

Revêtements durs en Norem02 : Simulation appliquée aux appareils de robinetterie des centrales nucléaires

Jean-Philippe MATHIEU¹, Gauthier BEAURIN³, Michel CORET², Daniel NELIAS²

¹ EDF R&D - MMC (Materials & Mechanics of components)

² SKF Aerospace

³ EC Nantes

⁴ INSA Lyon – LaMCoS



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

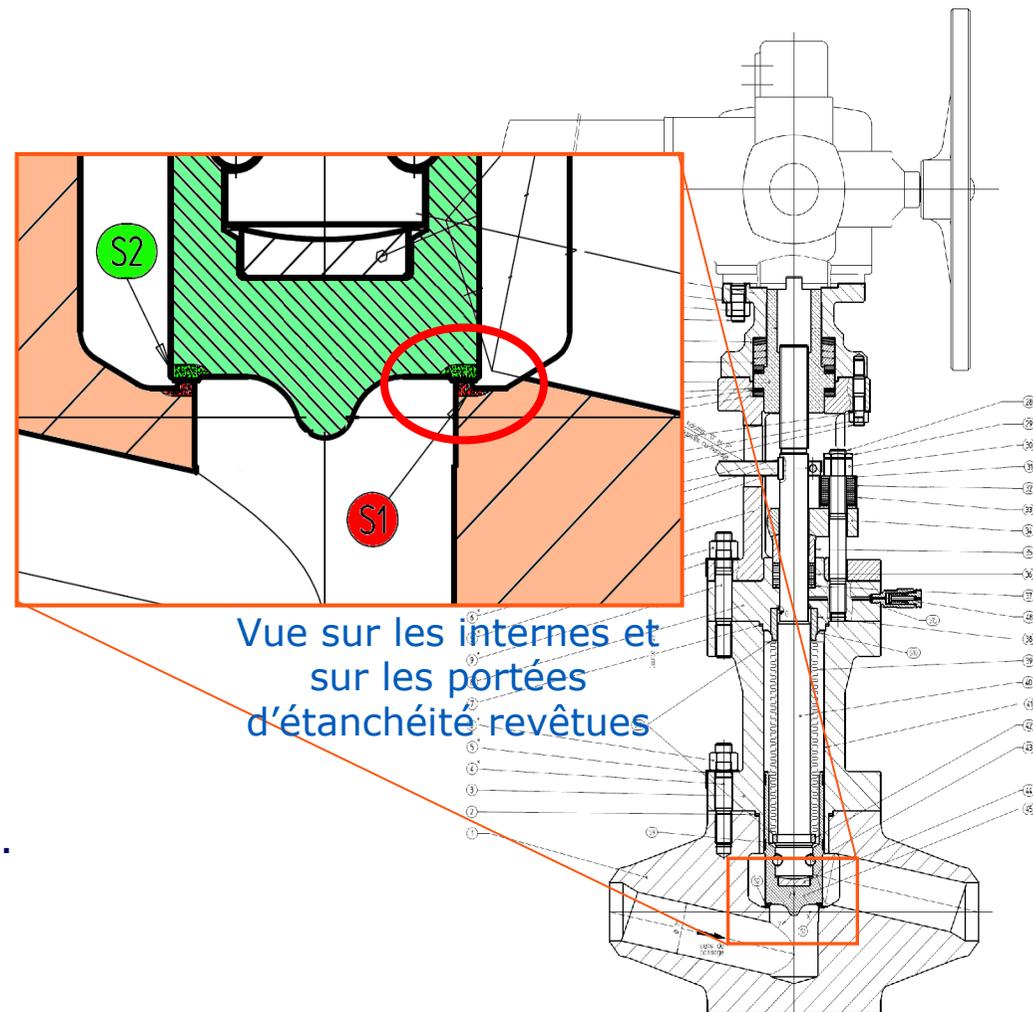
(Longue) Introduction

Matériau

Modélisation du soudage

Les revêtements durs pour la robinetterie nucléaire

- ▶ Améliorer la résistance à l'usure des sièges d'étanchéité ou des zones de frottement des robinets (inox 316L) sur le circuit primaire
 - 180 bars (2600 psi)
 - 265°C (545 °F)
- ▶ Compromis entre **ténacité et résistance à l'usure** (~ dureté élevée)
- ▶ Transitoires thermique, pression, corrosion, usure, circulation fluide...
- ▶ Changement de matériau :
Du stellite™(6) au Norem02™



Un prototype de robinet à soupape (fabrication Vanatome) qui sera installé sur EPR

Pourquoi se débarrasser des Stellite™?

STELLITE
Not Steel ~ But Its Master

"... For a Thousand Years"

THE RECENT announcement that pocket knives, made of Stellite, the eternal metal, were at last offered to the public, was met by a wide-spread response. Orders for hundreds of these knives have poured into the Stellite plant, and are continuing to come.

Stellite is one of the most beautiful of metals. It is the discovery of Elwood Haynes of Kokomo, Indiana, a metallurgist of international reputation, and is an alloy of semi-rare metals. It contains no iron, and it will not rust, stain, tarnish or corrode.

Stellite is an alloy of semi-rare metals. Knives made from it are harder than the hardest steel, have a richer and more beautiful luster than silver, and have the rust-resisting properties of platinum and gold. Fruit acids will not affect them and they will never lose their temper. They will be sharp, stainless and beautiful for many generations.

Each knife packed in an attractive box

IN FOUR STYLES

Stellite handle, stippled	\$7.00
Stellite handle, plain	7.00
Pearl handle, metallic ends	6.00
Pearl handle, plain	6.00

To secure one of these diamond hard, stainless, rust-proof knives, send order and check to

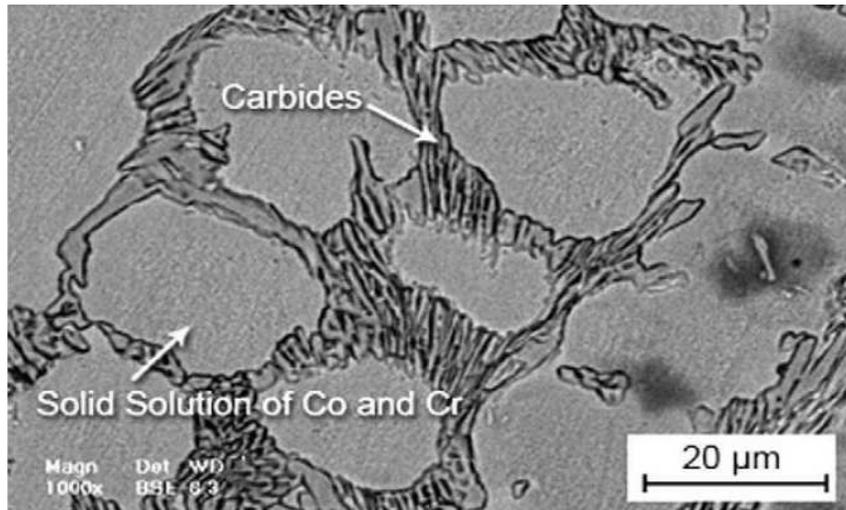
The Haynes Stellite Company
Kokomo, Indiana
Send for the Story of Stellite

STELLITE

148 Publicité de 1920

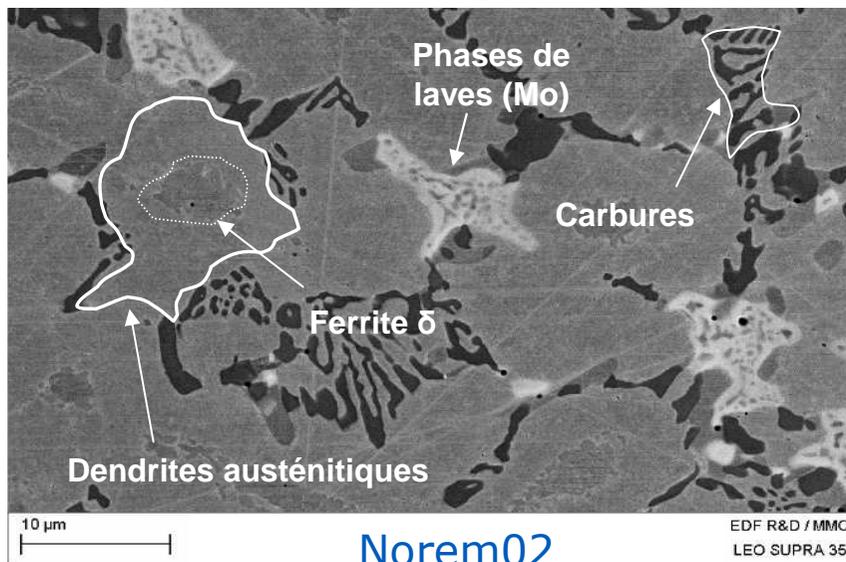
- ▶ Le stellite est un matériau ancien à base de cobalt hérité du thermique à flamme.
- ▶ D'un point de vue mécanique pas de bonnes raisons de s'en passer : les alliages à base de cobalt font très bien leur travail (si bien mis en œuvre)
- ▶ Mais la présence de cobalt dans le circuit primaire est problématique :
 - Le Co peut être présent dans le circuit (produits d'érosion, d'usure, de maintenance) et s'activer pour former l'isotope 60
 - Réduire la dosimétrie des intervenants
 - Problèmes de démantèlement, stockage
- ▶ Pour les robinets récents, des alliages à base fer ou nickel sont introduits dans les codes, comme le **Norem02**
(constante de temps pour le changement ~10 ans)

Le Norem02 : du “Stellite à base de fer”?



Stellite gr.6

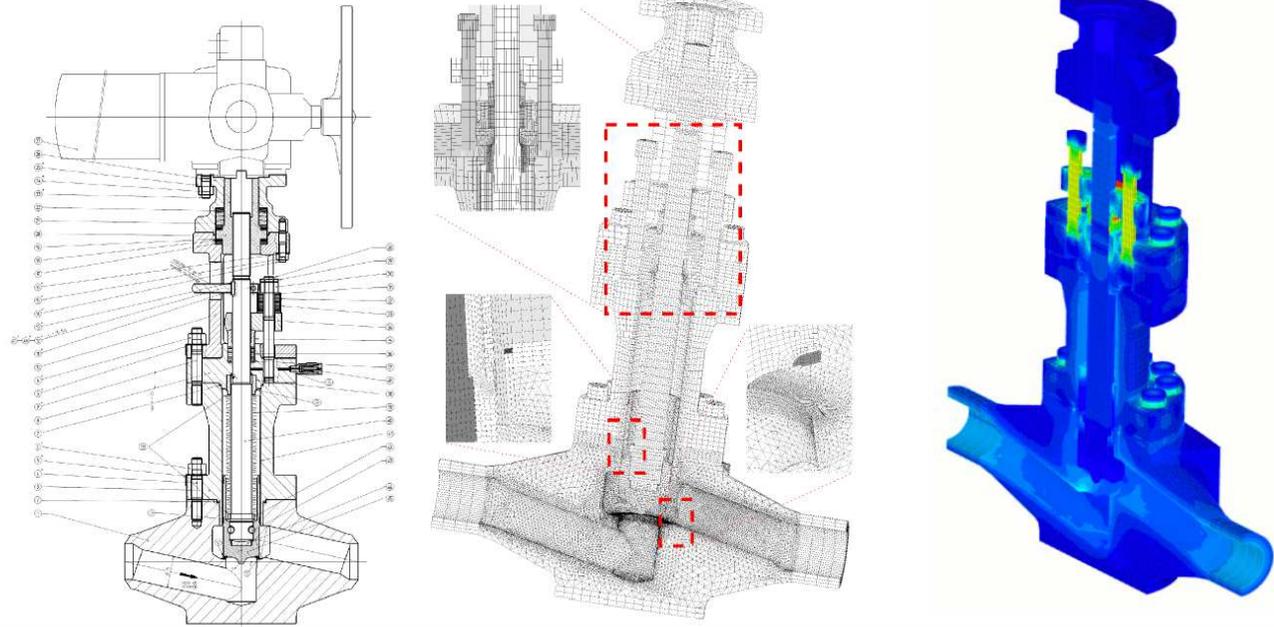
Composition (W%)	Norem02	Stellite6
C	1,23 %	1,2 %
Mn	4,3 %	0,8 %
Cr	25,4 %	29,0 %
Si	3,38 %	1,3 %
Ni	4,0 %	1,8 %
Mo	2,0 %	0 %
N ₂	0,17 %	-
W	0 %	4,8 %
B	≤0,001%	-
Co	0,01 %	Bal. = 59,3%
Fe	Bal. = 59,5%	1,8 %



Norem02

- ▶ La microstructure est complexe :
 - dendrites austénitiques (cœur delta-ferritique)
 - eutectique inter-dendrites (austénite + M_7C_3),
 - other : $M_{23}C_6$, ferrite, phases de laves Mo
- ▶ Compromis entre dureté (carbures) et ténacité/formabilité (dendrites)

Pourquoi modéliser les robinets?

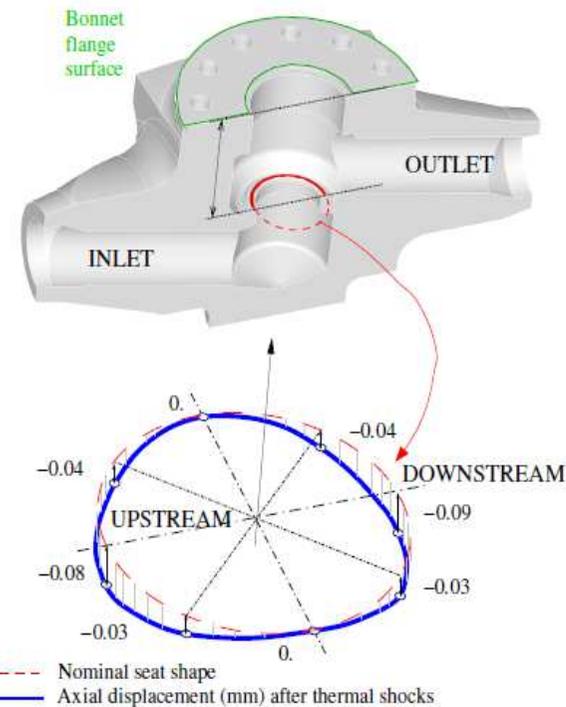
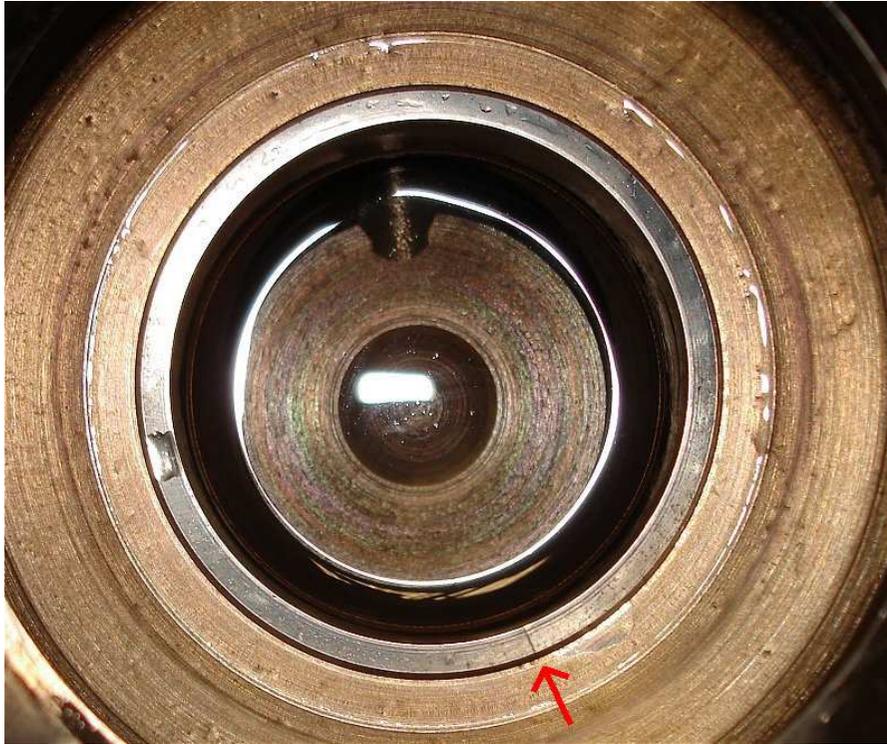


Robinet à soupape sur les boucles EDF R&D des Renardières, et son modèle numérique

- ▶ On souhaite pour **valider les conceptions** passer des essais systématiques à une approche par extension et analogie : un des enjeux du projet de R&D METRONOME
 - On ne peut pas tout modéliser (et remplacer complètement les essais)
 - Si l'on sait ce que l'on cherche (endommagements), la modélisation peut permettre d'étendre une validation expérimentale (taille, conditions d'utilisation) sans le nouvel essai
 - **Dans le cas qui nous intéresse : Modélisation de l'effet des transitoires thermiques**

Comprendre les effets du soudage est indispensable

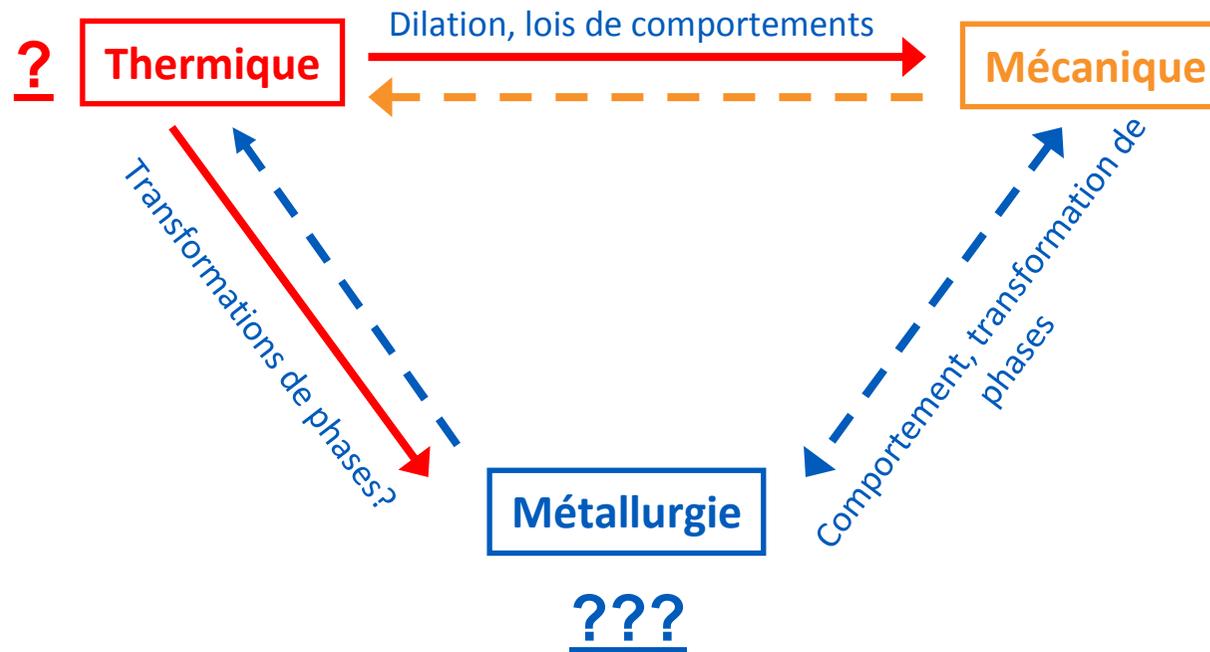
- ▶ On écarte ici les problèmes de “non-qualité” : traités en amont par les aspects réglementaires (EDF CEIDRE), mais...



Deux endommagements constatés sur Norem02 après transitoires thermiques

- ▶ **Rupture fragile du revêtement lors d'un transitoire** : l'état de contraintes résiduel doit être connu
- ▶ **Distorsion plastique suite à plusieurs transitoires consécutifs (fuite)** : La prise en compte du soudage est **nécessaire** à la bonne prédiction de la distorsion ; (PVP2010 – 25721)

Les physiques du soudage, les matériaux en présence



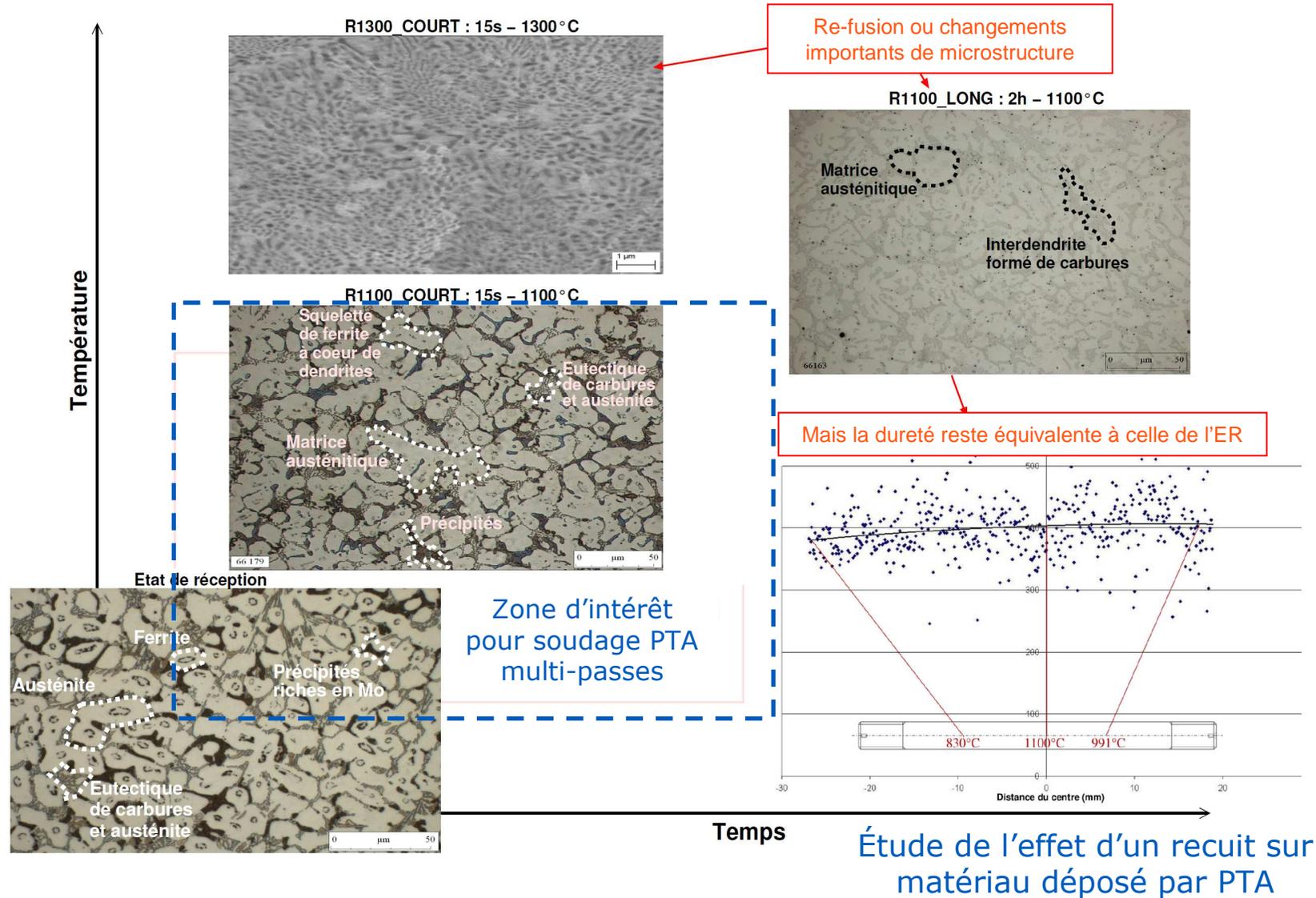
- ◆ Au démarrage de l'étude, pas de caractérisations matériaux pour le Norem02 :
 - Peu de connaissances des transformations métallurgiques
 - Pas de courbes de traction (Dureté, Re/Rm à Tamb et 300°C)
- ◆ Utilisation de données codifiées pour le 316L
- ◆ Le procédé est peu connu ou modélisé en SNS

Introduction

Matériau

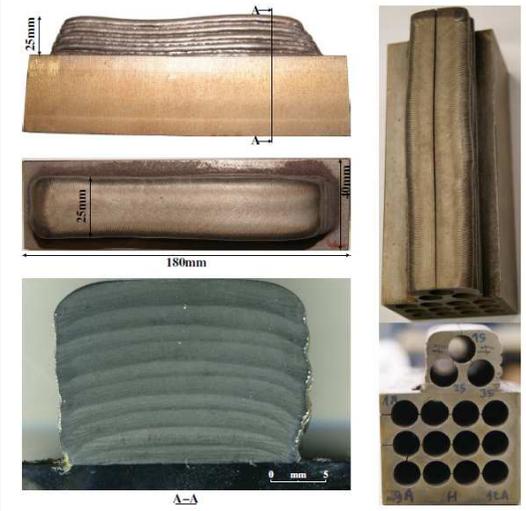
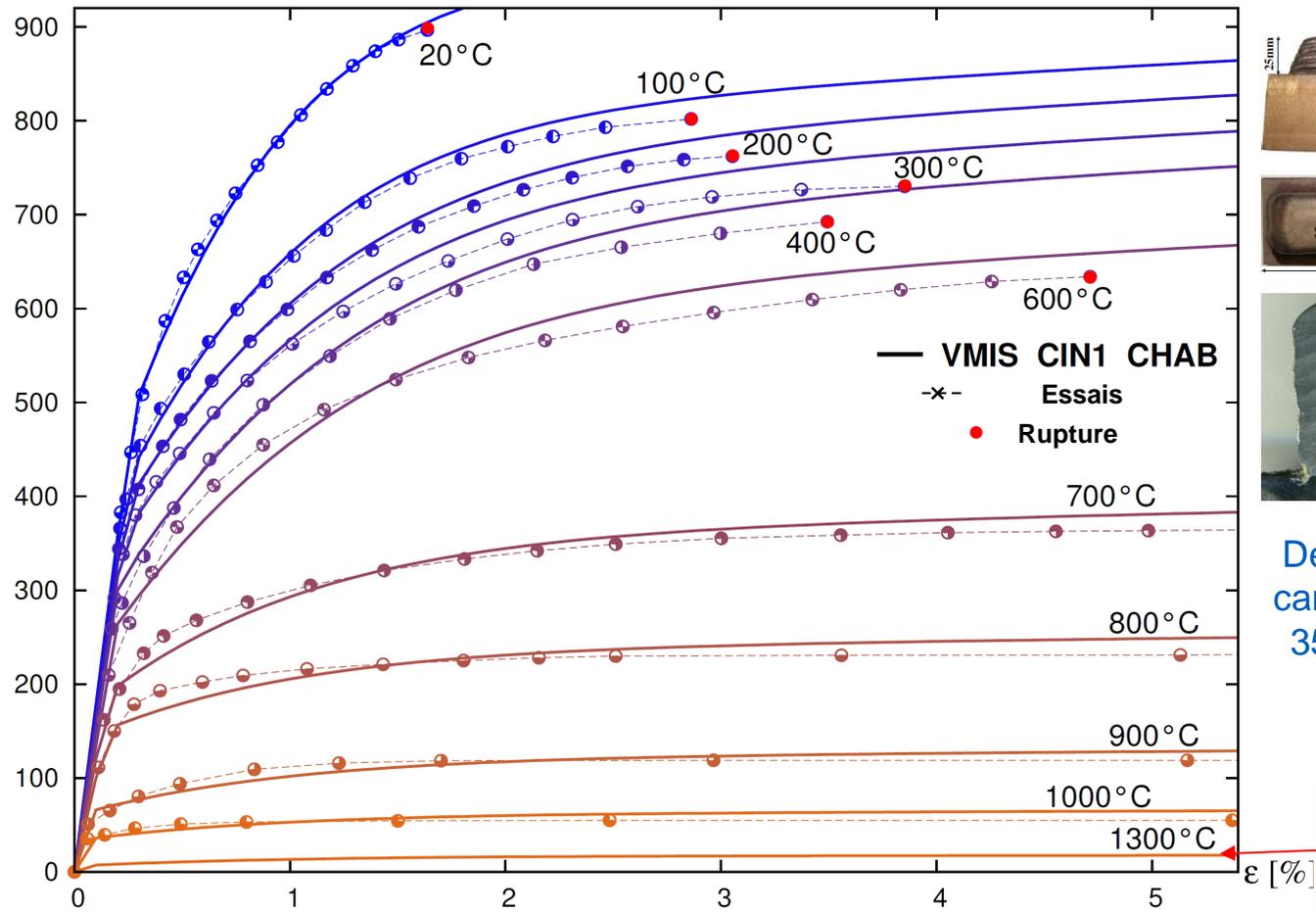
Modélisation du soudage

Influence du soudage multi-passes : effets sur dépôts épais



► + pas de transformations visibles en dilatométrie : on choisit de négliger les effets de la métallurgie pour la SNS

Identification d'une loi de comportement (Essais sur Geeble)



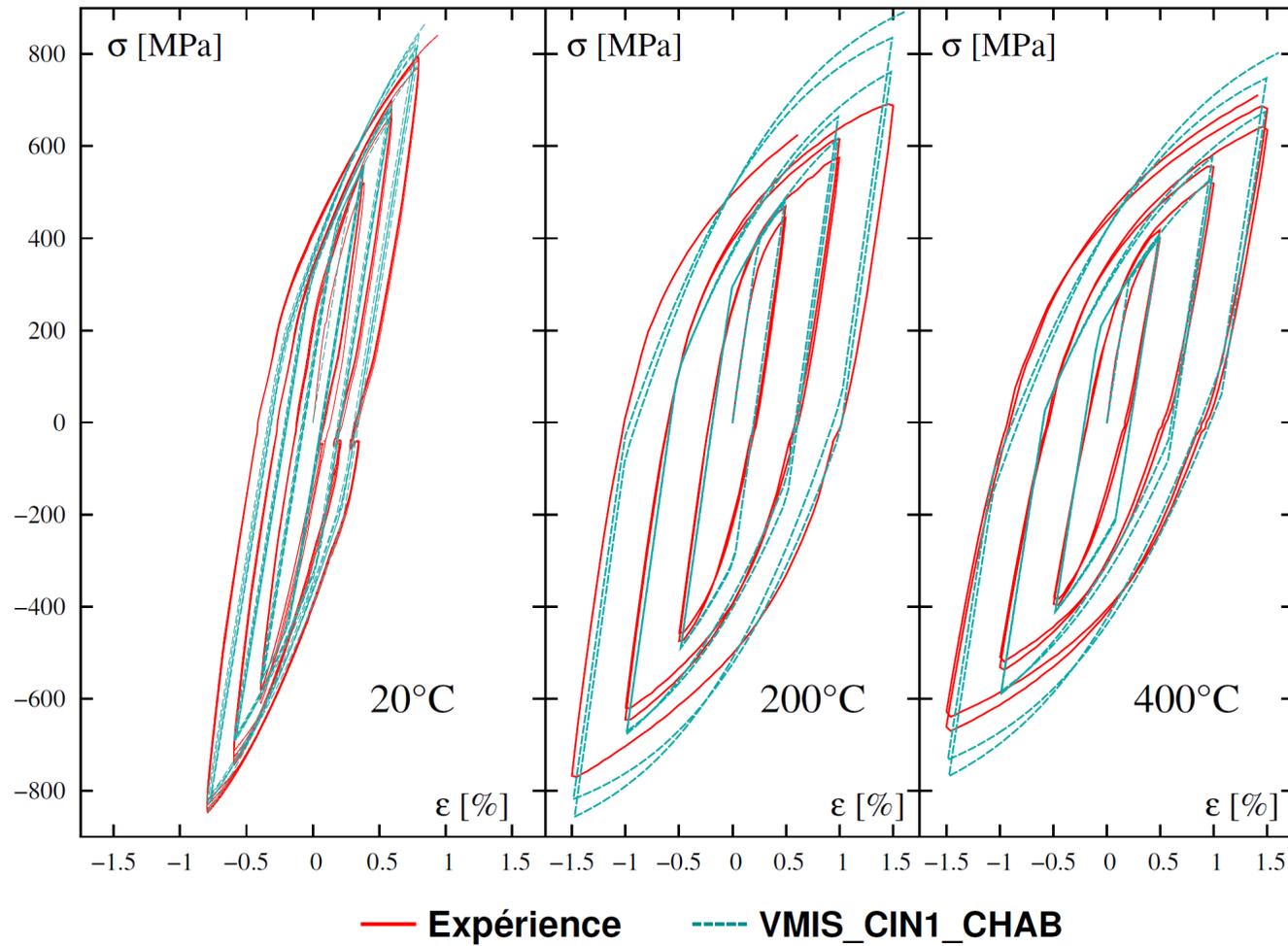
Dépôts épais utilisés pour caractérisation sur Geeble 3500 des laboratoires de l'INSA de Lyon

1300°C (liquidus) : extrapolation "numérique"

Comparaison expérience/simulation en traction

- ◆ Identification d'une loi de traction à une composante d'érouissage cinématique non linéaire (Vmis_Cin1_Chab dans Code_Aster)
- ◆ Évolution imposée monotone des coefficients en fonction de la température

Vérification sur comportement cyclique



► L'identification est validée dans le domaine testé

Introduction

Matériau

Modélisation du Soudage

Description du procédé étudié : Plasma à Arc Transféré (PTA)

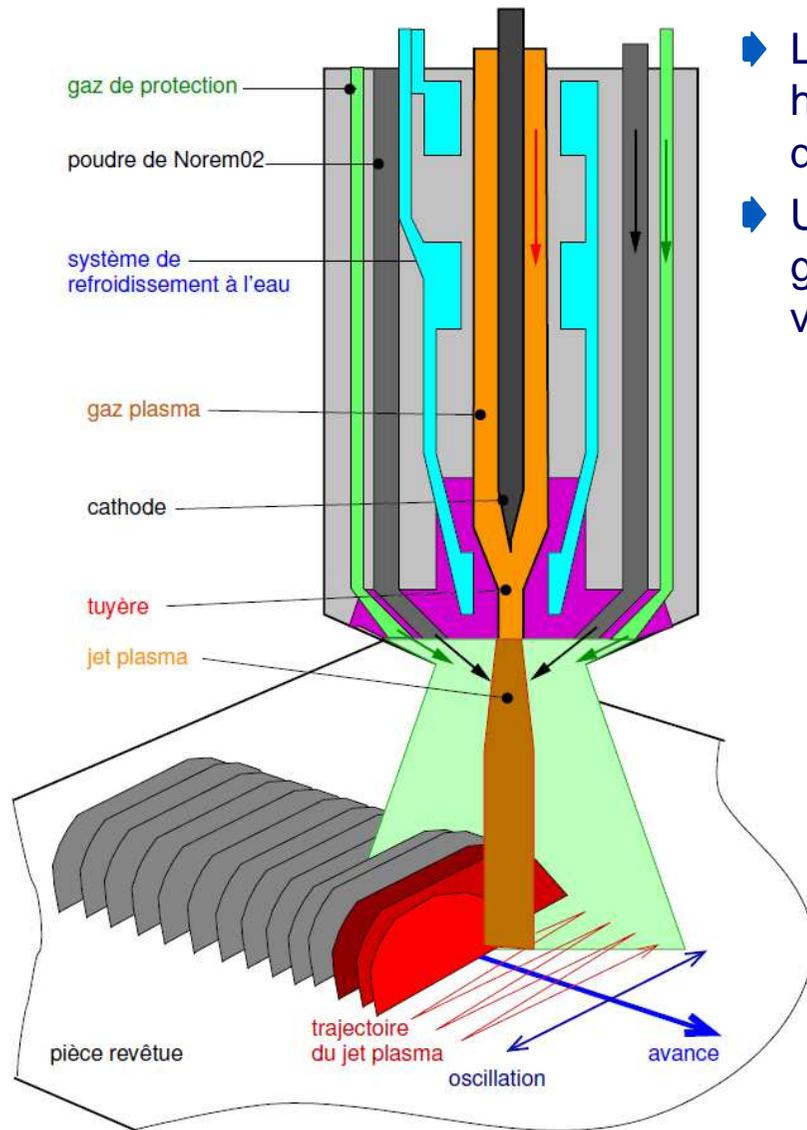
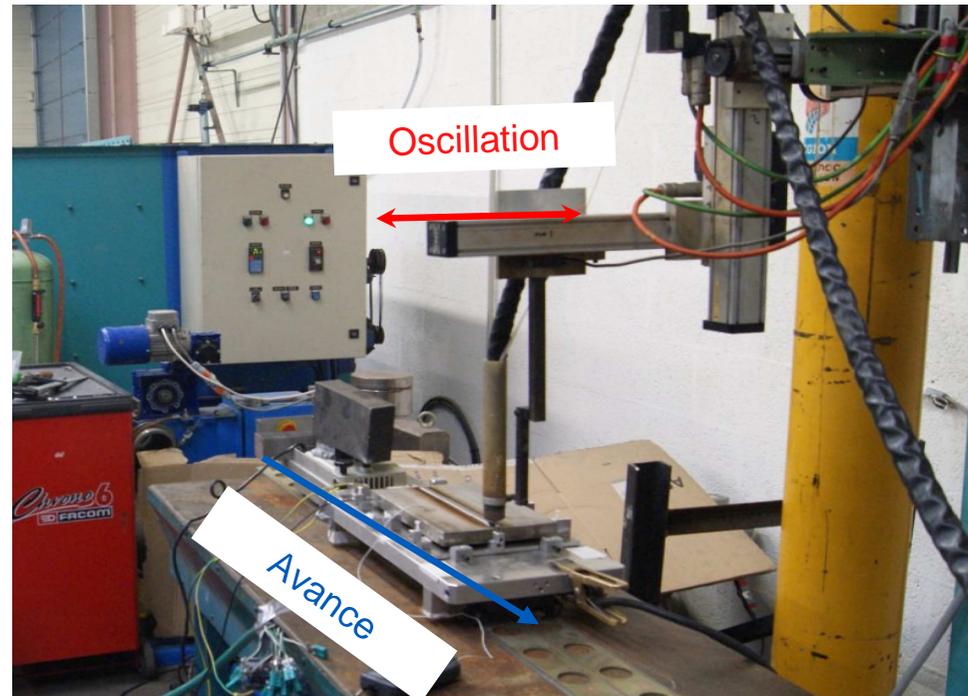


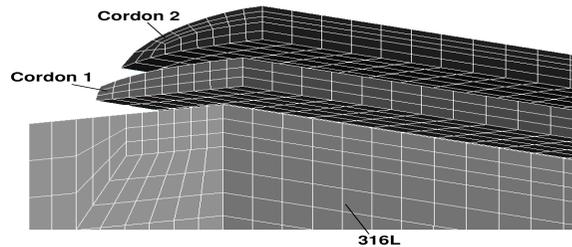
Schéma d'une torche PTA

- ▶ La tuyère concentre l'arc plasma et permet de très hautes densités d'énergies en sortie de torche (fusion de la poudre de MA).
- ▶ Une oscillation de la torche et un réglage des débits de gaz adapté permet de limiter le transfert de chaleur vers le MB : ZAT très peu profonde.



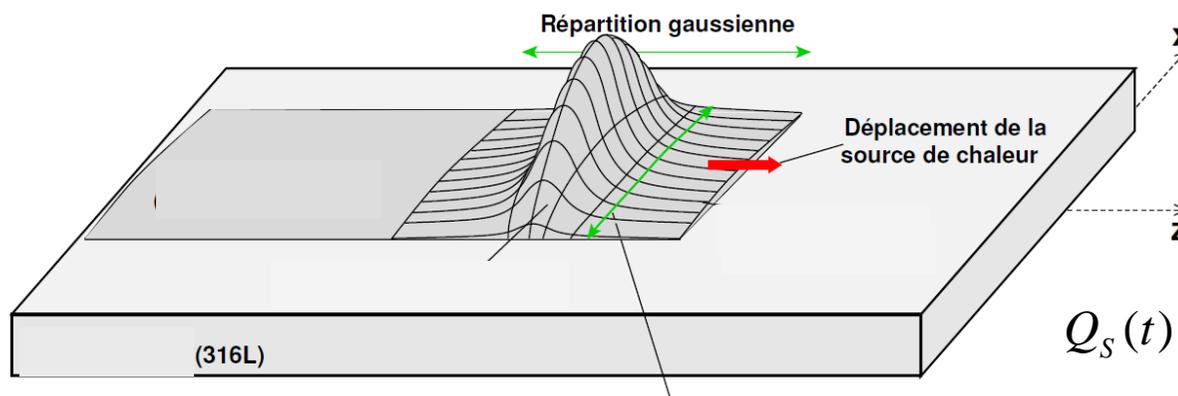
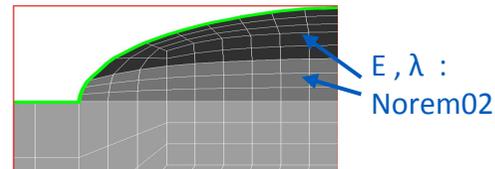
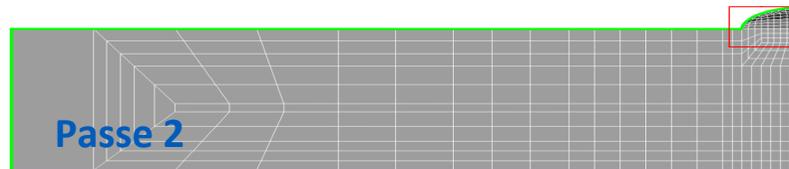
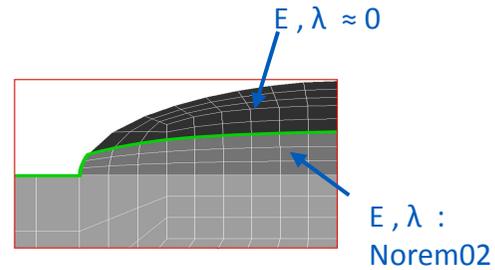
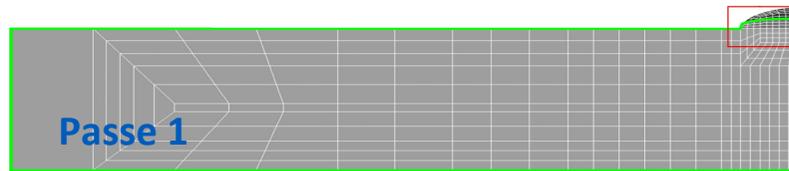
Essais de soudage sur maquette instrumentées dans les locaux de la société Atinox

Hypothèses de modélisation : thermique, mécanique



Désactivation complète des “cordons” :

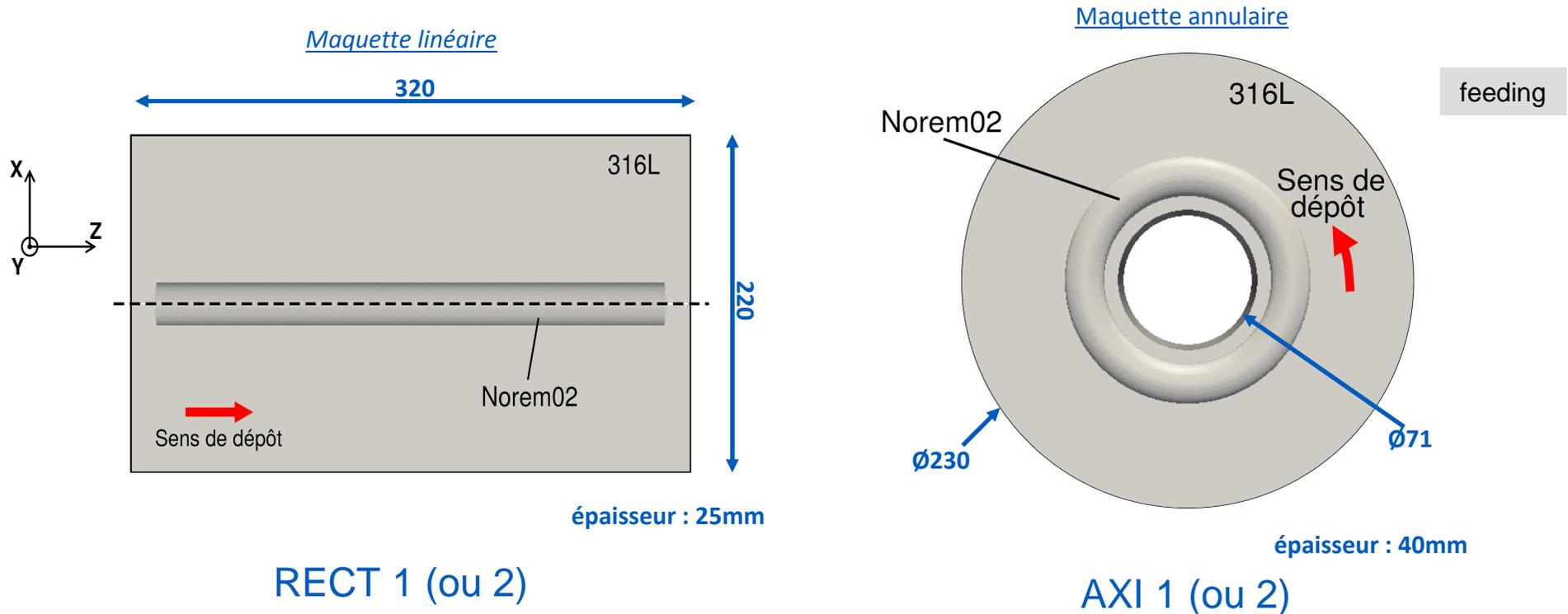
- Module d'Young $E \sim 0$
- Conductivité thermique $\lambda \sim 0$



$$Q_s(t) = \frac{U \cdot I}{S \cdot \beta \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(z - (z_0 + V_s \cdot (t - t_0)))^2}{2 \cdot \beta^2} \right]$$

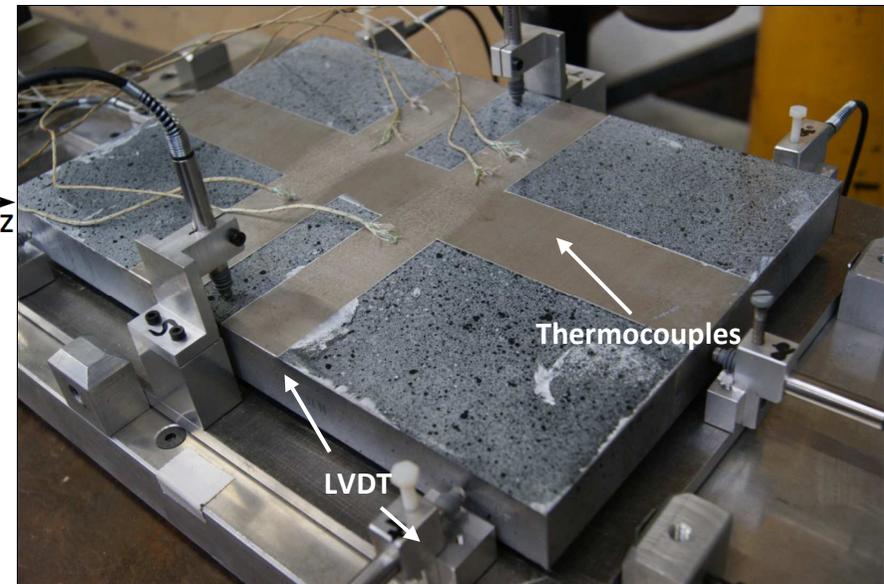
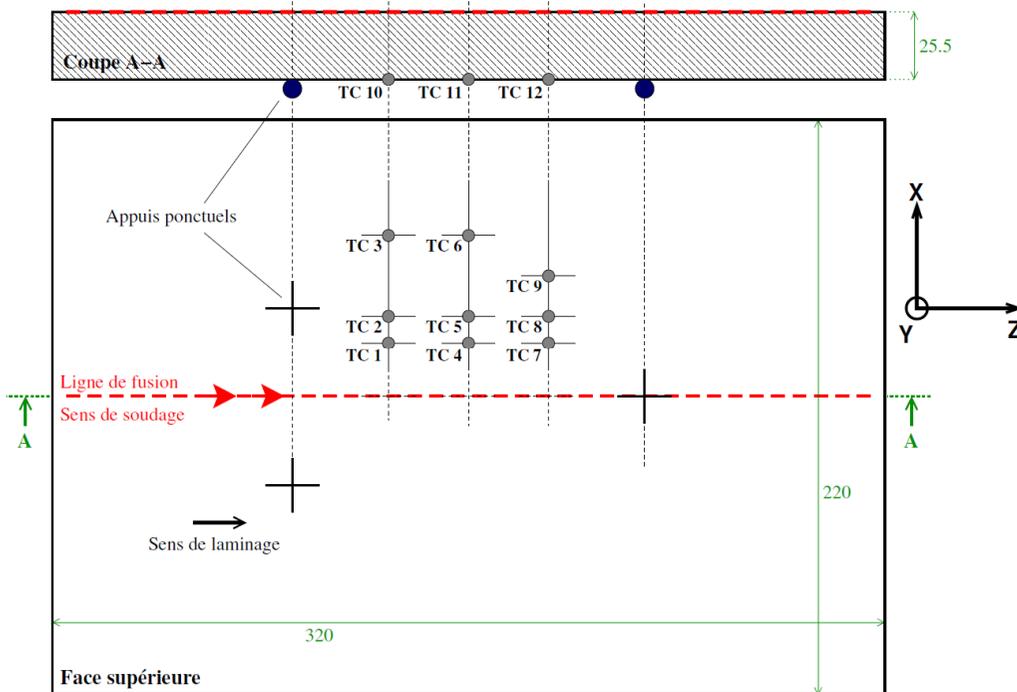
L'effet de l'oscillation est négligé : seule l'avance est prise en compte

2 maquettes différentes : « linéaire » & « robinet »



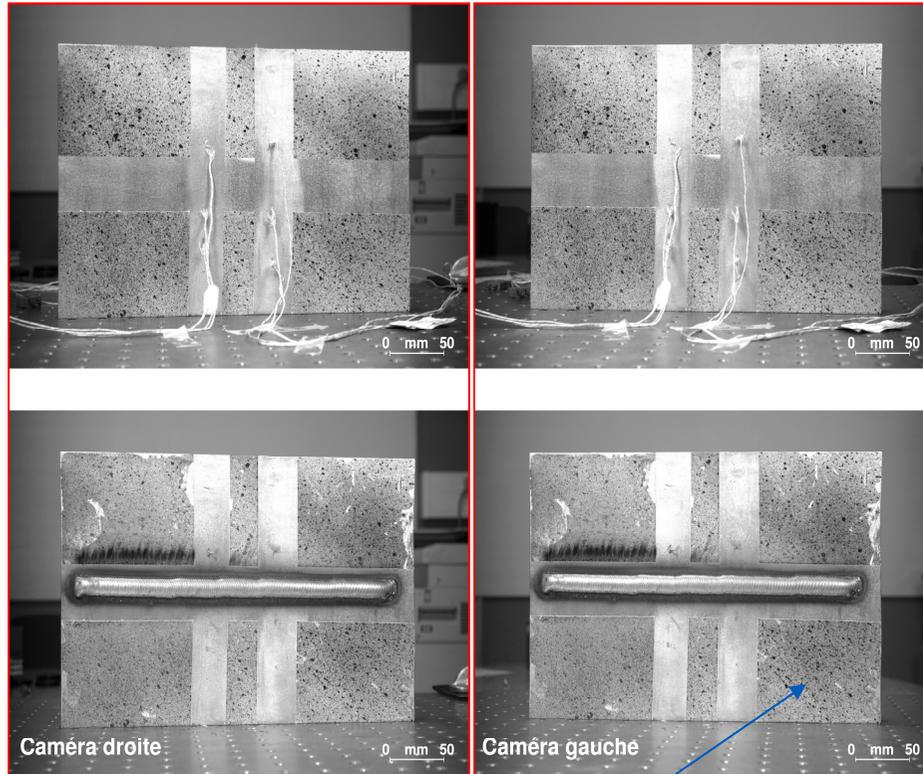
- Un cas simple et double passe pour chaque maquette
- Le volume de la maquette annulaire est comparable à celui d'un robinet
- On identifiera la source de chaleur (gaussienne et rendement), les coefficients d'émissivité et de transfert thermiques par optimisation sur le cas le plus simple (RECT1)

Instrumentation in situ des maquettes

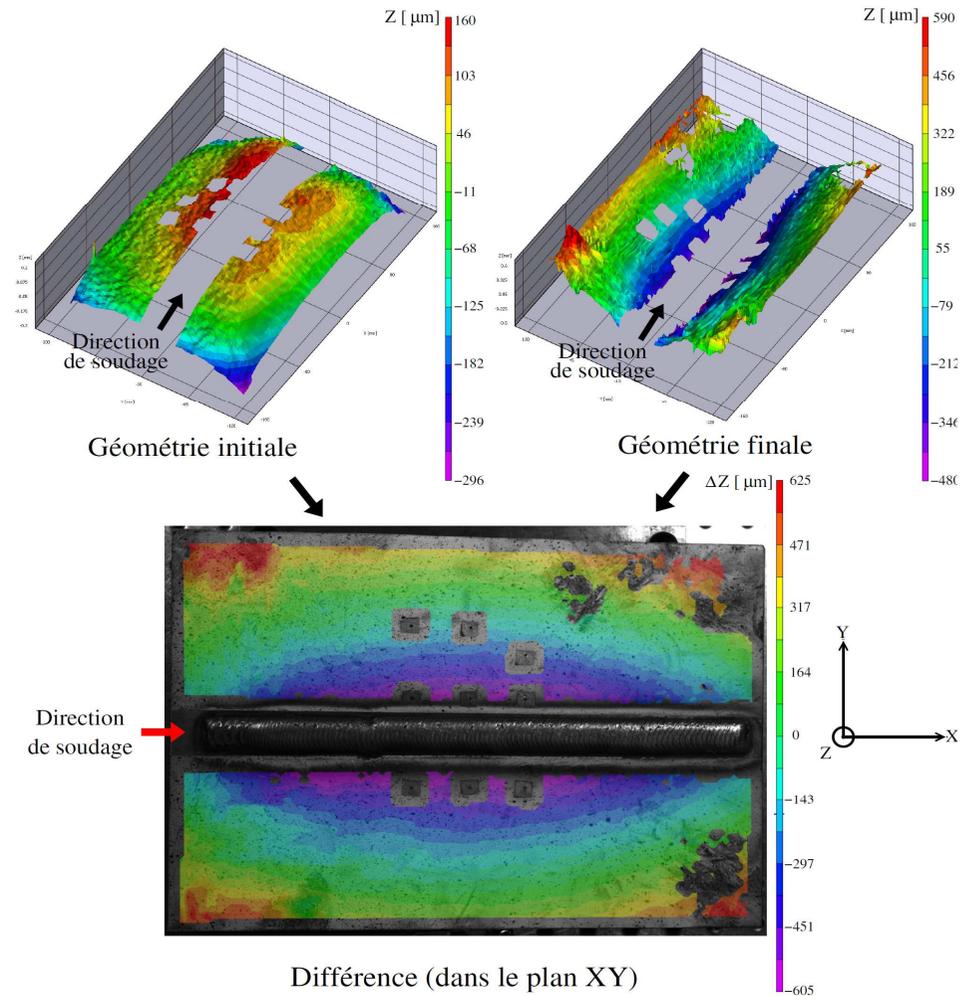


- ▶ Thermocouples micro soudés
- ▶ Couples de capteurs LVDT

Détermination des distorsions après soudage par corrélation d'images 3D

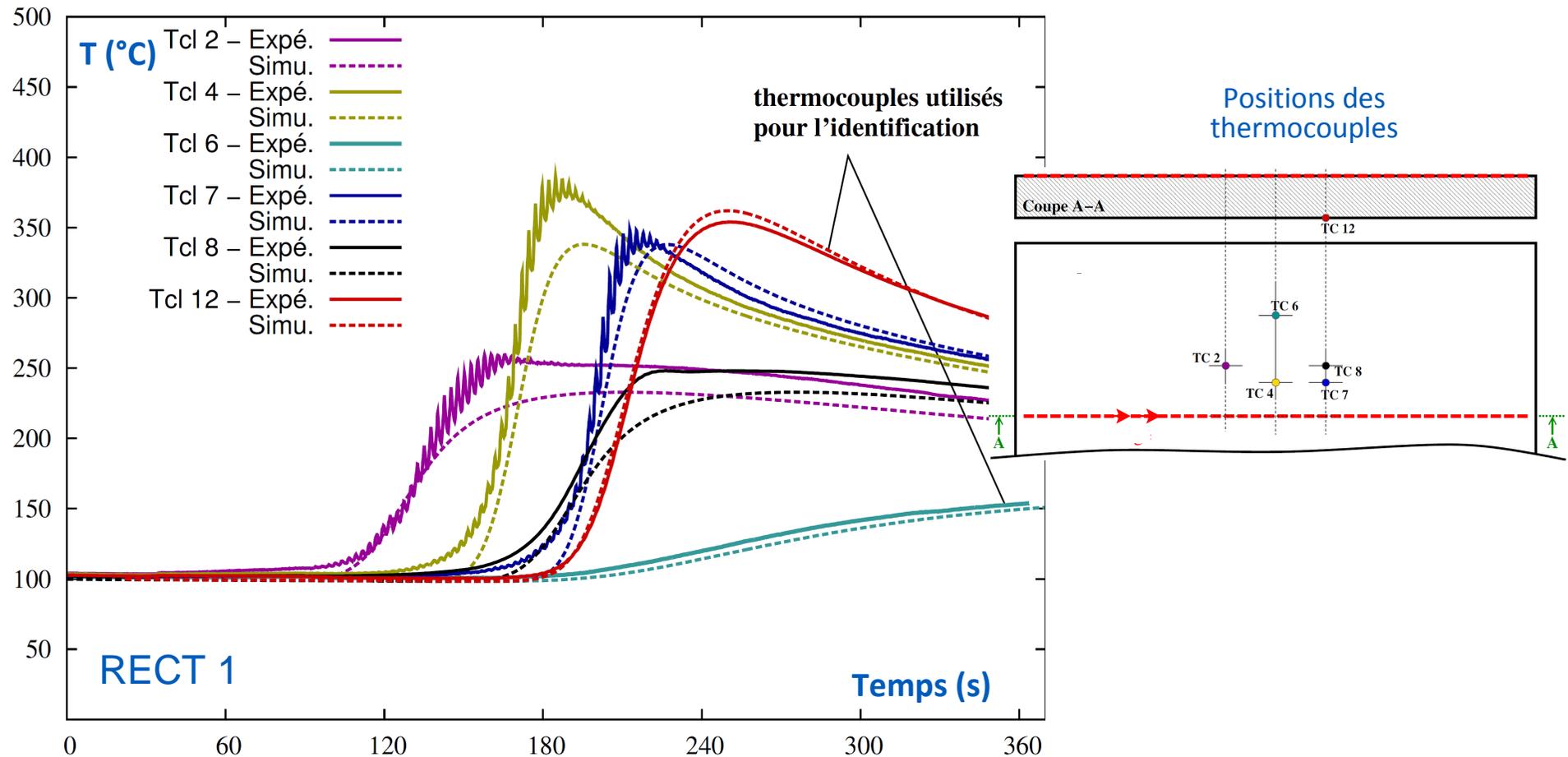


Mouchetis de peinture



► Les défauts de forme initiaux ne sont pas négligeables.

Recalage de la source de chaleur

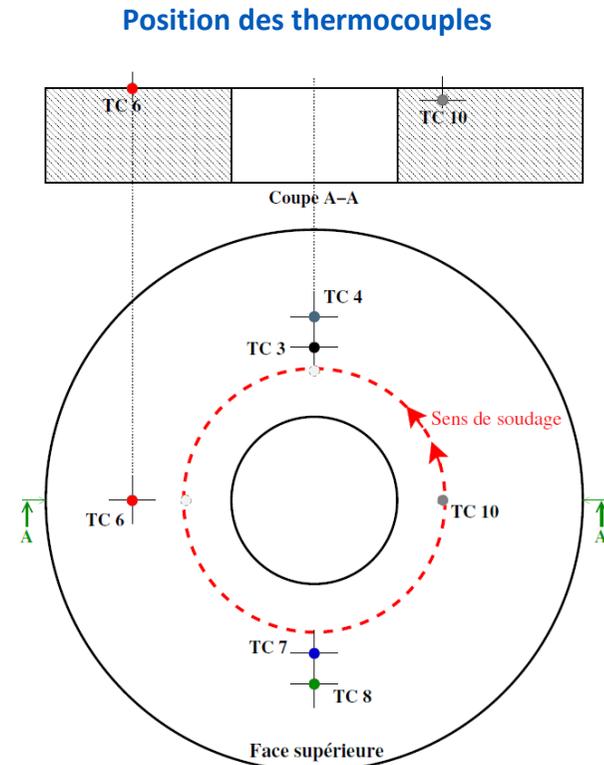
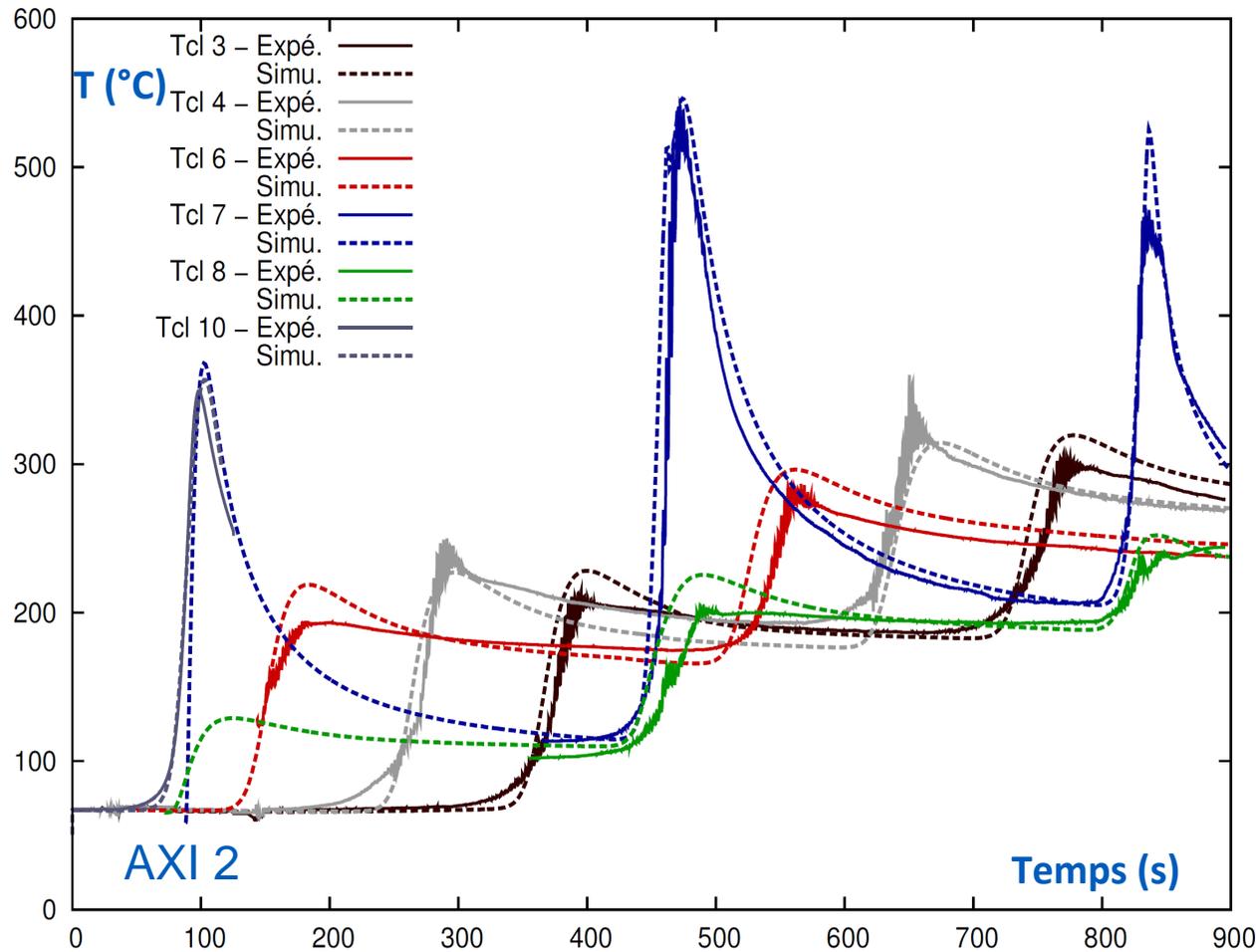


- Certains thermocouples de surface perturbés par les radiations plasma et le flux de gaz

$$f_{(\text{oscillation graphes})} = f_{(\text{oscillation torche})}$$

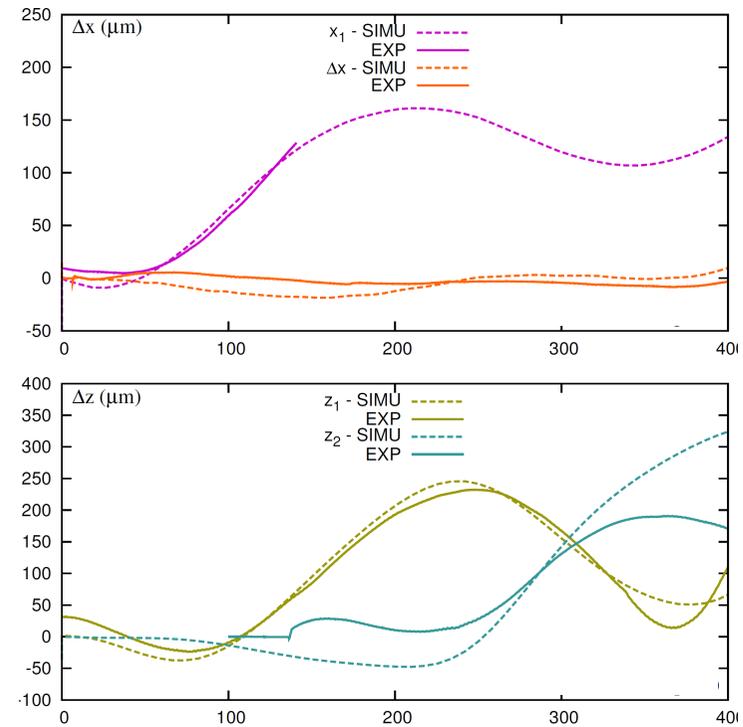
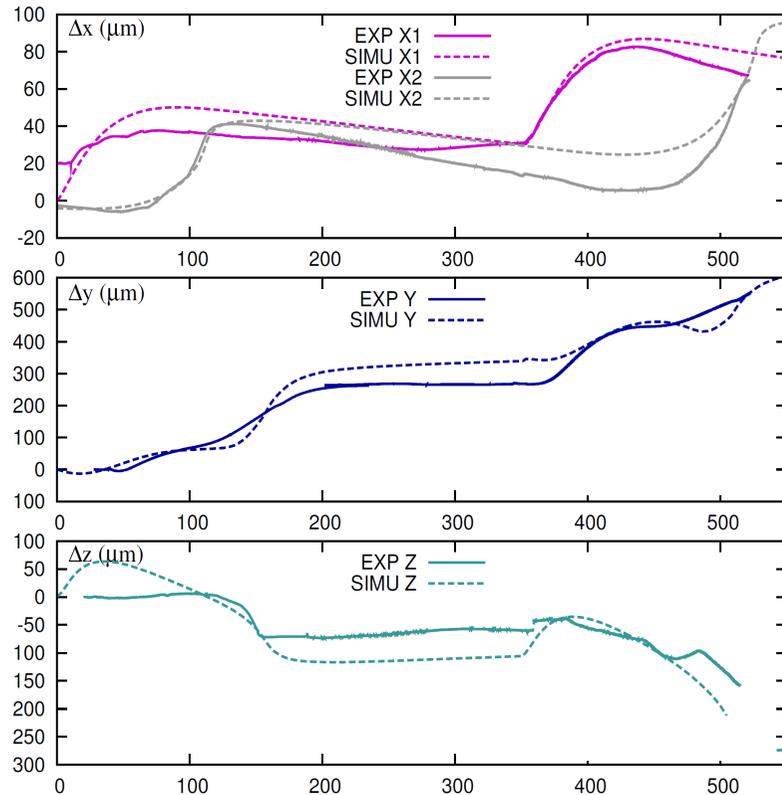
- Le rendement trouvé (0.6) est cohérent avec des estimations pour des plasmas comparables (sans métal d'apport), Les paramètres géométriques ne dépendent des paramètres d'avance et d'oscillation que pour de fortes variations.

Vérification sur les disques à 2 passes

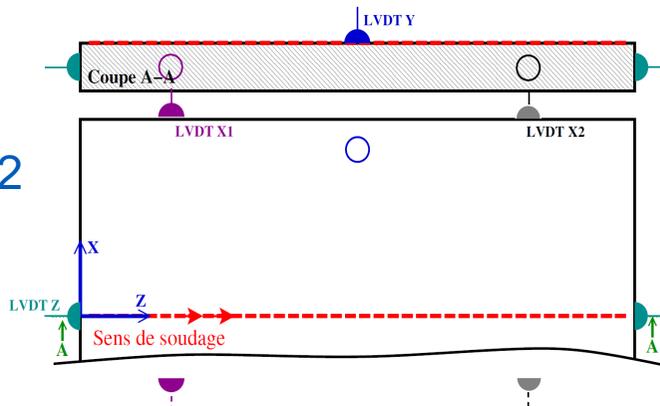


► On valide la modélisation thermique du procédé

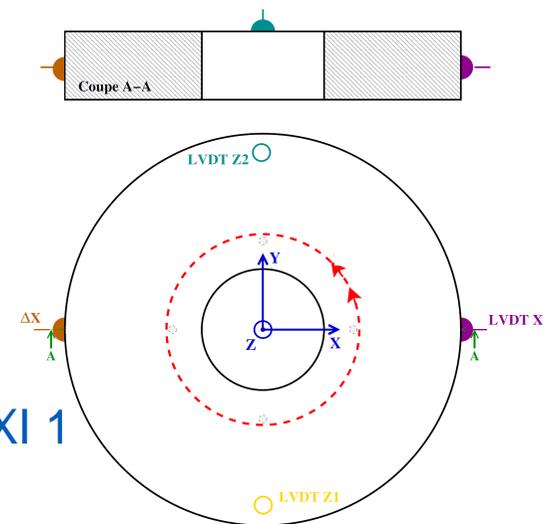
Validation mécanique : signaux LVDT in situ



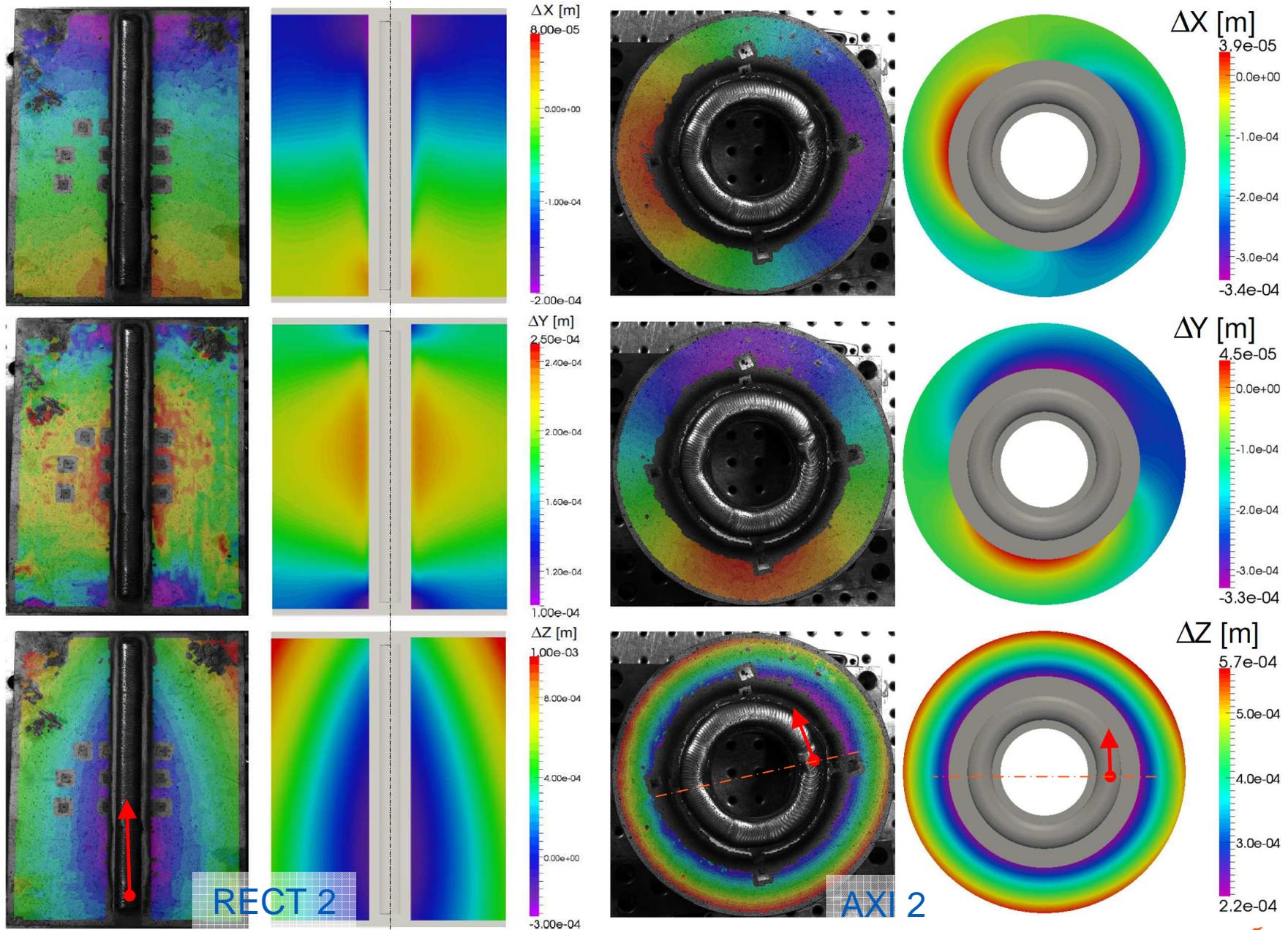
RECT 2



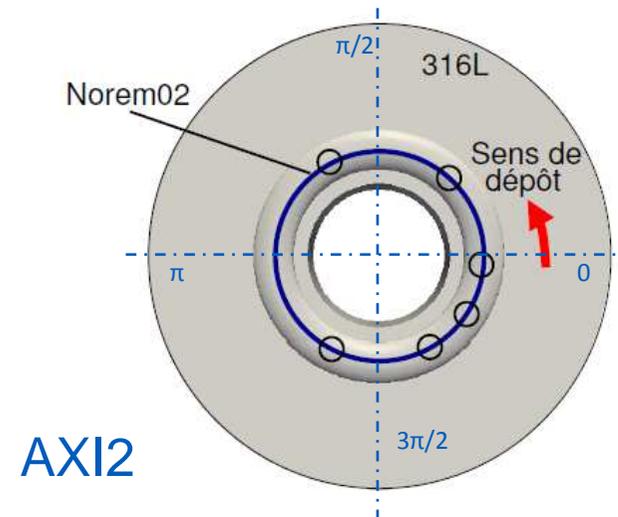
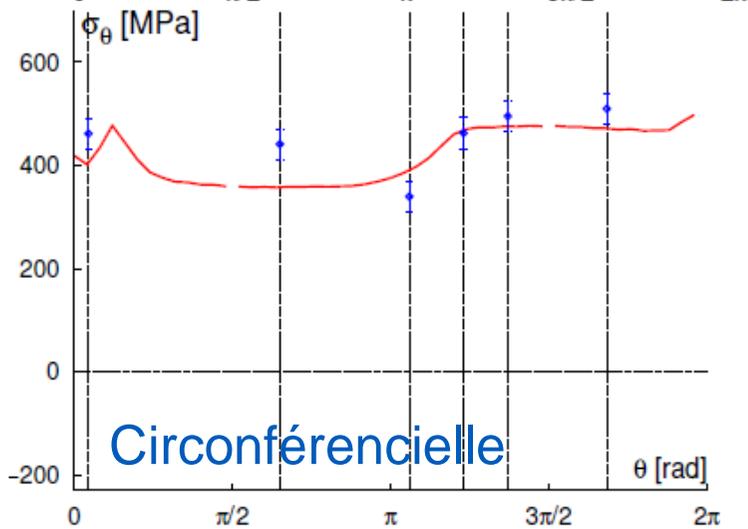
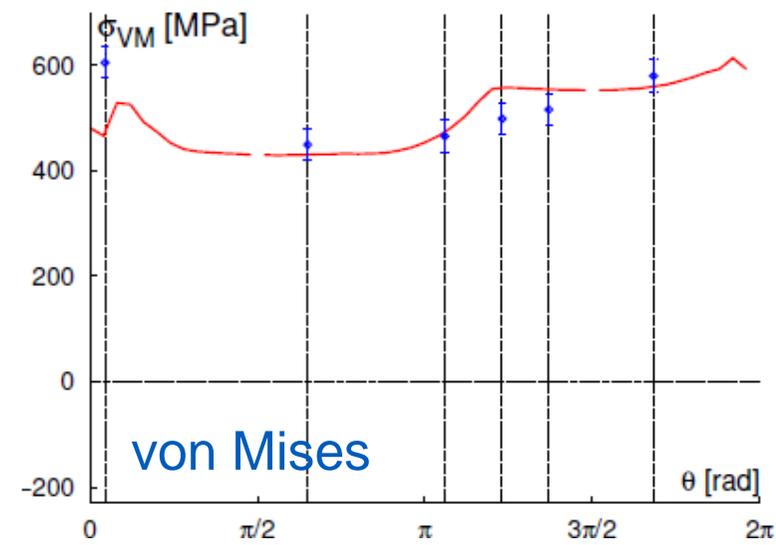
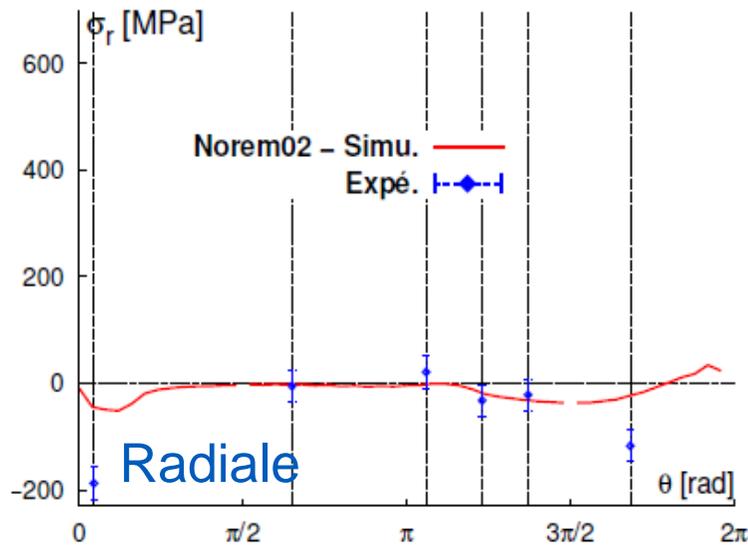
AXI 1



Distorsion après soudage : comparaison simulation/essais



Contraintes résiduelles par méthode du trou



- ◆ Bons résultats dans le dépôts (surfaçage par électro-érosion des cordons non pris en compte)
- ◆ Dans le matériau de base : mesure = simulation + résiduel usinage

Conclusion

- ▶ La **simulation est validée** (pour des études de robinetterie) :
 - Les contraintes résiduelles sont bien décrites dans les dépôts Norem02 (*rupture*)
 - Les distorsions globales sont bien prédites (*perte d'étanchéité dues aux distorsions*)
- ▶ De telles simulations pourraient être utilisées par les fabricants pour améliorer les conception « empiriques » (???)...
- ▶ Modélisation 3D de deux cordons : **10j** de calcul pour AXI2...
- ▶ ...sur le portable d'un étudiant en 2011 (**4j** sur station, **quelques heures** sur 32 processeurs)

Perspectives :

- ▶ Utiliser ces calculs sur un cas d'étude existant:
 - On sait que la modélisation est nécessaire. Dans quelles mesure la modélisation « axisymétrique » simplifiée (chauffe globale du cordon 3D) peut-elle suffire?
 - Prévu : Soudage 3D + 10 chocs thermiques alternés.
- ▶ Utiliser la modélisation thermique sur d'autres nuances pour expliquer les écarts de microstructure