	ARGON
arc_length	0.005
electrode_included_angle	60
sources	
[0]	Goldak instance
[1]	Goldak instance
geometry	P156 instance
length	0.25
width	0.22
thickness	0.06
lchan	0.012
hliga	0.01
chang	1
lbas	0.004
bead	Bead instance
width	0.009
penetration_depth	0.0045
front_length	0.009
rear_length	0.009
points	
parameters	Parameters in...
material	S355
thermogrammes	H/WPN/2.20...
macrography	H/WPN/2.20...
virtual_p_length	0.3
densite_prog	1.4
coeff_mesh	1.1
critere_conv	5.1
initial_temperature	144
temp_ext_end	20
temp_ext_env	20
echange_end	10
echange_env	10
actions	

VTK scene.2 - viewer.1

Plot2d scene.1 - viewer.1

TC\_passe13.dat.exp; TC\_passe13.dat.simu

Plot2d scene.2 - viewer.1

Table:0

VTK scene.1 - viewer.1

# Outil de calcul des retraits

## Principe de fonctionnement



### ► Exigences & Motivations

- ◆ Aide au développement des MOS (productivité, qualité)
- ◆ Mieux comprendre les processus de fabrication et leurs conséquences
- ◆ Outil de simulation : justification, réduction d'essais
- ◆ Disposer d'un outil ergonomique, facile à utiliser

### ► Spécificités de l'outil

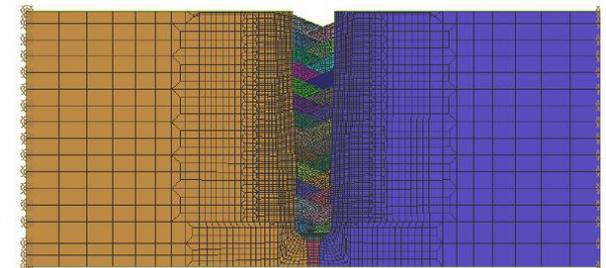
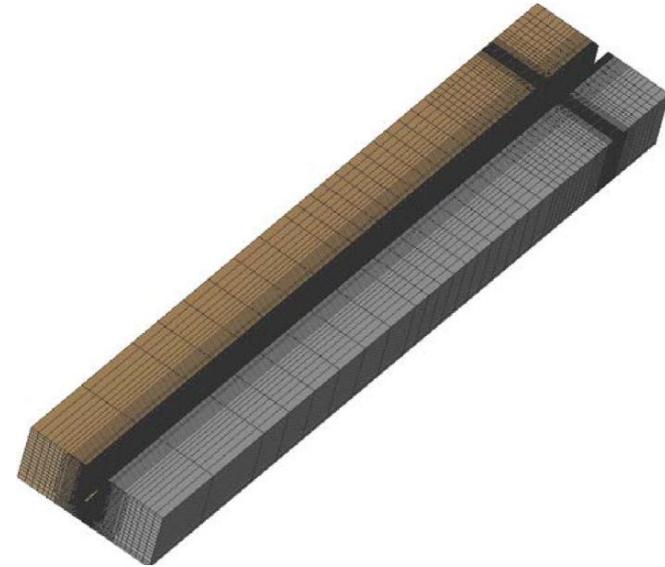
- ◆ Dédié au soudage multi-passe en chanfrein étroit profond
- ◆ Spécifique aux applications AREVA (usage interne)
- ◆ Développé sous SYSWELD en partenariat avec ESI Group (SIL)
- ◆ Deux modes d'utilisation

# Outil de calcul des retraits

## Principe de fonctionnement

### ► Fonctionnement de l'outil – mode soudeur

- ◆ **Séries de calculs thermiques, métallurgiques et mécaniques sous SYSWELD**
- ◆ **Maillage automatique**
- ◆ **Séquençage automatique**
  - Calcul thermique 3D – déplacement d'une source de chaleur équivalente (calage)
  - Calcul thermo-métallurgique 2D axi. (température, ZAT)
  - Calcul mécanique 2D axi. (contraintes, déformations)
- ◆ **Gestion du multipasse**
  - Joints soudés prémaillés
  - Activation de cordon à chaque passe
  - Actualisation de la géométrie après chaque passe (retrait)
- ◆ **Post-traitement automatique**
  - Évolution du retrait en haut de chanfrein
  - Contraintes en soudage, contraintes résiduelles
  - Déformations plastiques



# Outil de calcul des retraits

## Intégration de la source

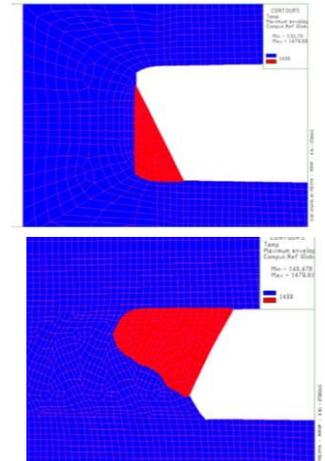


### ► Calcul thermo-métallurgique

- ◆ Utilisation d'un cycle thermique représentatif établi lors du calage de la source de chaleur
  - Deux premiers cordons : imposition aux nœuds des cordons
  - Ensuite : imposition aux éléments inclus dans la zone fondue

### ► Calcul mécanique

- ◆ Modèle élasto-plastique, écrouissage isotrope
  - Annulation de l'histoire du matériau à la fusion
  - Intégration de déformations liées aux changements de phases
  - Restauration de l'écrouissage au changement de phase
- ◆ Hypothèse de déformations planes (bridage)

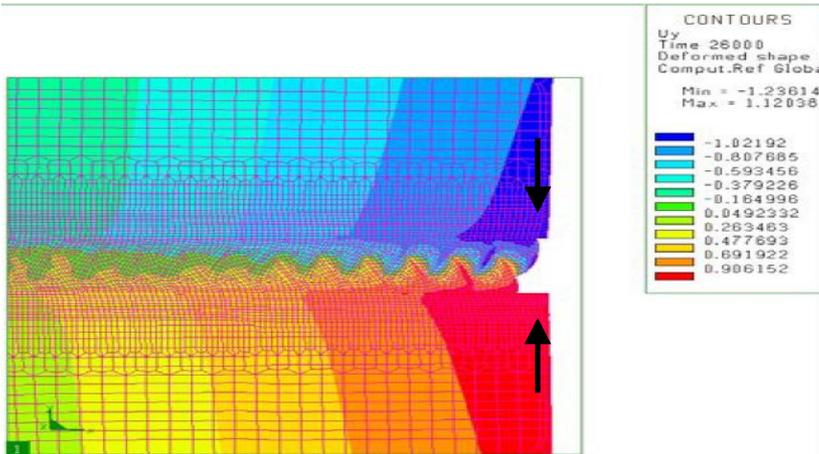


# Outil de calcul des retraits

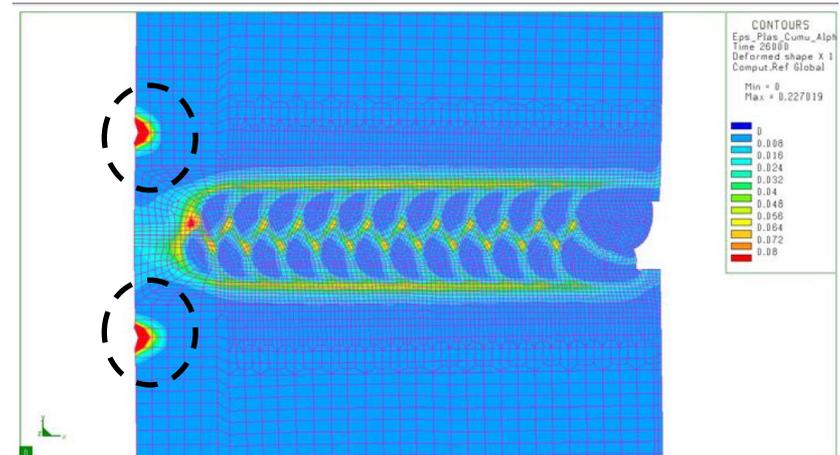
1<sup>ers</sup> résultats

## ► Calcul mécanique

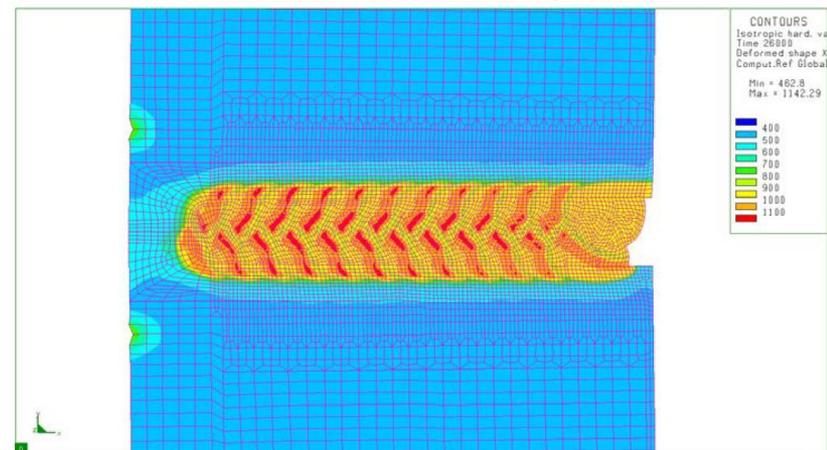
### Déformée finale



### Déformations plastiques cumulées



### Variable d'écouvissage finale



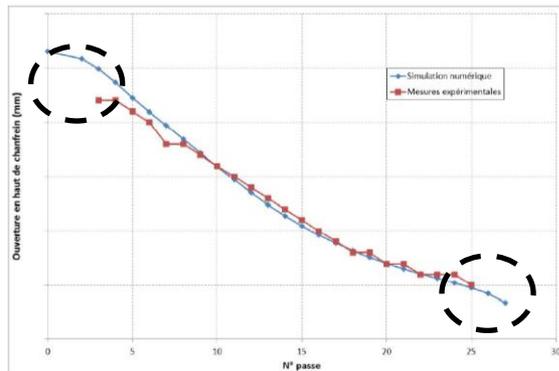
**AREVA**  
forward-looking energy

# Outil de calcul des retraits

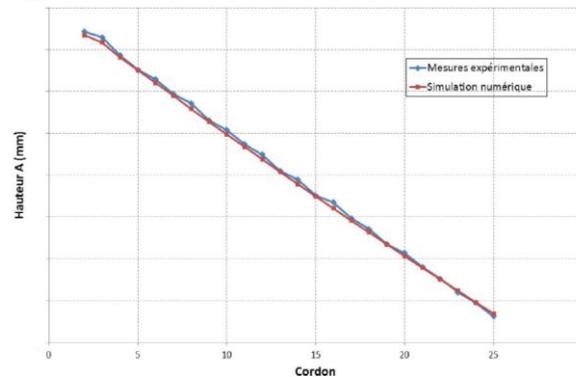
1<sup>ers</sup> résultats

## ► Calcul mécanique

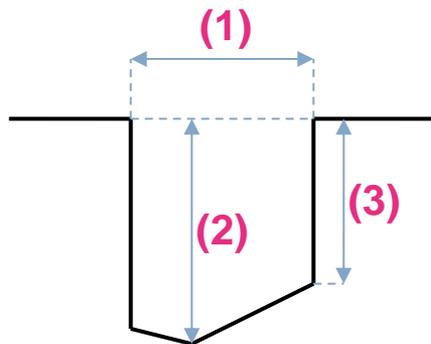
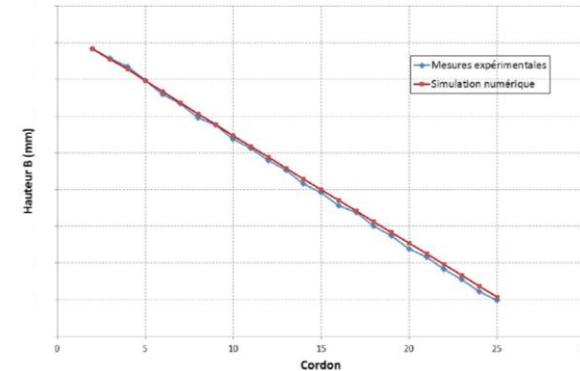
(1)



(2)



(3)



**Pas d'acquisition pour passes de fusion et finition**

**Déplacements correctement prédits**

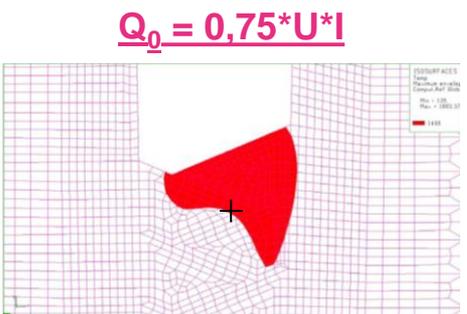
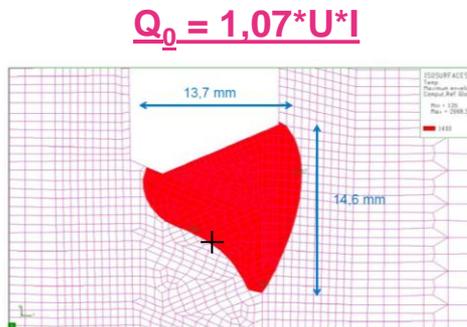
**Procédure d'actualisation des dépôts validée**

**1<sup>ère</sup> version satisfaisante**

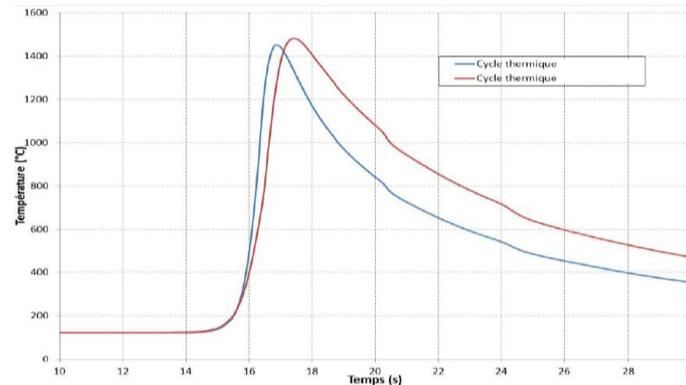
# Outil de calcul des retraits

1<sup>ers</sup> résultats

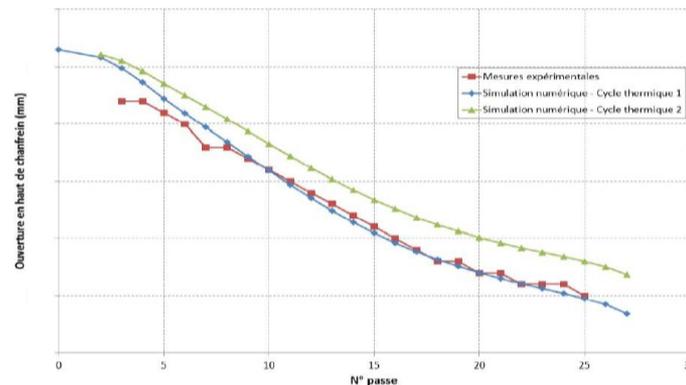
## ► Calcul thermo-mécanique – coefficient de rendement



### Cinétique thermique



### Retrait



> Meilleurs résultats avec rendement de 1,07

> Erreur maximale inférieure à 0,5 mm

# Outil de calcul des retraits

## Bilan intégration source



### ► Conclusion intermédiaire

- ◆ Etude de faisabilité : 1<sup>ers</sup> résultats satisfaisants
  
- ◆ Affinement des conditions aux limites du bridage
- ◆ Comparaison de cinétiques thermiques exp/num
  
- ◆ Spécification des paramètres de soudage des 1<sup>ères</sup> passes
- ◆ Caractéristiques des cordons de finition
- ◆ Position de soudage en corniche
  - Paramètres de soudage variables selon le retrait
  - Différence droite-gauche

1. La méthodologie mise en œuvre donne satisfaction, mais il faudrait allégé le processus
2. Les modèles sont implantés dans les divers outils logiciel (WPROCESS pour le CEA et l'Outil de calcul des retraits pour AREVA NP)
3. Il reste à comprendre l'origine des écarts entre la simulation thermique et les mesures et à en peser les conséquences au regard de la finalité qui est la prédiction du retrait de chanfrein