



HAL
open science

Matériaux – Procédés – Simulation

J. Angles, O. Asserin, G. Perrin

► **To cite this version:**

J. Angles, O. Asserin, G. Perrin. Matériaux – Procédés – Simulation. Nouveaux matériaux pour les REP et procédés de fabrication associés, Jun 2016, Paris, France. cea-02439457

HAL Id: cea-02439457

<https://cea.hal.science/cea-02439457>

Submitted on 26 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Institut Tripartite

Séminaire du 10 juin 2016 :

« Nouveaux matériaux pour les REP et procédés de fabrication associés »

Matériaux – Procédés – Simulation

Jean Anglès et al.



Olivier Asserin et al.



Gilles Perrin et al.



Le biface (1.7 Ma – 0.3 Ma BP)

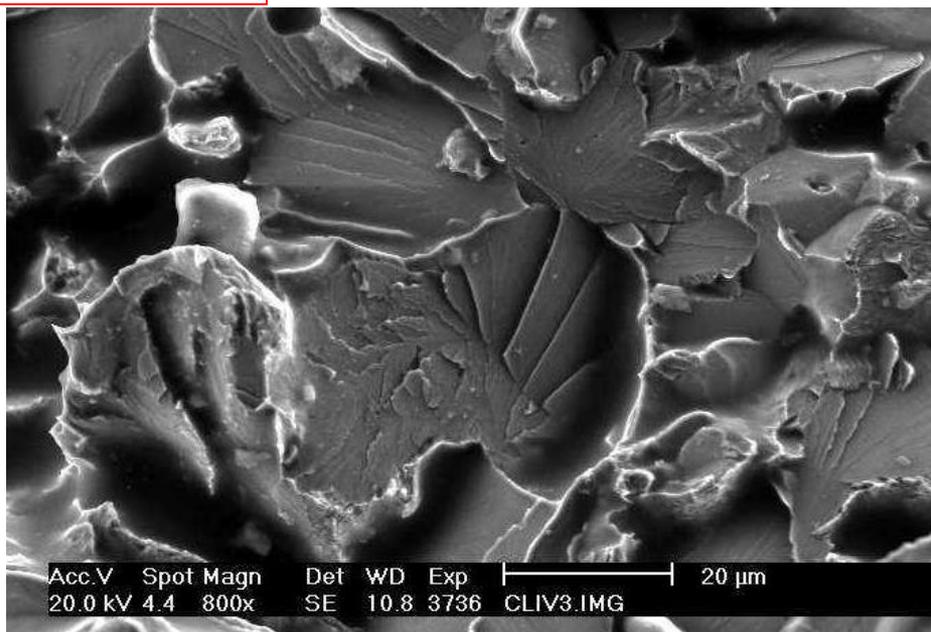


Le matériau multiface

Procédé de fabrication

Propriétés d'emploi

Analyse de risque



Matériau simplifié pour concepteur

Matériau architecturé

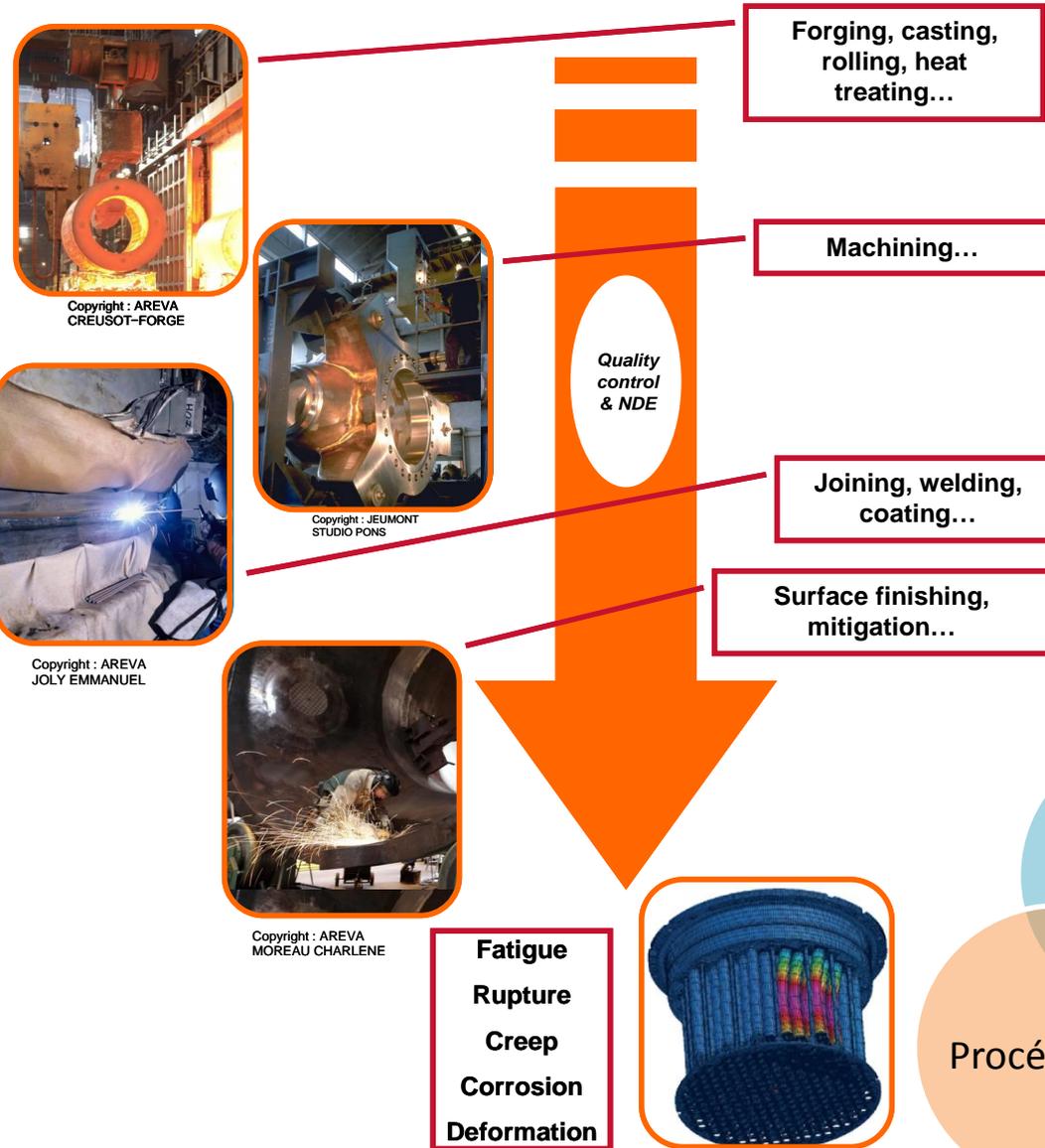
Matériaux architecturés

- Des matériaux avec une organisation à petite échelle ...
 - Particules et taille grain pour dureté et rupture
 - Grains : dans l'inox pour CND
 - Soudures
- ... qui est commandable

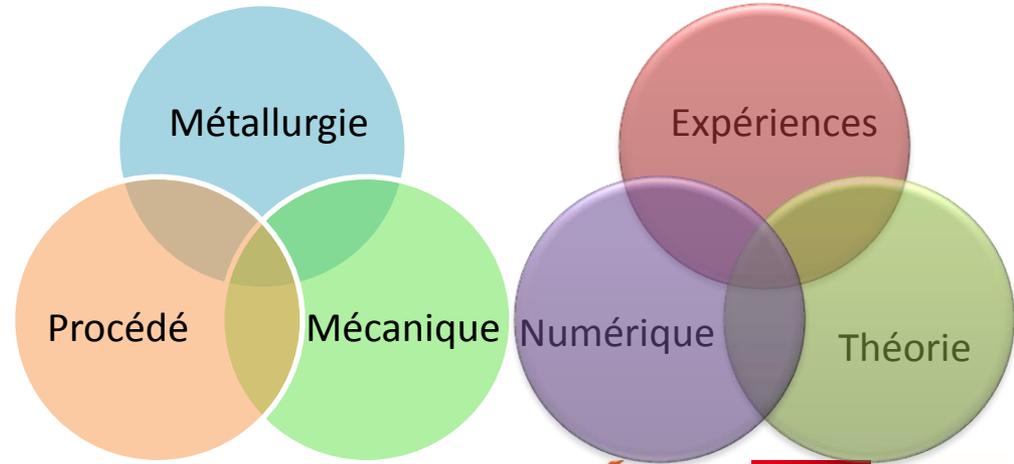
Propriétés d'emploi

- Paramètres matériaux
 - A%, KCV, %C, K_{IC}
- Critères
 - Textes réglementaires
 - Codes de construction
- Prise en compte de marges ou incertitudes

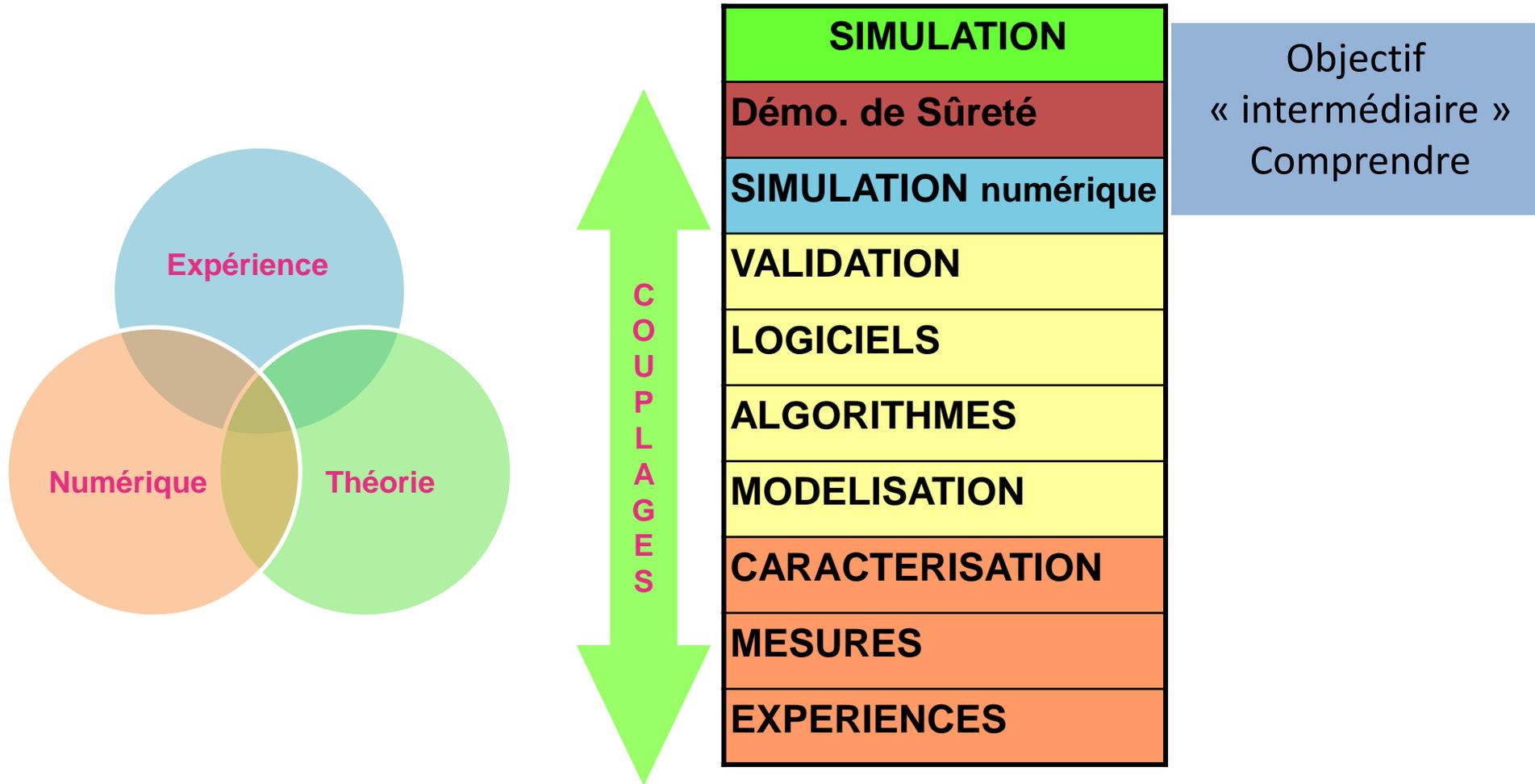
Contexte



Des interactions fondamentales

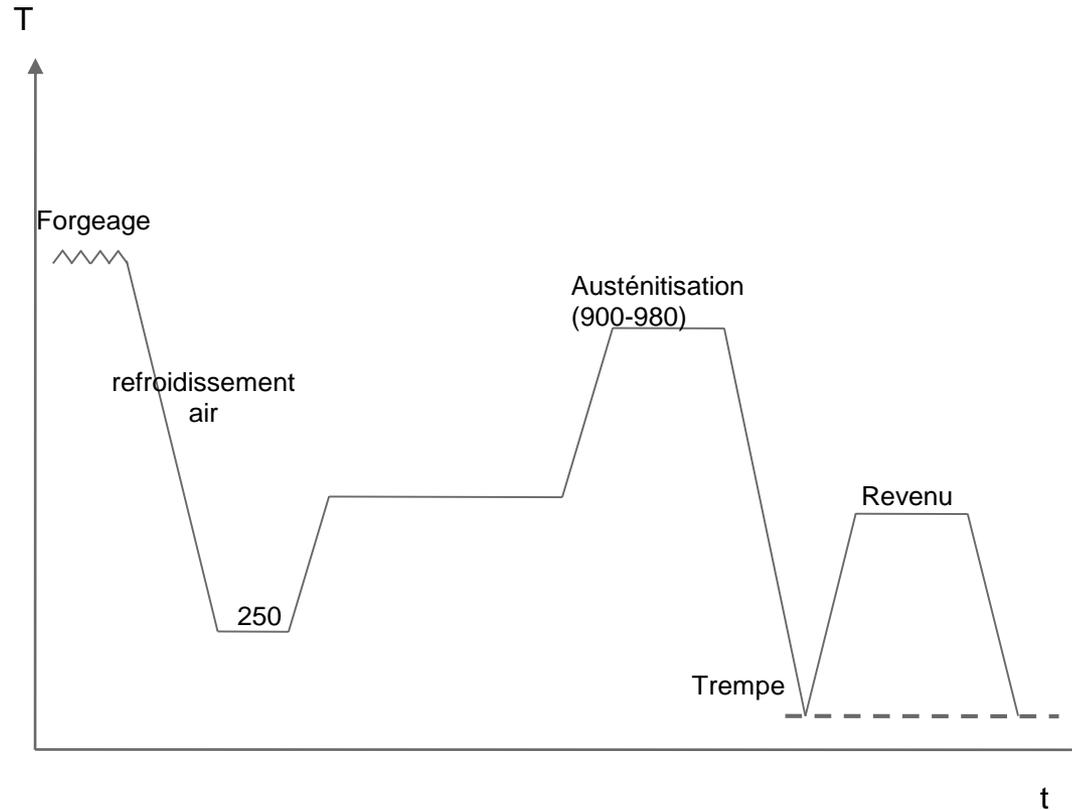


Simulation : tout un système



Une communauté d'acteurs

La simulation à la Forge

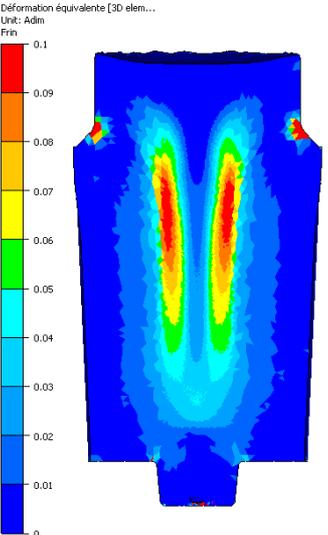


Coulée Solidification (CRMC)

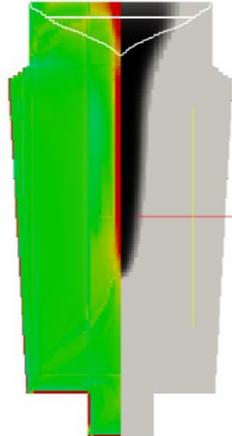
Thercast®



SOLID®



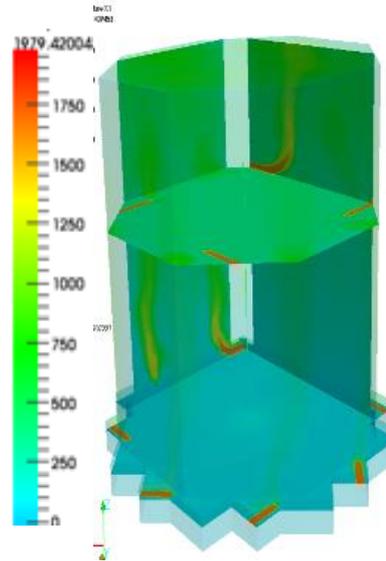
Distortion



Porosities

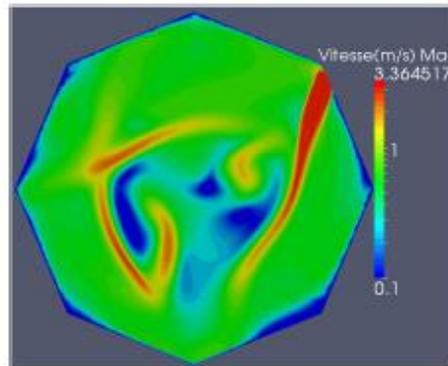
Simulation de Traitement Thermique

- Chauffage en four



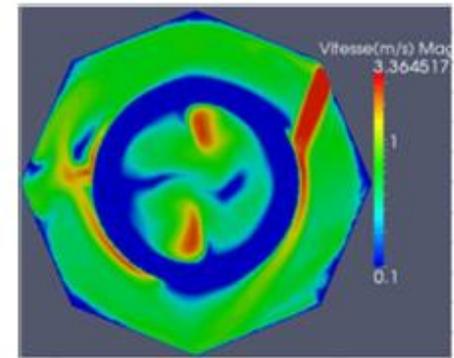
Industrial gas furnace: temperature distribution simulation (after 10 minutes heating) before the part introduction in the furnace

- Trempe



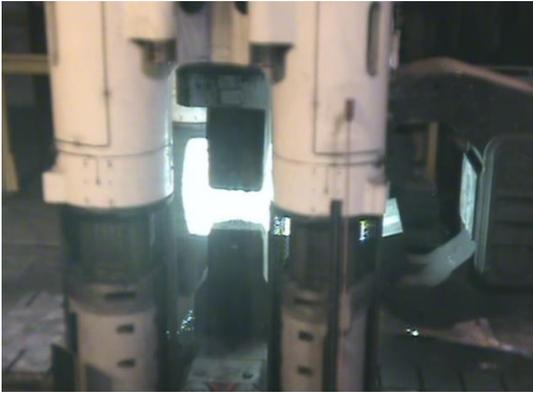
t = 1190s
h = 4 m

ThosT0 simulation of fluid velocity in a quenching tank, with or without the component



t = 1420s
h = 4 m

Forgeage d'une branche



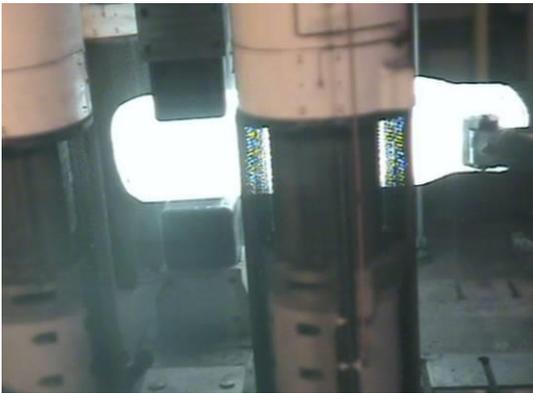
Blooming



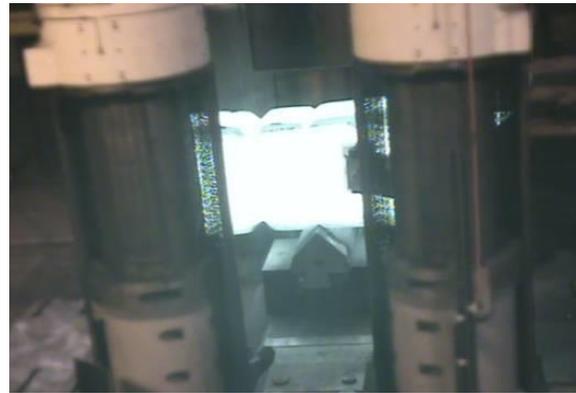
Upsetting



Upsetting



Drawing



Marking

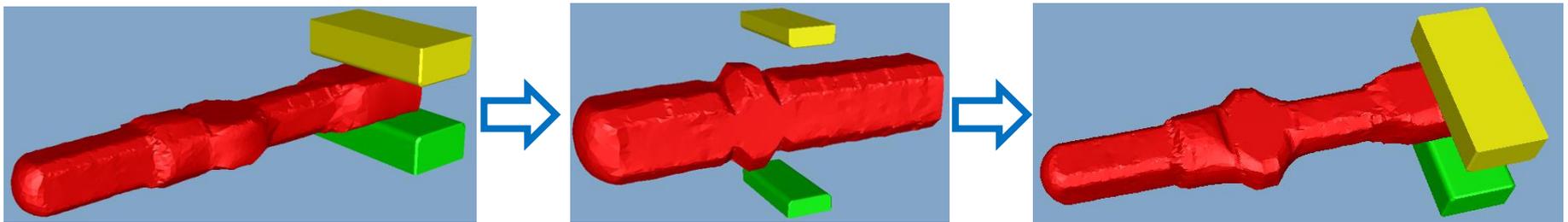
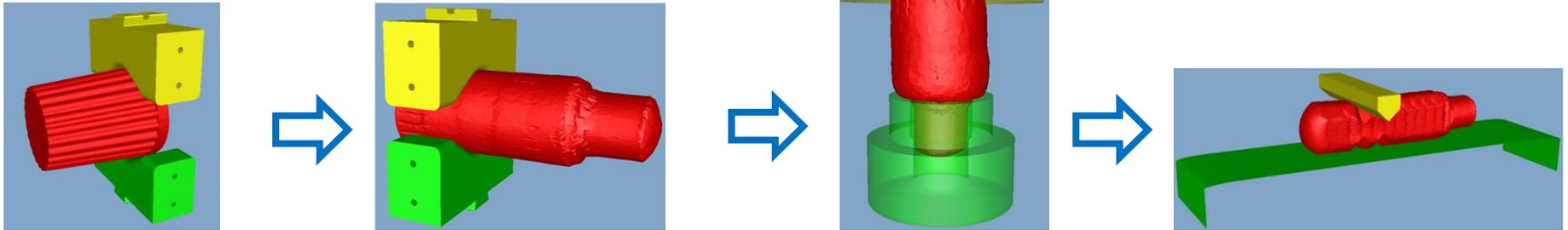


Final Product

Simulation numérique du forgeage d'une branche

▶ Lingot 304L – 158 t

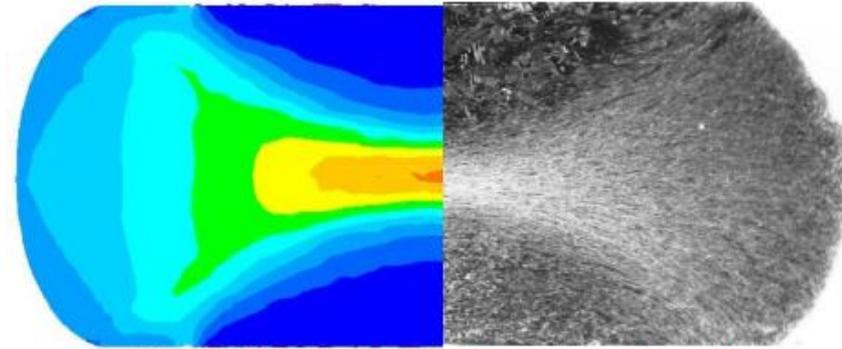
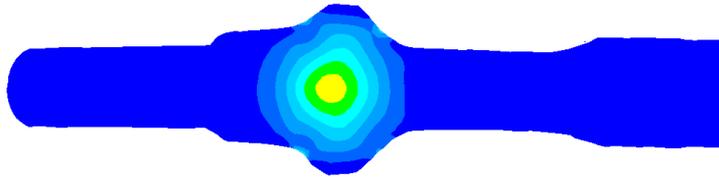
▶ Six opérations



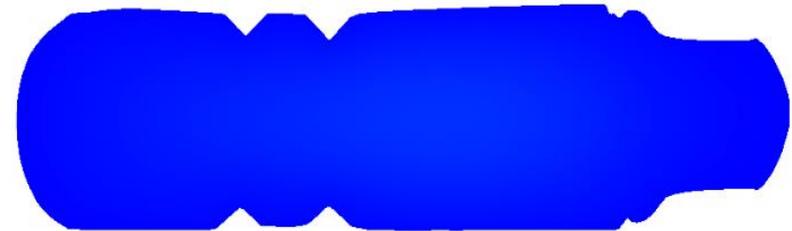
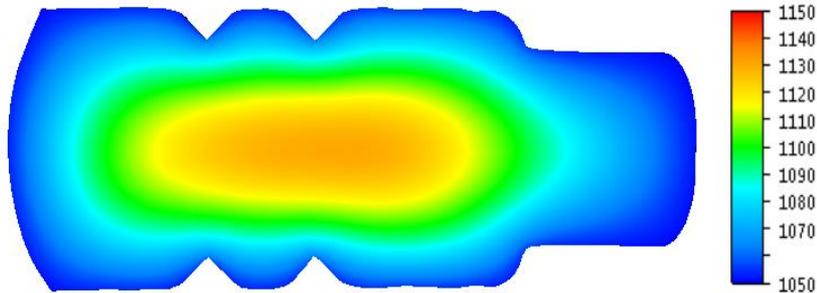
Upsetting of nozzle

Grandeurs mesurées et contrôlées

► Déformations

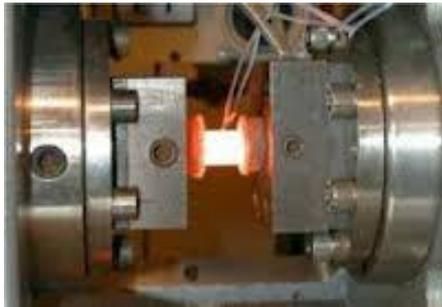


► Température



Loi rhéologique : plusieurs échelles x 200

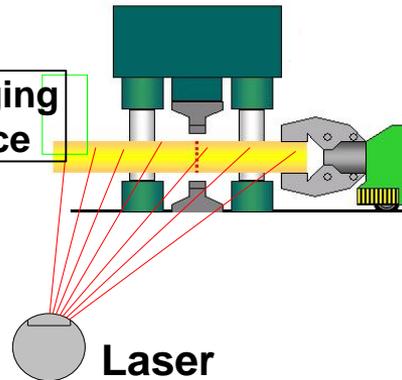
Gleeble Specimen 26mm



Forge : lingot 5000mm

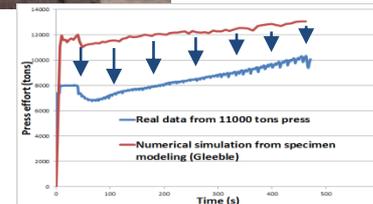


Real Forging
sequence



Measured
data

« *Inverse optimization* » algorithm to
reduce error between real and
computed stress.



Set of
parameters

Model with optimized parameters (Hansel Spittel)

Numerical
simulations in
FORGE®

$$\bar{\sigma} = K_0 e^{m_1 T} \bar{\varepsilon}^{m_2} \dot{\bar{\varepsilon}}^{m_3} e^{\frac{m_4}{\bar{\varepsilon}}} (1 + \bar{\varepsilon})^{m_5} T$$

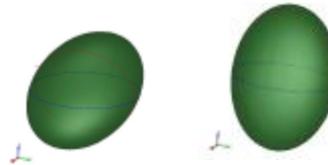
► Results

- Reduction of relative least square error of press from 43% to 20%
- More accurate and predictive model

Refermeture de porosité : CicaPoro

- **Modèle : variables pertinentes locales**

- Géométrie des porosités
- Taux de déformation
- Triaxialité des contraintes
- Température



- **Results**

- Voids closure → analytical expression model
- Forge® integration via an additional module
- More realistic approach than existing model :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + K_c T_x \bar{\varepsilon}$$

Existing in FORGE®

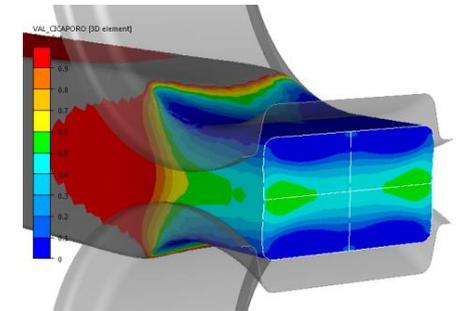
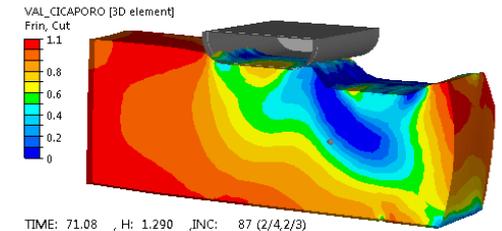
Error up to 60%

- Performance : no extra computation time
- Only one pass process module for the moment

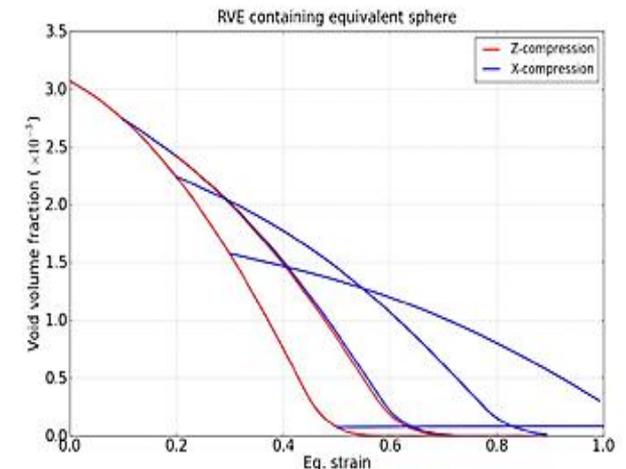
$$\frac{V}{V_0} = f(T_x, \bar{\varepsilon}, p, \lambda)$$

New model

Error max. <7%



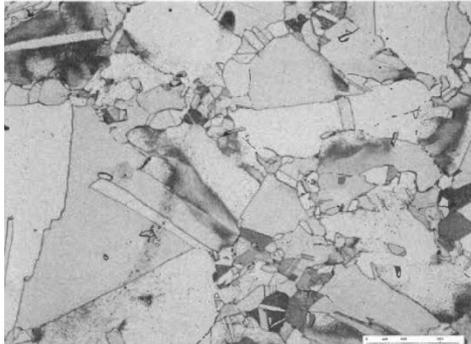
Strain when cogging (up) and rolling (low)



Evolution of void depending on load path

Recristallisation des BF 304L

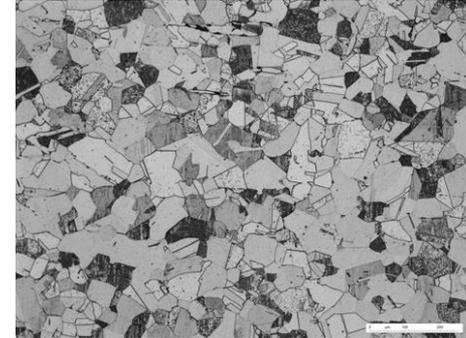
► 1. Programme expérimental



250µm

←ASTM 1 (250-300µm)
and 6 (40-50µm) in the
nozzle

ASTM 5 (60-70µm) at the
bottom side→

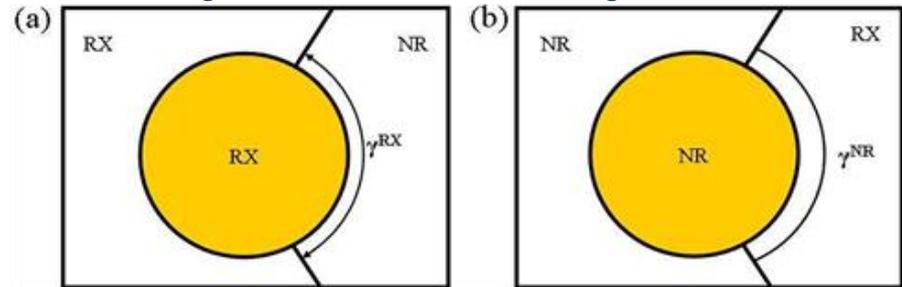


250µm

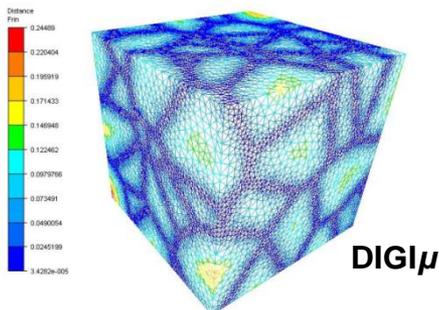
► 2. Modèle de champ moyen

◆ Variante topologique 2015

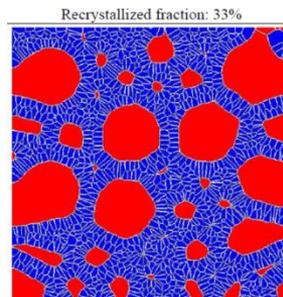
Scheme of mobile surface fractions for representative
grains RX



► 3. Modèle à champ complet



DIGIµ



Recristallisation en collier (2D)
– 304L post forging

La simulation à la Forge

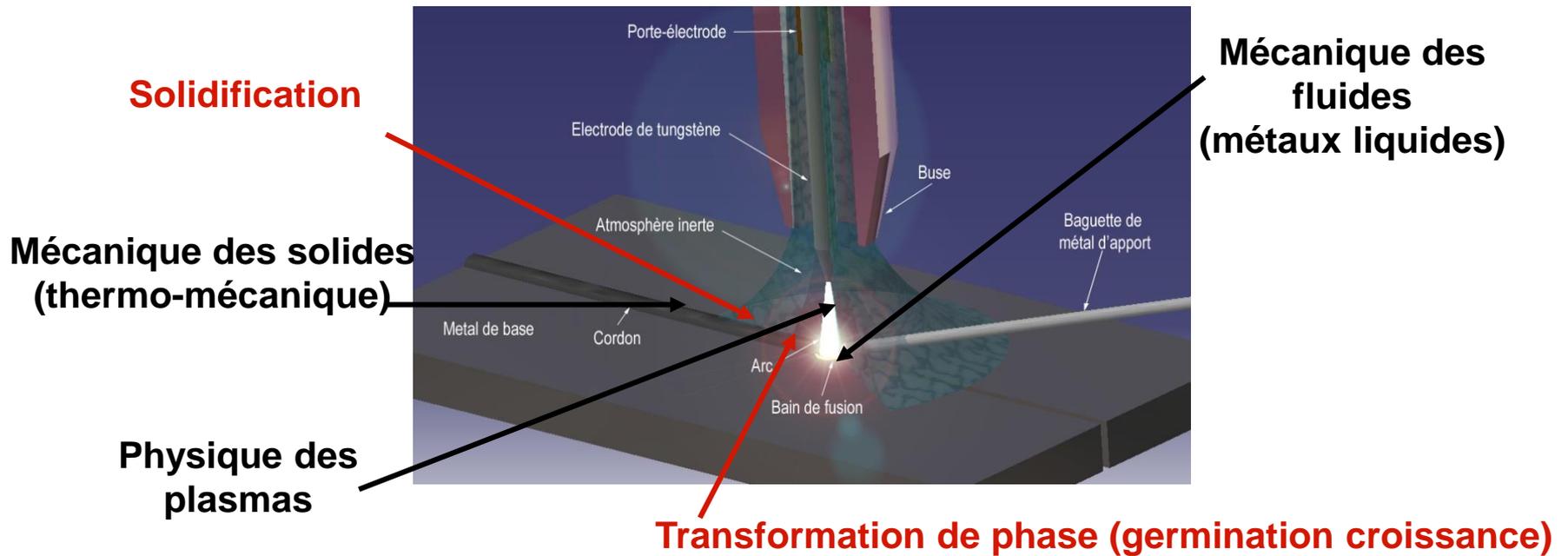
- Coulée/Solidification de lingot
- Four de chauffage
- Forgeage
 - Macro → Loi rhéologique
 - Meso → Refermeture des porosités
 - Micro → Recristallisation
- Traitements Thermiques
- Usinage

Capacités expérimentales en soudage



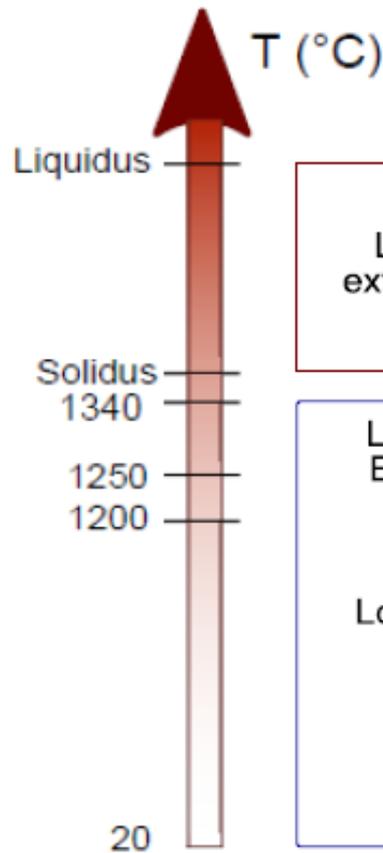
INTRODUCTION

Un problème multi-physique complexe



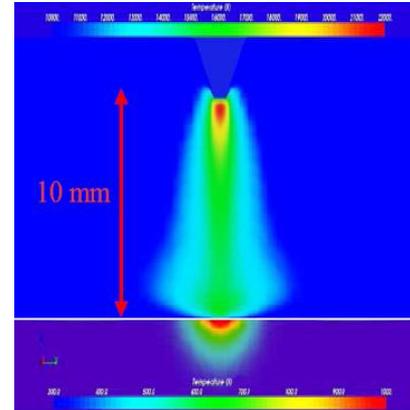
INTRODUCTION

Une grande échelle de températures



26 000°C

2300°C



Thèse D. Borel (2013)

Thèse X. Yau (2015-2018)

Thèse K. Koudadje (2013)

Zone pâteuse

Loi de comportement élastoviscoplastique extrapolée à partir des essais en phase solide
Loi cohésive : essais de traction en zone pâteuse

Loi de comportement élastoviscoplastique :
Essais de traction à chaud en phase solide
1200 °C - 1340 °C (~Solidus)

Loi de comportement élastoviscoplastique :
Essais Gleeble : 20 °C - 1250 °C

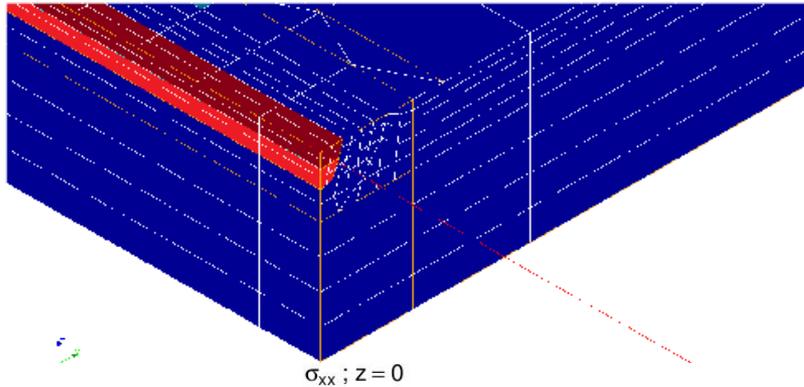
Phase solide

Thèse L. Bouffier (2013)

INTRODUCTION

Quelles grandeurs physiques faut-il mesurer ?

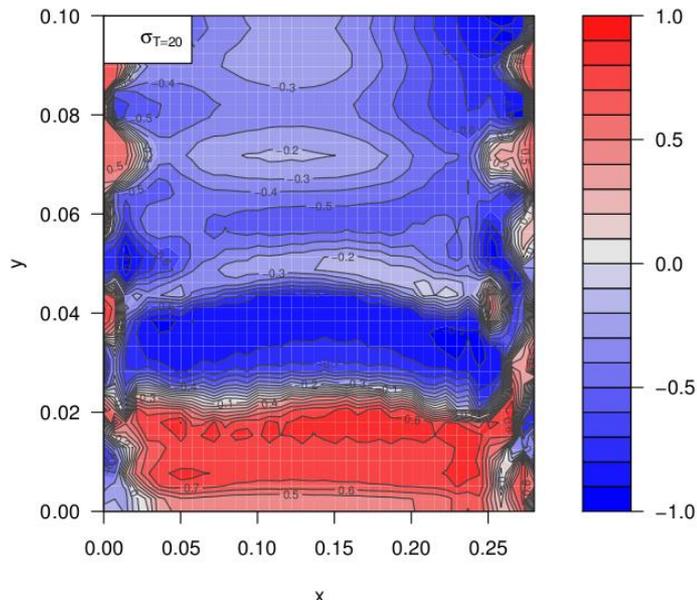
→ Une analyse de sensibilité peut répondre à cette question, exemple :



• Entrées :

coefficient de dilatation thermique,
module de young,
limite d'élasticité,
pente d'écrouissage.

• Sorties : contraintes résiduelles.



Conclusions :

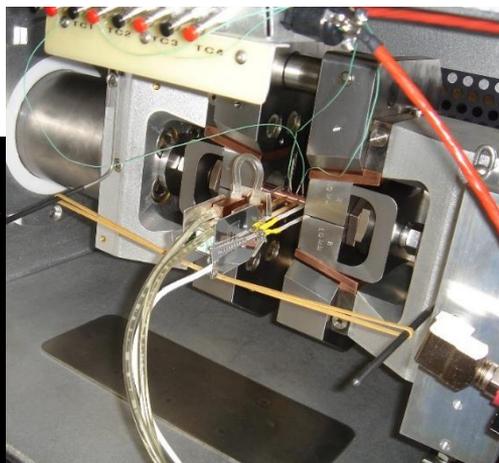
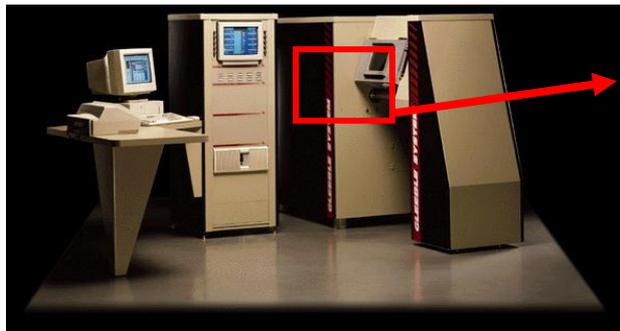
- Paramètre le plus influent : **limite d'élasticité** ($T=20^{\circ}\text{C}$);
- Second paramètre le plus influent : **dilatation thermique** ($T=1000^{\circ}\text{C}$);
- **Module d'Young** ($T=20^{\circ}\text{C}$) : influent dans les zones de déformations élastiques;
- **Pente d'écrouissage** ($T=20^{\circ}\text{C}$) : influent dans les zones plastiques.

SOMMAIRE

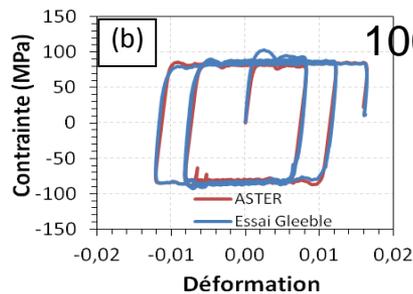
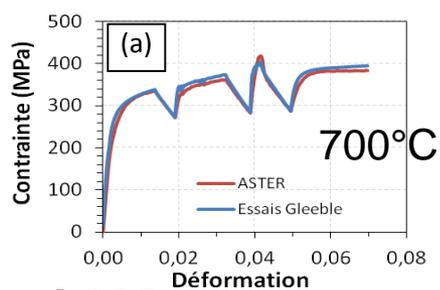
1. Essais de caractérisation
2. Essais de validation
3. Perspectives

Essais de caractérisation

Machine Gleeble

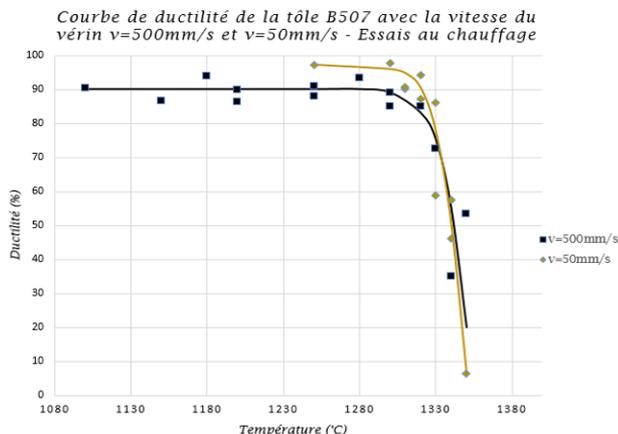


Températures :
300°C – 1250°C



Comportement mécanique
des matériaux
Thèse L. Bouffier (2013)

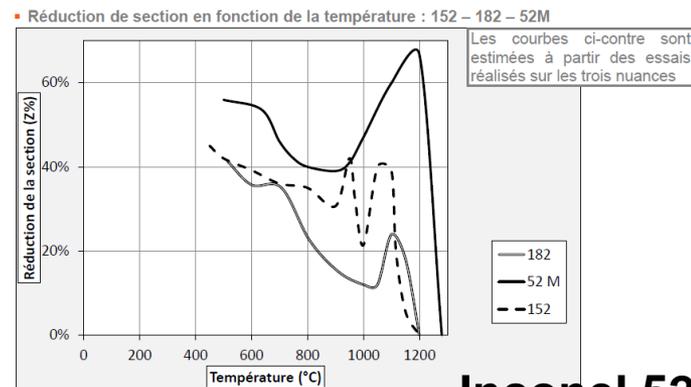
Inconel 600



316L

FAC par Liquation

Thèse G. Tran Van



FAC par DDC

Thèse A. Rapetti

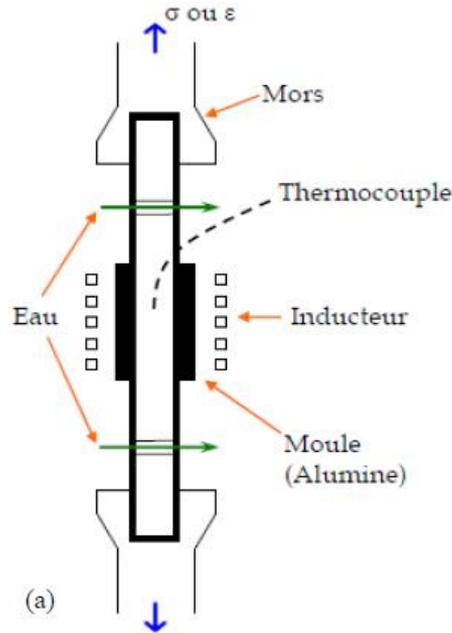
Inconel 52

Essais de caractérisation

Traction à chaud

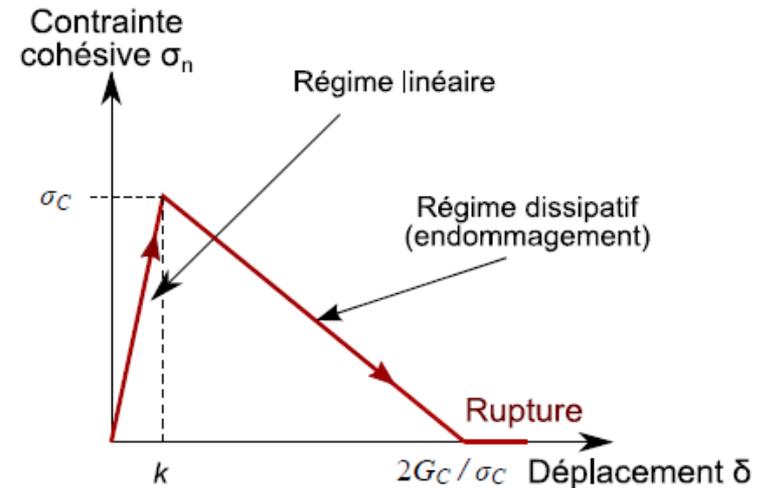
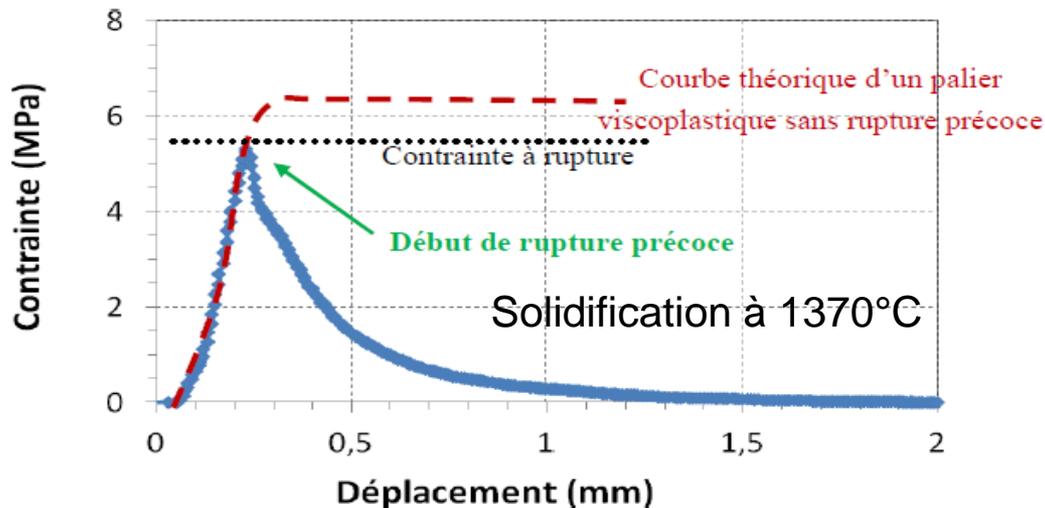
FAC en solidification

Température :
1200 – 1400°C



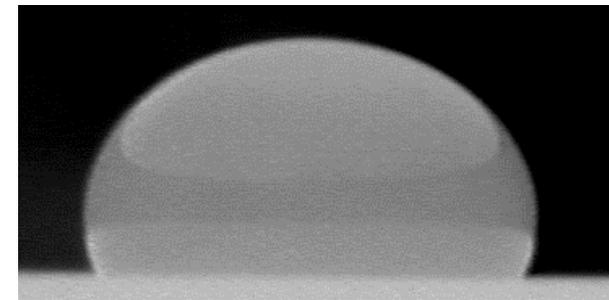
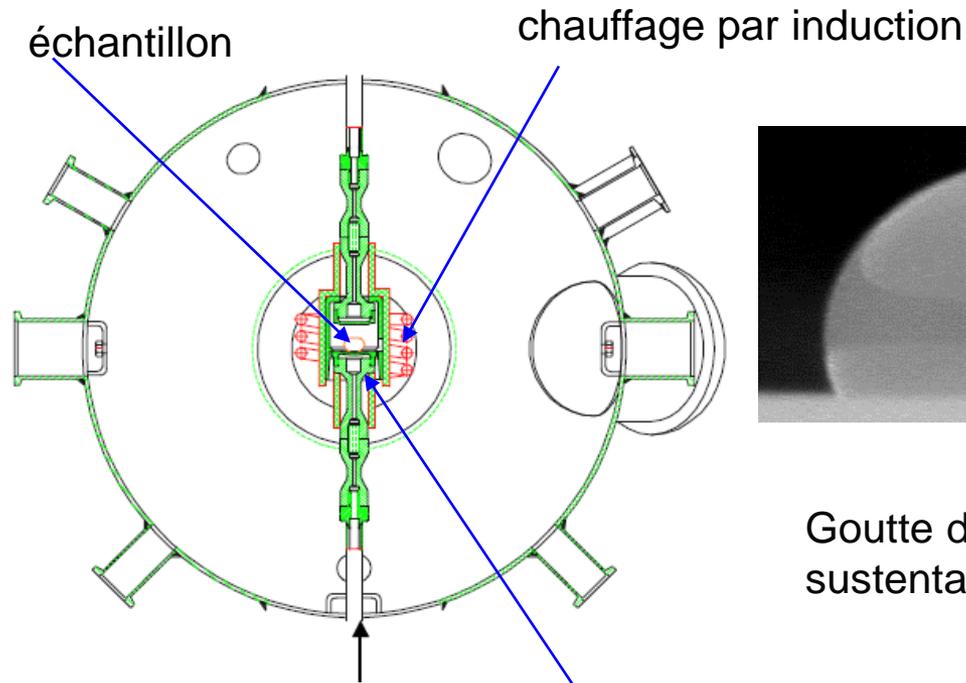
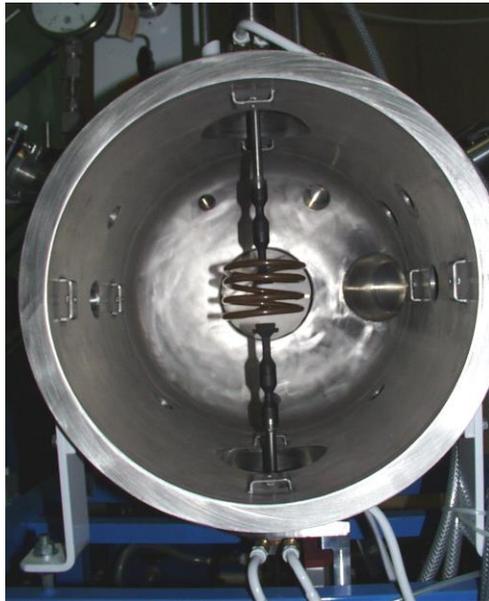
Inconel 600

Thèse L. Bouffier (2013)



Essais de caractérisation

Tension de surface du bain de fusion, essai VITI (CEA Cadarache)



Goutte de verre liquide en sustentation (T = 1250°C)

Température : 1200 – 2600°C

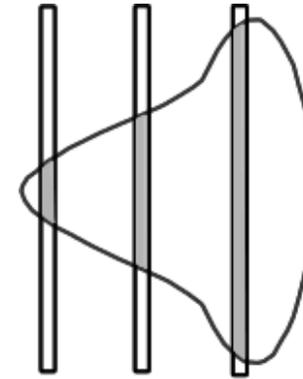
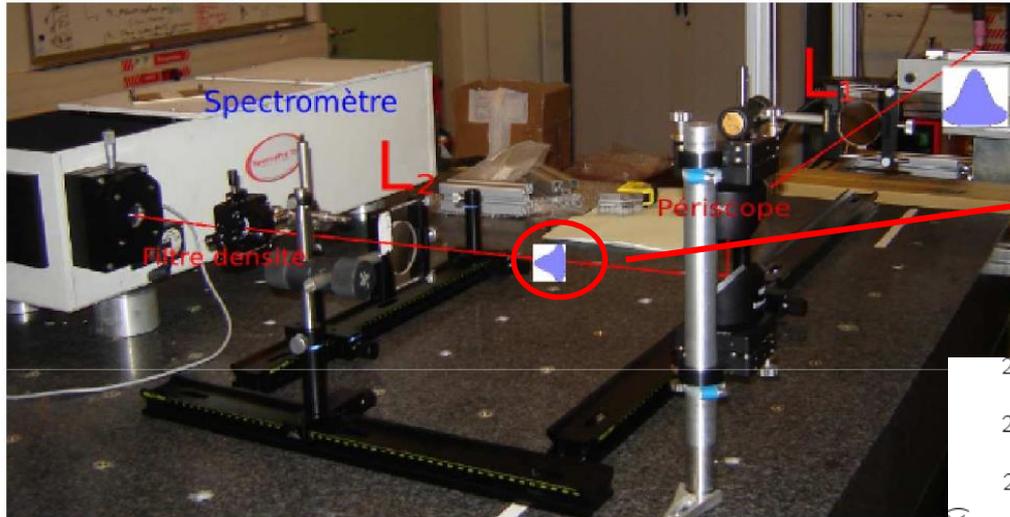
304L/316L

Travail commun :
EDF, CEA, AREVA
Projet I3P : MSNS

Essais de caractérisation

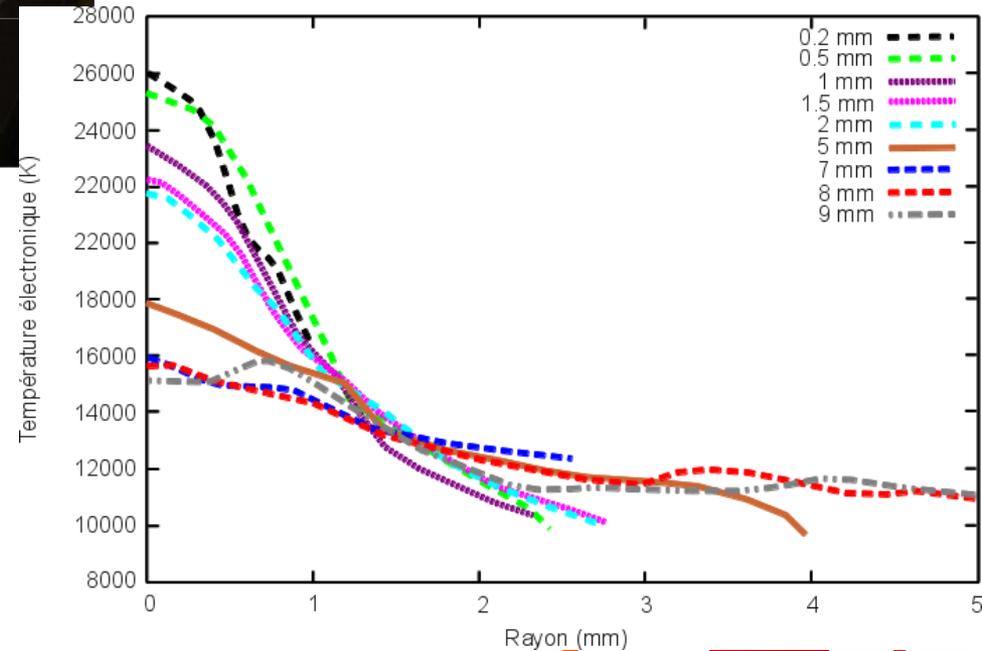
Thèse D. Borel (2013)

Mesure de la température du plasma (méthode indirecte)



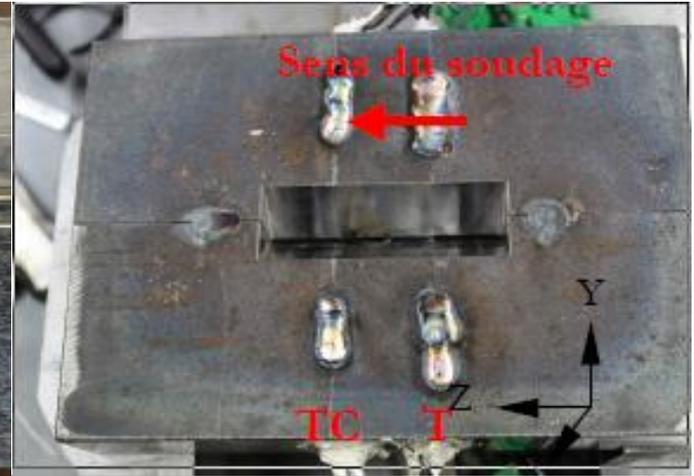
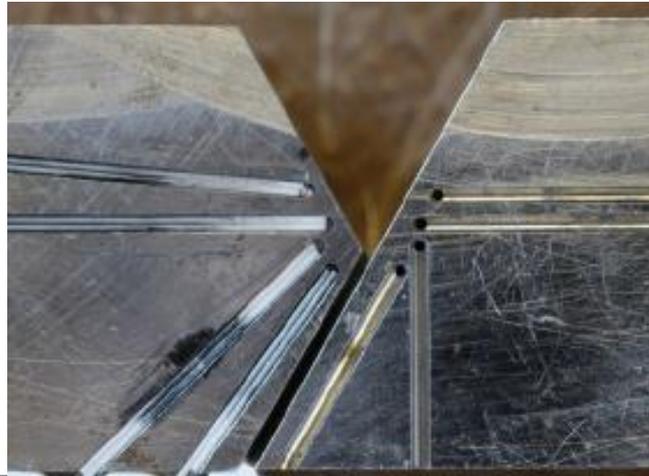
Température : 8000 – 26000°C

304L



Caractérisation du modèle thermique

Mesure de la température par thermocouples



Inconel 600
304L
16MND5

....

Essais de caractérisation/ validation

Imagerie rapide

Dispositif de réglage du filtre

Camera rapide

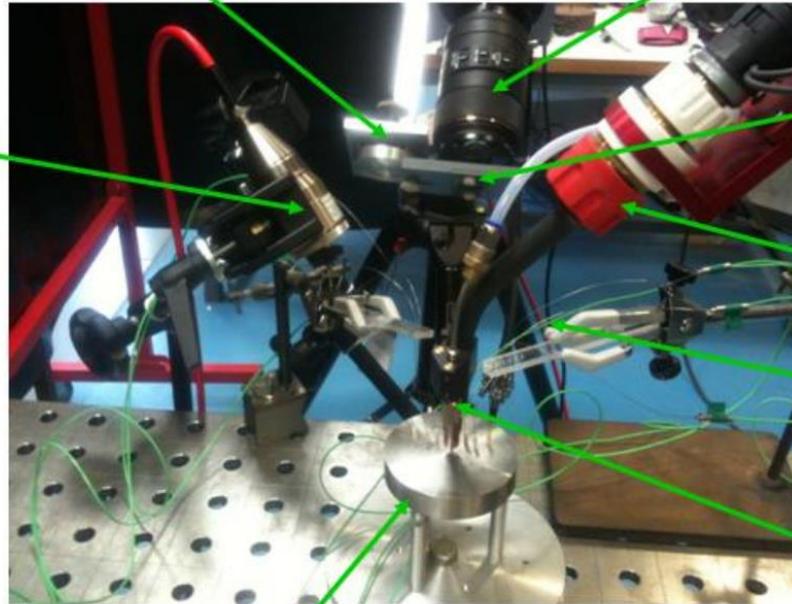
Diode laser

Filtre interférentiel

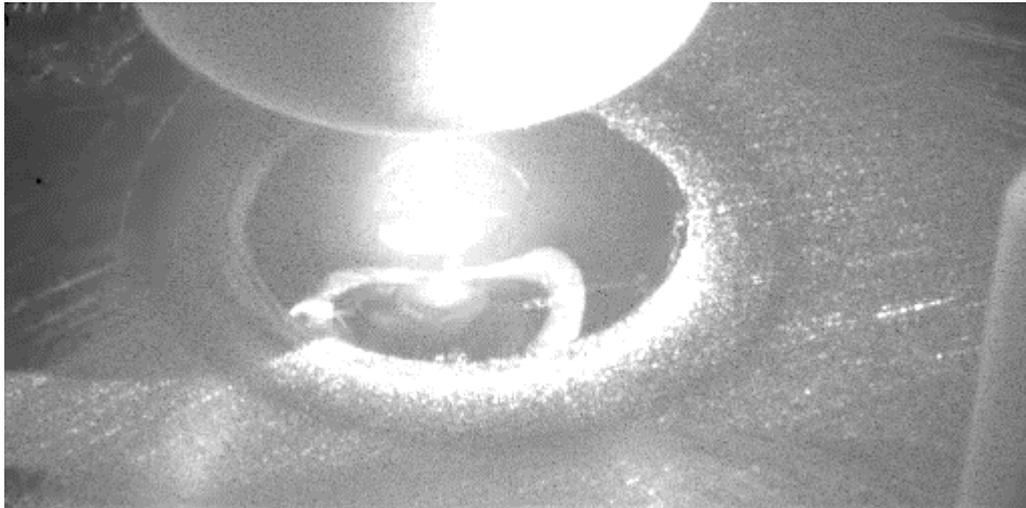
Bras du robot de soudage

Thermocouples

Torche de soudage

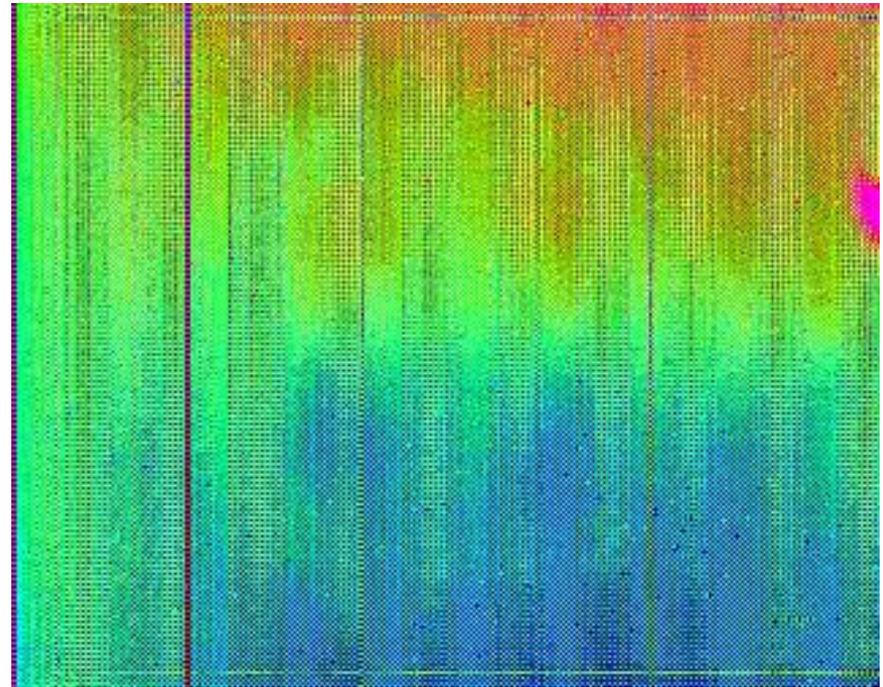
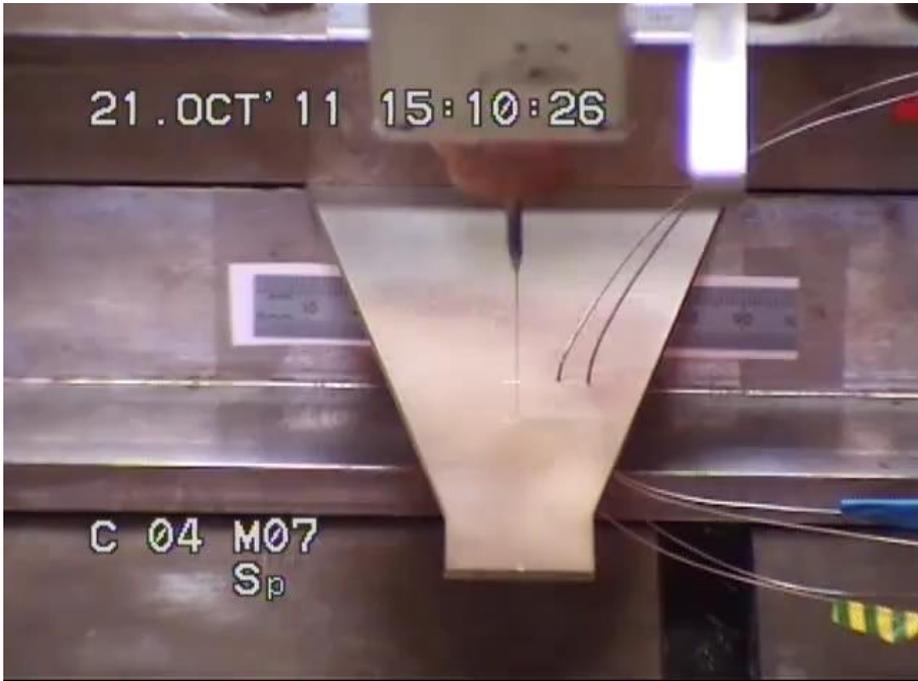


Pièce à souder

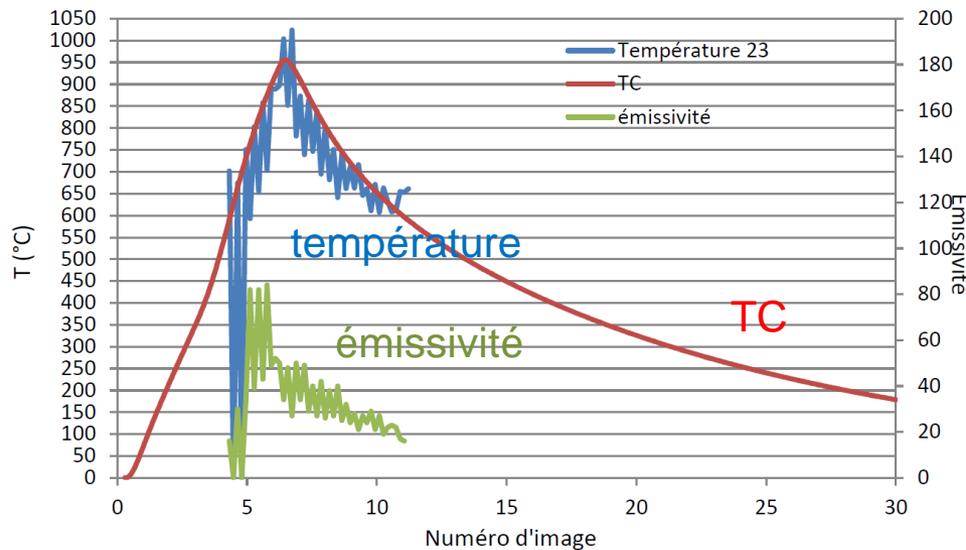


304L

Essais de caractérisation/validation

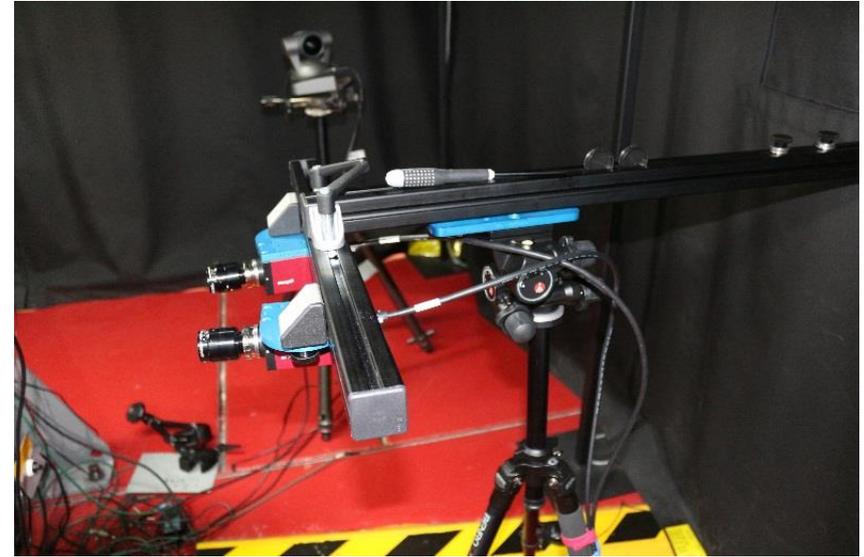
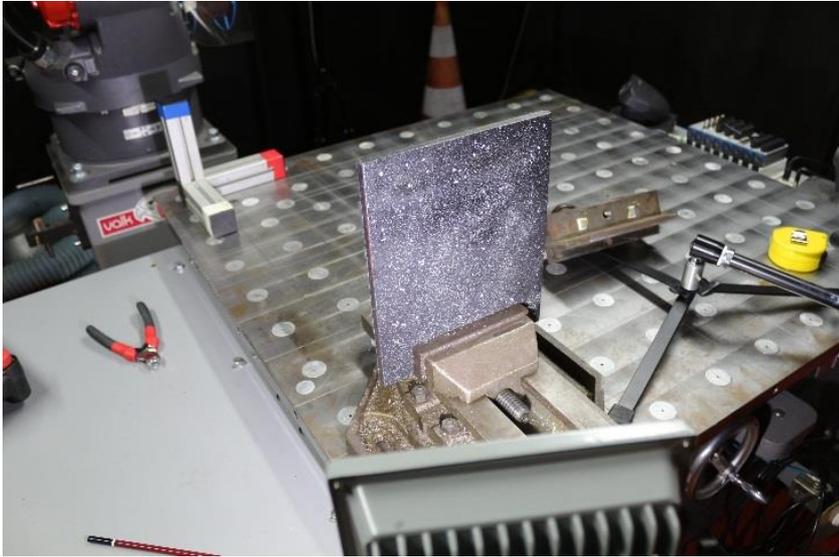


Thermographie infrarouge

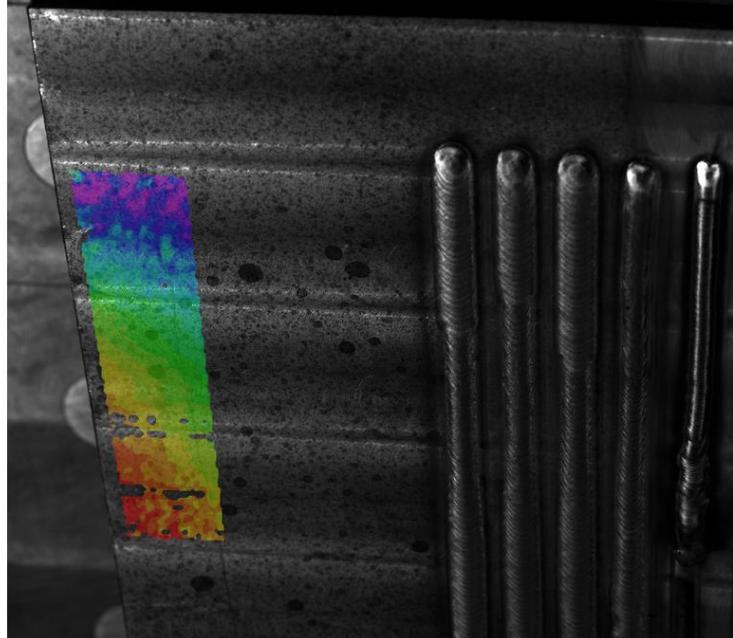


Travail commun :
EDF, CEA, AREVA
Projet I3P : MSNS

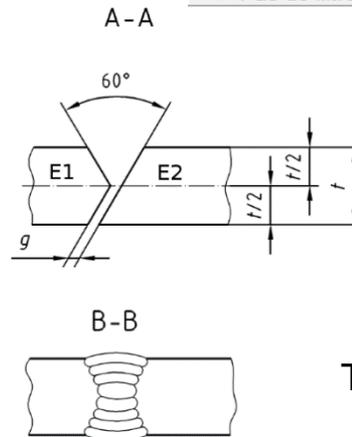
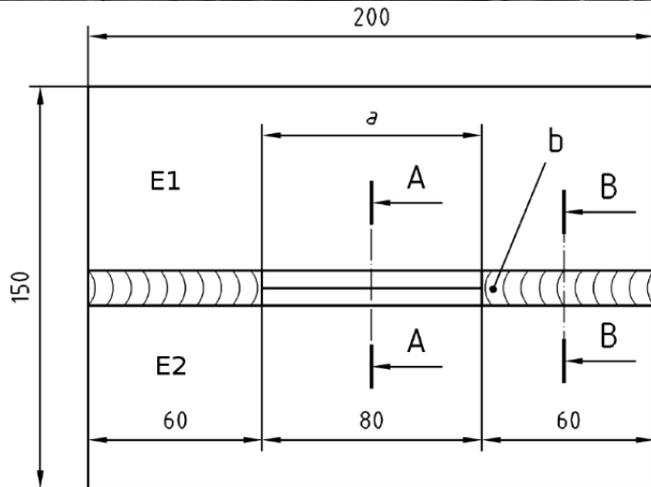
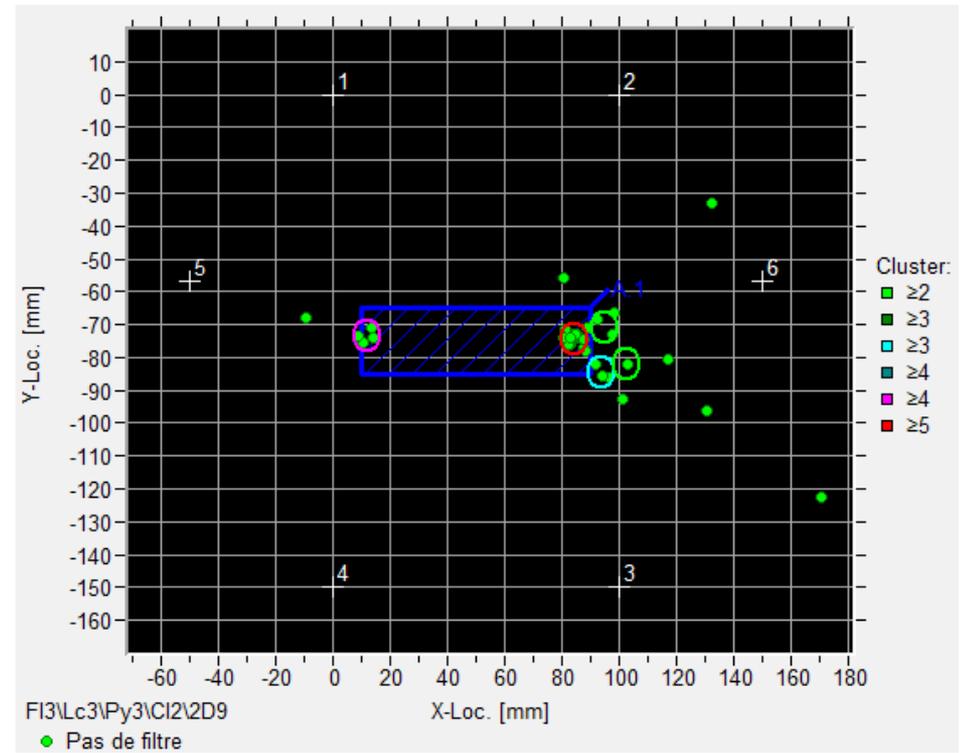
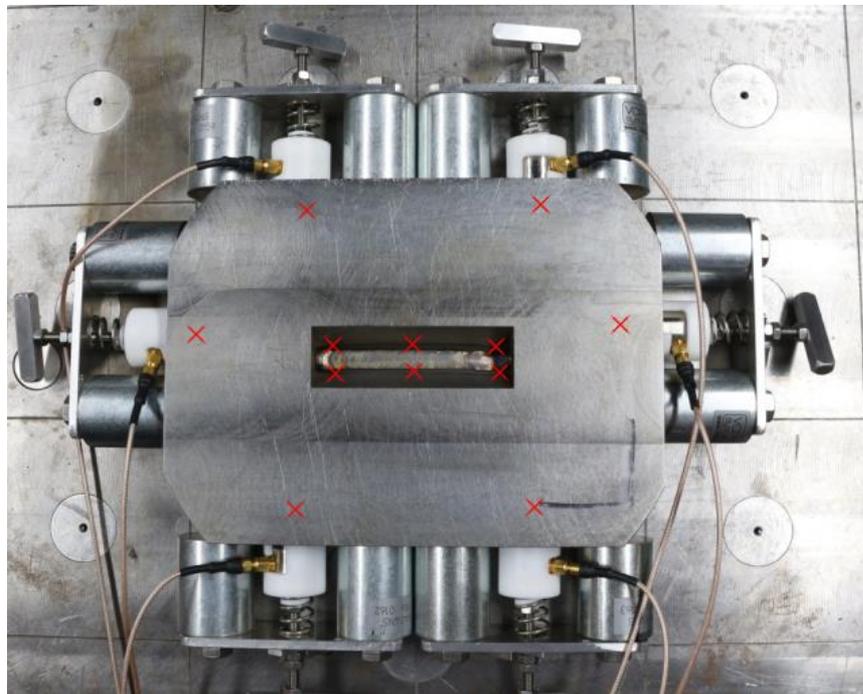
Essais de validation



Mesure de déformation par corrélation d'images



Essais de validation (FAF – essai Tekken) 16MND5



Détection d'amorçage et de propagation de fissure par émission acoustique

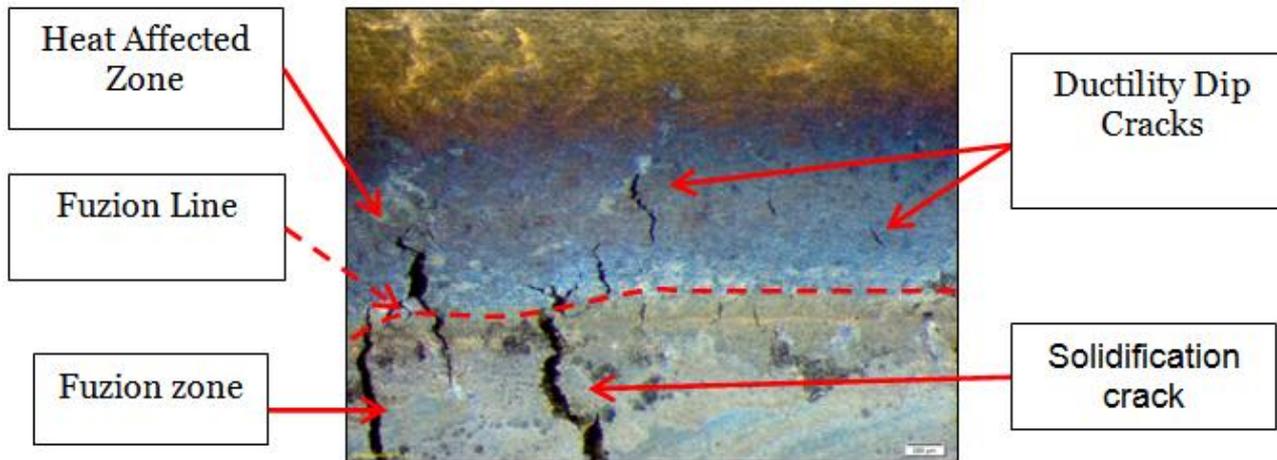
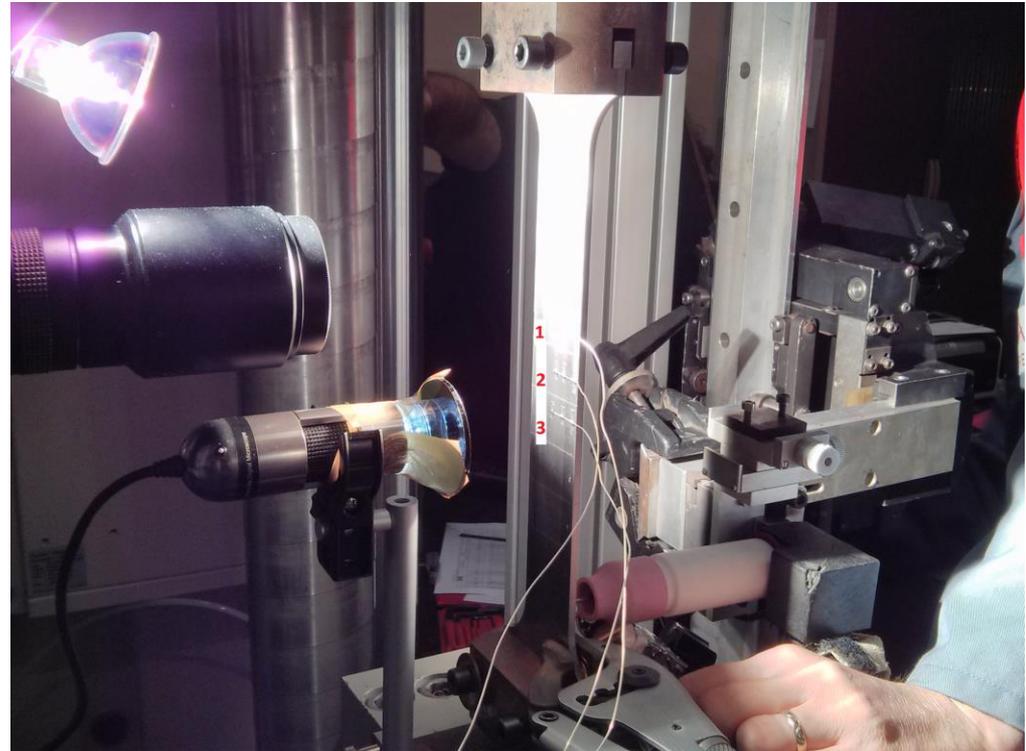
Thèse Q. Chen (2015)

Essais de validation

Programmierter Verformungs Riß Versuch (Essai PVR)

Dispositif bien adapté à la validation :

- des modèles de SNS
- des critères fissuration à chaud

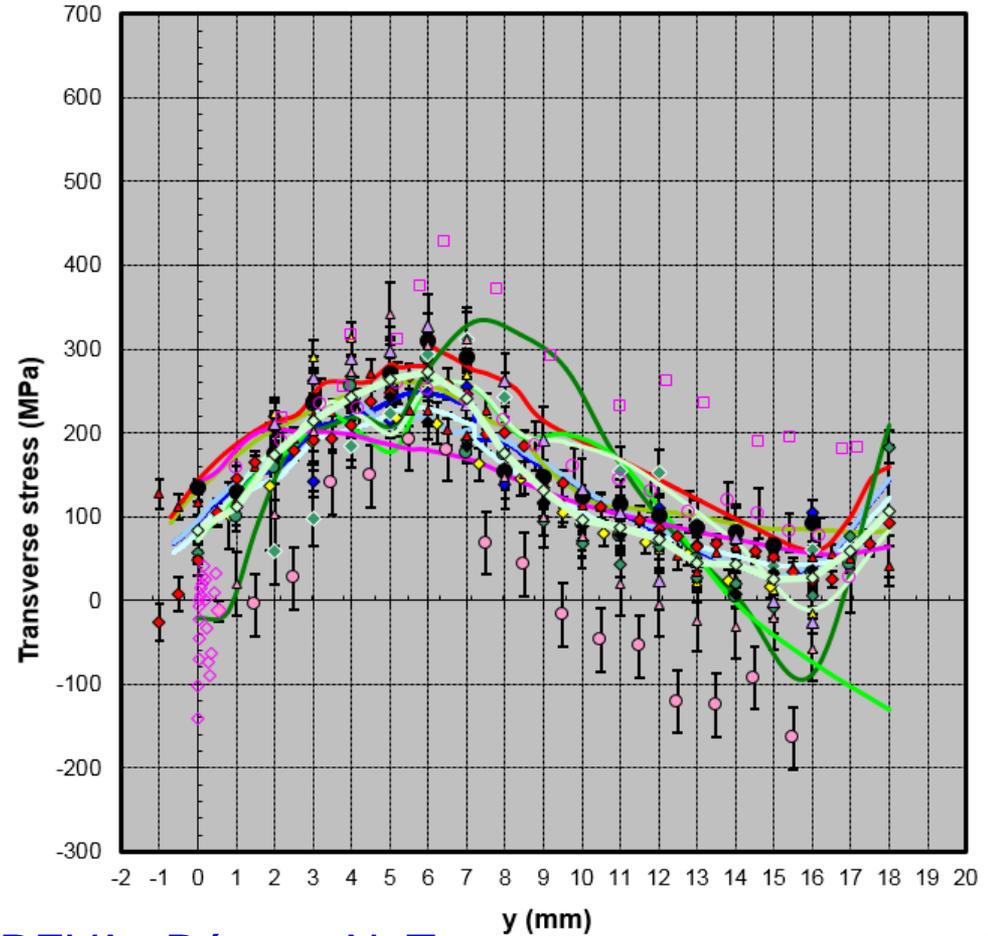
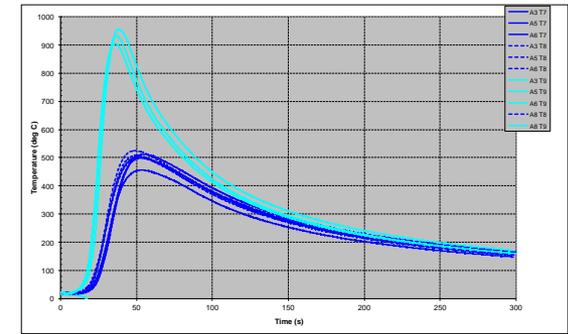
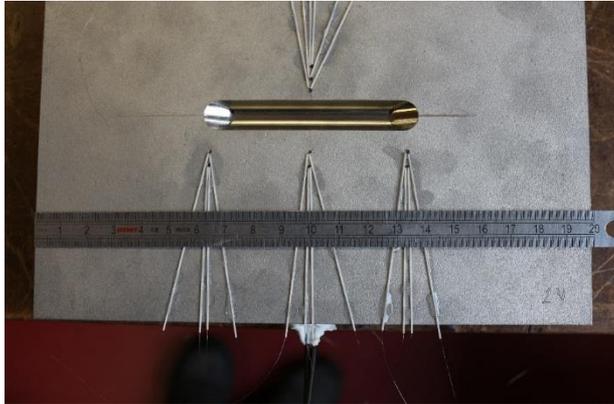
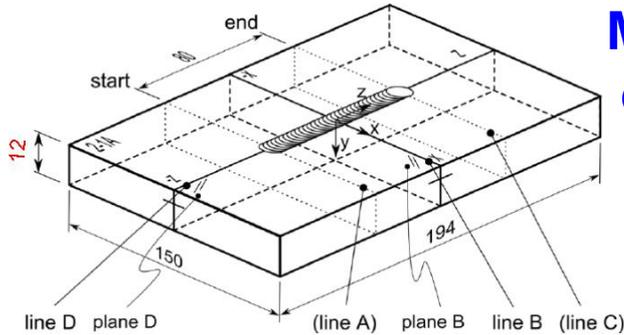


(AREVA)

Travail commun :
EDF, CEA, AREVA
Projet I3P : MSNS

Essais de validation

Mesure de température et de contrainte R

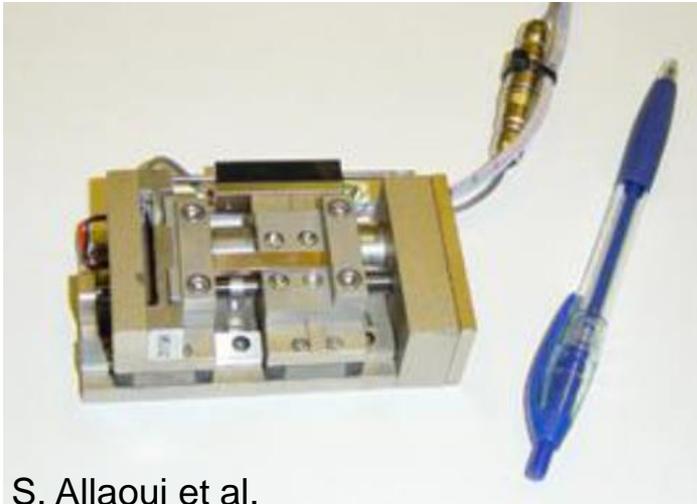


EDF, AREVA : Réseau NeT

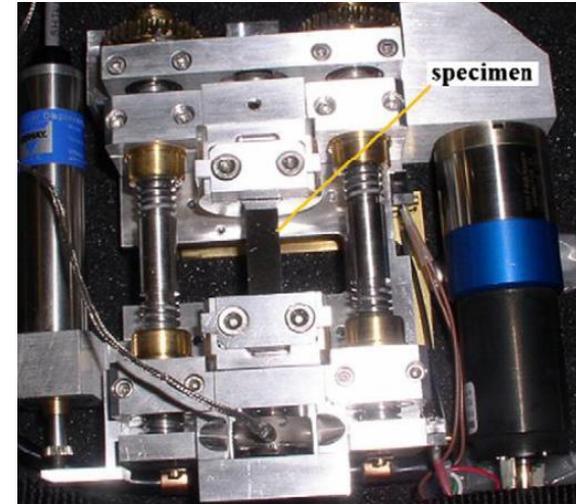
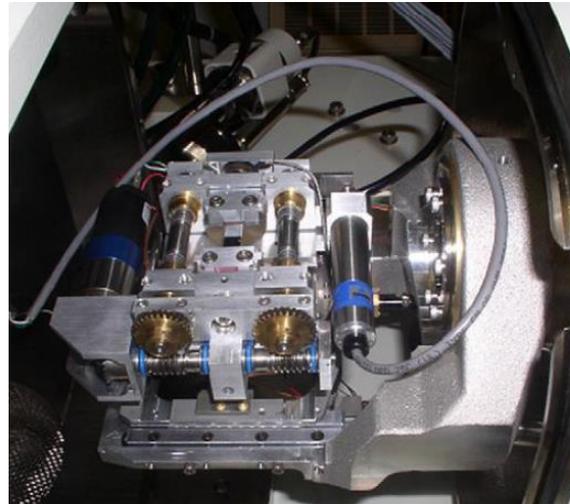
Perspective

Quelles mesures de propagation de fissures (à chaud) avec essais *in situ* ?

1. Imagerie 2D/2D des fissures
2. Mesure *in situ* : informations pendant la rupture (évolution de la position du front de fissure, vitesse et forme de la fissure ...)
3. Mesures *in situ* : visualisation de la microstructure, des joints de grain et mesures des éléments présents



S. Allaoui et al.



W. Zhang et Y. Liu

Difficultés/verrous :

- La température au-delà de 800°C
- La dimension du VER représentatif du matériau
- La gestion de grand nombre de données, surtout en 3D
- Couplage multi-physique : oxydation, corrosion, thermique, fragilisation ...

Capacités de modélisation et de simulation, et axes de recherche en soudage.



CAPACITÉS DE MODÉLISATIONS

5 MOTIVATIONS HISTORIQUES

Implant

Structure de trempe

Hydrogène

Contraintes

La fissuration à froid (1980...)

Low Alloy Steel Nozzle

Alloy 182 Buffering

Alloy 62/182 Butt Weld

Stainless Steel Safe End

Stainless Steel Field Weld

Stainless Steel Cladding

Stainless Steel Pipe

Les liaisons bimétalliques (1990 ...)

Limiter les distorsions (2000...)

Material: 316 L

Gravity

2 mm

8 mm

15 mm

> 15 mm

La maîtrise du procédé (2005...)

Environment

Stresses

Material

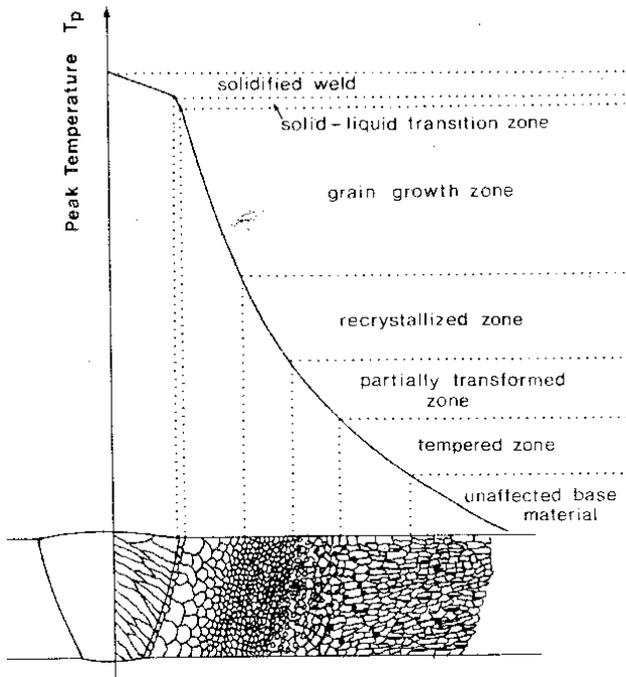
SCC

Plaque de partition: > 100 passes

Pénétration de Fond de Cuve > 80 passes

Les conséquences sur la DDVie (2010...)

La soudure est un matériau avec des propriétés différentes du métal de base et qui évoluent dans l'espace et le temps (vieillesse, irradiation, traitement thermique, mitigation, réparation ...).



Variation de microstructure

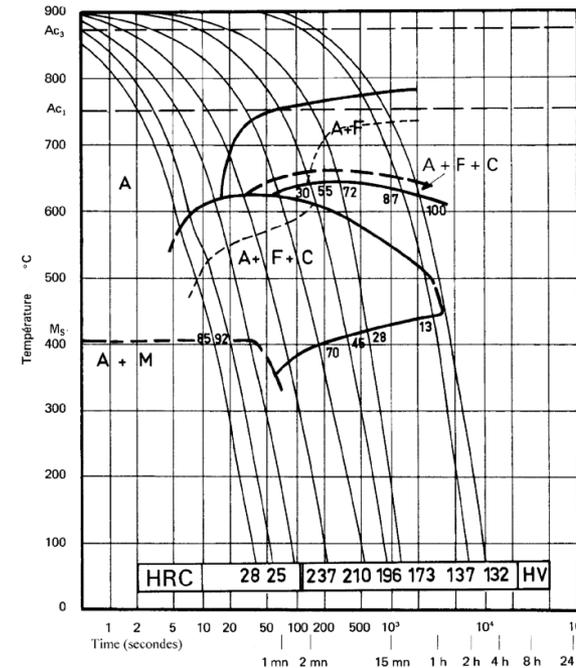
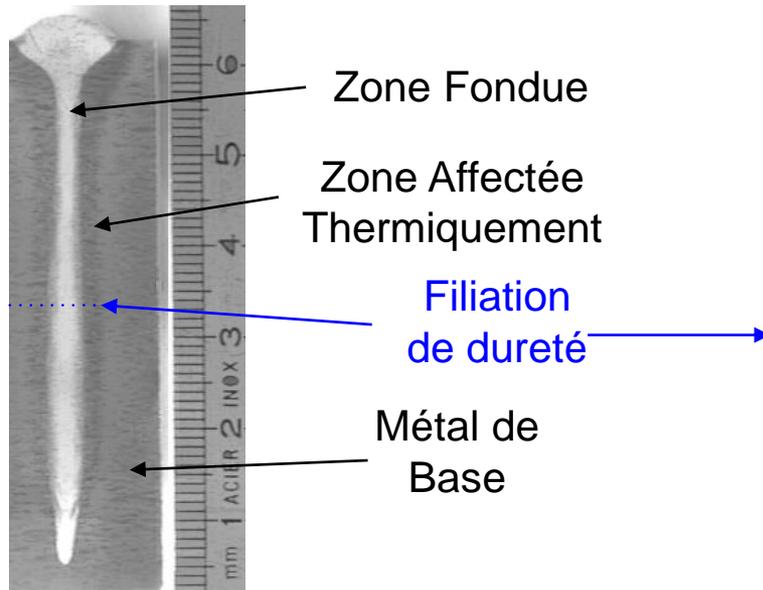


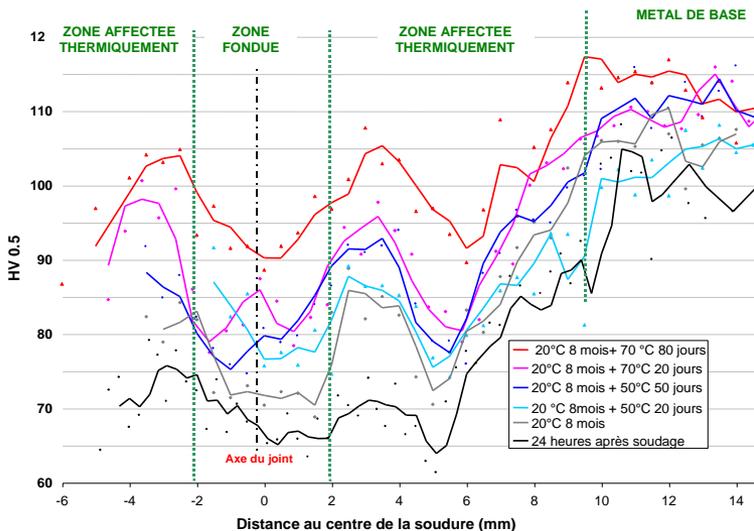
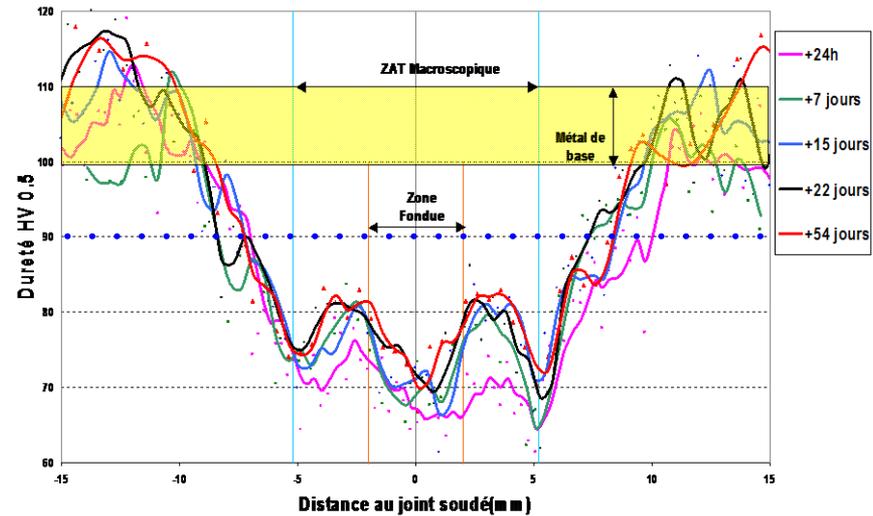
Diagramme TRC

La variation spatiale de la microstructure après soudage dépend de la température maximale atteinte et de la vitesse de refroidissement.

QUID DE LA SOUDURE CAS DES AA6061T6



Soudure par faisceau d'électrons d'un AA6061T6

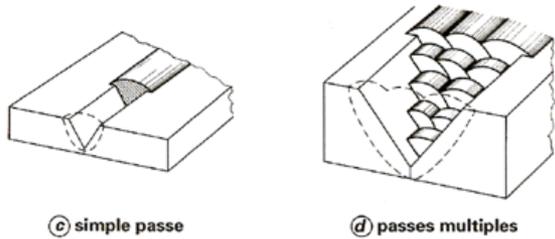


Les soudures en AA6061T6 présentent microstructure fine, irrégulière et évolutive, nécessitant une étude méticuleuse et une modélisation approfondie.

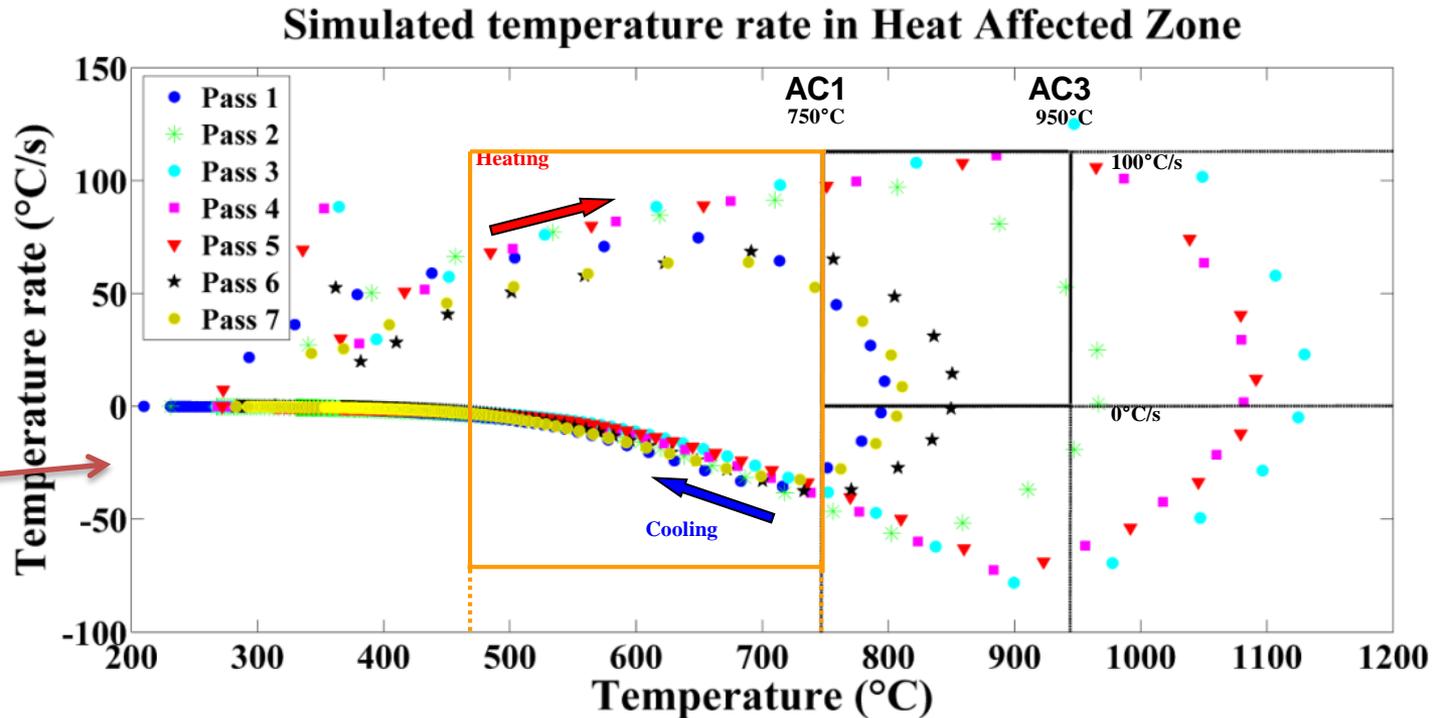
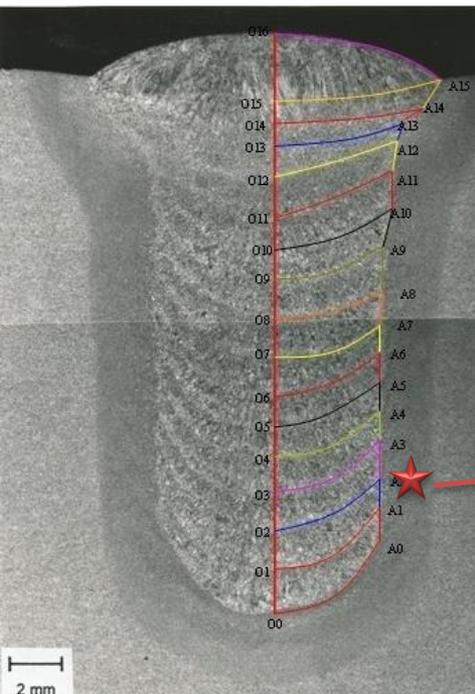
La variation temporelle de la microstructure après soudage dépend de la température, d'effet mécanique (grenailage...), irradiation.

Evolution de la dureté avec le temps et la température

QUID DE LA SOUDURE CAS DU SOUDAGE MULTIPASSE D'UN ACIER 9%Cr

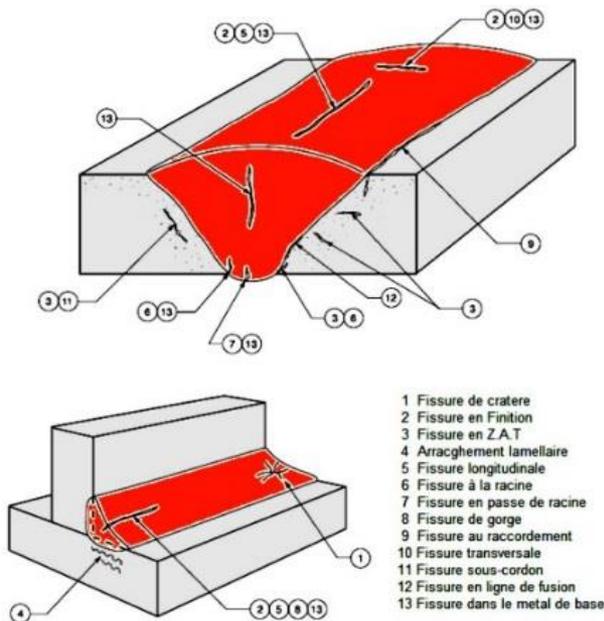


Aux transformations métallurgiques s'ajoutent la prise en compte des effets visqueux (température et vitesse de déformation) et cycliques.



Les défauts sont rares mais présentent une belle diversité (porosités, fissures, manque de fusion...)

---> prévenir ce risque.

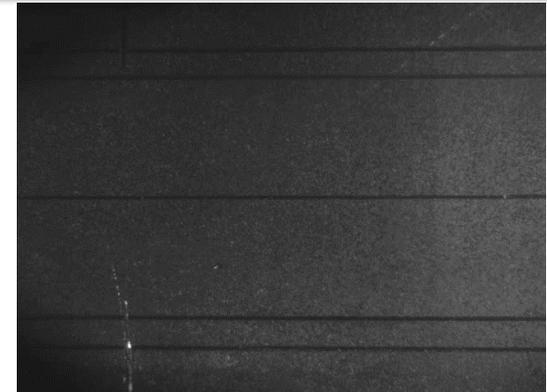
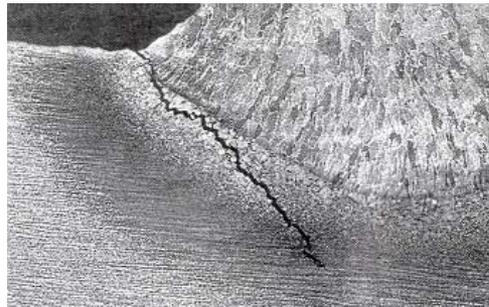
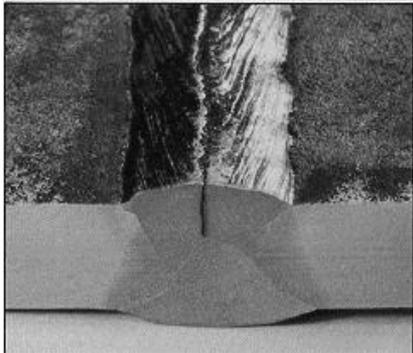


Description	Cross-section of weld	Radiogram
Worm hole		
Linear Slag Inclusion -		
Gas Pore		
Porosity (Linear)		
Lack of side-wall fusion - (lack of root fusion)		
Lack of inter-run fusion		
Longitudinal Crack		
Traverse Crack		
Radiating Cracks		

Fissuration à chaud de liquation, par chute de ductilité, ou de solidification, Essais Varestraint, JWRI...).

Fissuration à froid Essais Tekken, d'implant ...).

Fissuration au réchauffage ou en relaxation Essais Borland, PVR ...).



Essai de soudabilité Varestraint (*variable restraint*)

AISI SS 321 type



Criques de solidification (ZF)

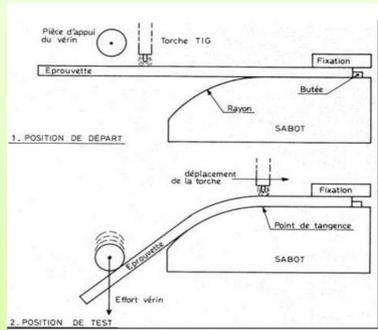
Criques de liquation (ZAT)

2 mm

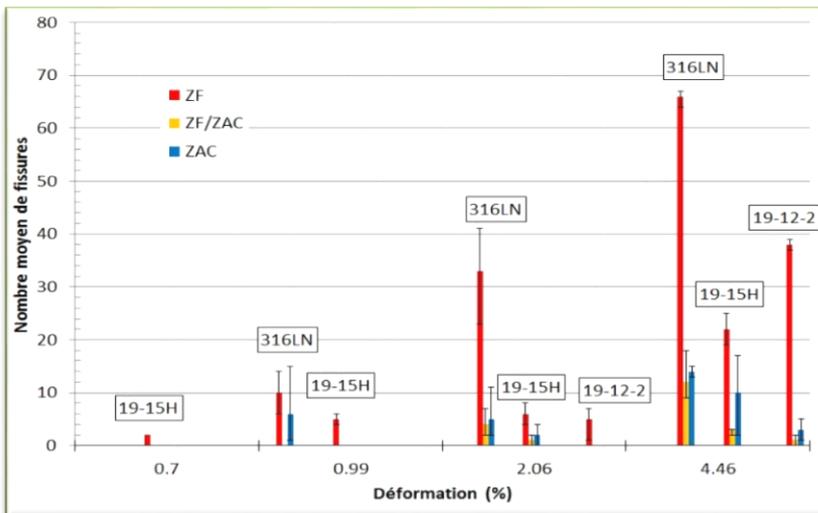
Pas de matériaux épargnés, une grande variété de fissures mais aussi d'essais technologiques pour les étudier
--- > méthodologie, transfert d'échelle, représentativité.

LA FISSURATION À CHAUD DE SOLIDIFICATION EN SOUDAGE D'ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES APPORT DE LA SIMULATION

Principe de l'essai Varestraint



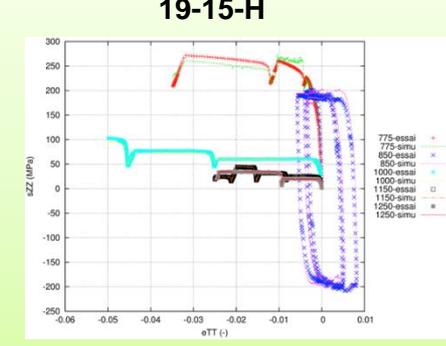
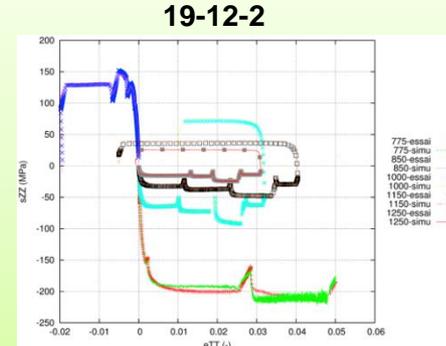
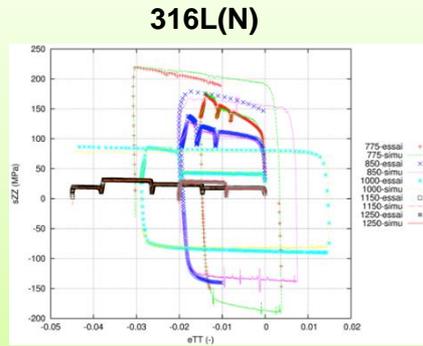
Nombre de fissures observées en fonction du niveau de déformation, des produits d'apports et de leurs positions



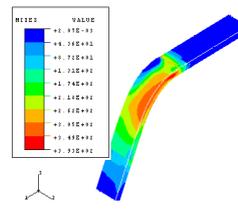
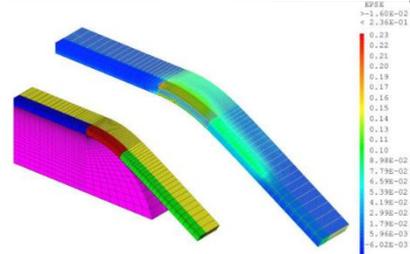
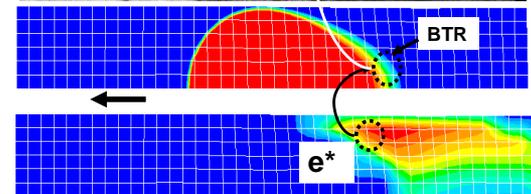
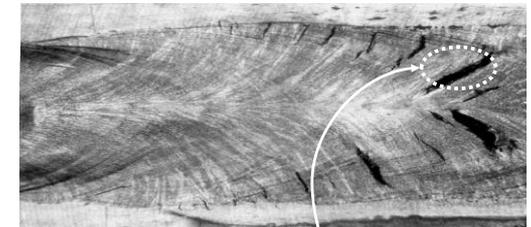
Les produits d'apports sont classés en fonction de leur nombre de fissures (= propension à fissurer (?)) pour différents niveaux de déformations appliquées. Mais la déformation appliquée n'est pas proportionnelle à la déformation locale responsable de la FàC.

LA FISSURATION À CHAUD DE SOLIDIFICATION EN SOUDAGE D'ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES APPORT DE LA SIMULATION

Gleeble



Caractérisation du comportement thermomécanique sur machine Gleeble.
Simuler les essais technologiques pour dégager un critère thermomécanique local et améliorer l'interprétation des essais.

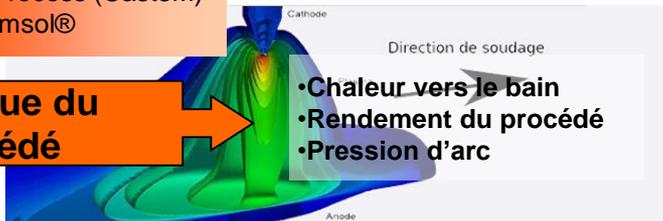


$$f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, BTR) R \{n\}, \{L = \sum_i^n l_i\}$$

CAPACITÉS ET OUTILS DE SIMULATIONS

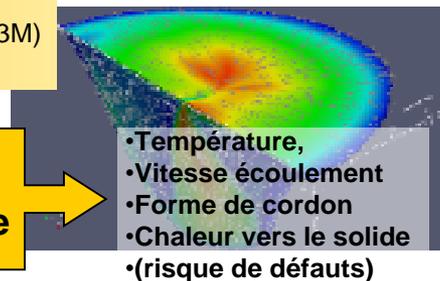
Physique du procédé

Code_Saturne
WProcess (Cast3M)
Comsol®



Thermique Thermohydraulique

Code_Saturne
WProcess (Cast3M)
Comsol®



Thermodynamique

Thermocalc®



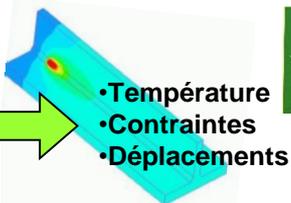
Solidification Croissance cristalline

Calcosoft®
ProCast®



Mécanique structure Couplage (thermo-méca-métallo)

Code_Aster
WProcess (Cast3M)
Sysweld®



COMSOL
MULTIPHYSICS®

Code_Aster
WProcess

Welding & Assembly
SYSWELD 2014

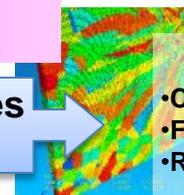
CIVA
NDE 2015

CODE SATURNE

Cast3M

Vers la DDVie les CND

CIVA
Ncode®



Incertitudes

Uranie
OpenTurns

- Sensibilité
- Optimisation
- Réduction de modèle
- Caractérisation

SALOME

The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation



Les Besoins

Sureté

- Fiabilité Qualité des soudures Durée de vie
- Maintenabilité mitigation, réparation, contrôlabilité, historique du process

Productivité

- Performance du process
- Réduction des coûts (maintenance, investissement, production)

Fabricabilité

- Gestion des règles de codification pour la construction
- Soudabilité opératoire et métallurgique
- Technologie d'assemblage

Capacités de modélisations

Effets thermo-métallurgiques-mécaniques
Bain de soudage (en cours)

Capacités et Outils de simulations

Bien identifiés (Benchmark)

En cours:

- Arc et Bain,
- Gestion des incertitudes,
- Plateforme

Mais capacité limité taille des composants et données matériaux manquantes.

Direction de recherche

- Bain de soudage (dynamique) couplé à l'arc 3D
- Comportement de la Zone pâteuse
- Apport de matière
- Tailles des calculs limitantes, réduction de modèle
- Données matériaux manquantes
- Gestion des incertitudes
- Lien CND et DDV
- Soudage des matériaux issus de la fabrication additive

Liens I3P

- MSNS
- FATRUPT
- Incertitudes

CONCLUSIONS SIMULATION DES PROCÉDÉS DE MISE EN FORME ET D'ASSEMBLAGE

La simulation est un outil pour compléter la mesure dans le matériau

Les données matériaux et physiques

- Que mesurer ? Comment ? Quelle échelle ?
- Prise en compte des dispersions (incertitudes)

Poursuivre la modélisation physique des phénomènes

- Transposition d'échelle
- Lien avec CND et durée de vie

Verrous organisationnels

- Chaînage (couplage) des codes de simulation sur une plateforme (d'échange, collaborative...)
- Partage de codes, Partage de données

