

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# ESTIMATION NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DES CONTRAINTE RÉSIDUELLES DANS DES STRUCTURES SOUDÉES HÉTÉROGÈNES MULTIPASSE

Alix Bonaventure<sup>1</sup>, Danièle Ayrault<sup>1</sup>, Olivier Asserin<sup>1</sup>,  
Olivier Doyen<sup>1</sup>, Guillaume Montay<sup>2</sup>, Vincent Klosek<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CEA Saclay, DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA

<sup>2</sup> Université de Technologie de Troyes

<sup>3</sup> CEA Saclay, DSM/IRAMIS/LLB

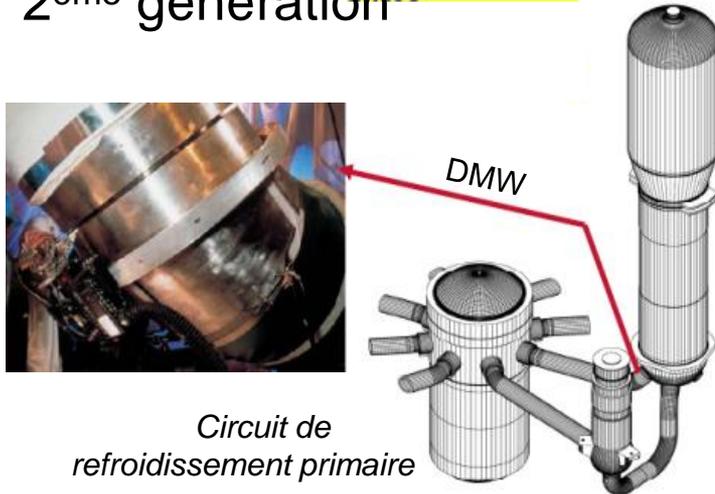


[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

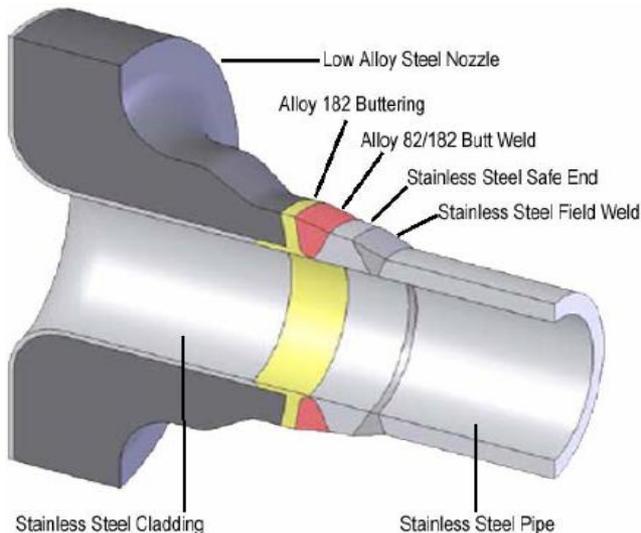
28 Mars 2013, SNS, La Défense

# Contexte (1/2)

## ■ Liaisons Bi-Métalliques (LBM) de réacteurs à eau sous pression (REP) de 2<sup>ème</sup> génération



Circuit de refroidissement primaire



### METAL DE BASE 1 : 16MND5

- Acier bainitique faiblement allié
- Transformations de phases à l'état solide
- Conductivité thermique élevée

### METAL DE BASE 2 : 316L

- Acier inoxydable austénitique
- Conductivité thermique faible et coefficient de dilatation élevé
- Limite d'élasticité faible

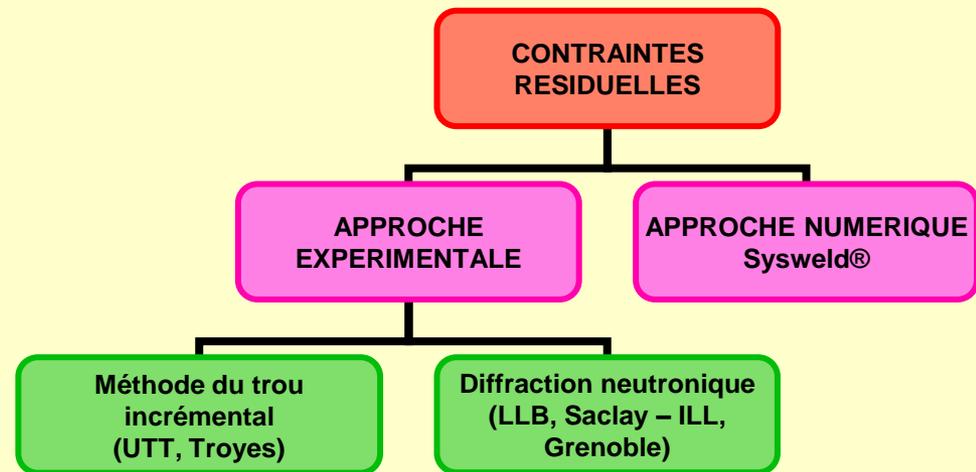
### METAL D'APPORT : INCONEL 82

- Alliage base Nickel
- Structure austénitique
- Propriétés intermédiaires avec 16MND5 et 316L

## ■ Analyse de la durabilité des soudures

- Indispensable de connaître les contraintes résiduelles (rôle important dans la tenue en service)
- Améliorer la mise au point de traitements de mitigation

Evaluation et analyse du **champ de contraintes résiduelles** dans une **structure hétérogène épaisse**





## 1. Fabrication de la soudure hétérogène



## 2. Mesures de contraintes résiduelles

- Diffraction neutronique
- Méthode du trou incrémental



## 3. Simulation du soudage



## 4. Comparaison mesures vs. simulation



## 1. Fabrication de la soudure hétérogène



## 2. Mesures de contraintes résiduelles



## 3. Simulation du soudage

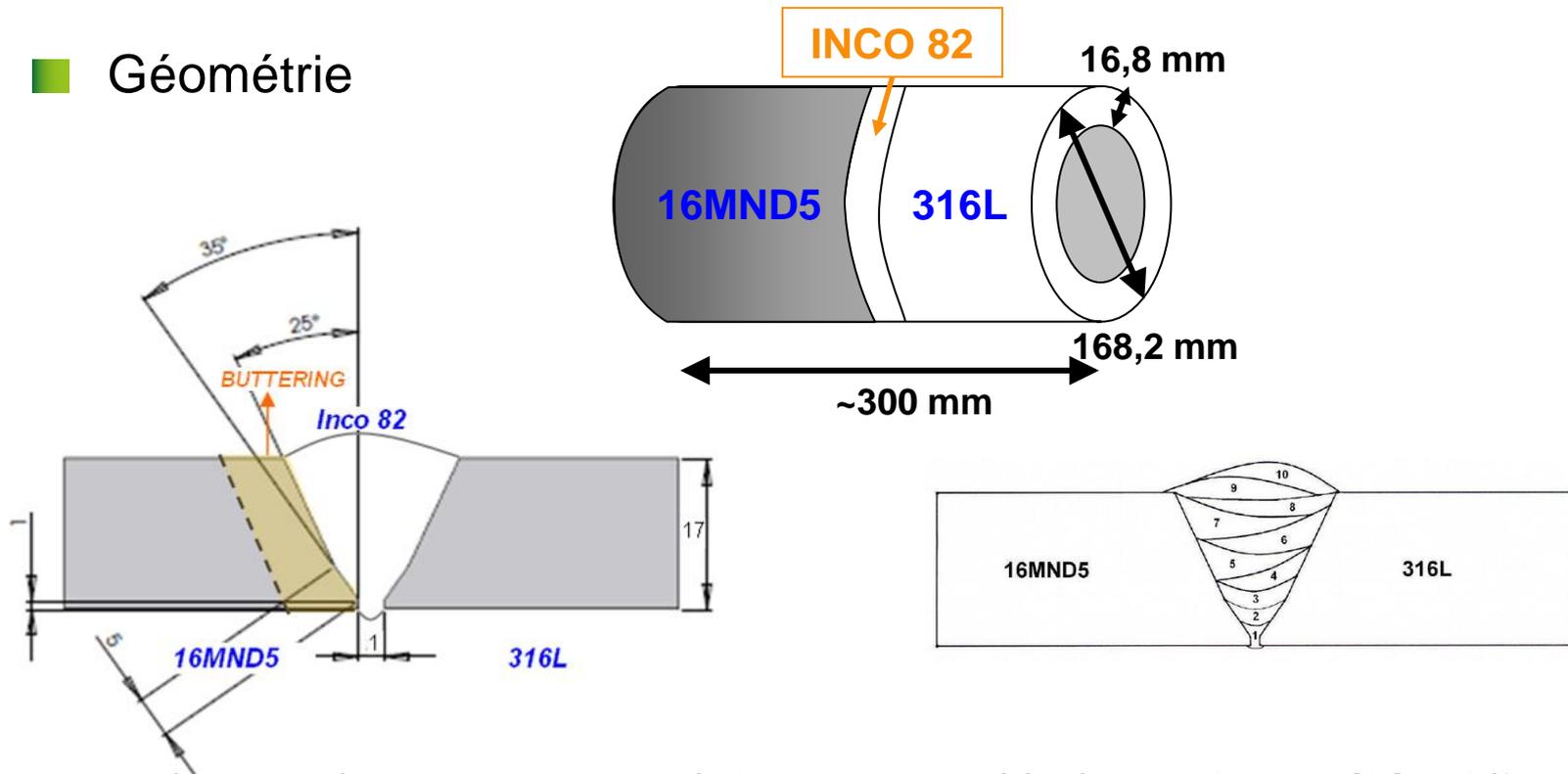


## 4. Comparaison mesures vs. simulation

## ■ Composition chimique (w%)

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
<b>316L</b>	0,015	0,50	1,36	0,031	0,001	16,75	11,21	2,14		Bal.
<b>16MND5</b>	0,17	0,25	1,44	0,004	0,002	0,2	0,75	0,51		Bal.
<b>INCO 82</b>	0,005	0,12	3,10	0,002	0,002	20,49	73,15		0,30	0,10

## ■ Géométrie

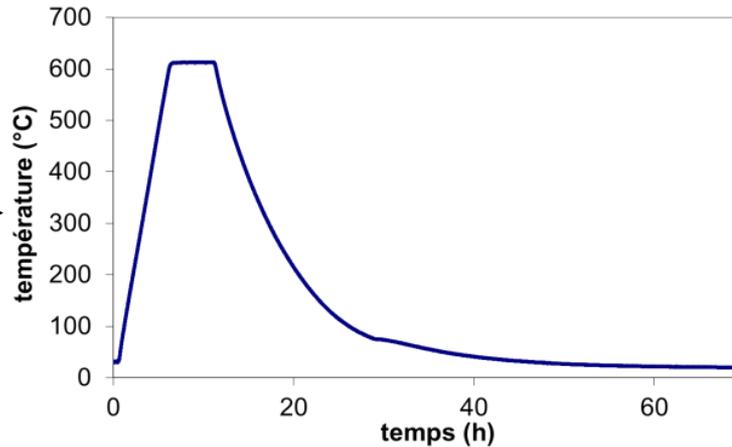
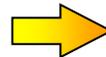


# Fabrication – Procédure



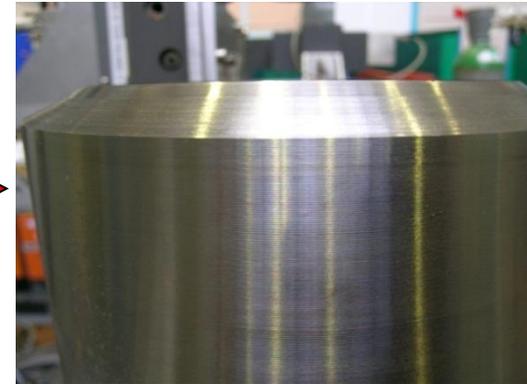
## 1. PRECHAUFFAGE et BEURRAGE

TIG auto : beurrage du 16MND5 par de l'INCO 82 (épaisseur 10 mm)



## 2. TTH POST-BEURRAGE

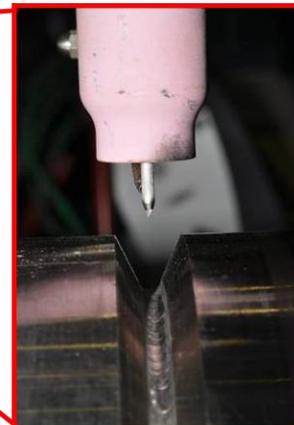
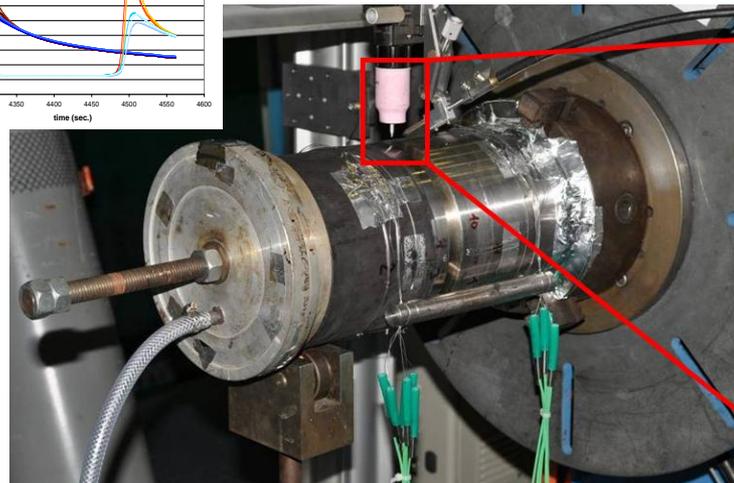
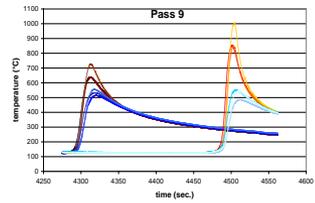
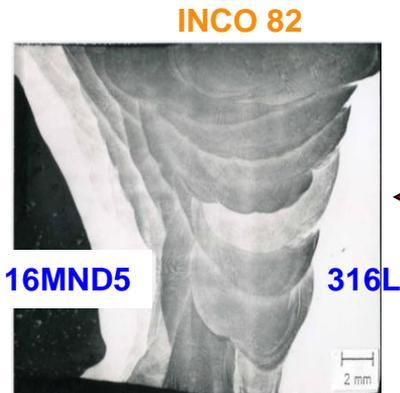
615°C/5h/refroidissement air



## 3. USINAGE



## 4. REMPLISSAGE TIG auto (sauf pour la passe de racine)

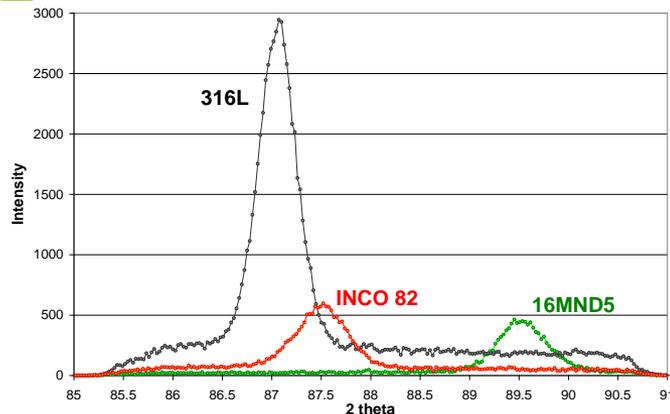




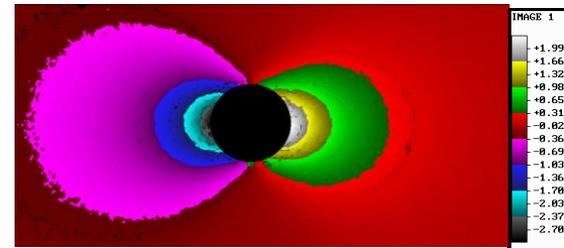
## 1. Fabrication de la soudure hétérogène



## 2. Mesures de contraintes résiduelles



Neutron Diffraction  
LLB, Saclay



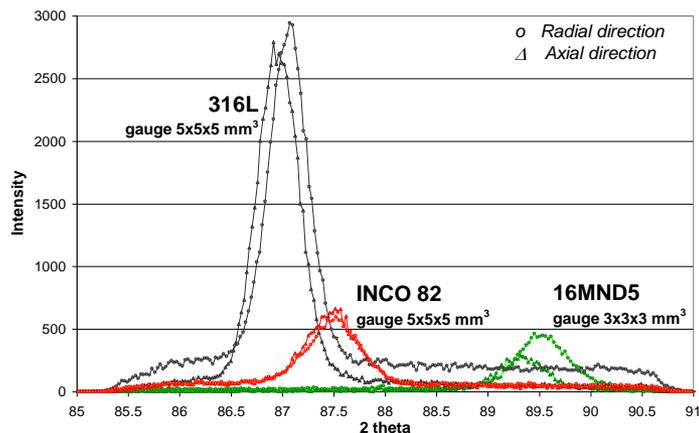
## 3. Simulation du soudage



## 4. Comparaison mesures vs. simulation

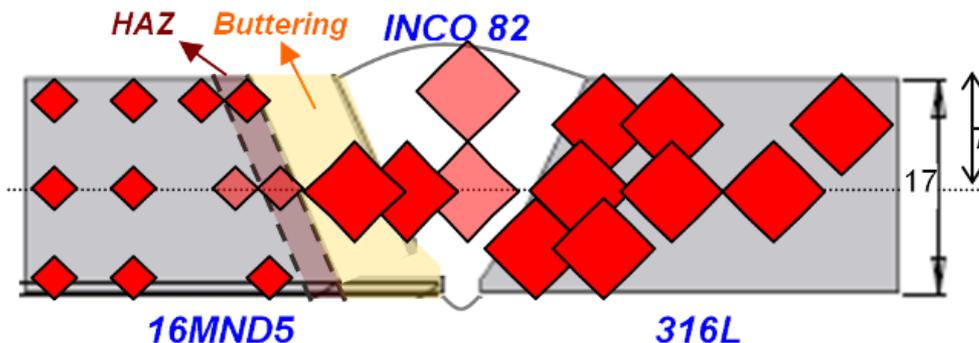
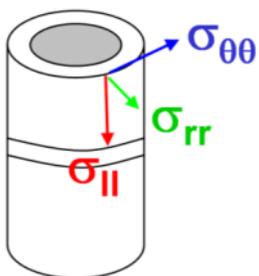
## Méthode

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1 \quad \longrightarrow \quad \sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[ \varepsilon_i + \frac{\nu}{1 - 2\nu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right] \quad i = r, \theta, z$$

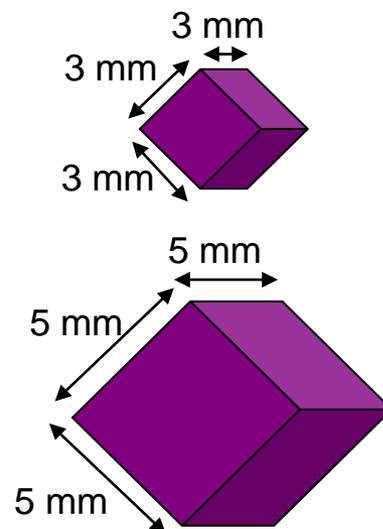


$\theta$  : angle de Bragg  
 $d$  : distance inter-réticulaire  
 $d_0$  : distance inter-réticulaire de référence  
 $\nu$  : coefficient de Poisson  
 $E$  : module d'Young

## Conception expérimentale

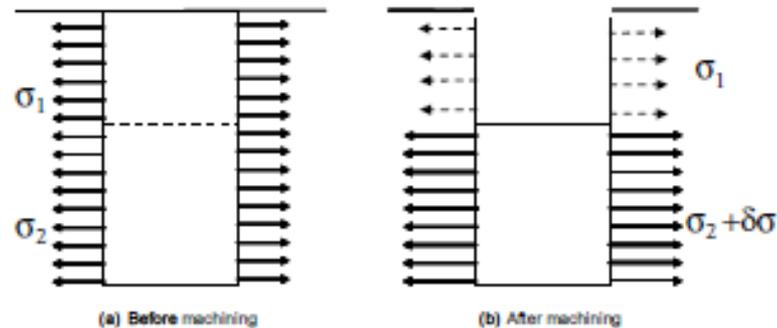


### Taille de gauge

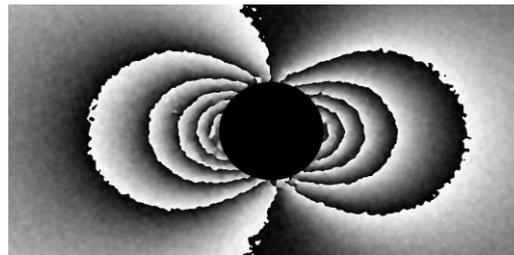


## ■ Relaxation des contraintes internes

- L'enlèvement de matière par le perçage d'un trou relâche les contraintes qui siègent dans la structure
- Création en surface de déplacements et déformations

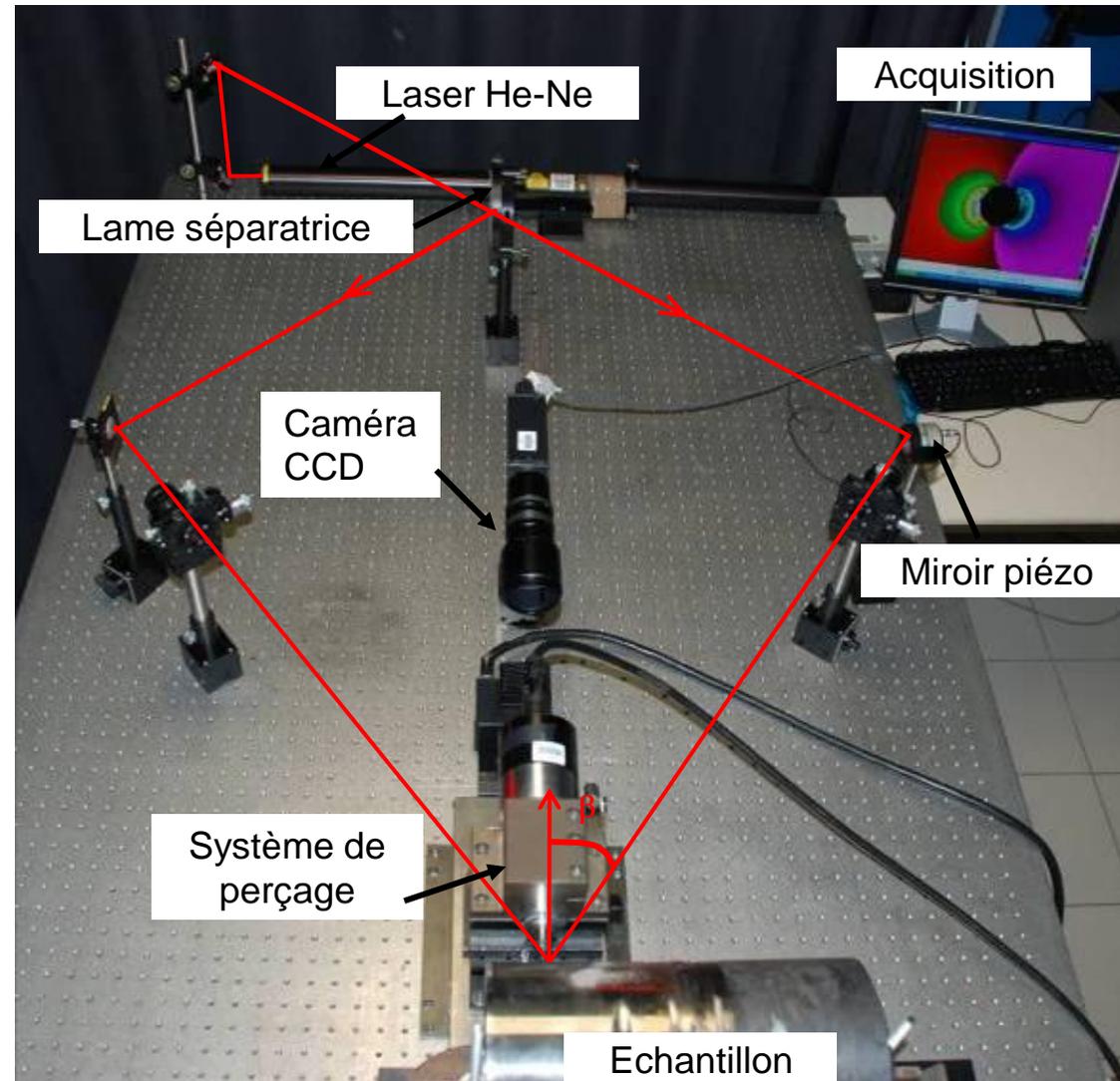


## ■ Mesure des champs de déplacements par méthode optique



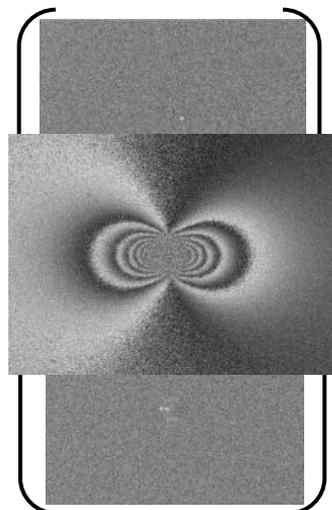
## Conditions expérimentales

- Diamètre du trou = 2 mm
- Interférométrie de Speckle
- Laser He-Ne ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ )
- Mesures en décalage de phase (4 images)



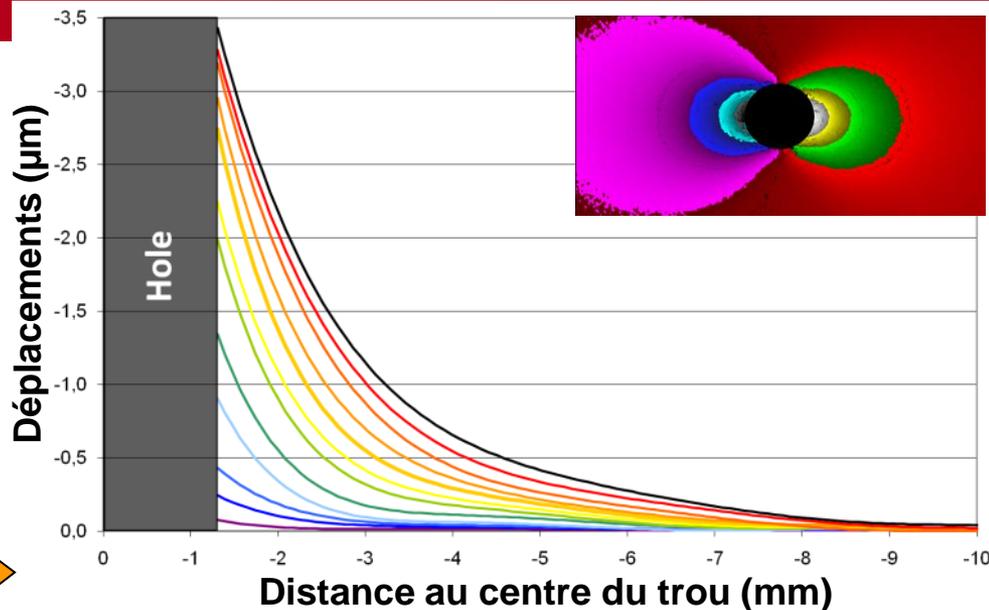
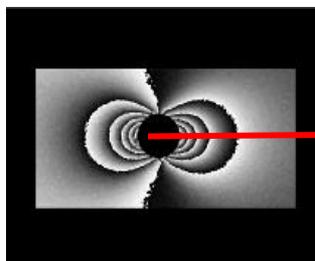
# Méthode du trou incrémental

Etat de référence

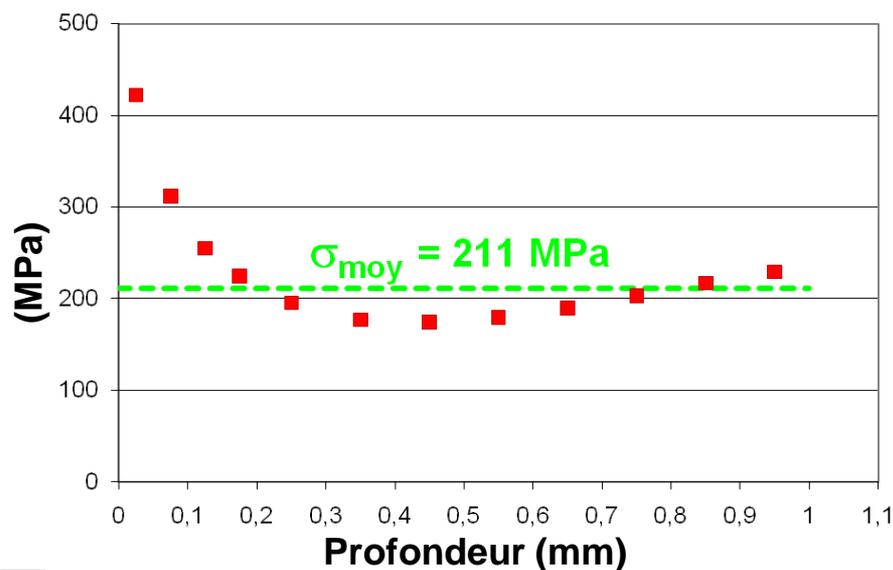


Etat final

$$\Delta u = \frac{\lambda}{4\pi \sin \beta} \Delta \varphi$$



Contraintes résiduelles axiales



$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_n^*}{2A_{nn}} = \frac{\varepsilon_n - \sum_{i=1}^{n-1} 2A_{ni}\sigma_i}{2A_{nn}}$$



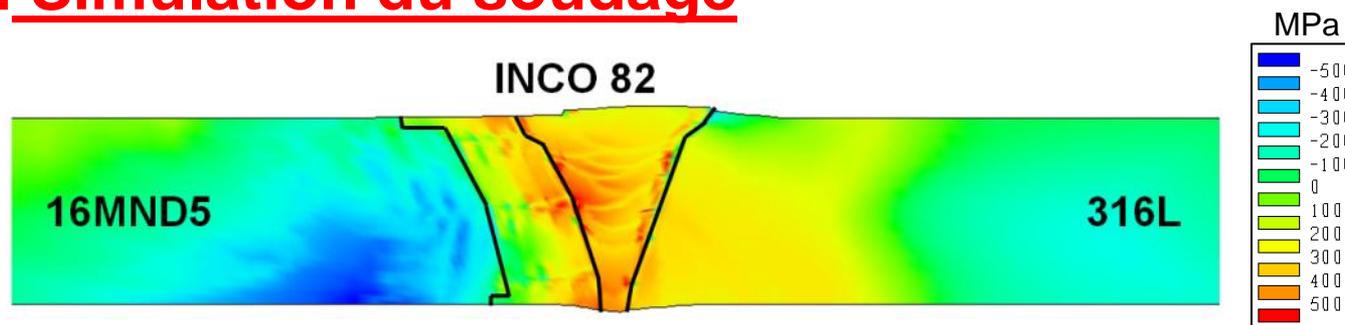
1. Fabrication de la soudure hétérogène



2. Mesures de contraintes résiduelles



3. Simulation du soudage

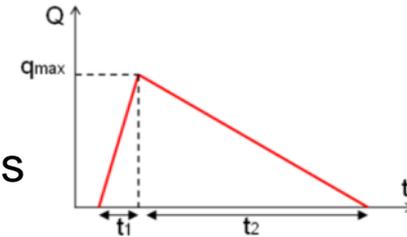


4. Comparaison mesures vs. simulation

# Modèle numérique (1/2)

- 2D axisymétrique

- Source de chaleur : densité de flux de chaleur temporel  
→ calée à partir de la macrographie et du suivi des températures



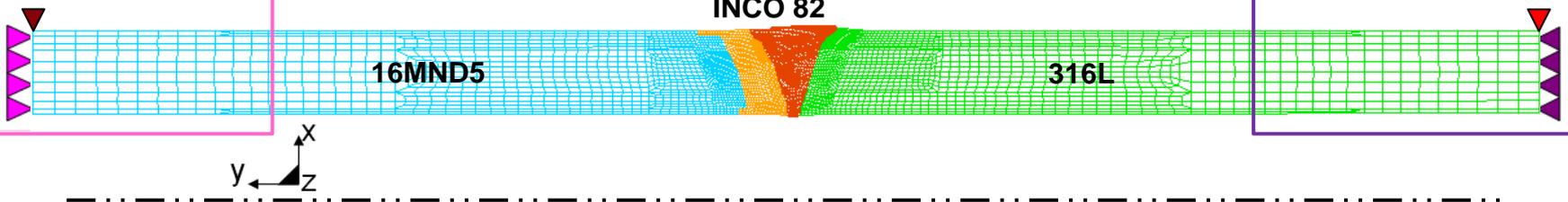
- Métallurgie : transformations de phases du 16MND5

- Mécanique

- Comportement EP (EVP pour TTPB)
- Ecrouissage isotrope
- Plasticité de transformation

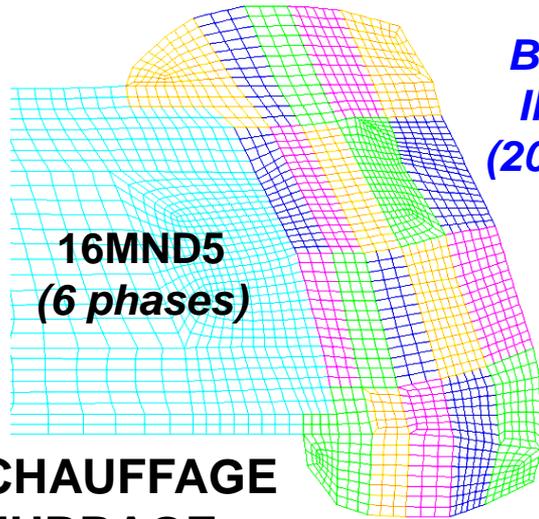
- Méthode d'activation/désactivation des éléments pour simuler le métal d'apport et l'usinage

Conditions aux limites  
BEURRAGE

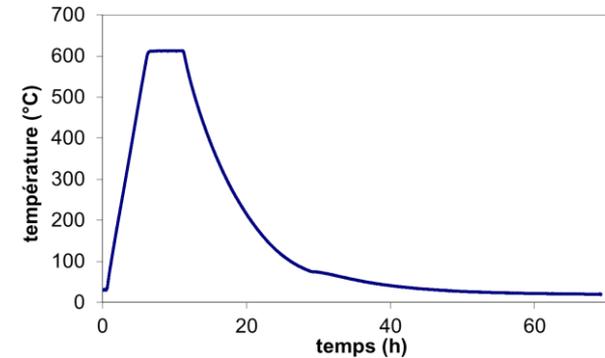


Conditions aux limites  
REPLISSAGE

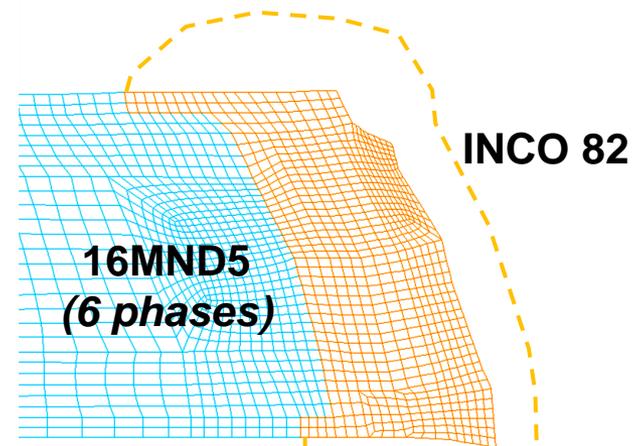
# Modèle numérique (2/2)



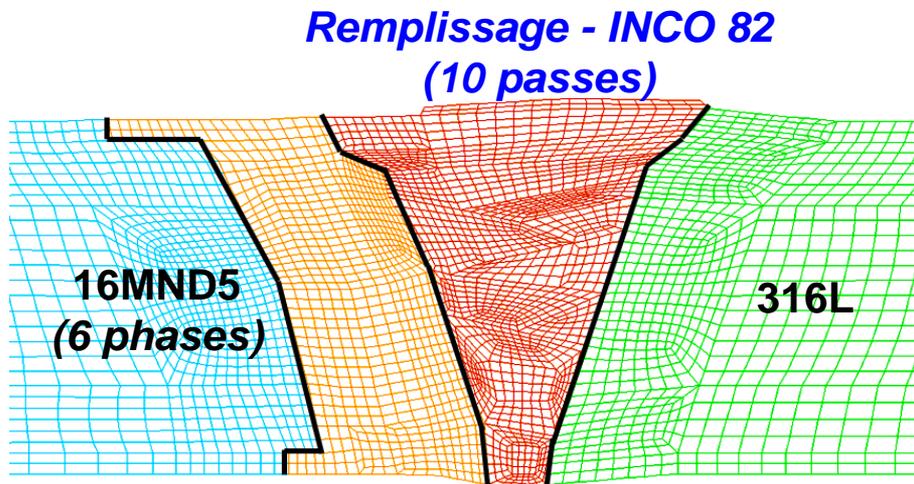
## 1. PRECHAUFFAGE et BEURRAGE



## 2. TTH POST-BEURRAGE



## 3. USINAGE



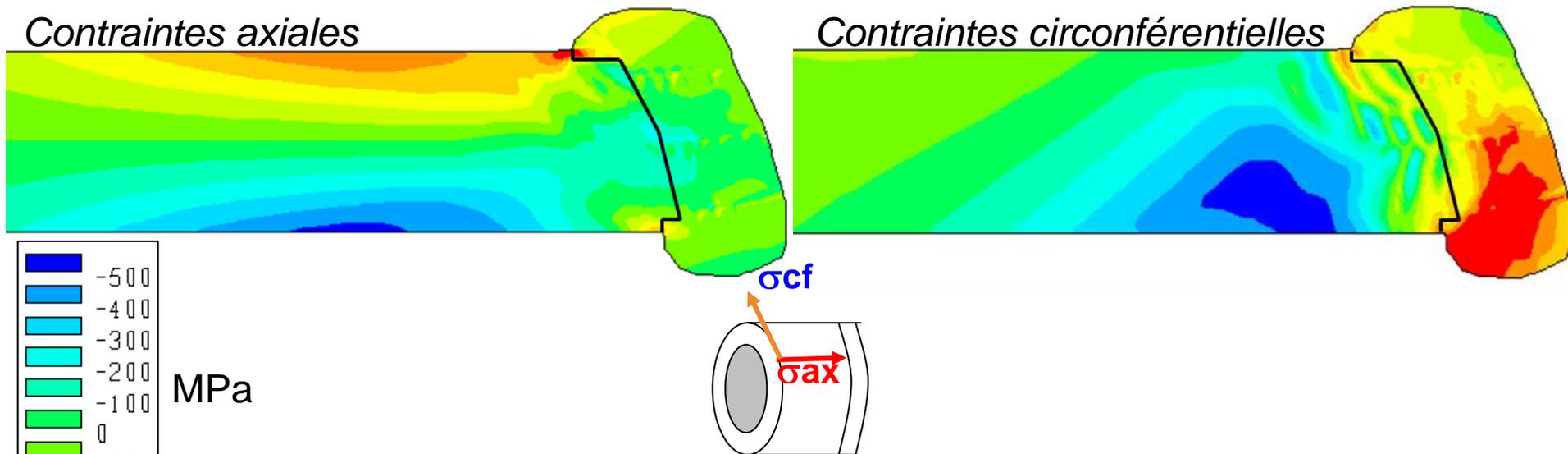
## 4. REMPLISSAGE

# Contraintes résiduelles

## Après beurrage

Contraintes axiales

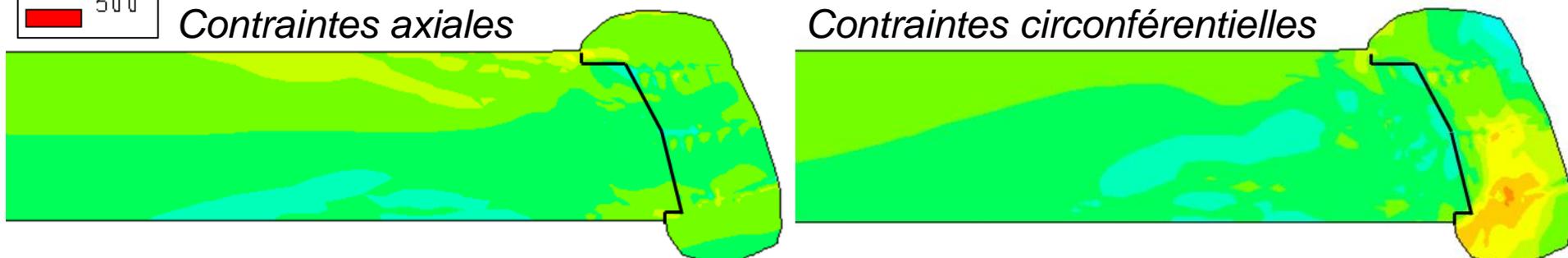
Contraintes circonférentielles



## Après traitement thermique post-beurrage (TTBP)

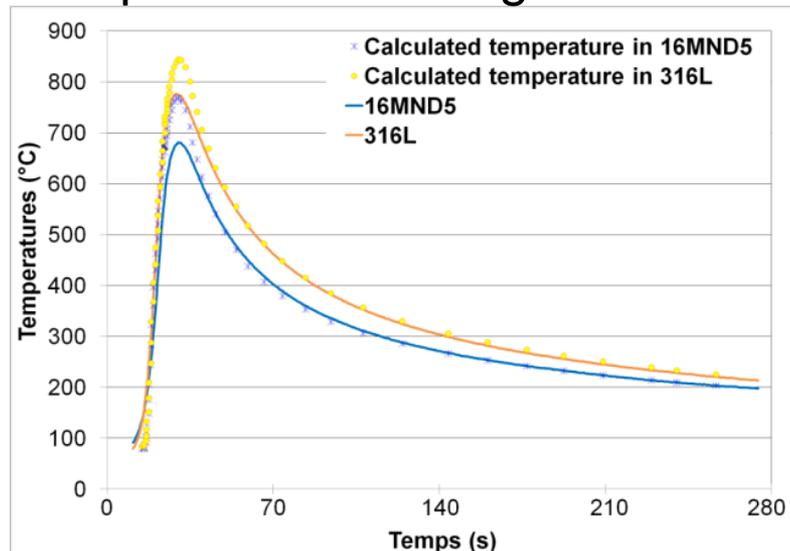
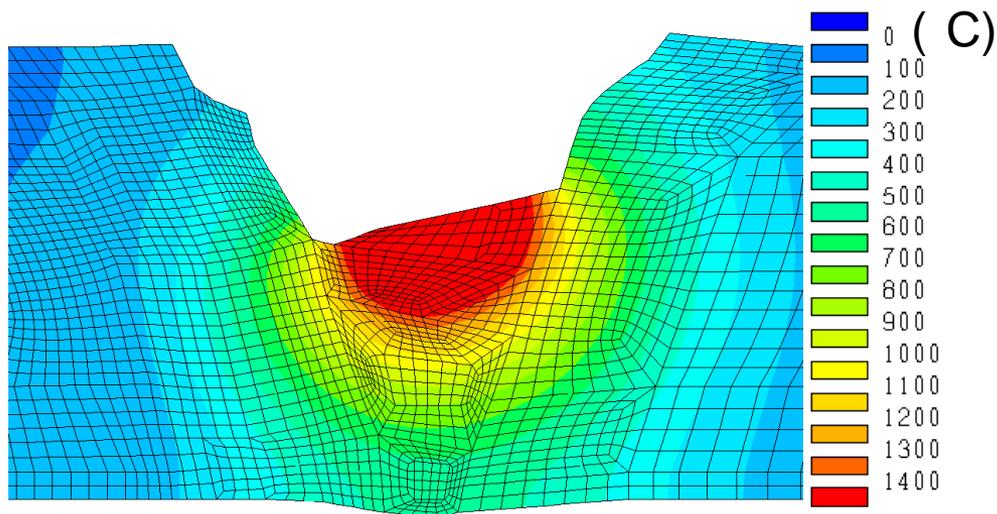
Contraintes axiales

Contraintes circonférentielles

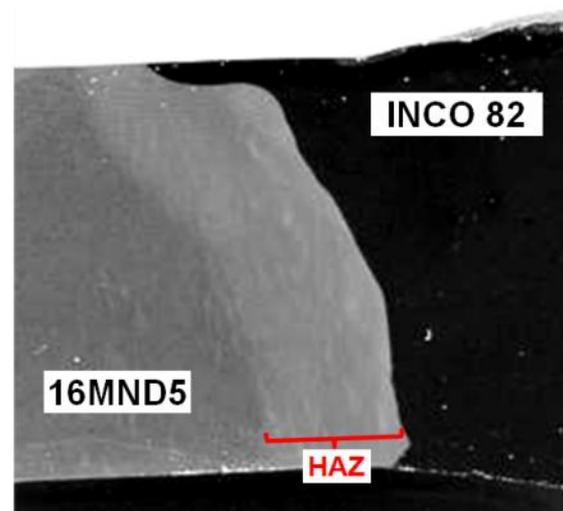
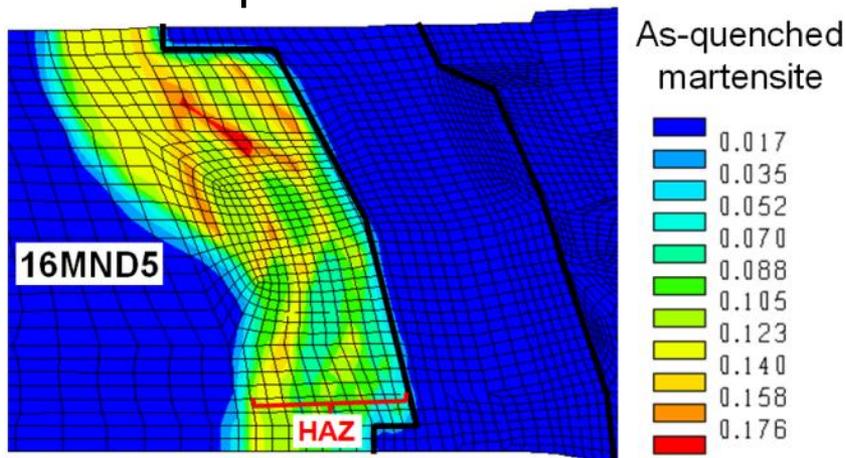


# Résultats thermo-métallurgiques

## Distribution de températures pendant la 4<sup>ème</sup> passe de soudage

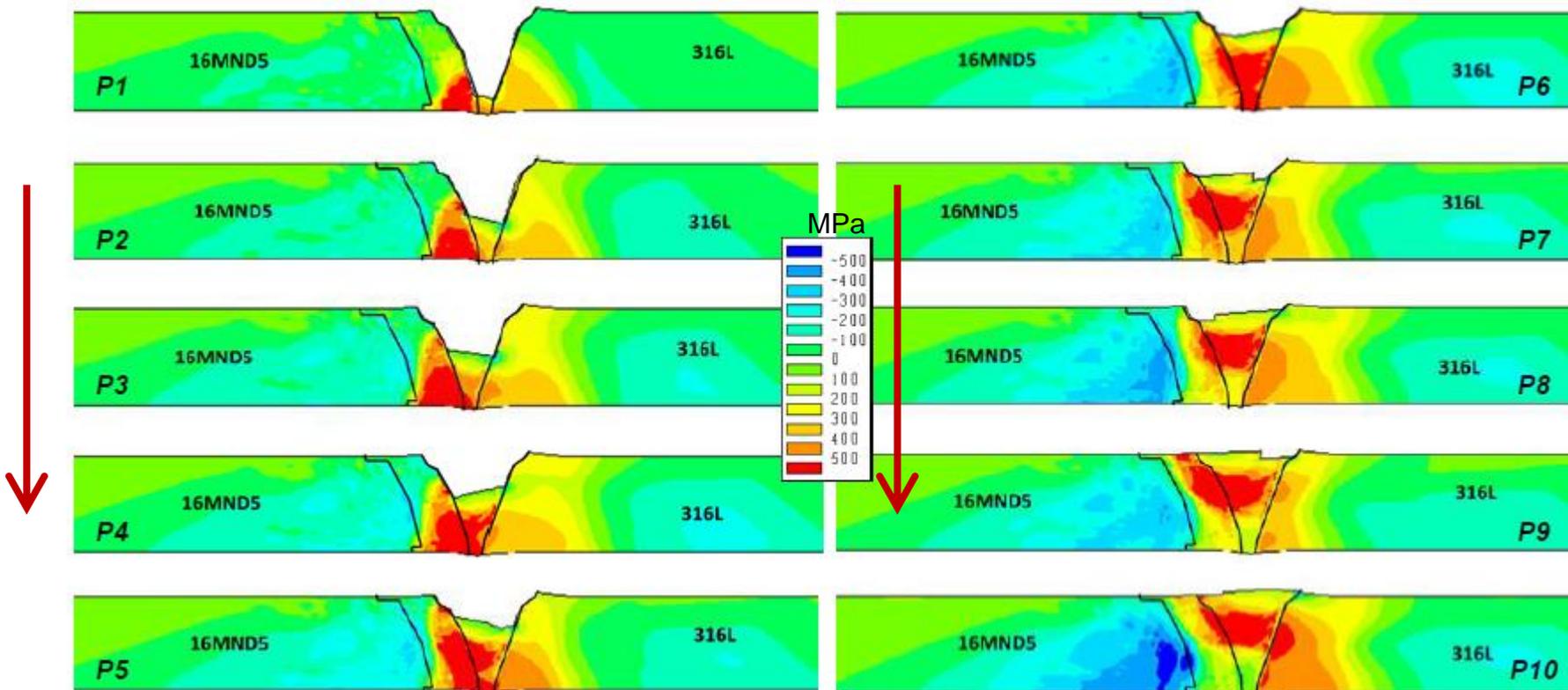


## ZAT simulée et expérimentale



# Contraintes en cours de soudage

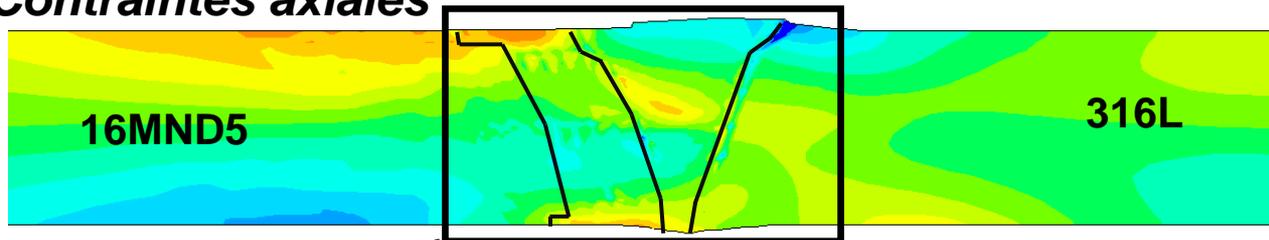
- Distribution des contraintes résiduelles circonférentielles après chaque passe de soudage



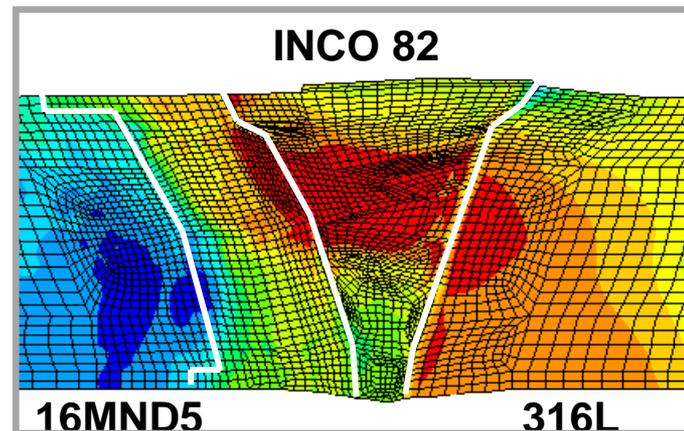
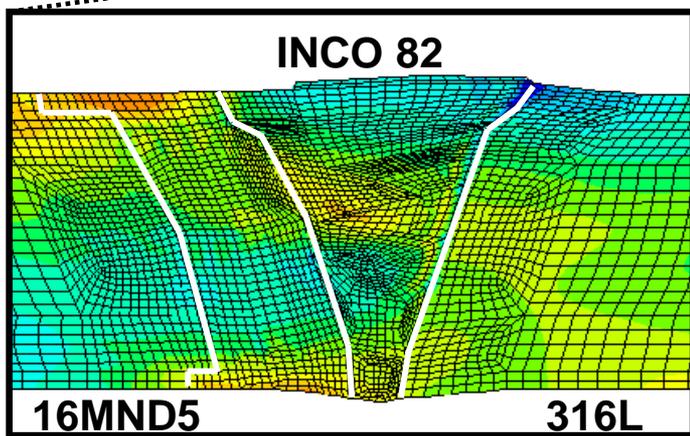
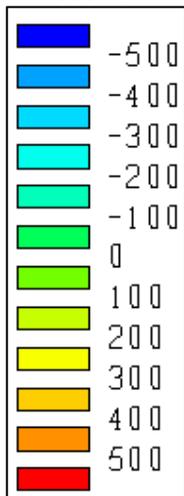
# Contraintes résiduelles post-soudage

Après remplissage

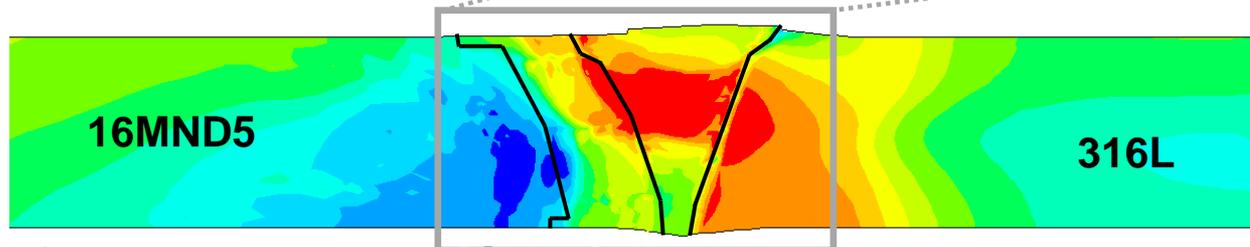
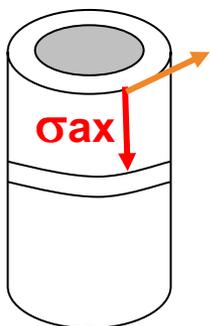
**Contraintes axiales**



MPa



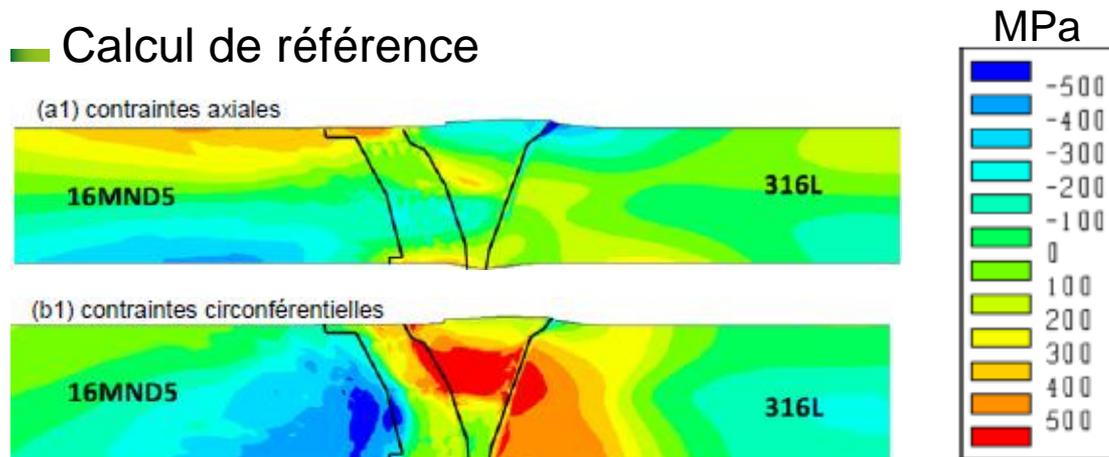
$\sigma_{cf}$



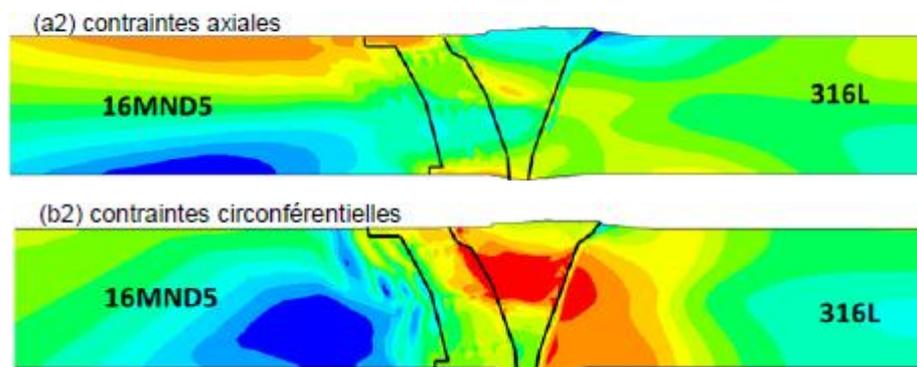
**Contraintes circonférentielles**

## ■ Effet de quelques étapes du mode opératoire

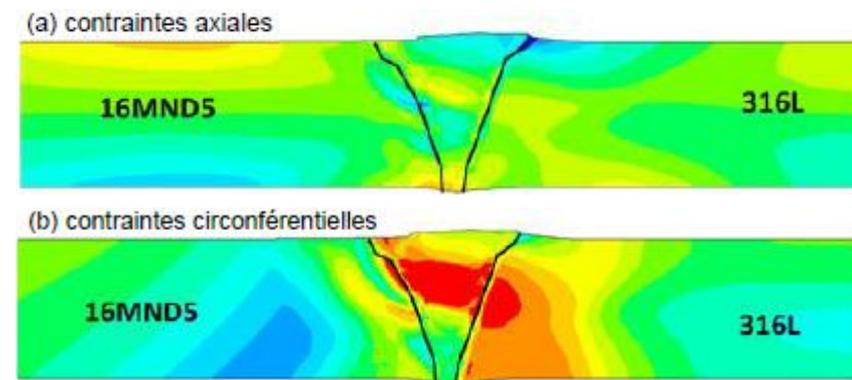
### ■ Calcul de référence



### ■ Sans TTPB



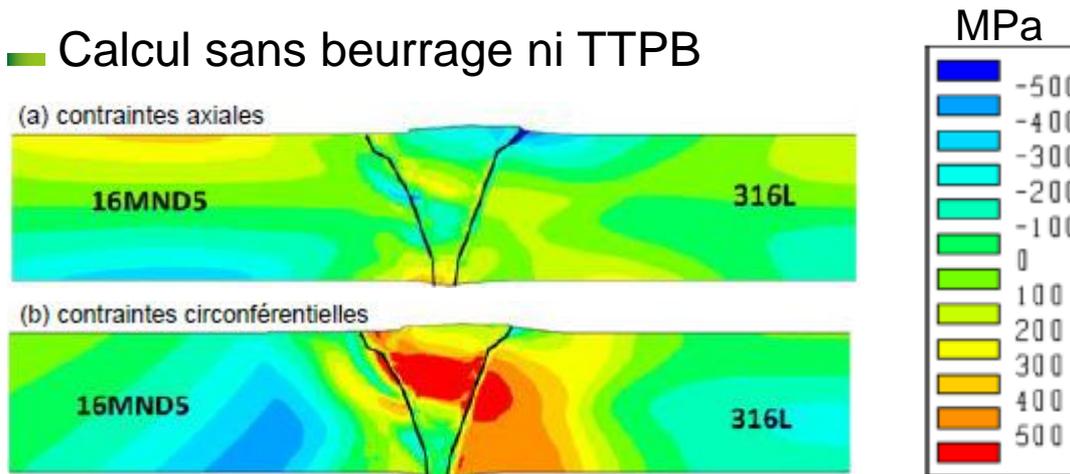
### ■ Calcul sans beurrage ni TTPB



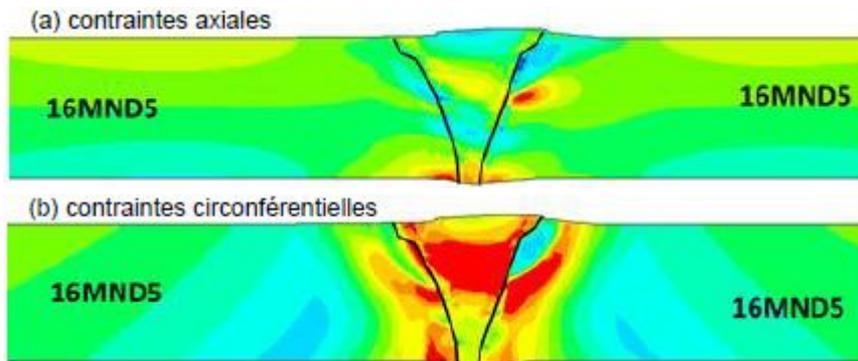
# Contraintes résiduelles

## ■ Effet matériaux

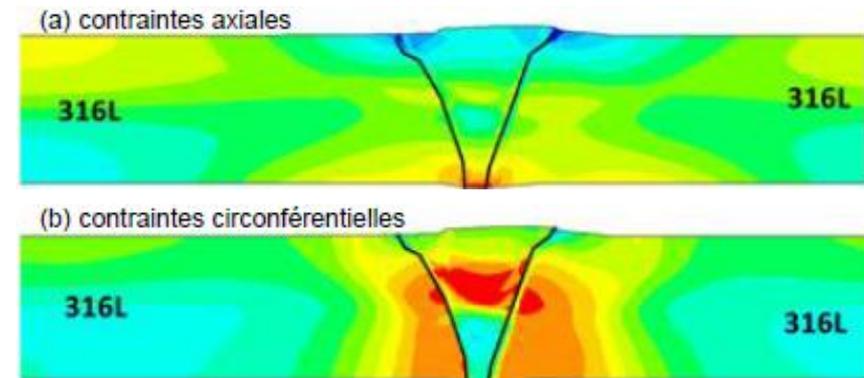
### ■ Calcul sans beurrage ni TTPB



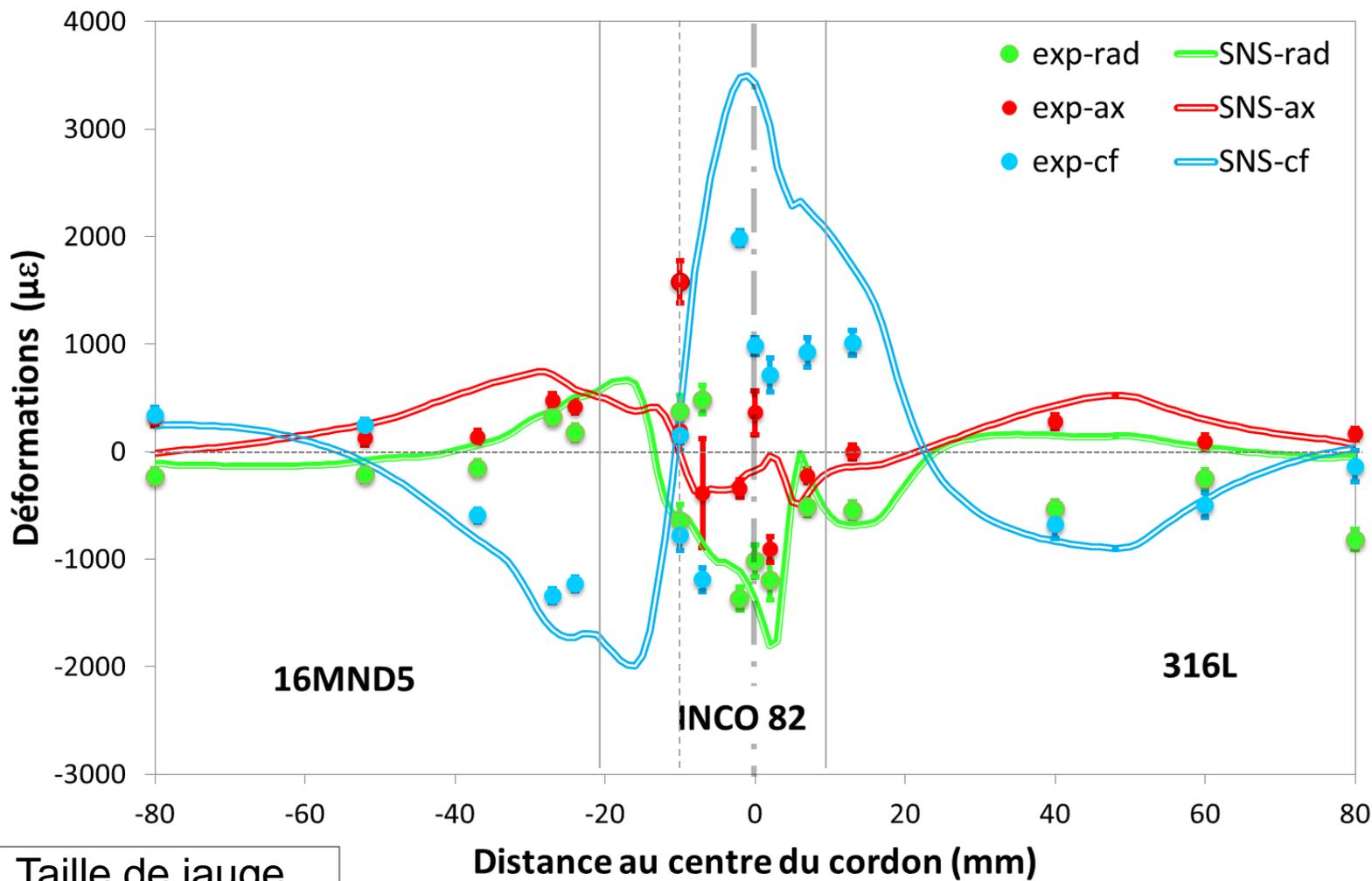
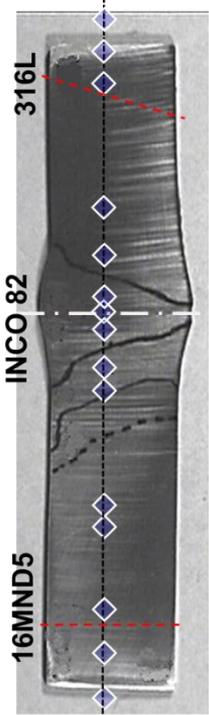
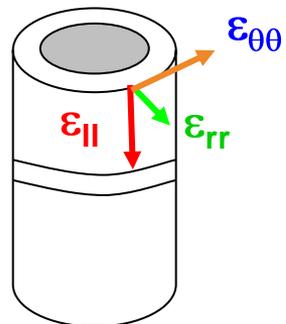
### ■ 16MND5 / Inco82 / 16MND5 sans beurrage



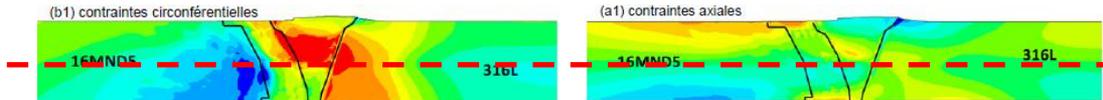
### ■ 316L / Inco82 / 316L sans beurrage



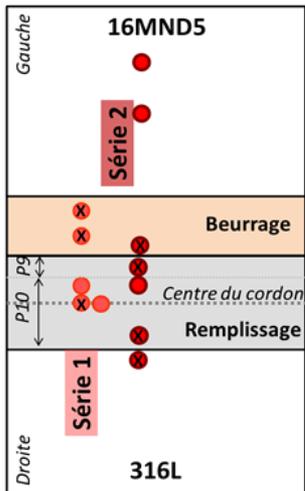
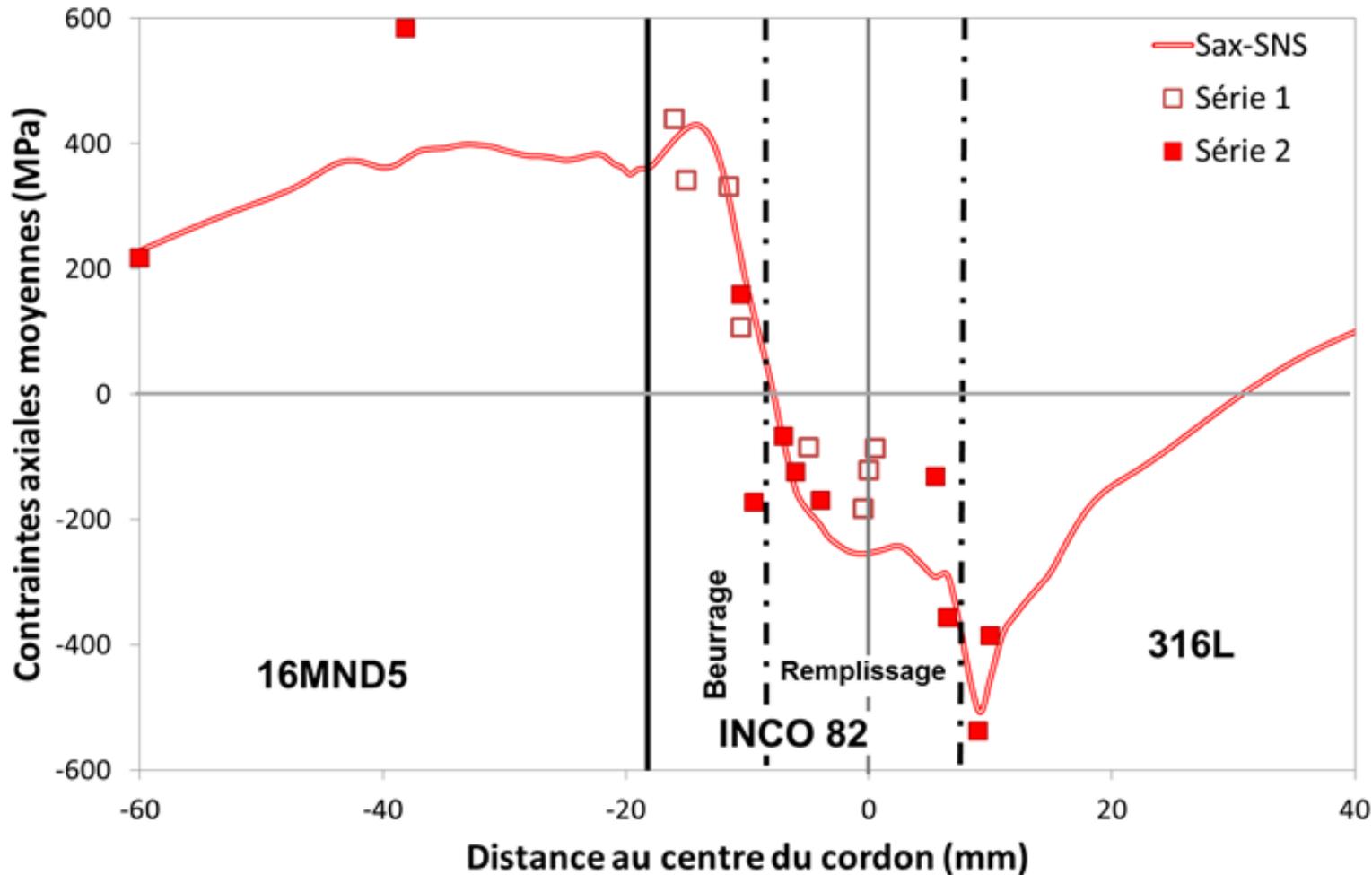
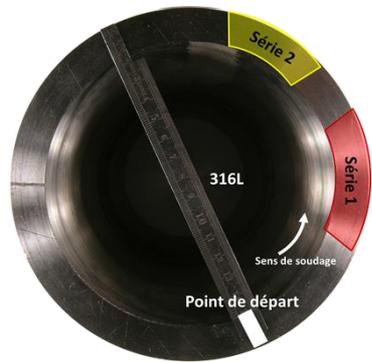
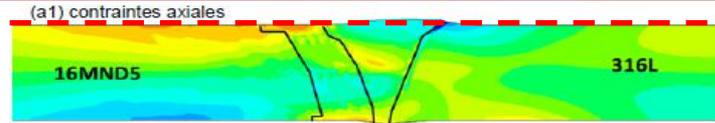
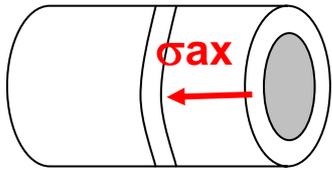
-  1. Fabrication de la soudure hétérogène
-  2. Mesures de contraintes résiduelles
-  3. Simulation du soudage
-  4. Comparaison mesures vs. simulation



Taille de jauge  
2x2x2 mm<sup>3</sup>



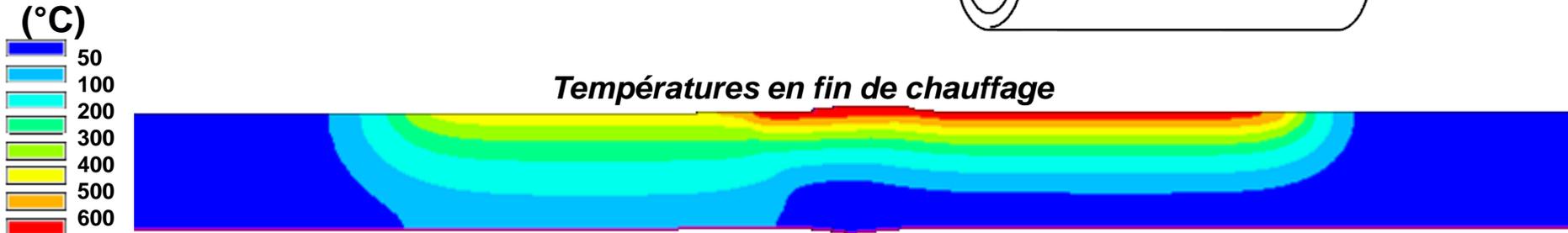
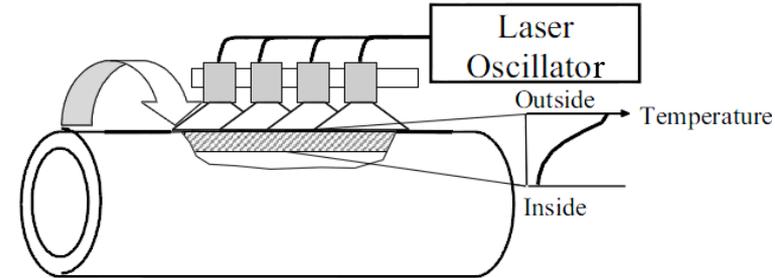
# cea Contraintes résiduelles axiales – Trou incrémental



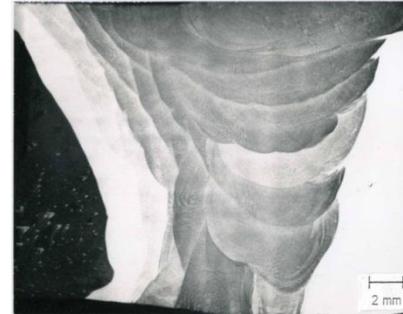
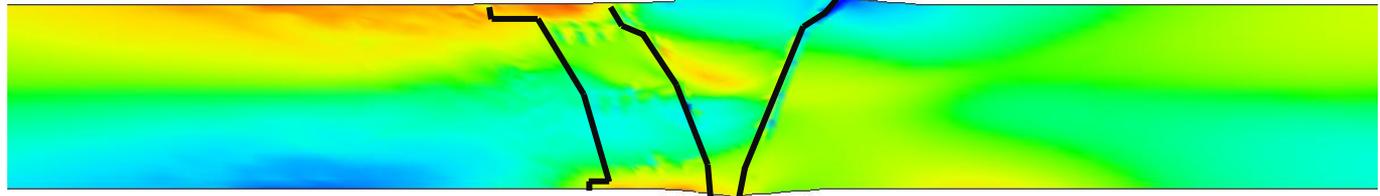
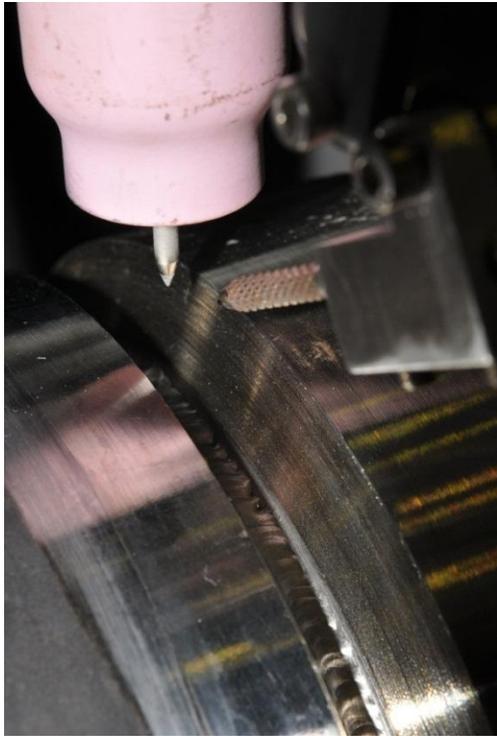
- Calcul du champ de contraintes résiduelles dans une LBM
  - Localement par voie expérimentale
  - Par voie numérique
  
- 2 méthodes complémentaires d'évaluation des contraintes résiduelles
  - Diffraction des neutrons
  - Trou incrémental couplé à l'interférométrie de Speckle
    - Observation de gradients de contraintes
  
- Bon accord mesure vs. simulation
  - Cohérence des tendances et gradients de contraintes
  
- Intérêt de la simulation numérique
  - Identification de zones particulières
  - Souligne l'importance de l'effet matériaux (liaison hétérogène)
  - Souligne l'importance de certaines étapes de fabrication (beurrage...)

## Voies d'optimisation des contraintes résiduelles

### Traitement de redistribution des contraintes



- Développement en parallèle d'une méthode de mesure des contraintes en cours de soudage



## MERCI POUR VOTRE ATTENTION

- Divers : Recherche candidats pour 2 thèses au CEA/LTA
  - Soudage par résistance des aciers ODS ([olivier.doyen@cea.fr](mailto:olivier.doyen@cea.fr))
  - Fissuration à chaud d'acier inox austénitique ([olivier.asserin@cea.fr](mailto:olivier.asserin@cea.fr))