



9ème colloque: modélisation et simulation numériques du soudage

Simulation des réparations par soudage et billage de l'Inconel 600



LaMCoS: Daniel Nélias



EDF: Said Taheri, Gérard Douchet



AREVA: Vincent Robin, Philippe Gilles

Plan

- Contexte et objectif de l'étude
- Étude expérimentale du billage US
- Modélisation numérique du billage US
- Simulation numérique du soudage
- Conclusion et perspectives

Processus de réparation

■ Si détection de défaut sur un composant nucléaire, alors



■ soit remplacer le composant

■ soit laisser en état si l'innocuité du défaut justifiée

■ soit réparer le défaut et remettre en conformité vis-à-vis des critères de conception

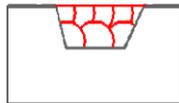
■ Lors de la réparation d'un défaut, une des possibilités de réparation est :



■ affouillement par fraisage



■ rechargement par soudage



■ remise en conformité par surfaçage

I. Contexte et objectif de l'étude
-processus de réparation
-procédé de parachèvement

II. Étude expérimentale du billage US

III. Modélisation numérique du billage US

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives

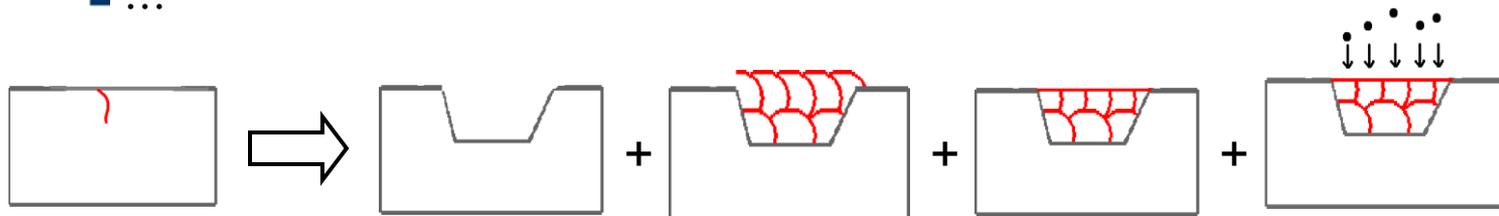
Procédé de parachèvement

- Problématique : Contraintes résiduelles de soudage

$$\sigma_{\text{soudage}} < \sigma_{\text{seuil}(CSC)}$$

- Solution : Procédé de mise en compression

- water jet peening
- laser peening
- ultrasonic shot peening (billage US)
- ...



- Objectifs

- modélisation du chaînage
- validation par essais

I. Contexte et
objectif de l'étude
-processus de réparation
-procédé de
parachèvement

II. Étude
expérimentale du
billage US

III. Modélisation
numérique du
billage US

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

Dispositif expérimental

I. Contexte et objectif de l'étude

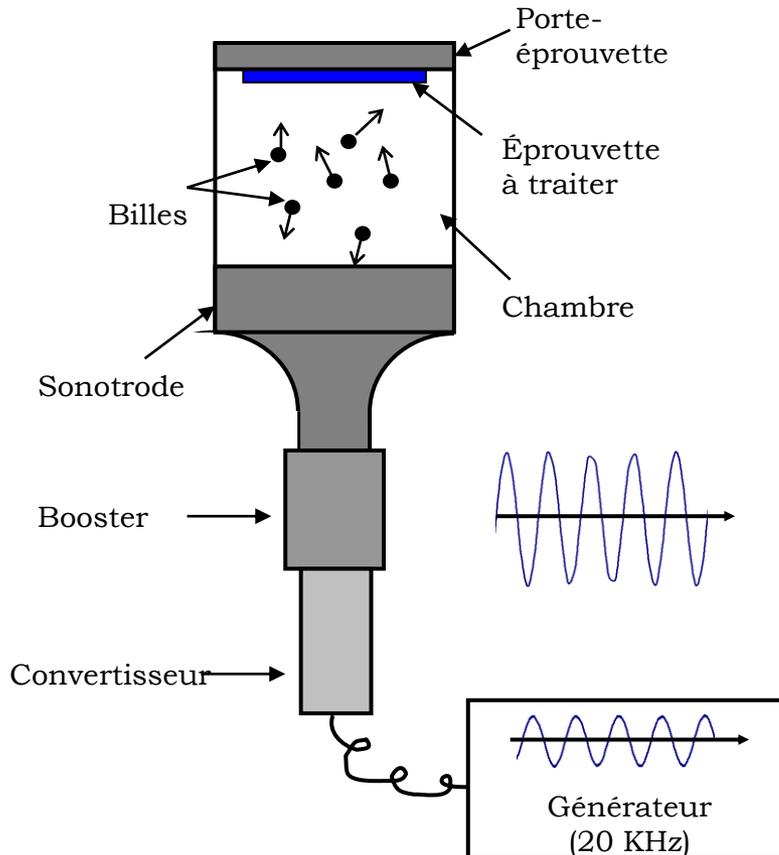
II. Étude expérimentale du billage US

- dispositif expérimental
- paramètres influents
- état de contrainte avant billage
- taux de recouvrement
- grandeurs à mesurer

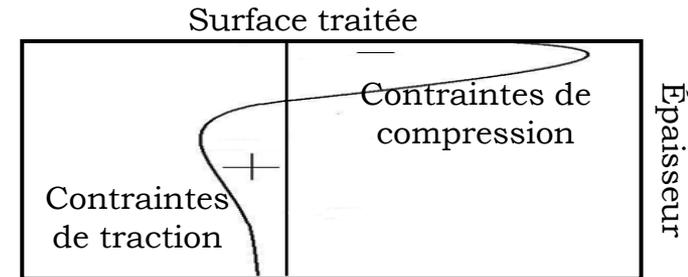
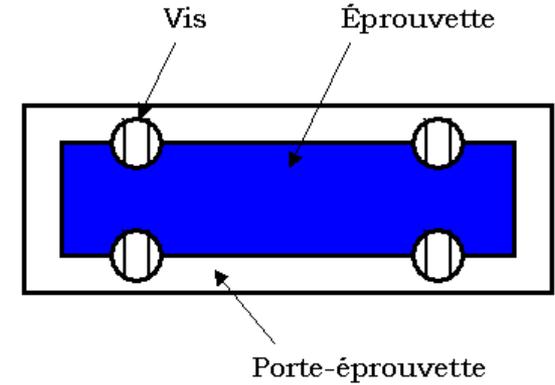
III. Modélisation numérique du billage US

IV. Simulation numérique du soudage

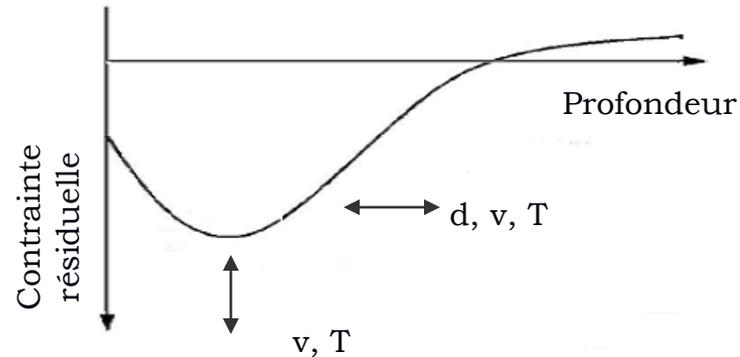
V. Conclusion et perspectives



Vue dessous



Paramètres influents



d, diamètre de bille
v, vitesse de billes
T, taux de recouvrement

■ Paramètres fixes

■ dimensions de l'éprouvette (Inco600)	[mm]	60 x 18 x 2
■ dimensions de la chambre	[mm]	80 x 40 x 50
■ diamètre des billes (100Cr6)	[mm]	4
■ Nb. de billes dans la chambre	[-]	10
■ fréquence de la sonotrode	[KHz]	20

■ Paramètres variables

■ vitesse initiale de billes	[m/s]	1,5 / 4 / 6
■ taux de recouvrement	[%]	100 / 150 / 200

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US
-dispositif expérimental
-paramètres influents
-état de contrainte avant
billage
-taux de recouvrement
-grandeurs à mesurer

III. Modélisation
numérique du
billage US

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

État de contraintes des éprouvettes avant billage

Usinage : électroérosion à fil suivie d'une rectification

Traitement thermique de détensionnement (TTD) : 600°C pendant 3 heures

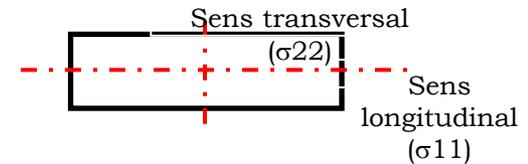
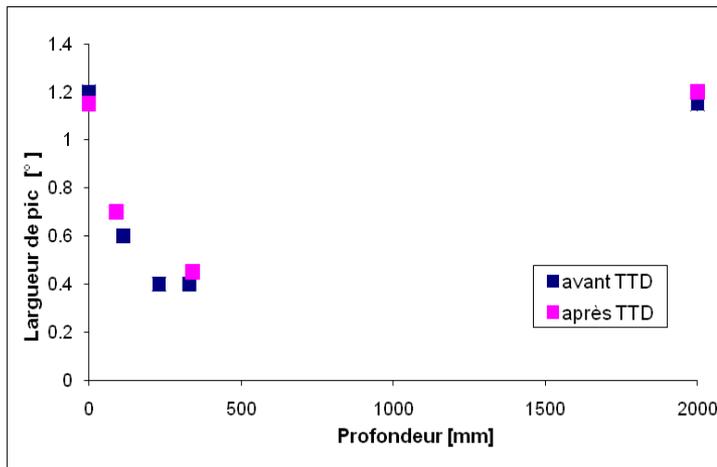
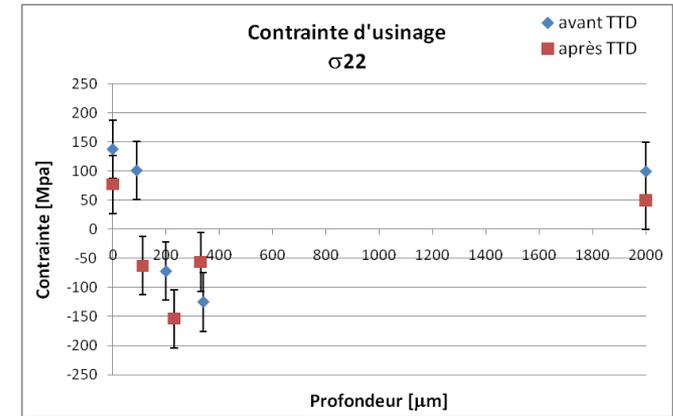
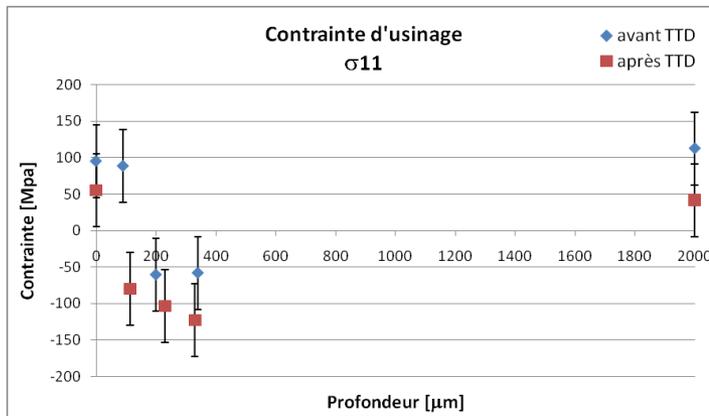
I. Contexte et objectif de l'étude

II. Étude expérimentale du billage US
-dispositif expérimental
-paramètres influents
-état de contrainte avant billage
-taux de recouvrement
-grandeurs à mesurer

III. Modélisation numérique du billage US

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives

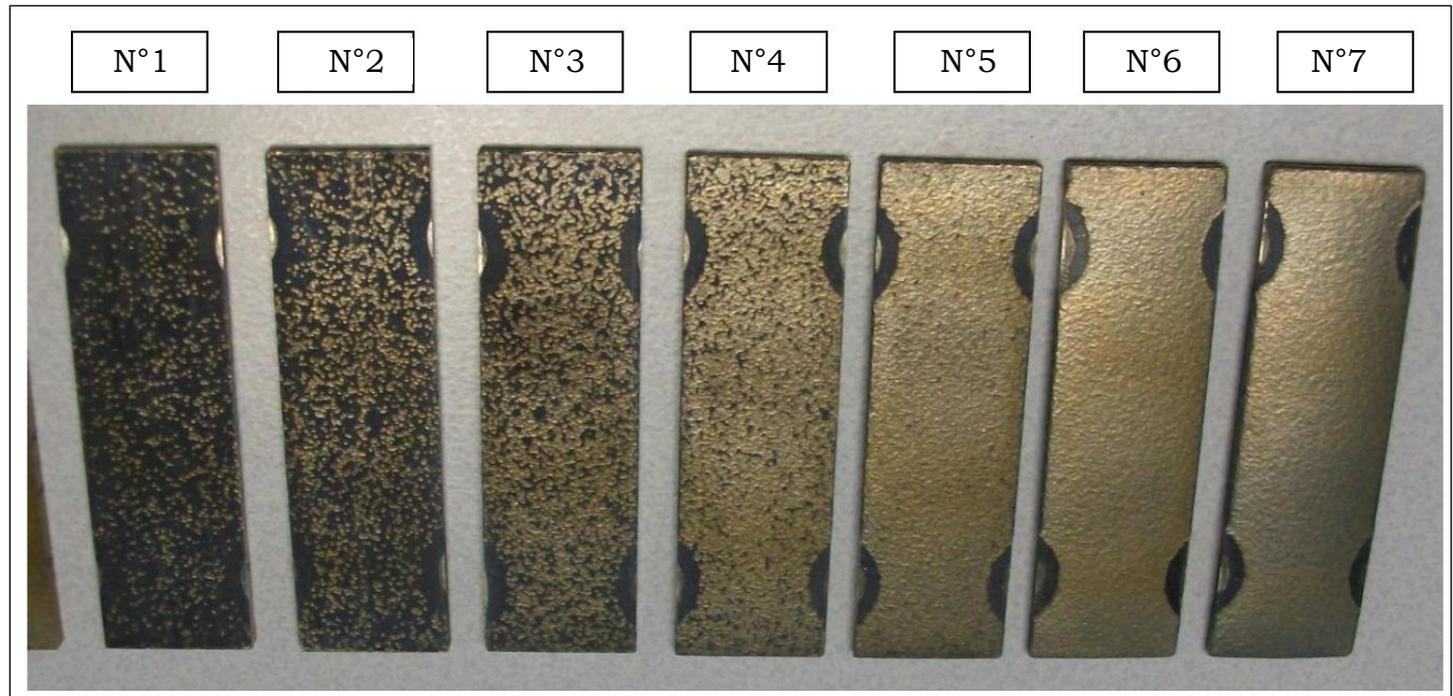


- contraintes réduites d'un facteur 2 en face avant et arrière après le TTD
- fort écrouissage en surface suite aux opérations d'usinage, qui n'est pas éliminé par le TTD

Taux de recouvrement

- $t_{100\%}$ = toute la surface est impactée au moins une fois
- détermination par examen visuel
- délicate et approximative

N°	temps de traitement		Recouvrement
1	t	17s	
2	2t	34s	
3	4t	68s	
4	8t	2min16s	
5	16t	4min32s	≈100%
6	32t	9min4s	≈200%
7	64t	18min8s	



N°1

N°2

N°3

N°4

N°5

N°6

N°7

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

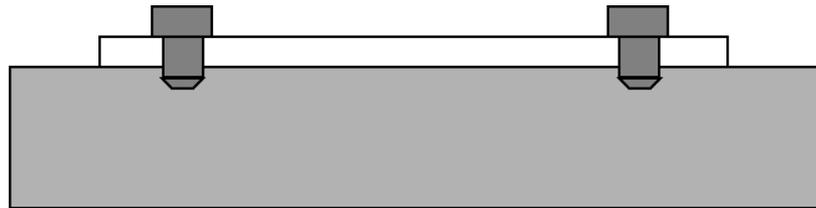
-dispositif expérimental
-paramètres influents
-état de contrainte avant
billage
-taux de recouvrement
-grandeurs à mesurer

III. Modélisation
numérique du
billage US

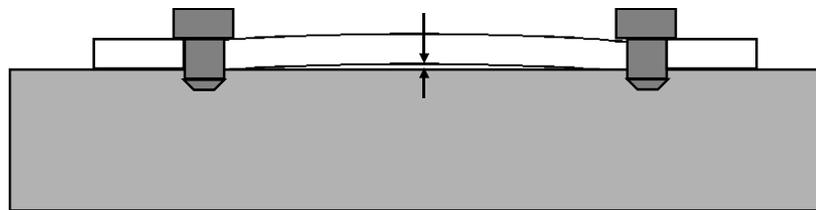
IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

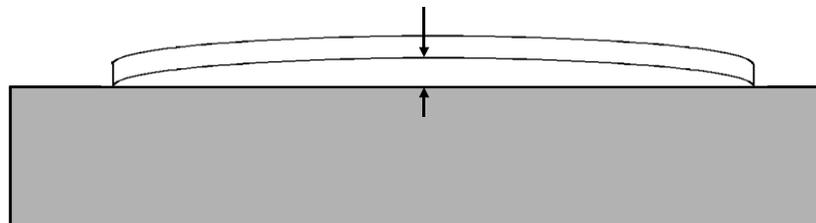
Grandeurs à mesurer



État **bridé** avant le traitement de billage US



État **bridé** après le traitement de billage US



État **libre** après le traitement de billage US

■ Mesures à réaliser après le débridage

- distorsion de l'éprouvettes, à l'aide de la Machine à Mesurer Tridimensionnel (MMT)
- contraintes résiduelles, à l'aide de la méthode de Diffraction des Rayons X (DRX)

I. Contexte et objectif de l'étude

II. Étude expérimentale du billage US
-dispositif expérimental
-paramètres influents
-état de contrainte avant billage
-taux de recouvrement
-grandeurs à mesurer

III. Modélisation numérique du billage US

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives

Méthode semi-analytique (SA)

I. Contexte et objectif de l'étude

II. Étude expérimentale du billage US

III. Modélisation numérique du billage US

-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-impact
-comparaison résultats numériques et expérimentaux

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives

■ Sommation des solutions analytiques élémentaires

■ Exemple de la résolution du contact normal :

■ Déplacement en tout point d'une surface élastique soumise à un effort unitaire [Boussinesq85, Cerruti82, Love52, Vergne85]

$$\bar{u}_{ij} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} K_{i-k, j-l} \times P_{kl}$$

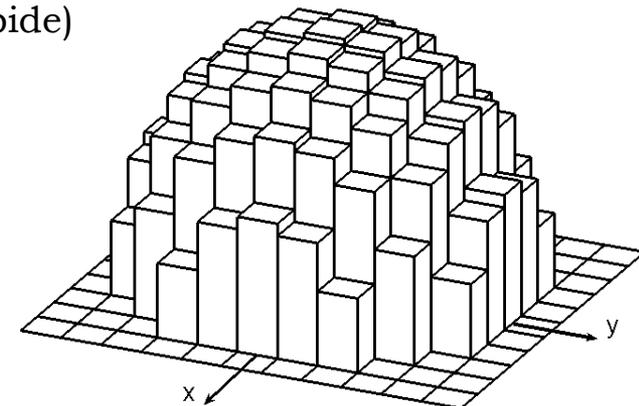
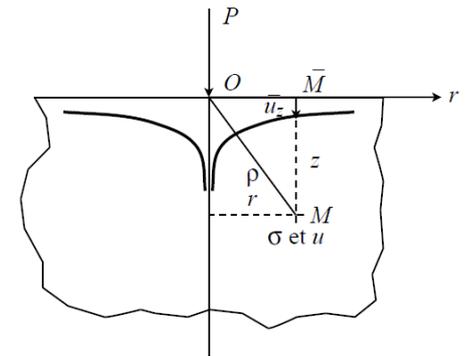
■ Discrétisation de la pression

■ Produit de convolution

=> Méthode FFT (transformée de Fourier rapide)

■ Résolution du problème

=> Méthode du GC (gradient conjugué)



Généralités du code semi-analytique

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

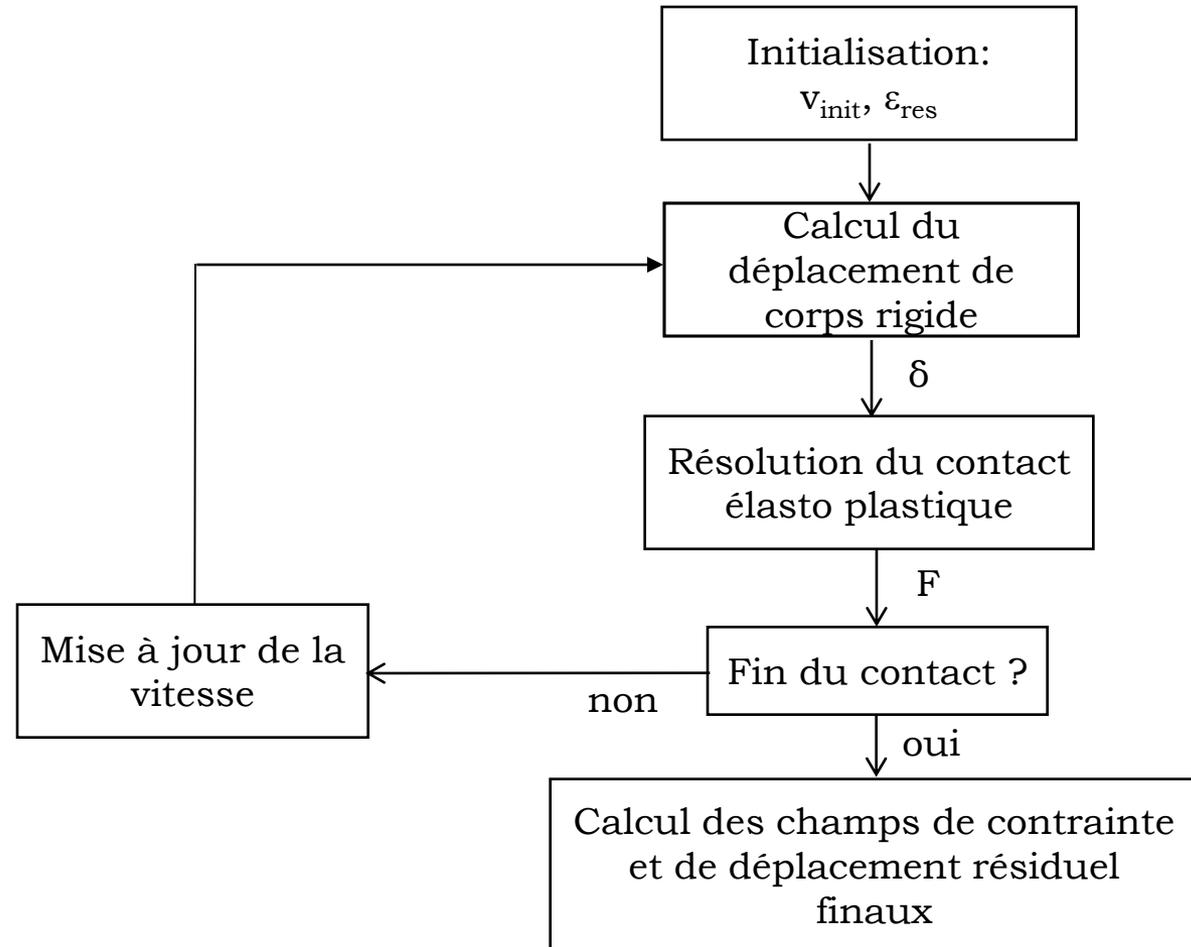
III. Modélisation
numérique du
billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-
impact
-comparaison résultats
numériques et
expérimentaux

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

- Code de calcul 3D
 - développé au LaMCoS
 - initialement pour résoudre des problèmes de « contact »
- Module d'impact [thèse T.Chaise]
 - massif semi-infini
 - formulation en HPP
 - maillage composé de cuboïde à un point de calcul central
- Validation du code dans le cas mono impact
 - par comparaison avec code EF
 - par expérimentation (en cours)
- Avantage du code
 - temps de calcul réduits de l'ordre d'une dimension

Résolution du mono impact



I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

III. Modélisation
numérique du
billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-
impact
-comparaison résultats
numériques et
expérimentaux

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

Stratégie du multi-impact (1/3)

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

III. Modélisation
numérique du
billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-
impact

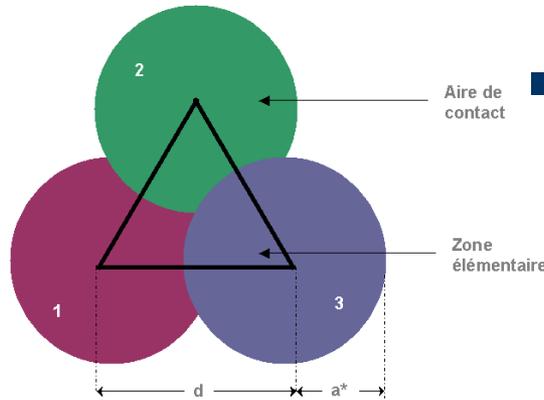
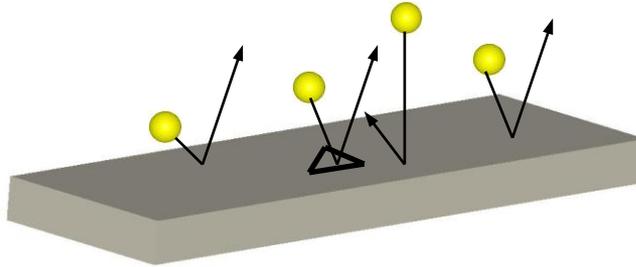
-comparaison résultats
numériques et
expérimentaux

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

■ Hypothèse:

Après saturation, l'état de déformation
plastique et de contraintes résiduelles est
homogène dans les plans parallèles à la
surface.



■ Zone élémentaire représentative:

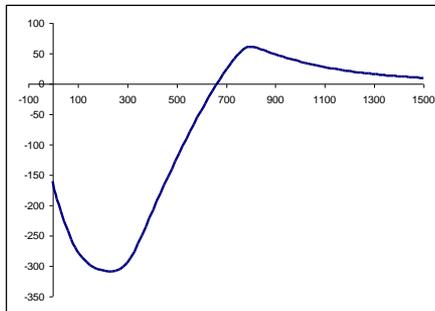
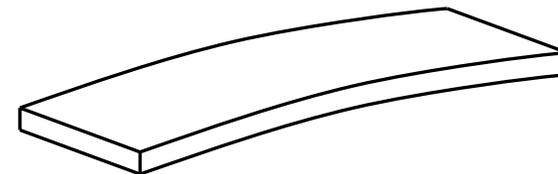
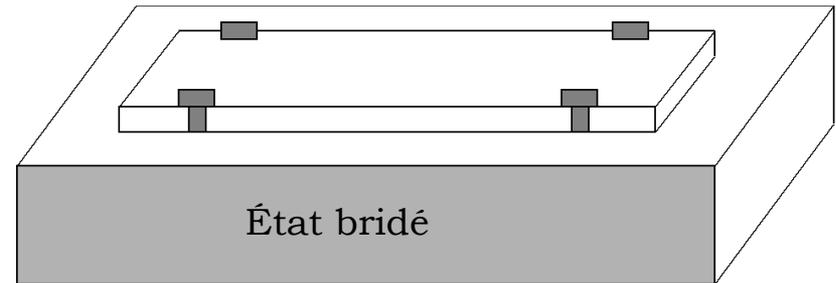
constituée de 3 impacts successifs, dont les
centres forment un triangle équilatéral

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{a^*}{d} \right)^2$$

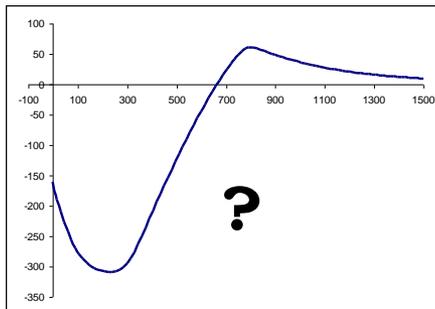
T : taux de recouvrement
a* : rayon de l'empreinte
d : distance entre 2 impacts

Stratégie du multi-impact (2/3)

Code semi-analytique \longrightarrow Massif semi-infini



Contrainte correspondante
à l'état bridé



Contrainte correspondante
à l'état relâché

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

III. Modélisation
numérique du
billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-
impact

-comparaison résultats
numériques et
expérimentaux

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

Stratégie du multi-impact (3/3)

I. Contexte et
objectif de l'étude

II. Étude
expérimentale du
billage US

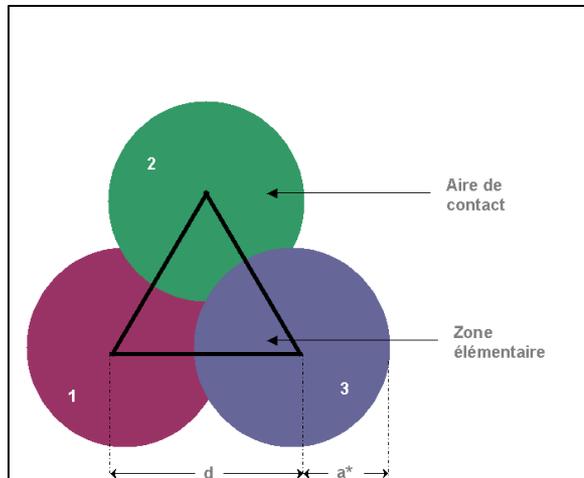
III. Modélisation
numérique du
billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-
impact

-comparaison résultats
numériques et
expérimentaux

IV. Simulation
numérique du
soudage

V. Conclusion et
perspectives

Code Semi Analytique



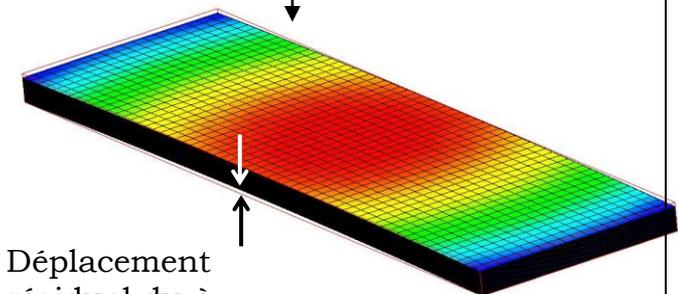
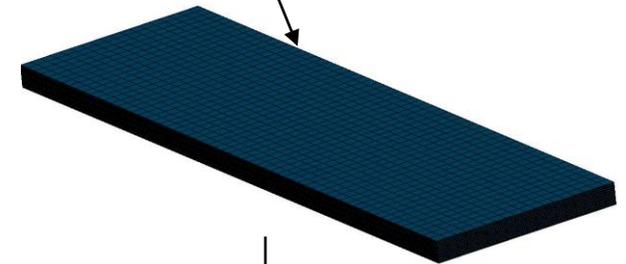
⇒ 3 impacts successifs
sur un massif semi infini

⇒ Moyennation des
résultats dans la zone
élémentaire

ε^p
 \equiv_{moy}

Code Éléments Finis

Projection du tenseur de
déformation moyenné aux
points de gauss des éléments
de la plaque



Déplacement
résiduel du à
l'équilibre après
projection

Comparaison des résultats numériques et expérimentaux à $V=4\text{m/s}$ (1/2)

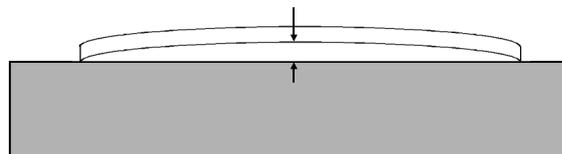
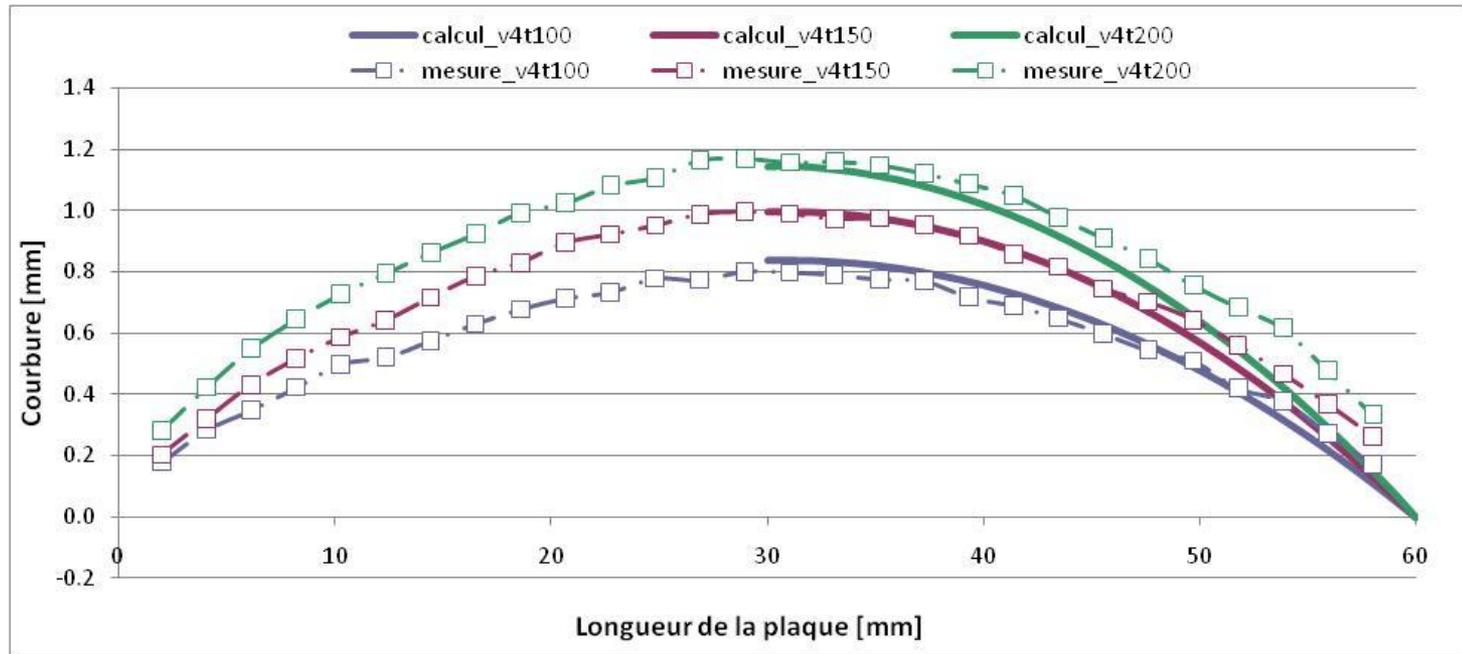
I. Contexte et objectif de l'étude

II. Étude expérimentale du billage US

III. Modélisation numérique du billage US
-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-impact
-comparaison résultats numériques et expérimentaux

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives



	flèche mesurée	flèche calculée	écart relatif
t100	0.801	0.835	4.25%
t150	0.996	1.036	4.05%
t200	1.169	1.147	1.92%

Comparaison des résultats numériques et expérimentaux à $V=4\text{m/s}$ (2/2)

I. Contexte et objectif de l'étude

II. Étude expérimentale du billage US

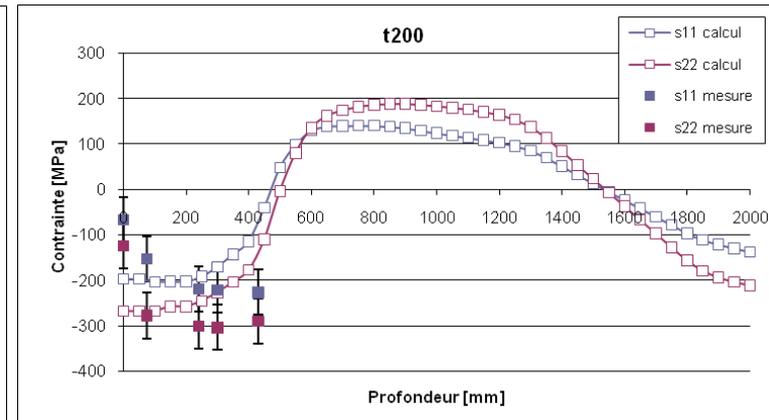
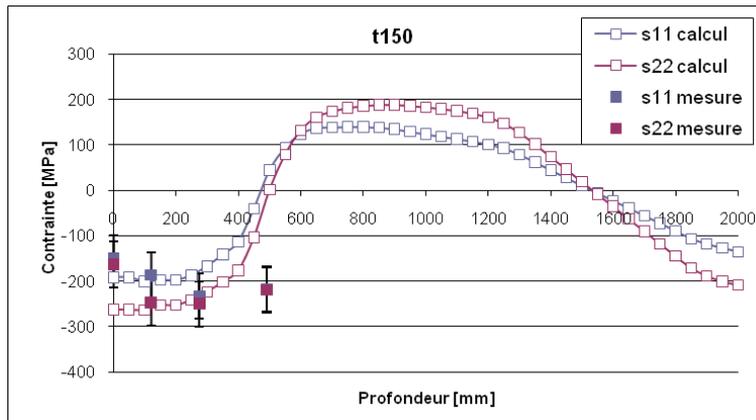
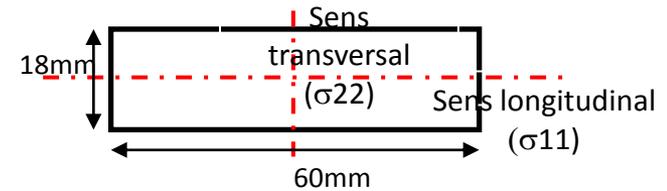
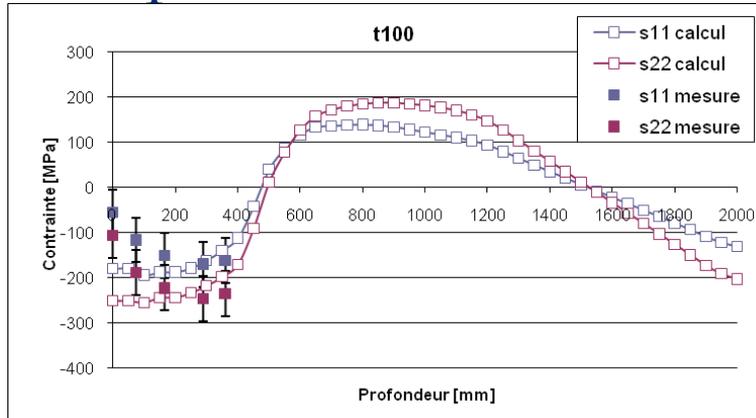
III. Modélisation numérique du billage US

-méthode semi-analytique
-code semi-analytique
-résolution mono impact
-stratégie du multi-impact

-comparaison résultats numériques et expérimentaux

IV. Simulation numérique du soudage

V. Conclusion et perspectives

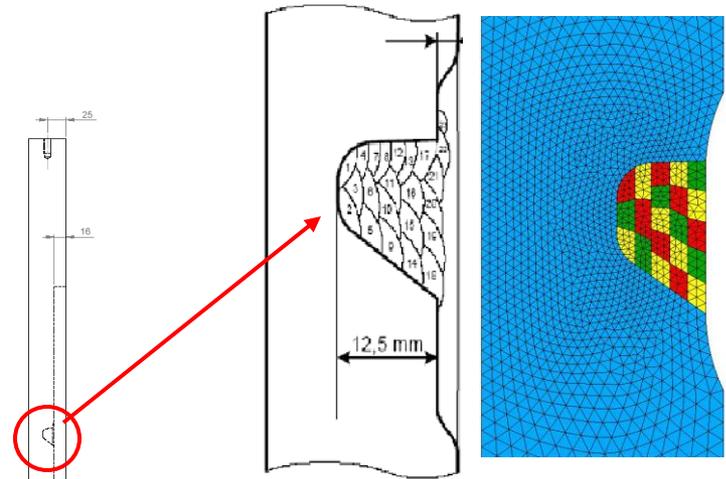
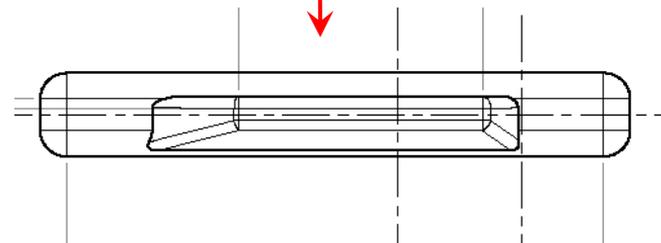
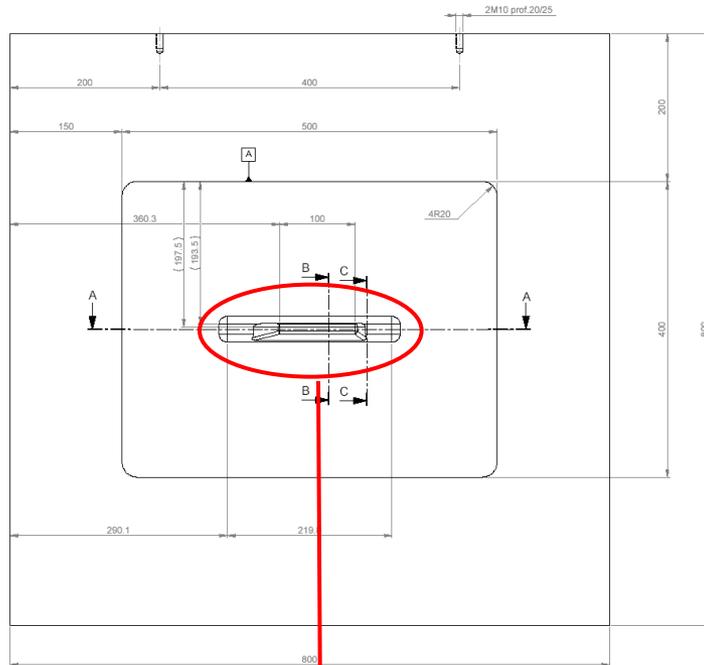


- Faible écart de mise en compression à différents taux de recouvrement
- Écart plus important en face avant (lié à l'écrouissage après l'usinage)

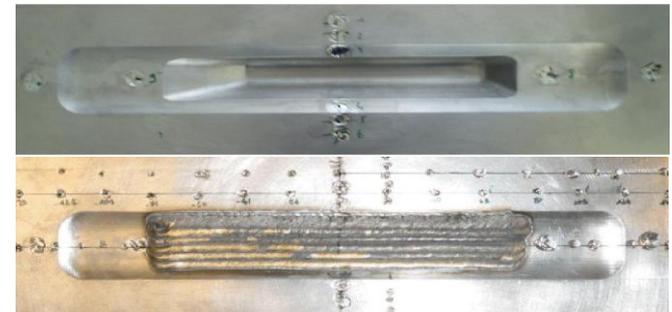
Maquette représentative & modèle numérique

- I. Contexte et objectif de l'étude
- II. Étude expérimentale du billage US
- III. Modélisation numérique du billage US
- IV. Simulation numérique du soudage
 - maquette & modèle
 - contraintes de soudage
- V. Conclusion et perspectives

Plan de la maquette



21 cordons de soudures
Modèles numériques:
- Systus/Sysweld : 3D
- Code_Aster : 2D



Contraintes résiduelles de soudage

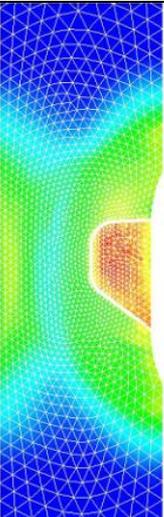
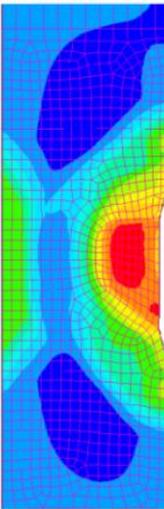
I. Contexte et objectif de l'étude

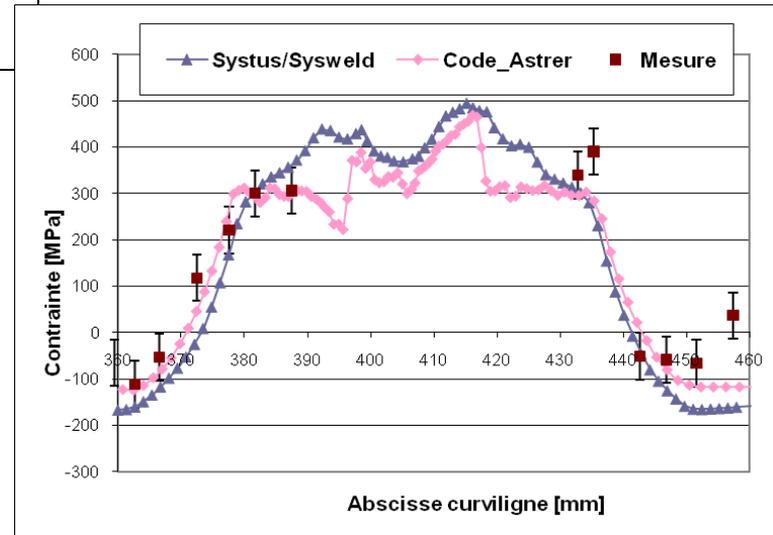
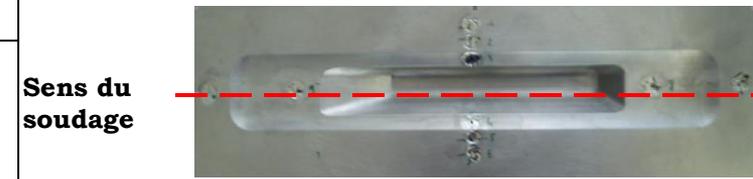
II. Étude expérimentale du billage US

III. Modélisation numérique du billage US

IV. Simulation numérique du soudage
-maquette & modèle
-contraintes résiduelles

V. Conclusion et perspectives

	Aster 2D	Sysweld 3D
Maillage	- triangles quadratiques	- briques quadratiques
Thermique	apport de chaleur en flux imposé	apport de chaleur en température imposée
Mécanique	loi d'écrouissage : cinématique linéaire	loi d'écrouissage : cinématique non linéaire
	condition aux limites : libre	condition aux limites : libre
Contraintes longitudinales (dans le sens de soudage)		



Conclusion et Perspectives

- I. Contexte et objectif de l'étude
- II. Étude expérimentale du billage US
- III. Modélisation numérique du billage US
- IV. Simulation numérique du soudage
- V. Conclusion et perspectives

