

[AFM SNS 2013 - 28 mars 2013]

Mesure de champs de température et de déplacements pour la simulation numérique du soudo-brasage de tôles minces pour automobiles

Benoît Beaubier⁽¹⁾⁽²⁾,
Karine Lavernhe-Taillard⁽¹⁾, Clara Boucq⁽²⁾, René Billardon⁽¹⁾

⁽¹⁾ LMT Cachan, ⁽²⁾ PSA Peugeot Citroën



Contexte industriel

Objectif : Prévoir les déformations
induites par le soudage de tôles minces

Internationalisation du groupe PSA

Plusieurs procédés pour fabriquer les mêmes véhicules dans les différentes usines du groupe

Conception de pièces adaptées à plusieurs procédés

Aujourd'hui

Temps de mise au point long

Plan d'Intégration et Validation coûteux



Objectif : prévision des déformations

Aide au choix et à la Mise Au Point du procédé de soudage

Aide à la conception des pièces

Contexte industriel

Procédés étudiés

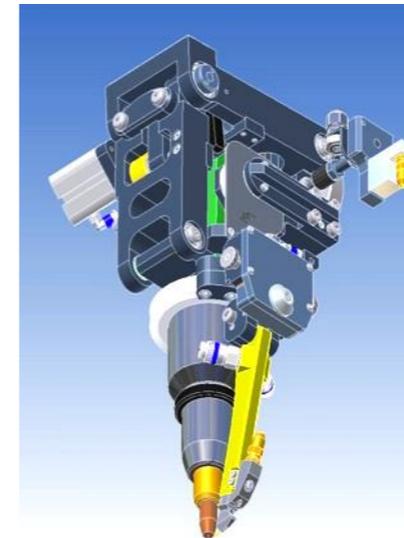
Soudo-brasage laser

Soudo-brasage Plasmatron

Soudo-brasage MIG

Soudo-brasage CMT

...



Plasmatron



Soudo
brasage laser

Soudo-brasage :

Pas de fusion du métal de base

Source de chaleur :

surfacique et volumique (métal d'apport)

d'intensité différente selon le procédé

se déplaçant à une vitesse différente selon le procédé



CMT ou MIG

Contexte industriel

Tôles automobiles

épaisseur inférieure au millimètre
dimension supérieure au mètre carré
ayant subi une mise en forme par déformation plastique
(écrouissages, contraintes résiduelles)

Risque de déformations

y compris loin
de la zone affectée thermiquement



Problématique scientifique

Problématique initiale

Développer un outil de prévision numérique efficace et robuste
des déformations de tôles minces
induites par différents procédés d'assemblage par soudage

Modélisation robuste adaptée à un outil de simulation industriel

Modèles de source de chaleur

Modèle de contact thermo-mécanique

Modèles de comportement Thermo-Métallo-Mécanique des matériaux

Prise en compte de l'état mécanique initial induit par la mise en forme

Problématique "secondaire"

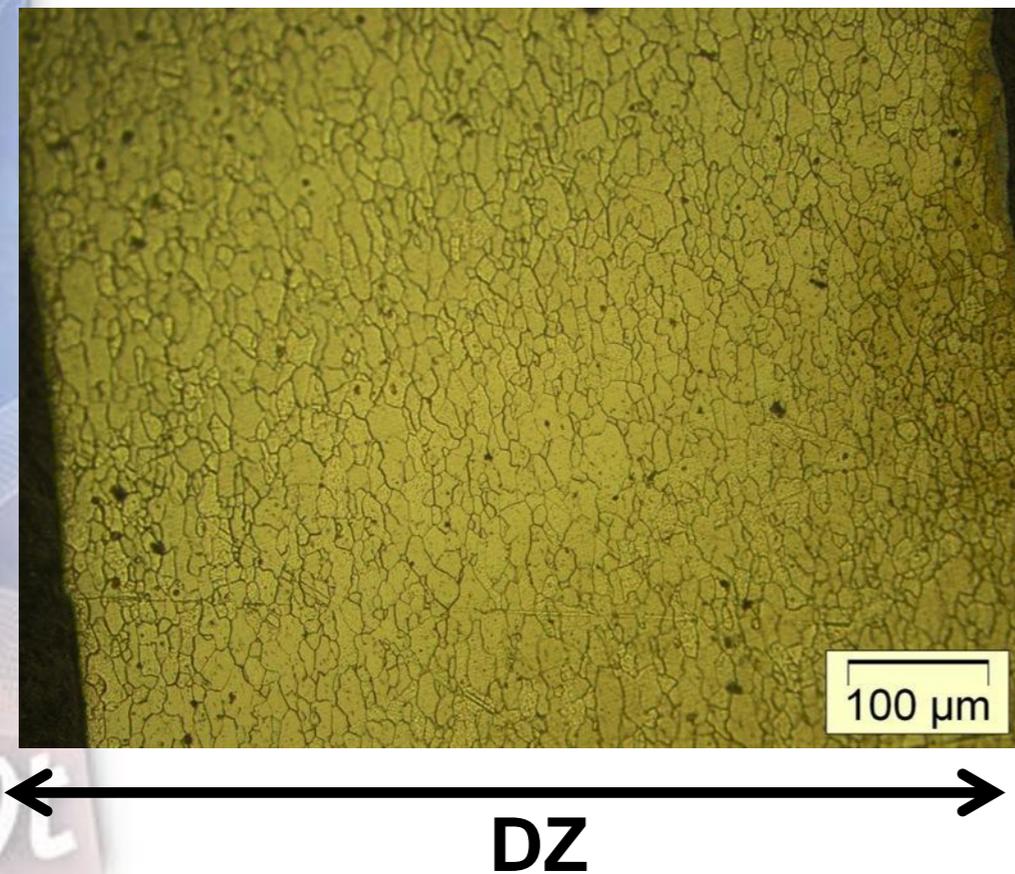
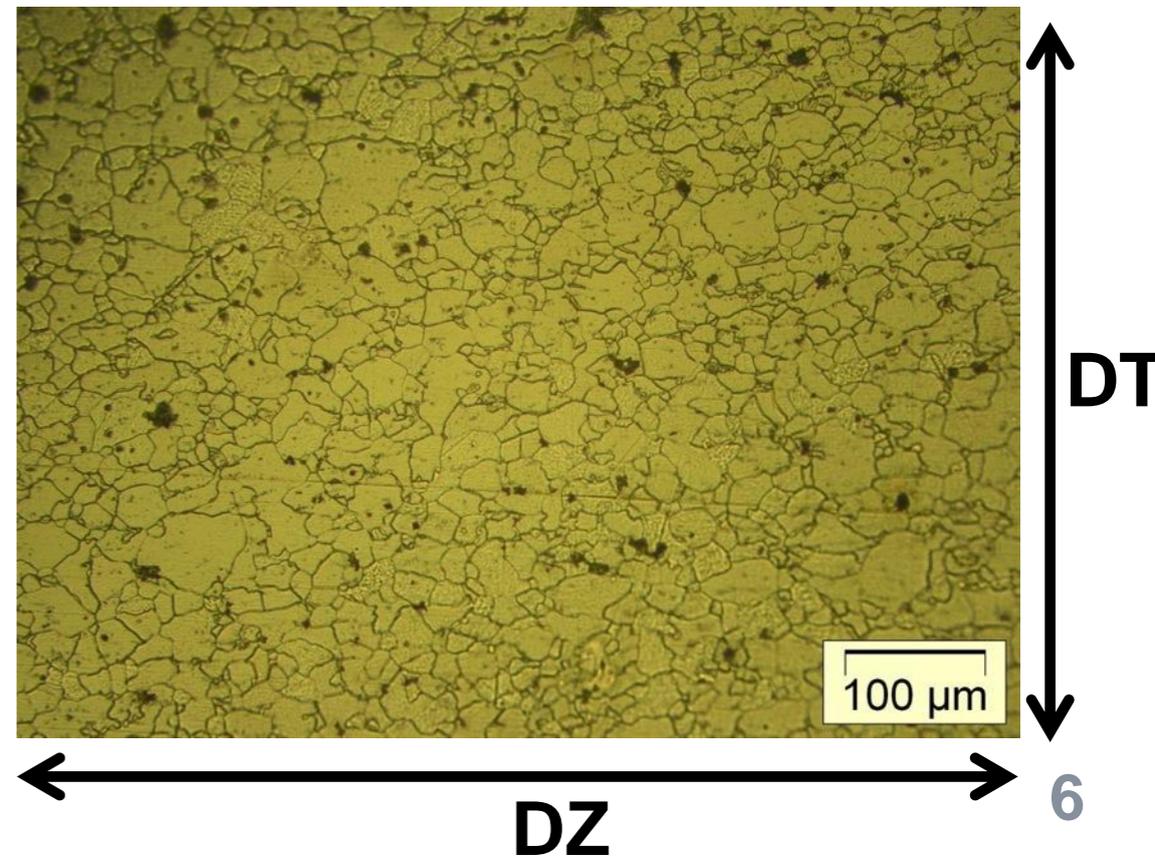
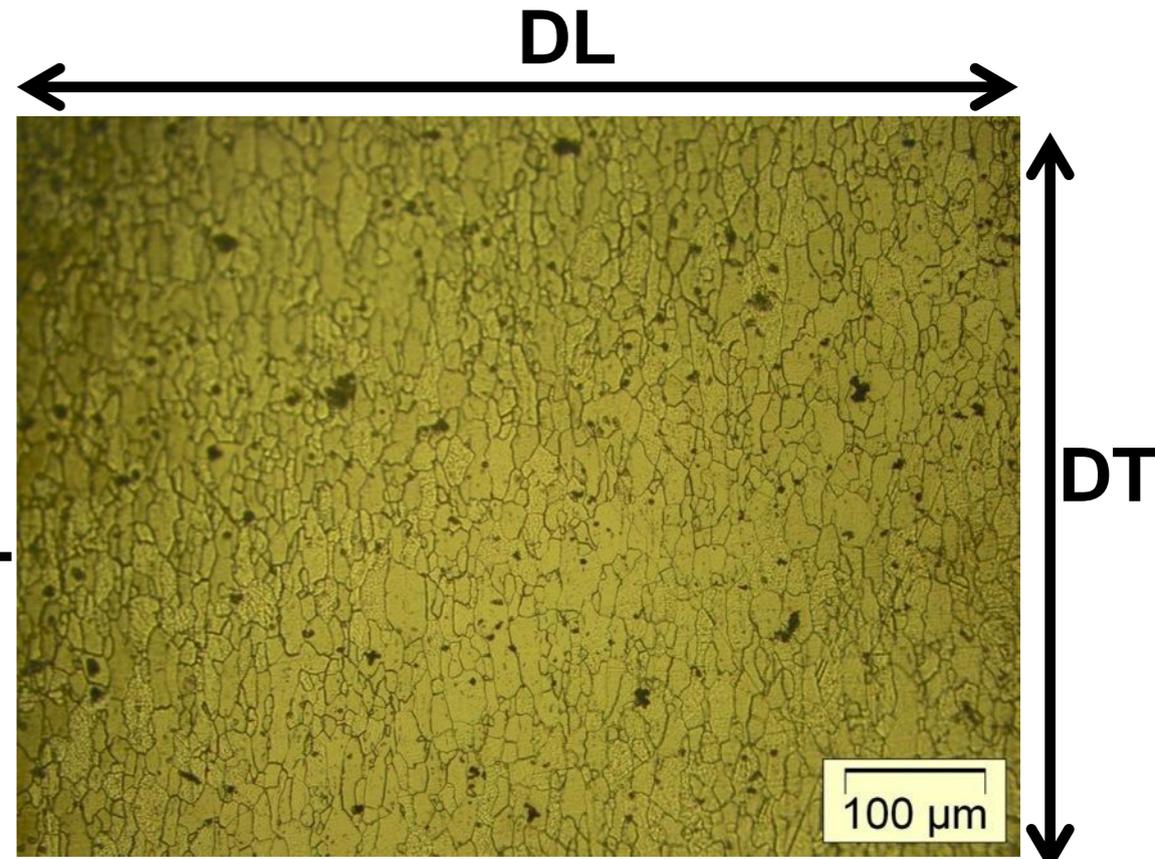
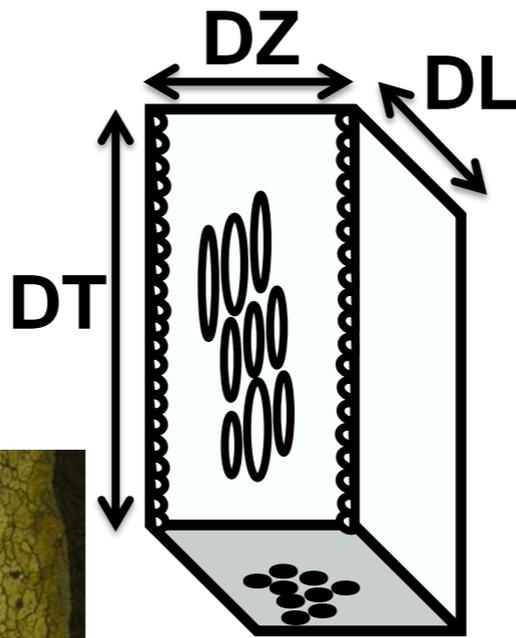
Développer des outils d'identification rapides et efficaces
pour alimenter la base de données matériaux et procédés

Tôles de carrosserie minces

Composition acier XES
en pourcentage massique

C	P	S	Mn
≤ 0,08	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,4

Matrice ferritique
Épaisseur 0,67 mm



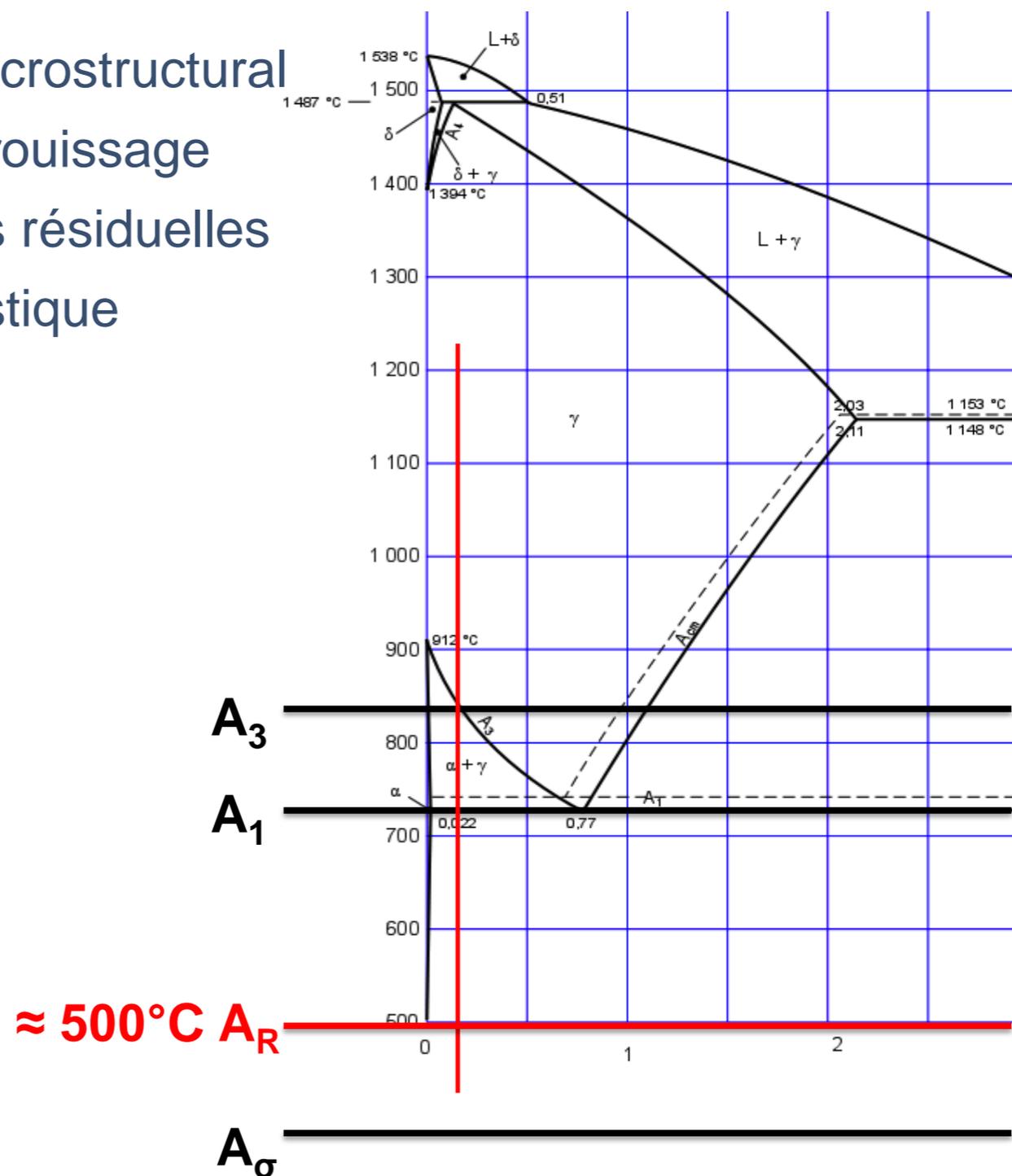
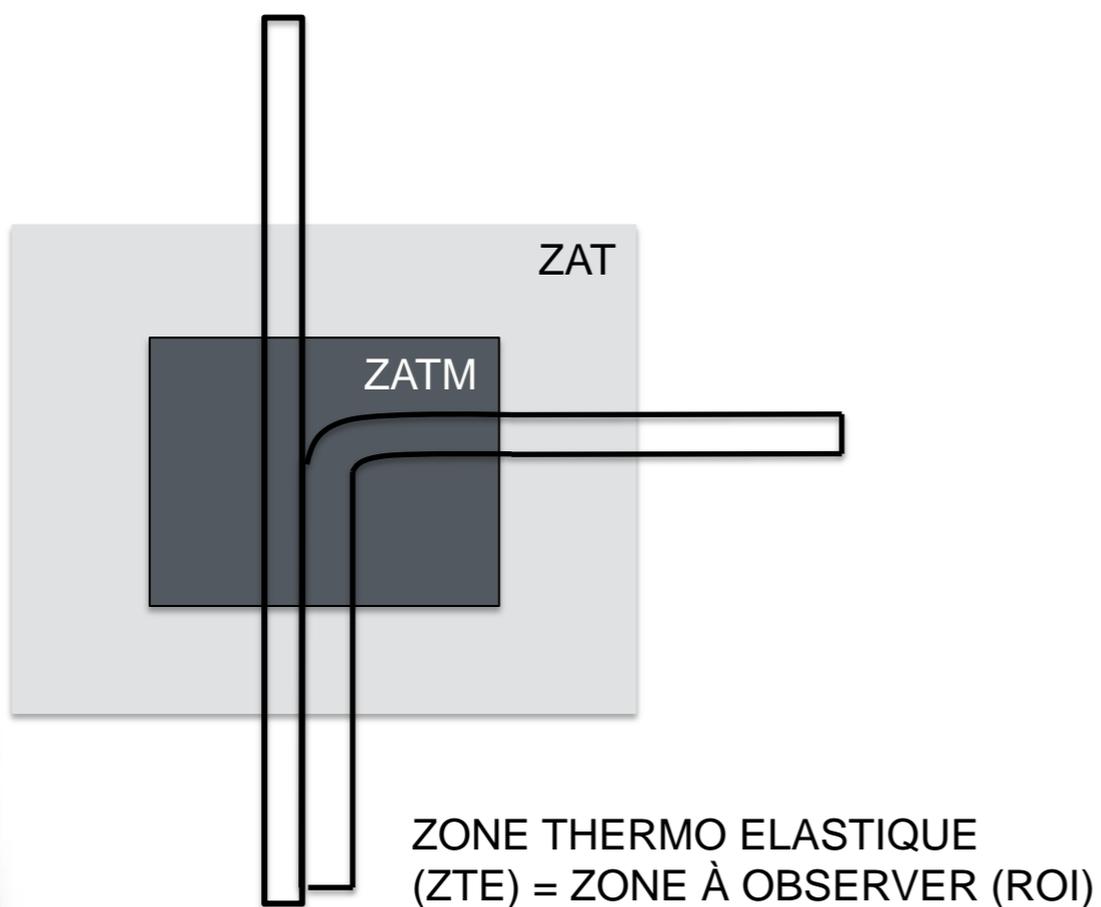
Zones Affectées Thermiquement

Détermination des limites entre zones

ZATM : zone où il y a changement microstructural

ZAT : zone où il y a restauration d'écrouissage et relaxation des contraintes résiduelles

ZTE : zone où la déformation est élastique





Plan de la présentation

Analyse thermique d'essais de soudo-brasage en laboratoire

Identification de la source de chaleur

Identification du comportement des tôles

Essais de validation sur pièce automobile

Conclusions et perspectives



Plan de la présentation

Analyse thermique d'essais de soudo-brasage en laboratoire

Identification de la source de chaleur

Identification du comportement des tôles

Essais de validation sur pièce automobile

Conclusions et perspectives

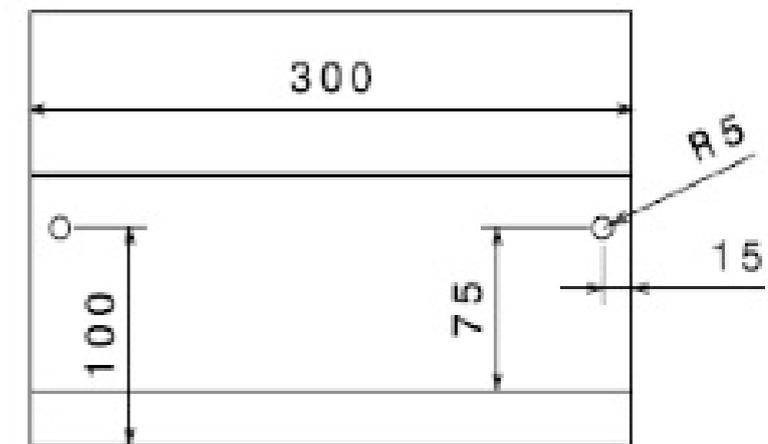
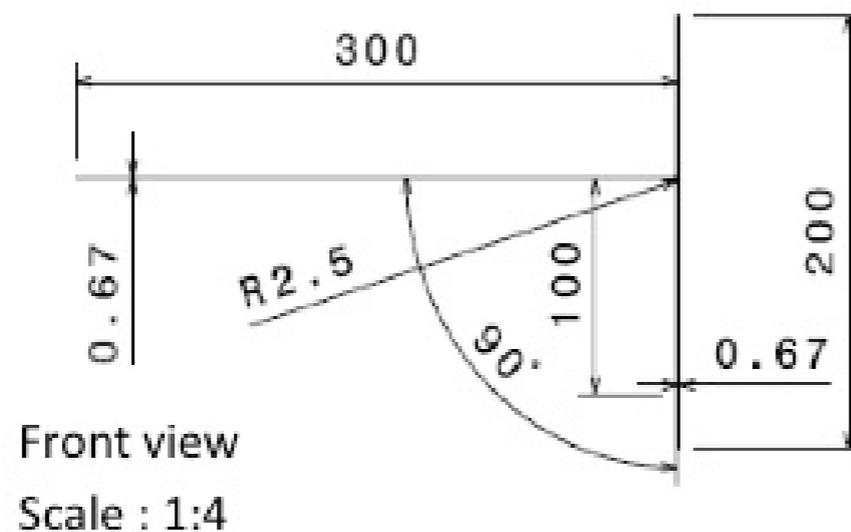
Essai de soudo-brasage de laboratoire

Éprouvettes

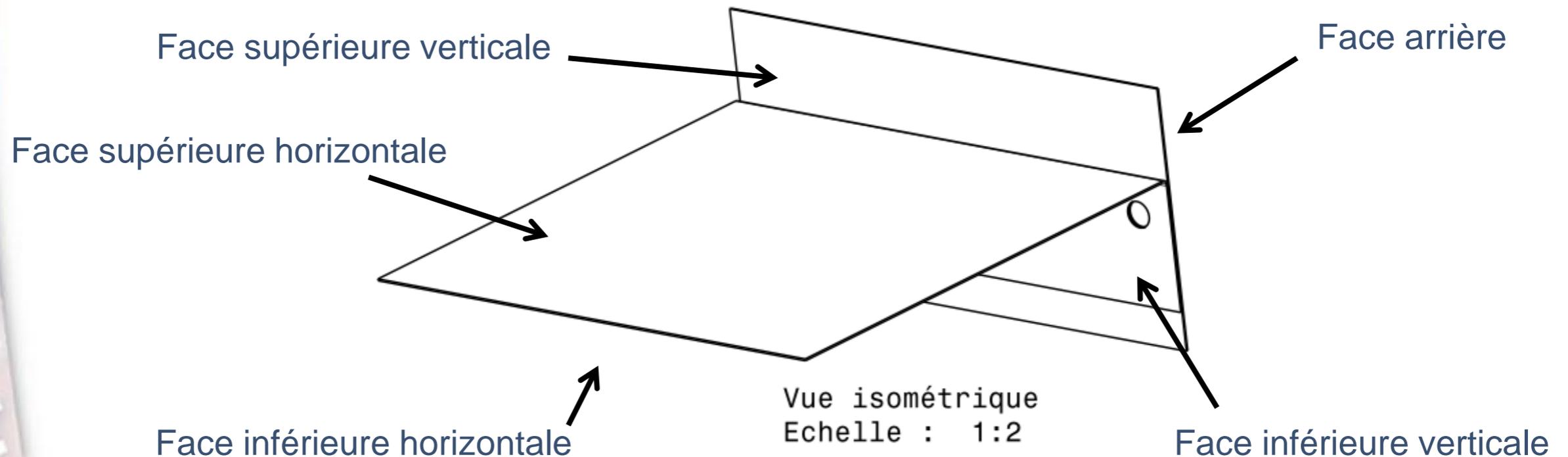
Tôles en acier XES (non revêtues)

Mise en forme par pliage

Dimensions en mm



Définition des différentes faces



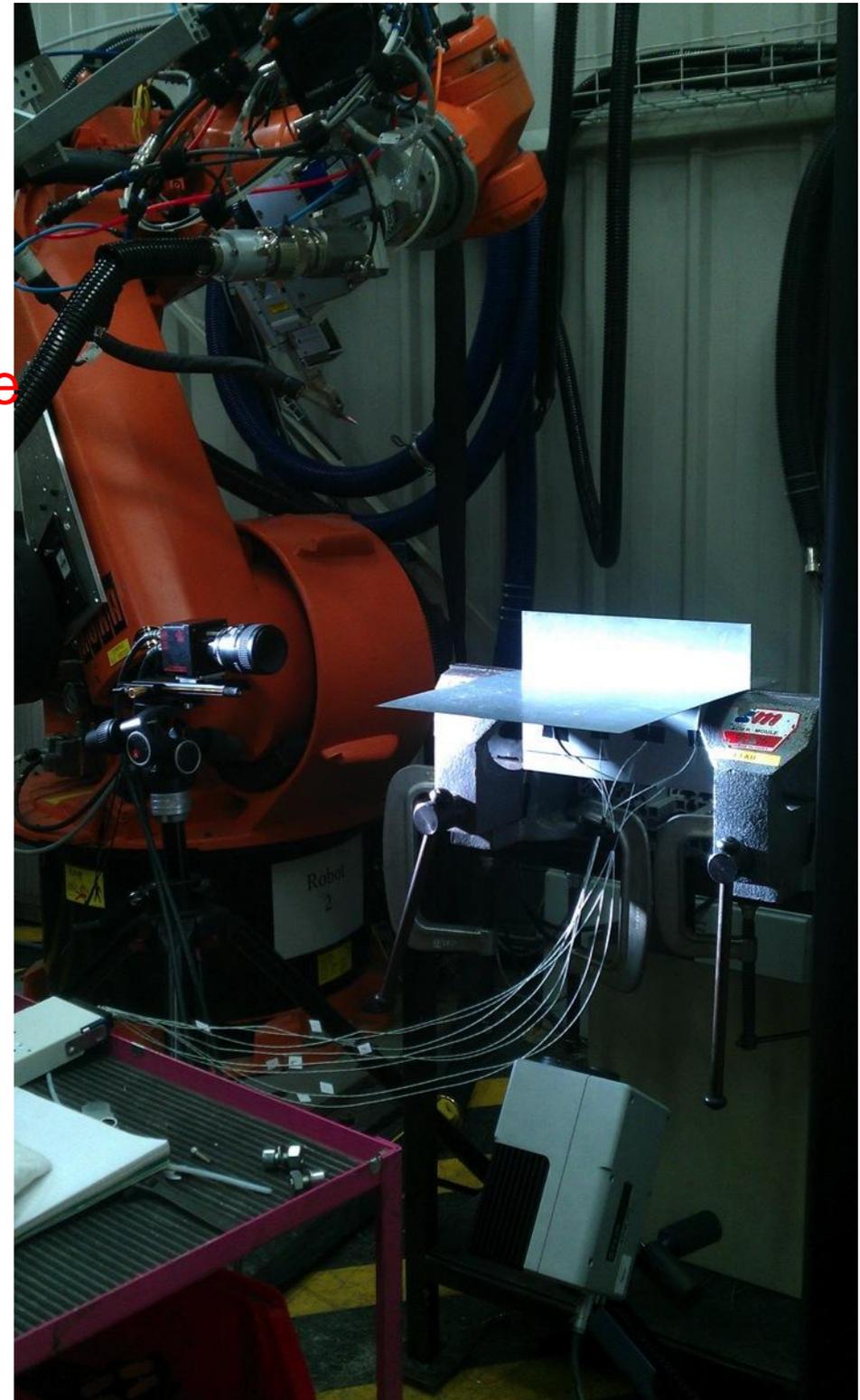
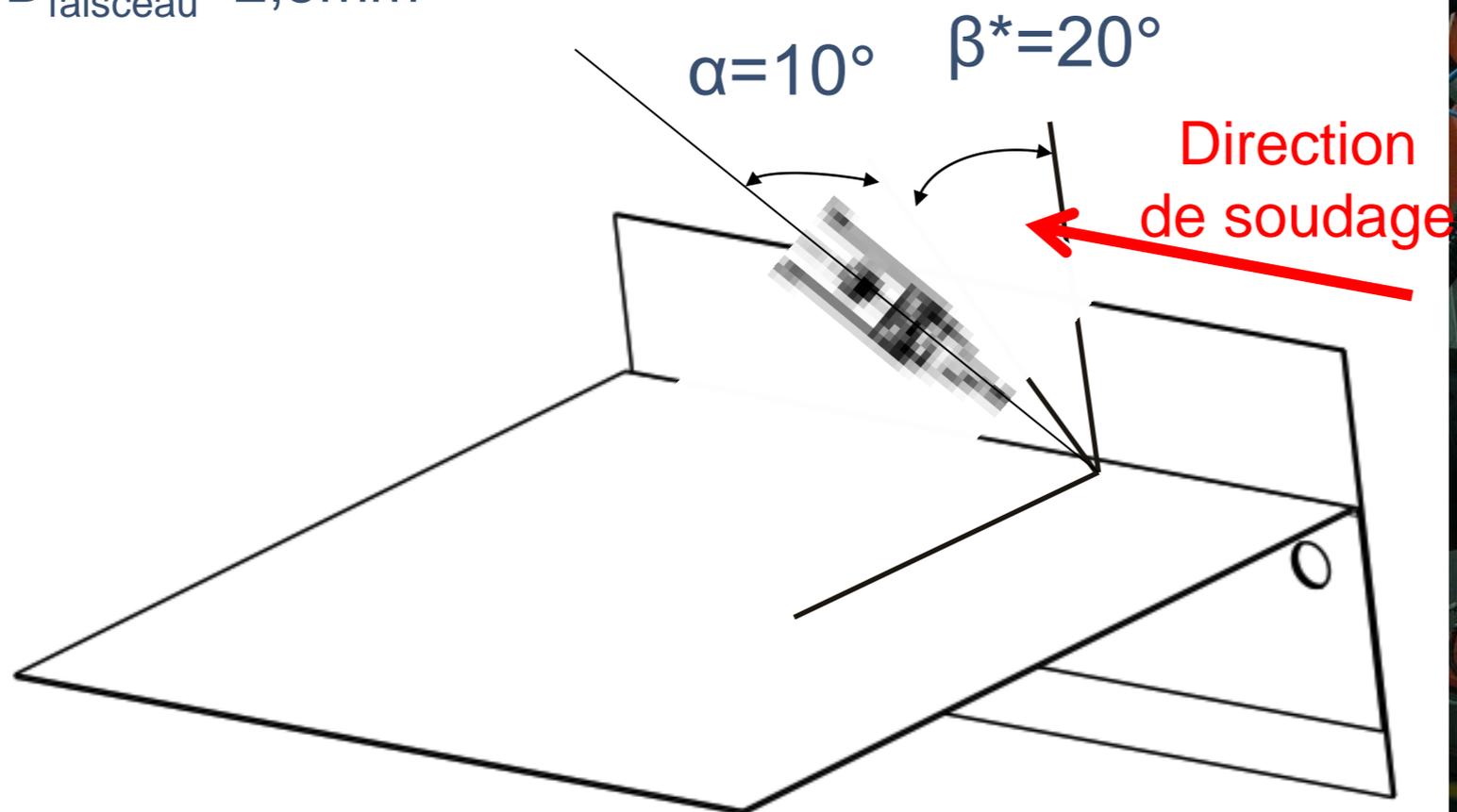
Essai réalisé

Paramètres du procédé de soudo-brasage laser

$$V_s = 4 \text{ m/mn} \quad V_f = 3,5 \text{ m/mn}$$

$$P = 2400 \text{ W} \quad A_f = 80 \text{ A}$$

$$D_{\text{faisceau}} = 2,5 \text{ mm}$$



Mesure des températures

Thermocouples

8 thermocouples perpendiculaires à la trajectoire de soudage
le premier à 8mm du cordon

Images IR

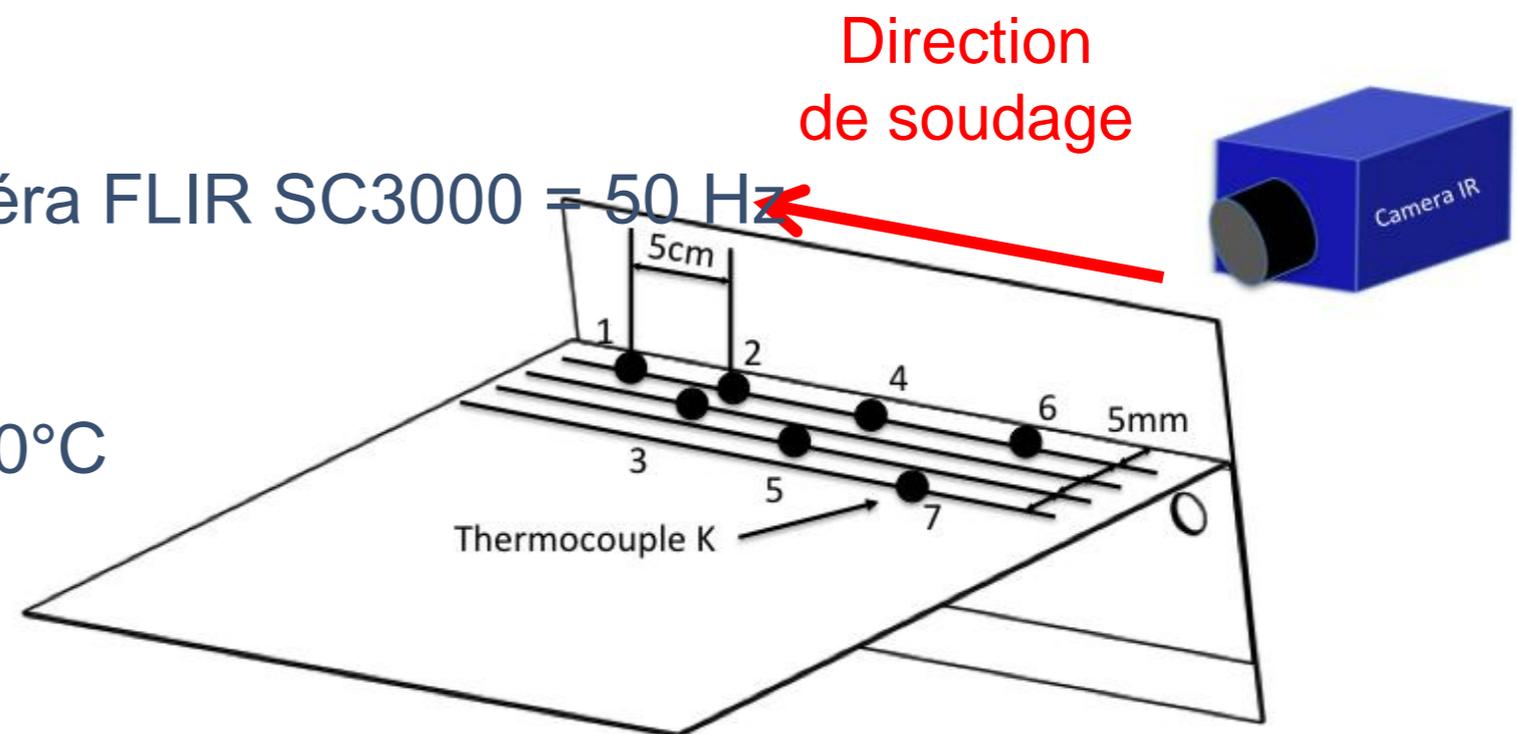
Fréquence d'acquisition caméra FLIR SC3000 = 50 Hz

Résolution : 240 x 320 pixels

Taille de pixel : 0,11mm

Plage d'acquisition : 500-1000°C

[Gaussorgues, 94]

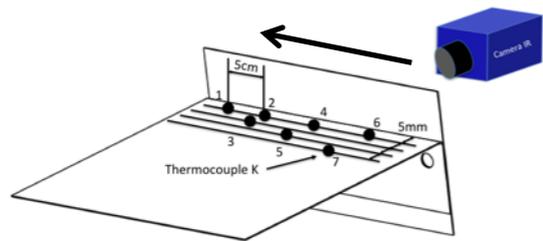


Émissivité de la peinture noire QUEEN = $0,93 \pm 0,03$

Émissivité de la peinture MOTIP = $0,94 \pm 0,03$

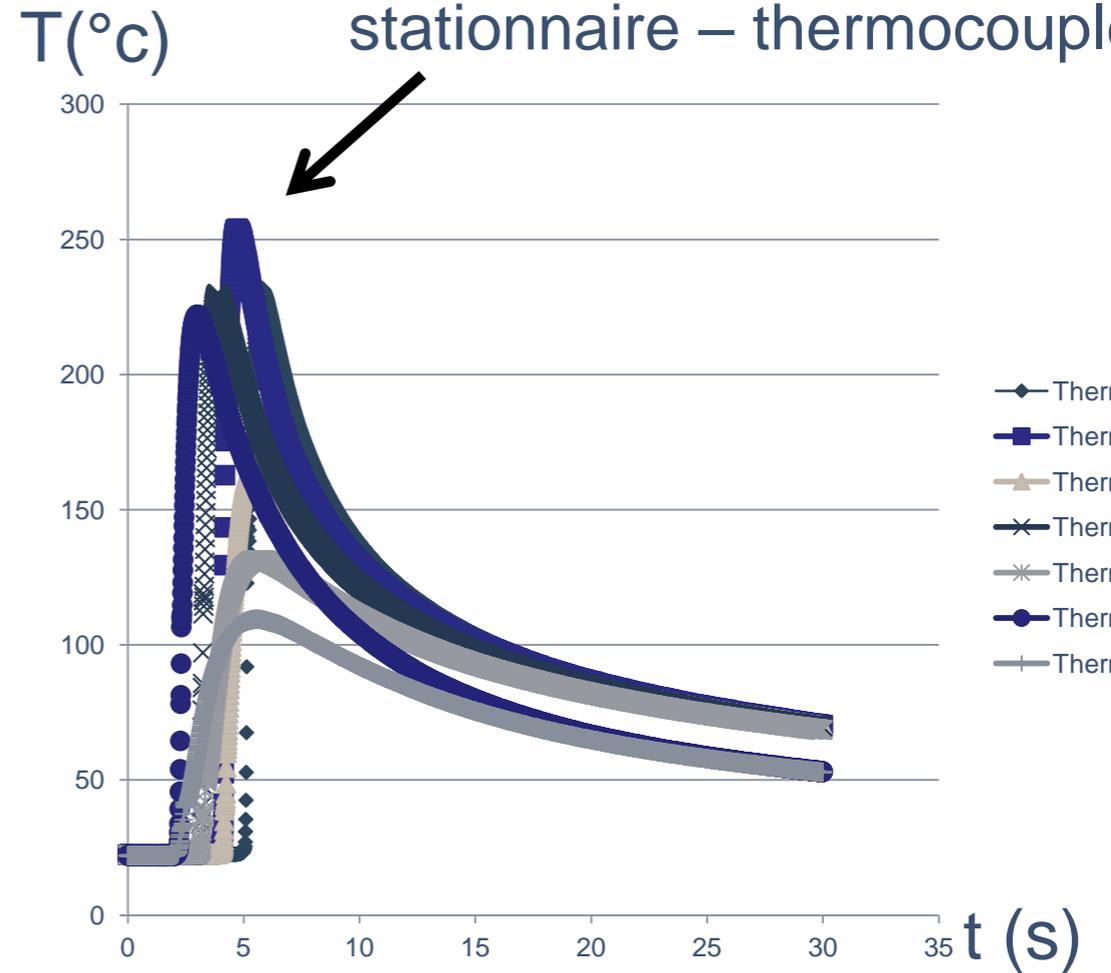
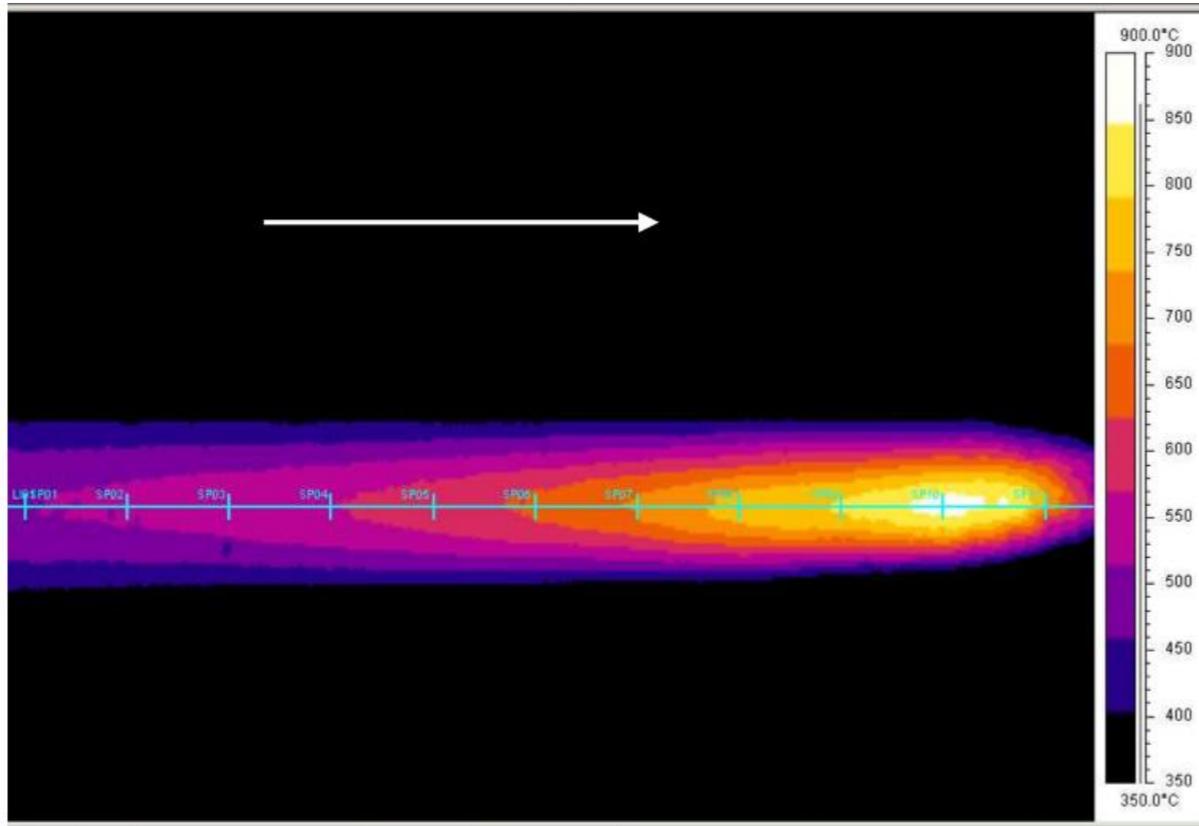
Température environnement = $22^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Direction de soudage

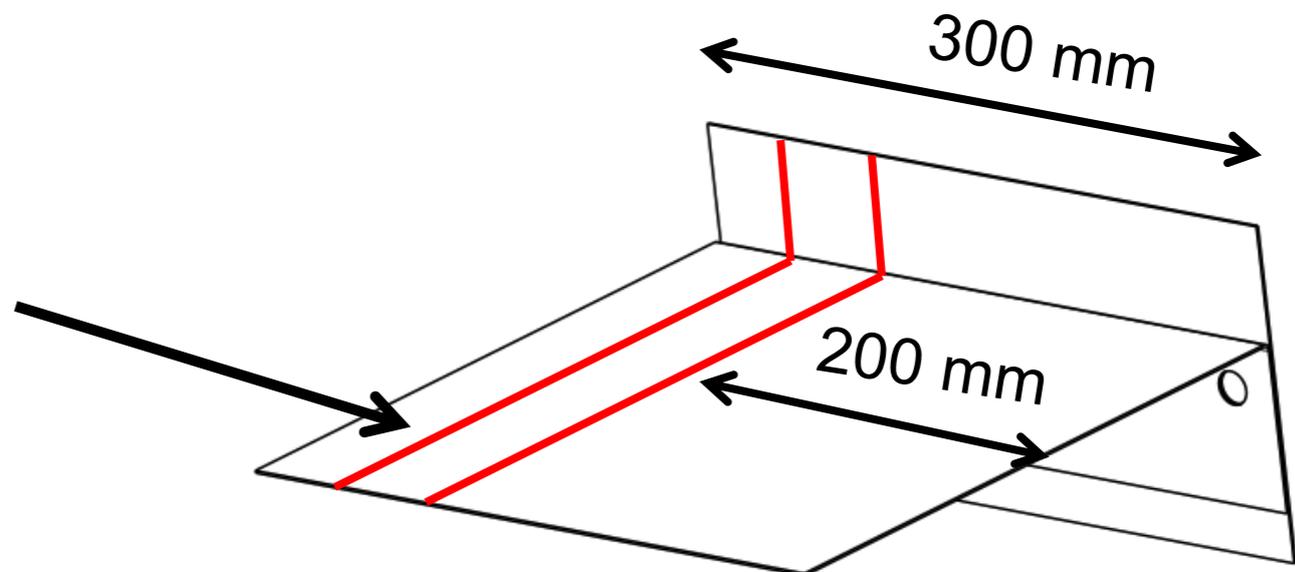


Mesure des températures

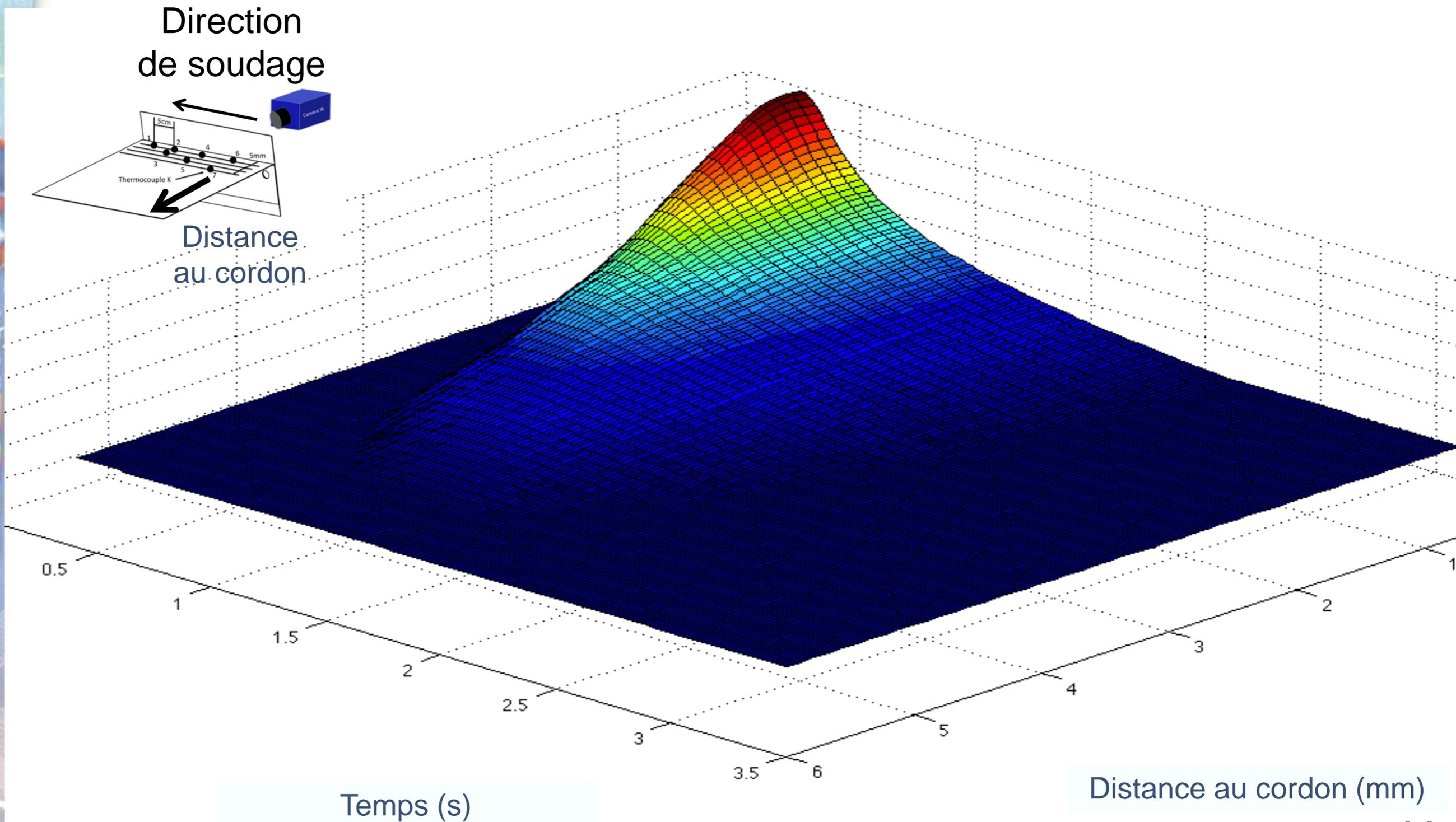
1^{er} thermocouple en régime stationnaire – thermocouple 2



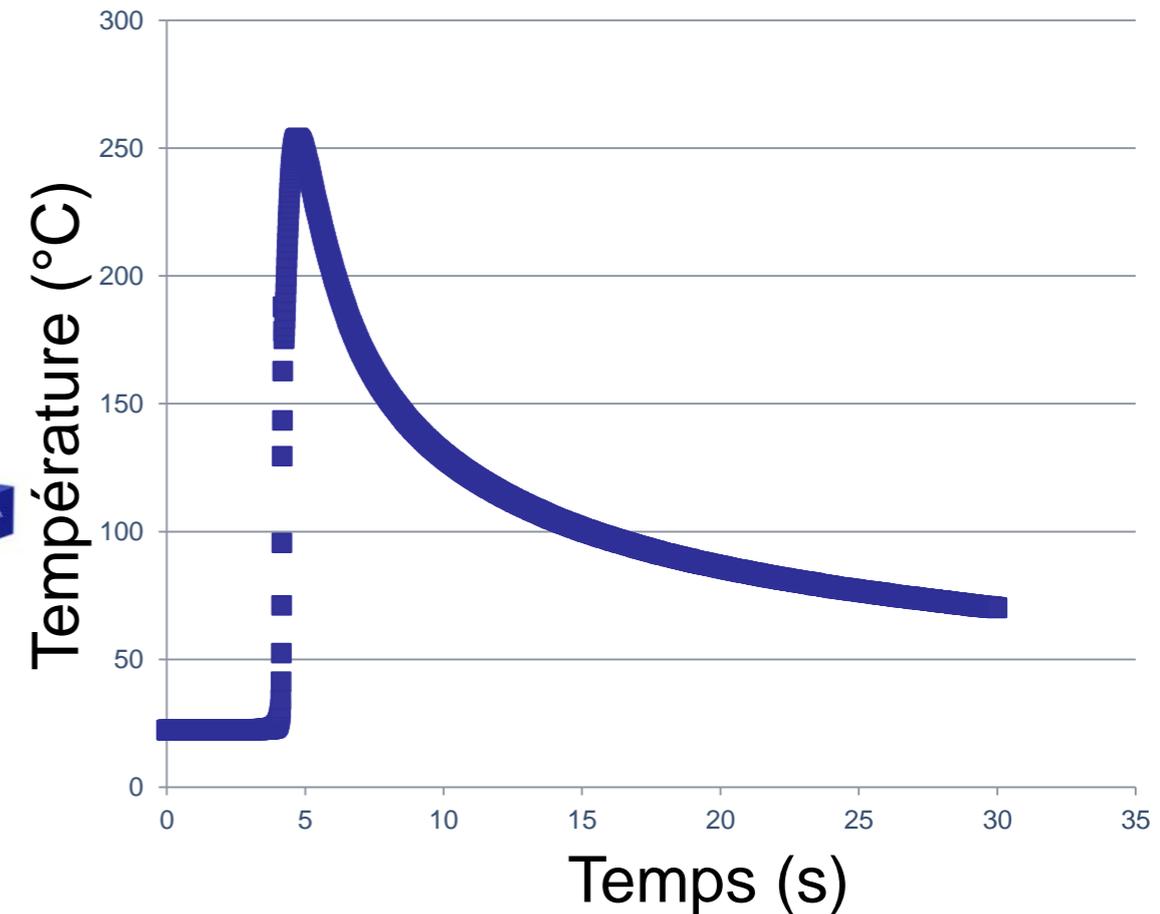
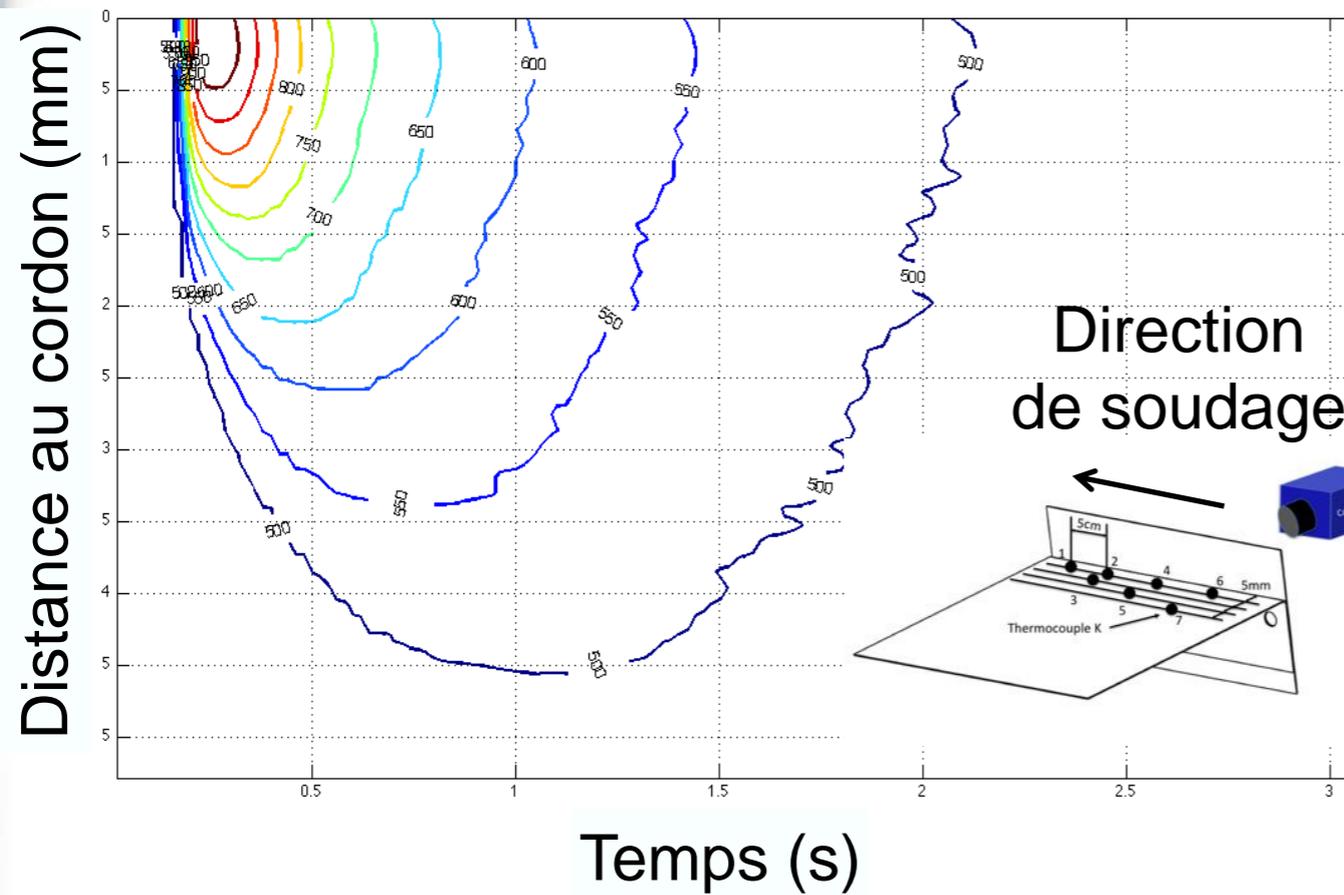
Régime stationnaire (entre 200 mm et 250 mm)



Évolution de la température sur la face arrière en fonction du temps le long d'une direction perpendiculaire au cordon



Domaine de validité des modèles



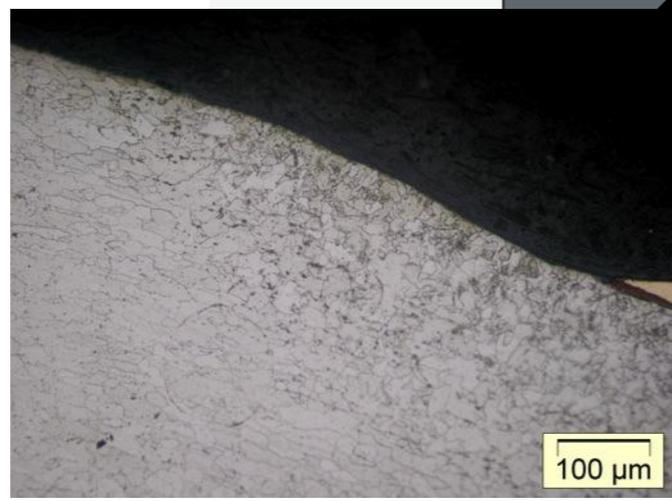
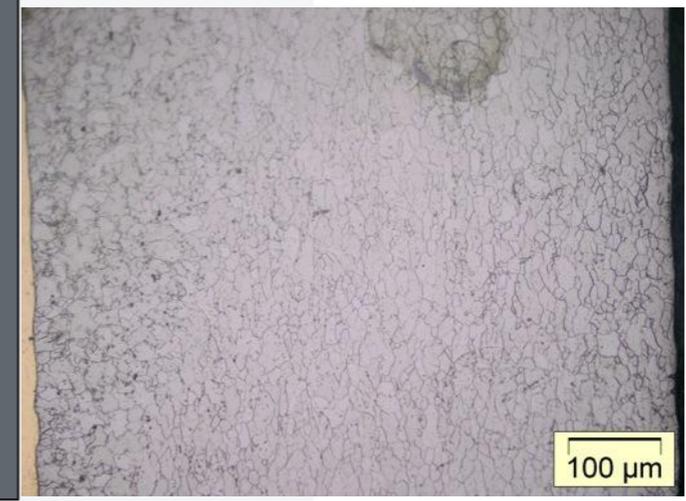
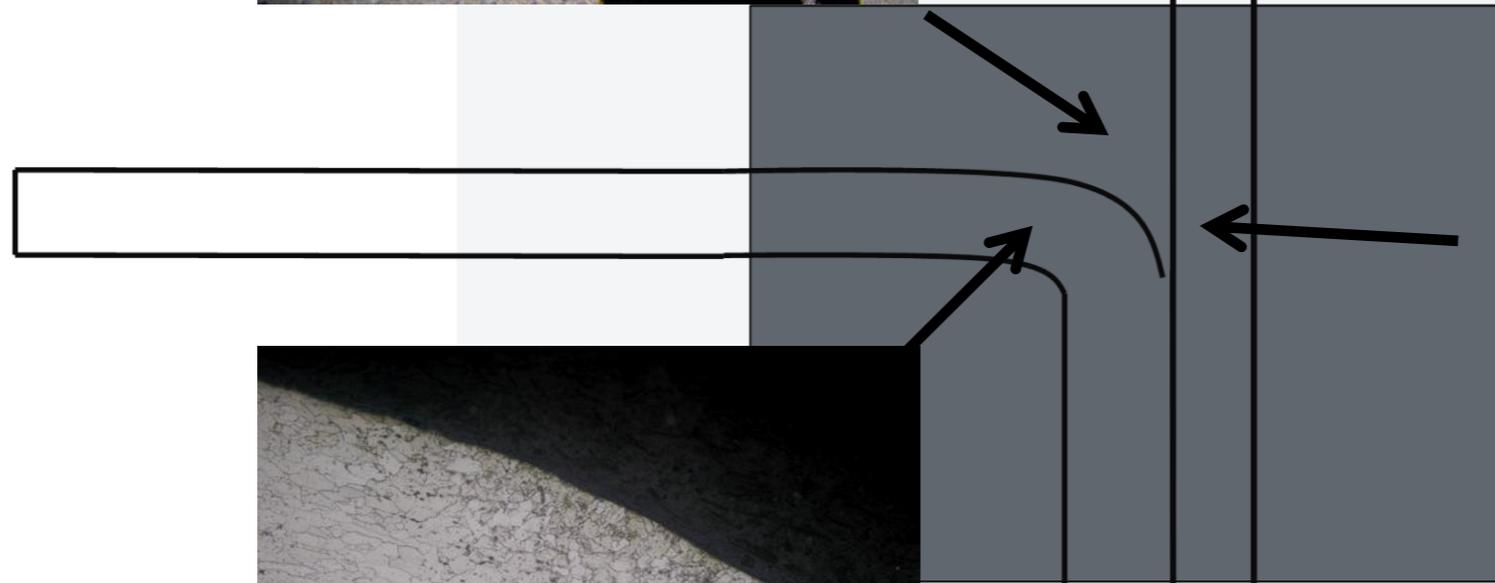
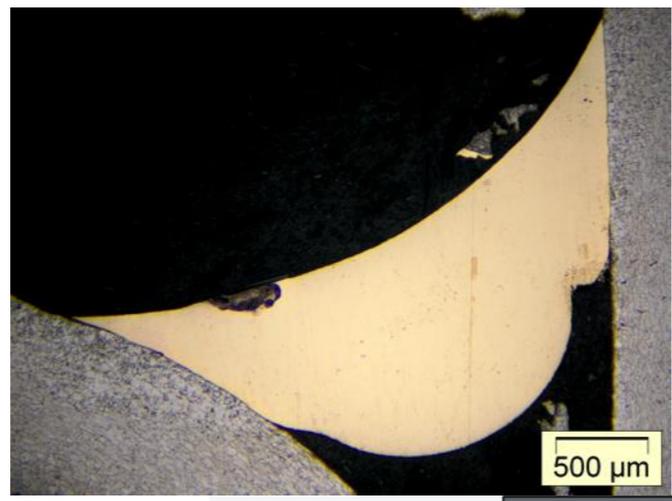
Identification du comportement TMM des matériaux de 20 à 1000°C
avec temps de maintien $t < 2s$ à $T > A_R = 500^\circ C$

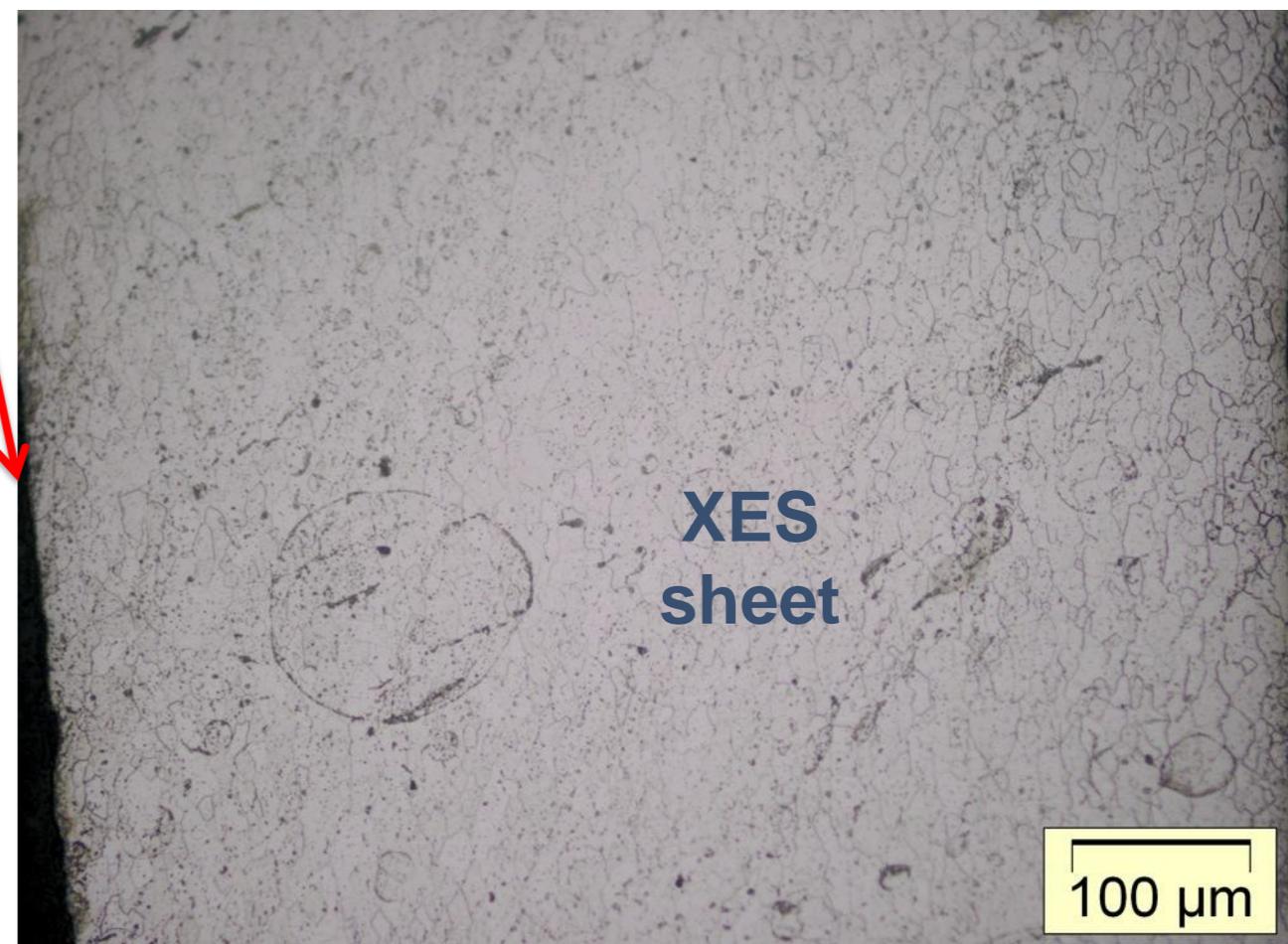
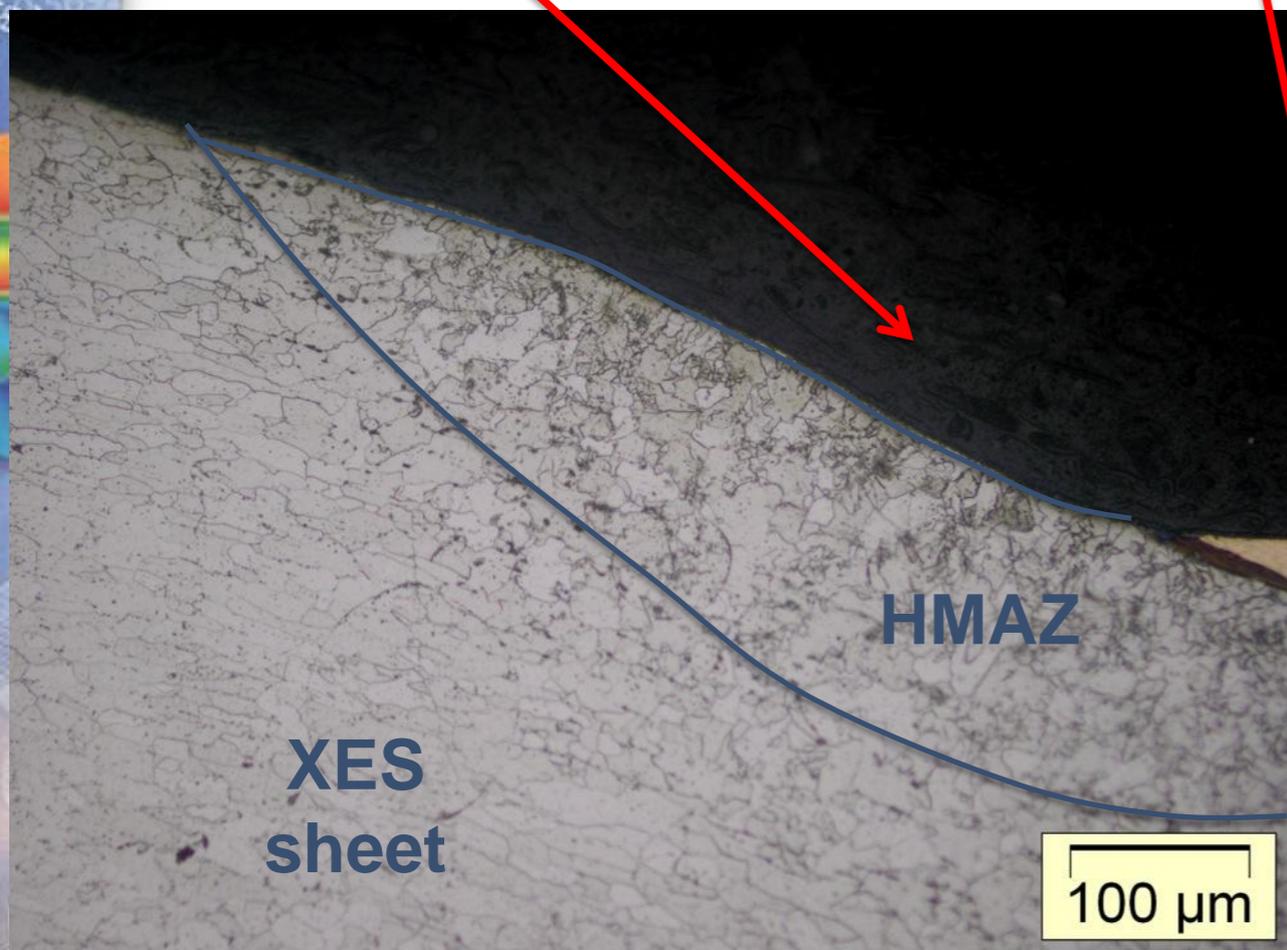
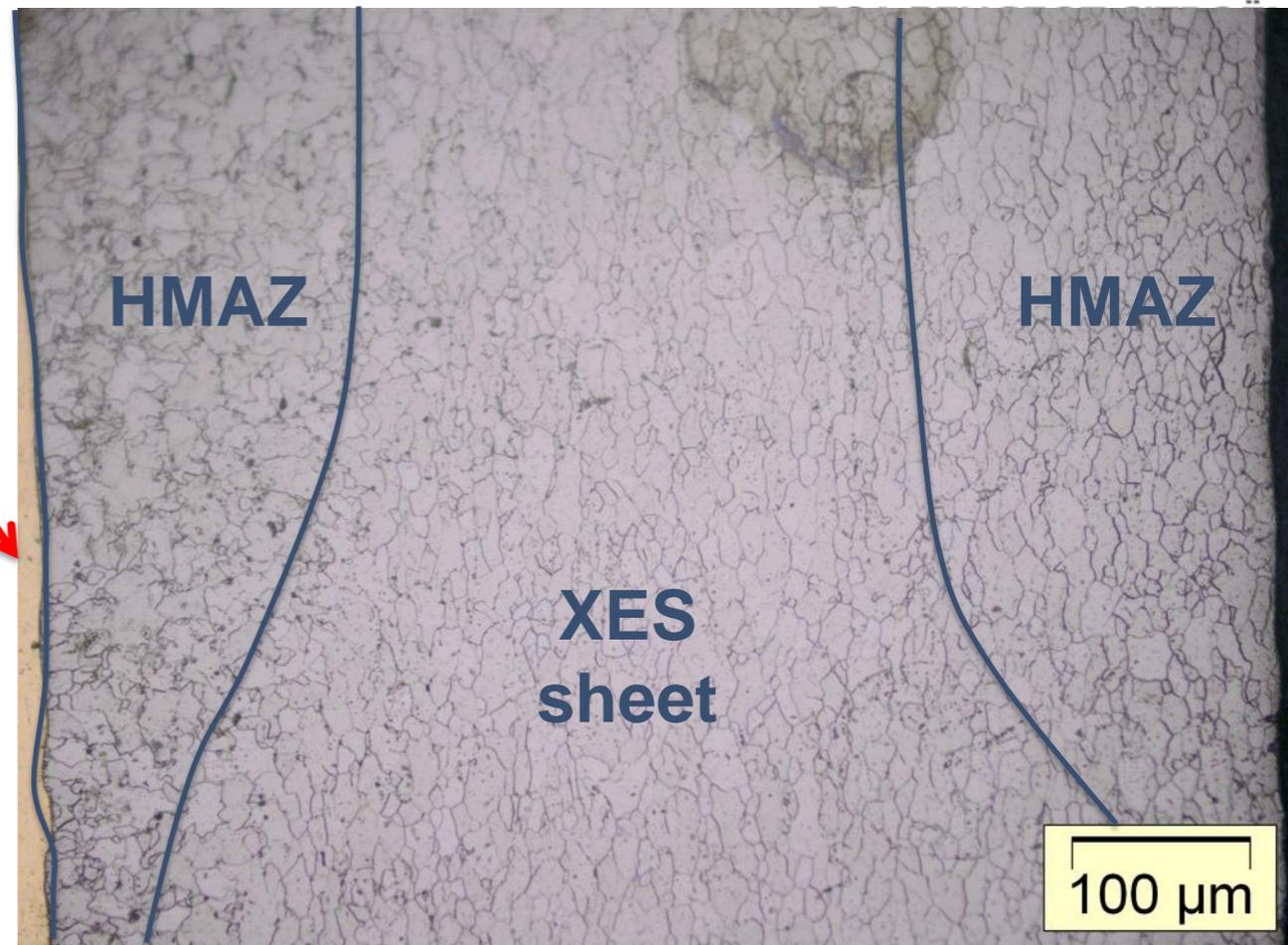
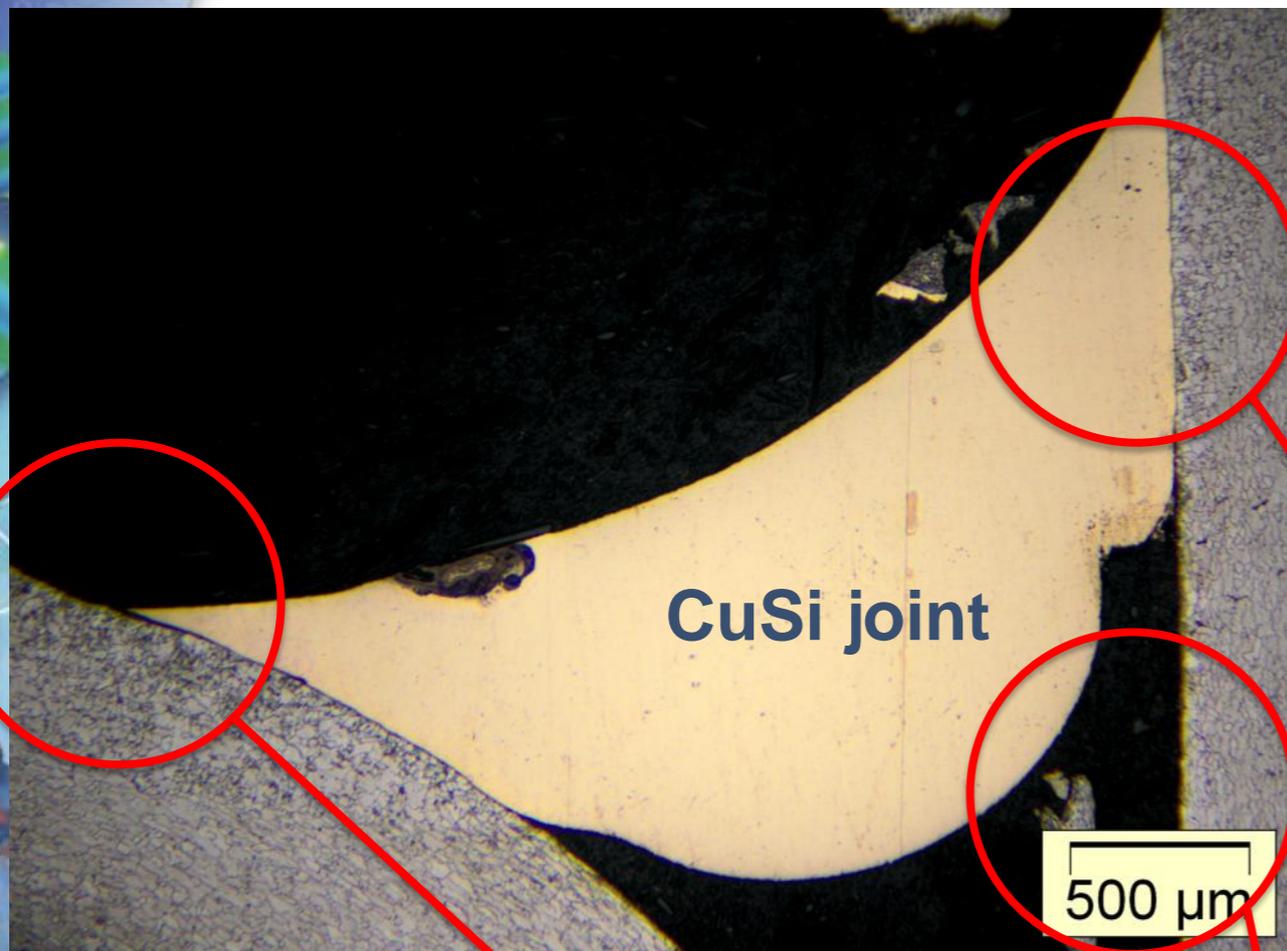
Chauffage en 2s

Identification de la source de chaleur sur la montée

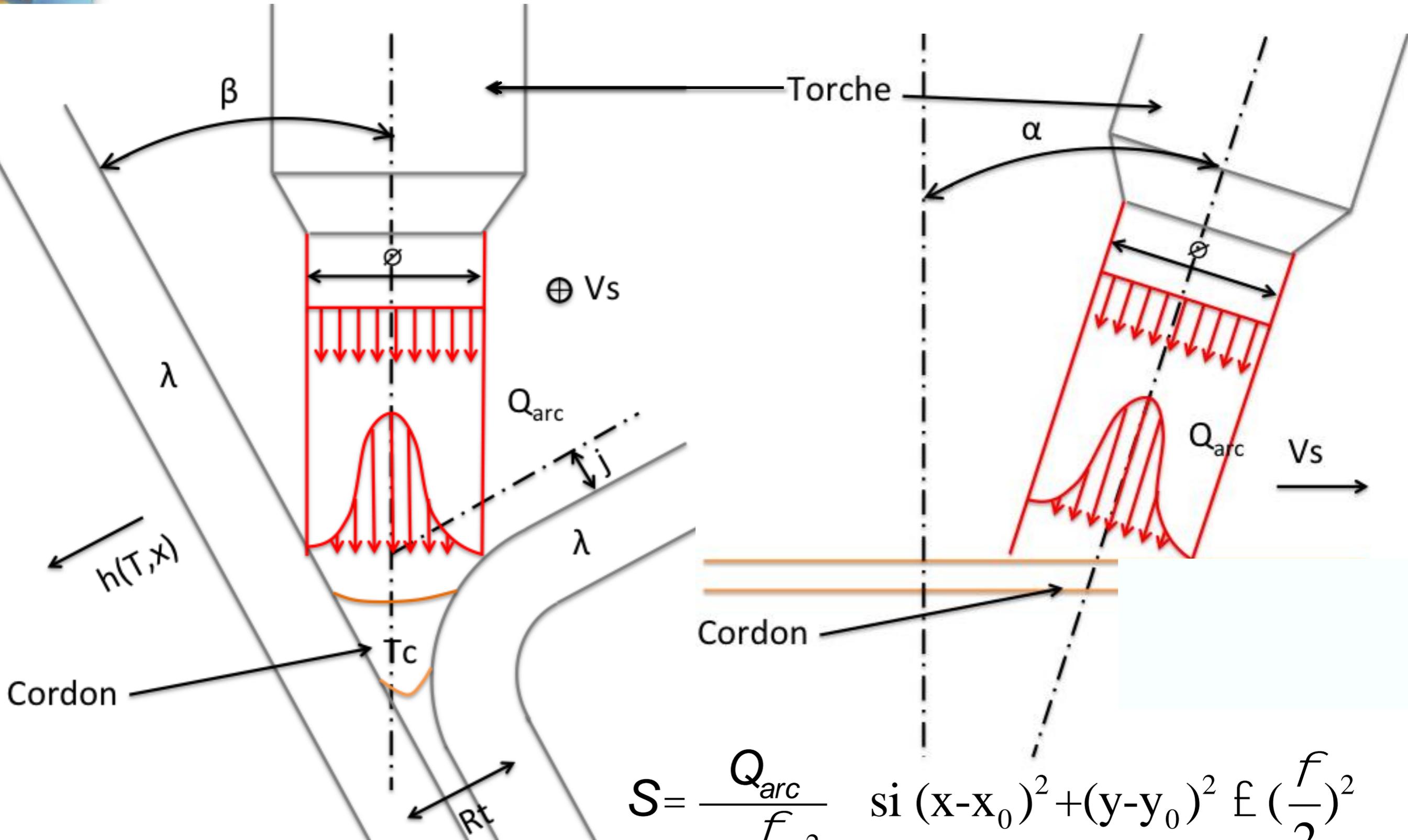
- sans effet des échanges thermiques par convection-rayonnement
- sans effet de la résistance de contact (variable) entre tôles

Micrographies





Identification de la source de chaleur

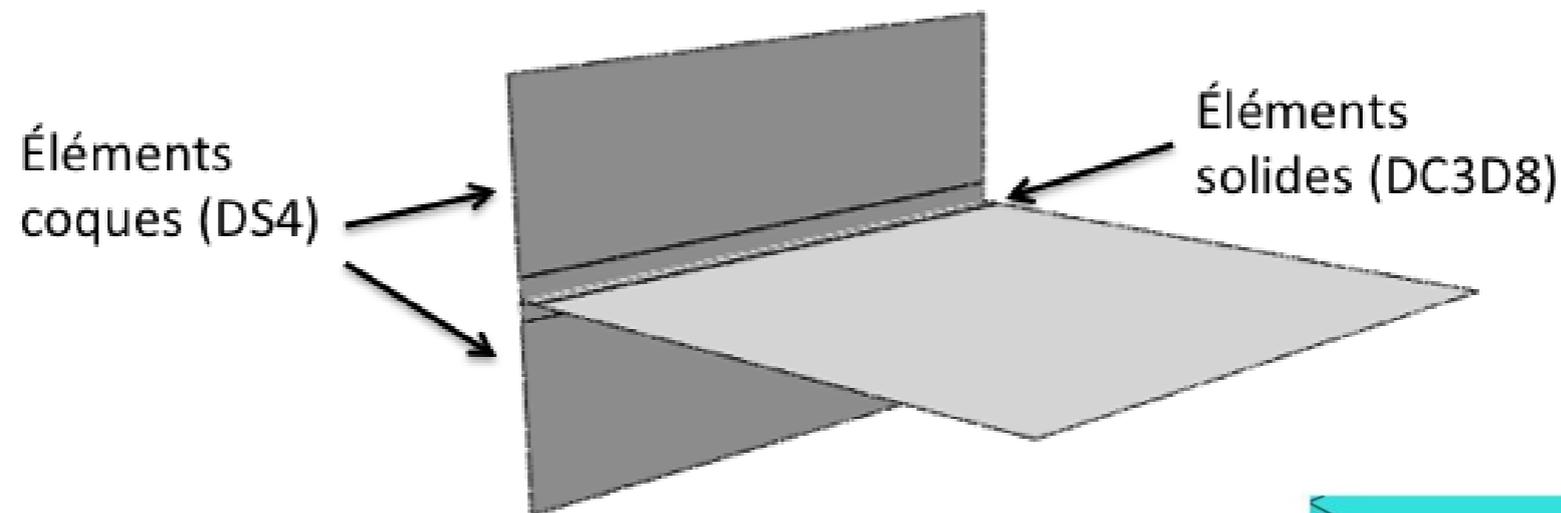


$$S = \frac{Q_{arc}}{\rho \left(\frac{f}{2}\right)^2} \quad \text{si } (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \leq \left(\frac{f}{2}\right)^2$$

Simulation purement thermique

Tôles modélisées par des éléments coques
DS4 + 5 points de Simpson

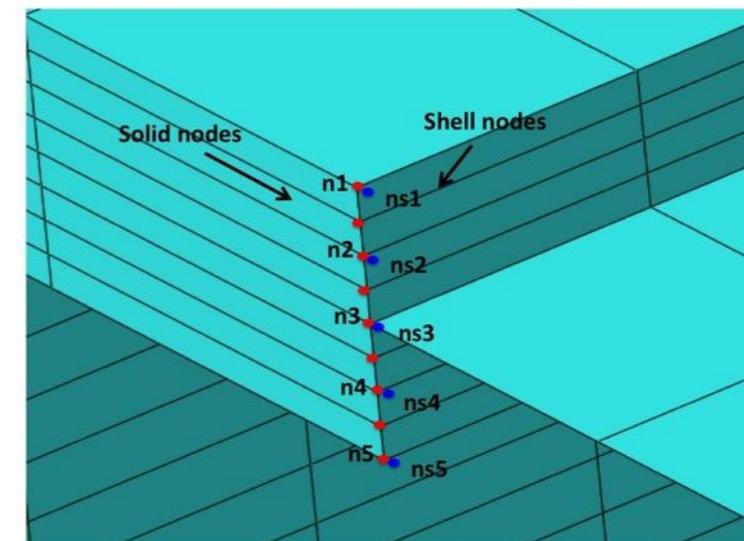
Cordon de soudure et ZAT modélisés par des éléments 3D
C3D8 + points d'intégration aux noeuds



Liaison entre le maillage coques et le maillage solide par
*EQUATION NT11(ni)-NT1i(nsi)=0

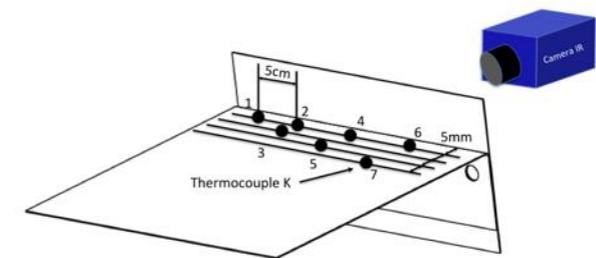
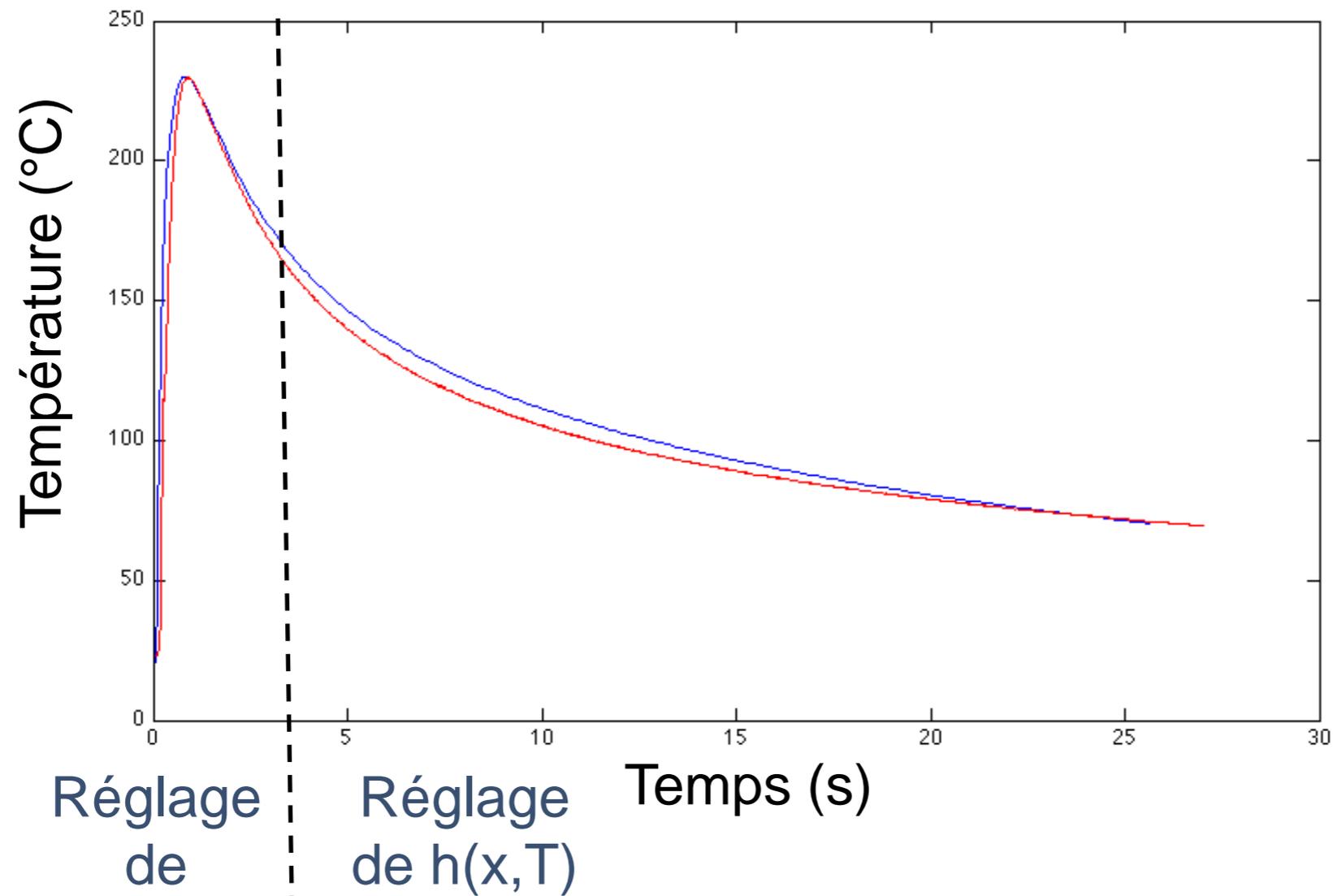
Paramètres thermiques issus de la littérature

Valeur de résistance thermique de contact issue de la littérature
sans influence sur le calcul des paramètres de la source de chaleur



Résultats

Résultats après détermination dichotomique de Q_{beam} et h



Evolution de la température au niveau du thermocouple 2 (5mm du cordon)



Plan de la présentation

Analyse thermique d'essais de soudo-brasage en laboratoire

Identification de la source de chaleur

Identification du comportement des tôles

Essais de validation sur pièce automobile

Conclusions et perspectives

Modèle de comportement biphasé

[Hamata, 92], [Goth, 02], [Saint-Germain 06], [Roux 09]

Prise en compte du caractère éventuellement multi-phasé du matériau

Hypothèse de déformation homogène et partition des déformations

$$\underline{\underline{e}} = \underline{\underline{e}}_i = \underline{\underline{e}}_i^e + \underline{\underline{e}}_i^{vp}$$

Loi de mélange appliquée à l'énergie libre et à la dissipation

$$y(\underline{\underline{e}}, T, V_i, \mathbf{x}_a) = \sum_{i=1}^2 \dot{\alpha}_i y_i(\underline{\underline{e}}, T, V_i) + y^{\text{interaction}}(\underline{\underline{e}}, T, V_i, \mathbf{x}_a)$$

$$\text{avec } i = a, g \quad \mathbf{x}_a + \mathbf{x}_g = 1 \quad \text{et} \quad V_i = \left(\underline{\underline{e}}_i^p, r_i \right)$$

Courbes de Transformations au Chauffage et au Refroidissement Anisotherme

$$\dot{\mathbf{x}}_a = f(T, \dot{T}) \quad [\text{Leblond 84}], [\text{Leblond 85}], [\text{Waeckel 94}], [\text{Roux 09}]$$

Identification de chaque phase indépendamment,

phase ferritique de 20°C à 700°C

phase austénitique de 900°C à 1000°C

Essais de caractérisation à haute température

Tenue du mouchetis hautes températures :

Lubrifiant à sec – nitrure de bore

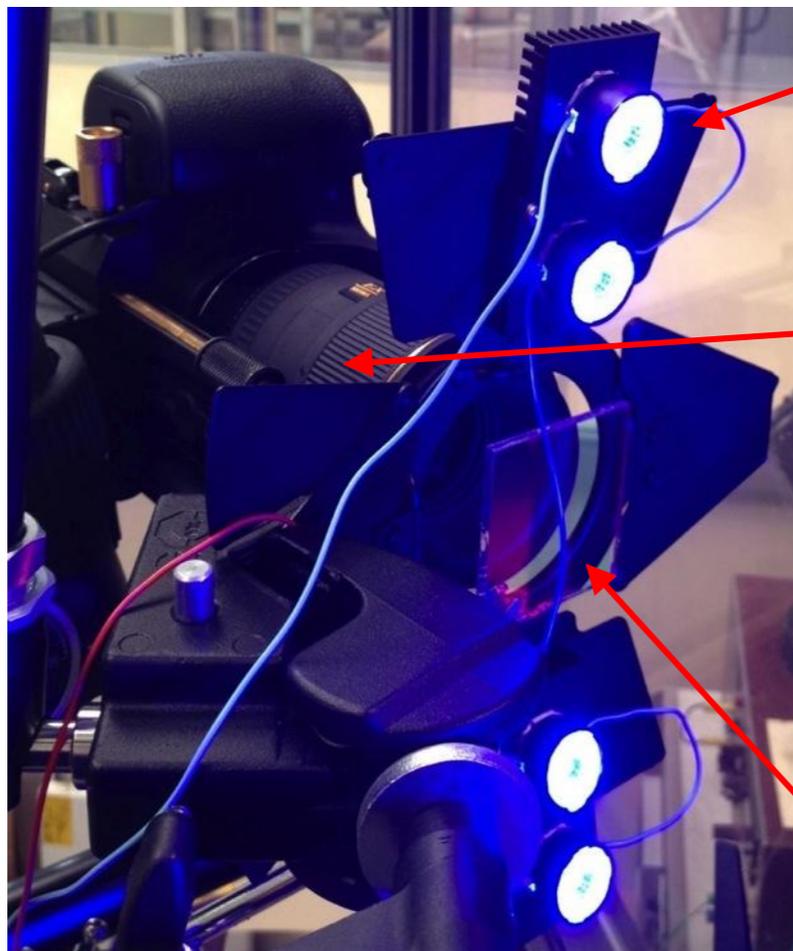
Mélange ciment / oxyde de fer

Incandescence du métal, variation de lumière à l'intérieur du four

Nouveau mode opératoire de CIN à chaud

Canon 60D + Sigma 105mm

Utilisation de la partie bleue du signal photographique



4 LED bleu royal
centrées sur 447,5 nm



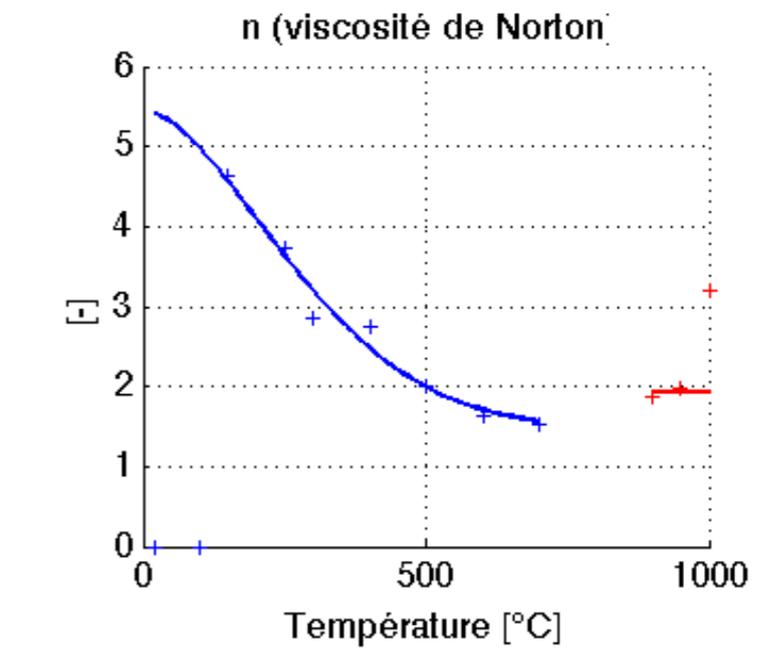
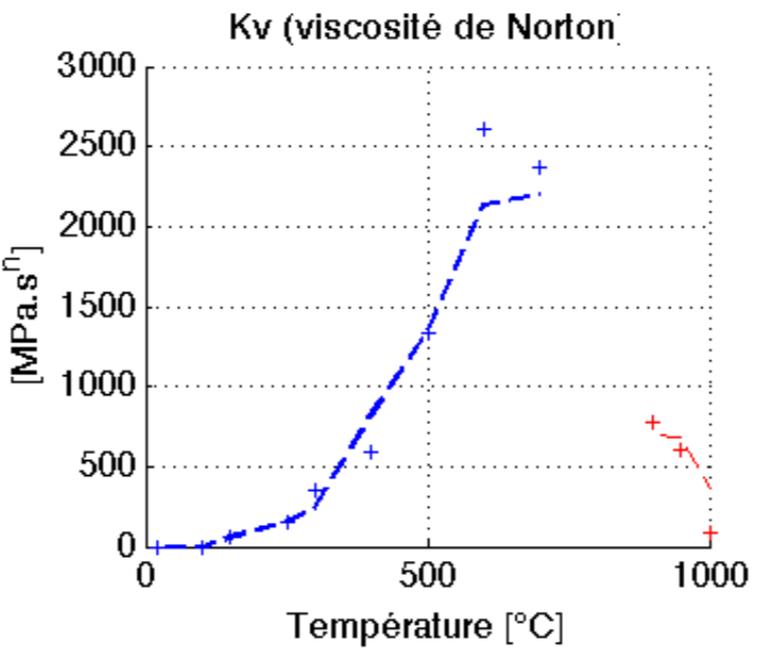
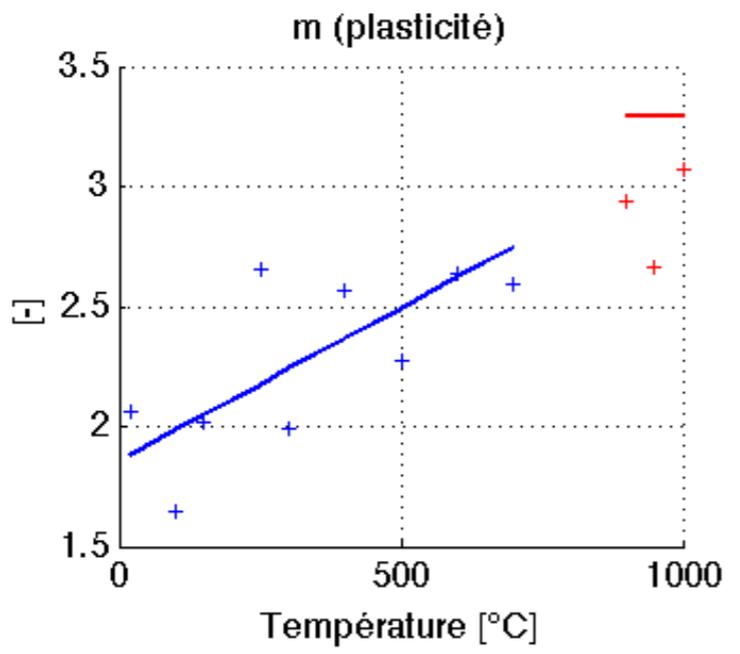
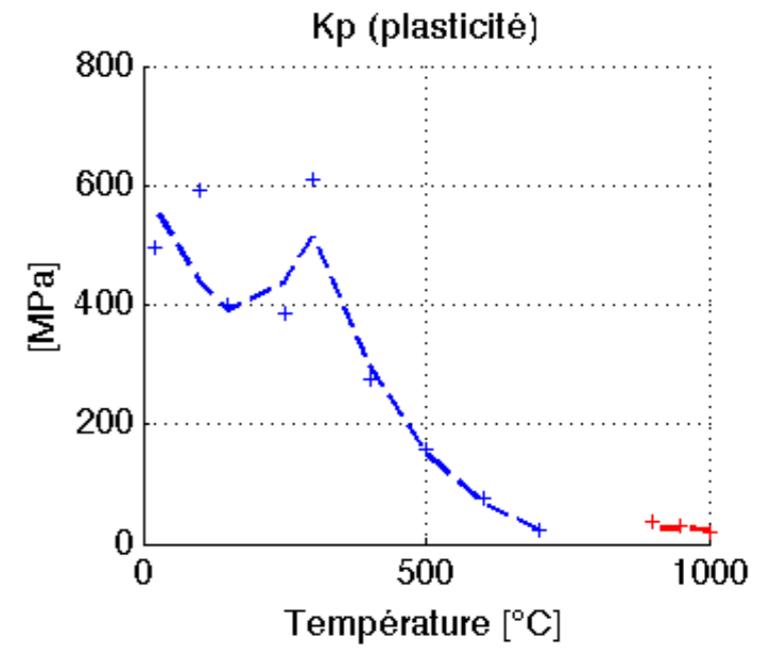
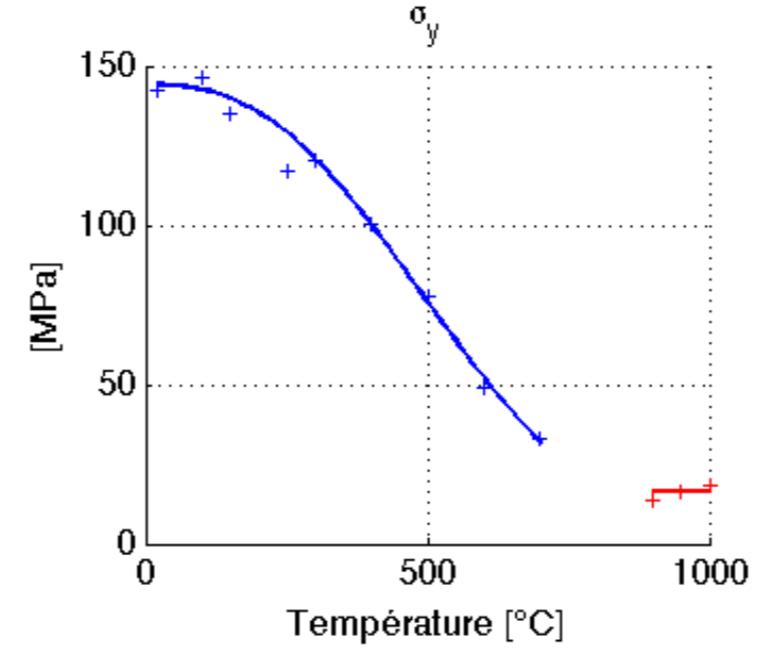
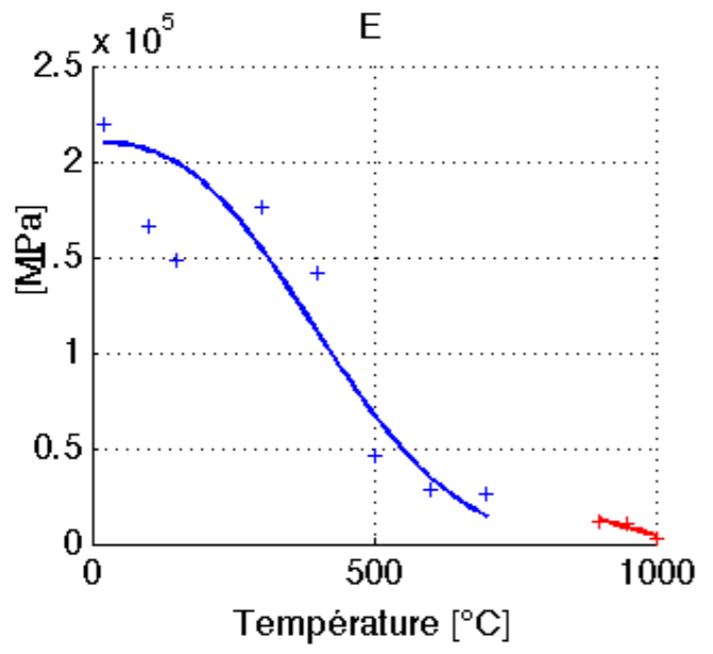
Filtre Passe-Bande pour $420 \text{ nm} \leq \lambda \leq 460 \text{ nm}$
monté dans un tube d'allonge

Miroir chaud (Passe Bas pour $\lambda < 700 \text{ nm}$)



[Lyons, 96], [Pan, 11]

Résultats





Plan de la présentation

Analyse thermique d'essais de soudo-brasage en laboratoire

Identification de la source de chaleur

Identification du comportement des tôles

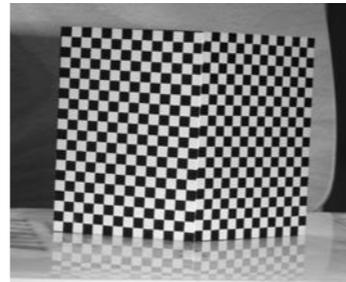
Essais de validation sur pièce automobile

Conclusions et perspectives

Essai de validation sur pièce réelle

Mesure des déformations pendant l'assemblage par stéréocorrélation

Système de stéréovision
en général calibré
à partir d'une mire



-> mal adapté aux objets de grande dimension

Développement d'un nouveau système
dit d'autocalibration utilisant
le modèle CAO de la pièce
et agissant sur les pôles définissant les surfaces

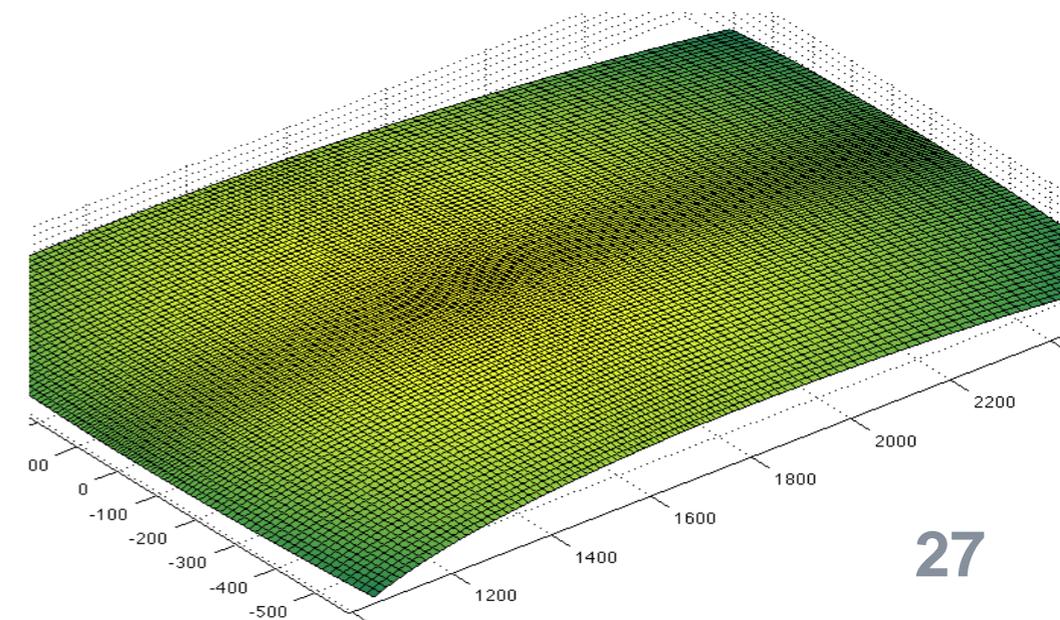
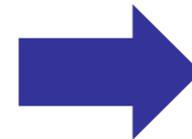
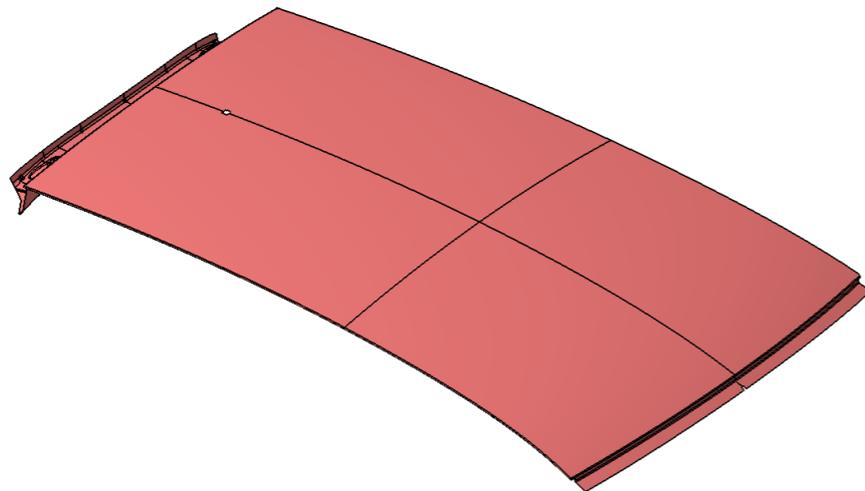
Tête de
soudo-brasage

Système de
stéréovision

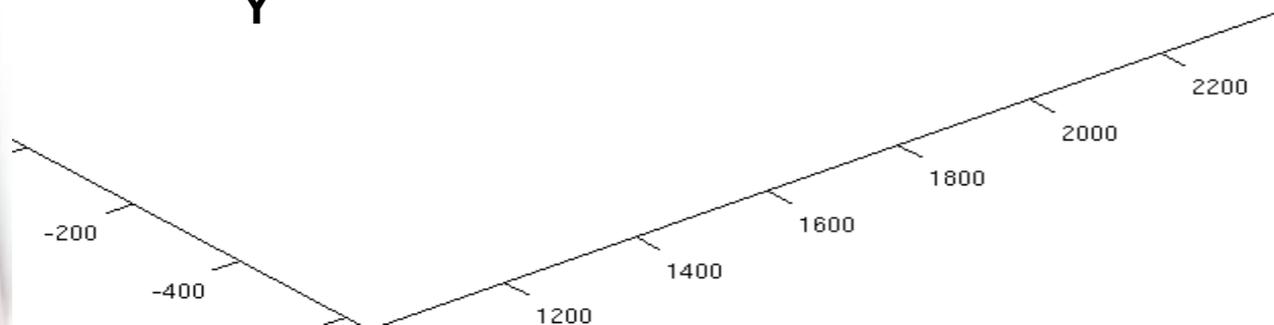
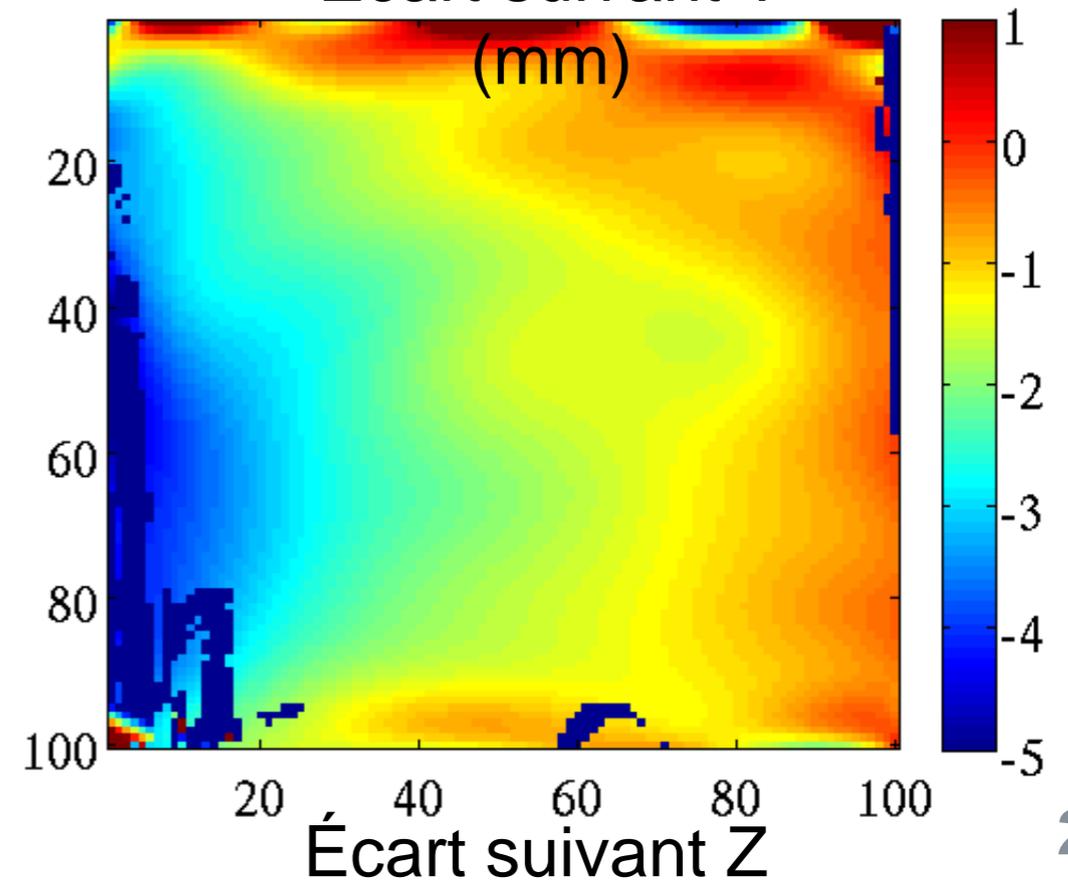
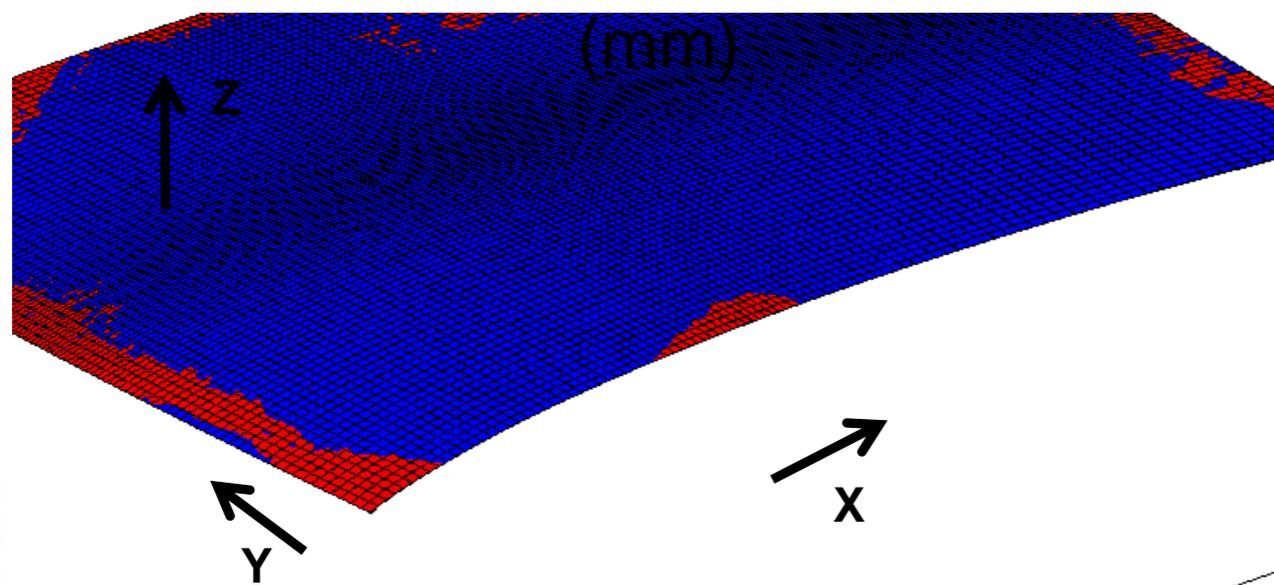
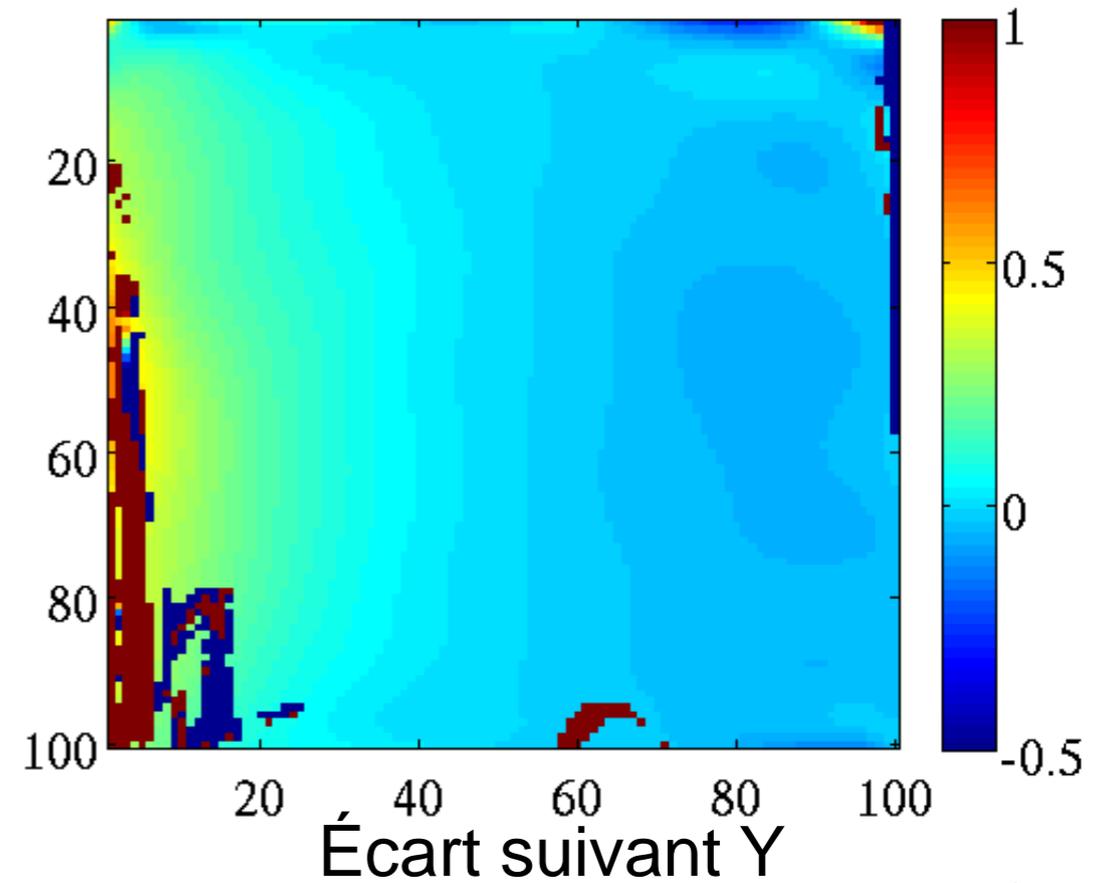
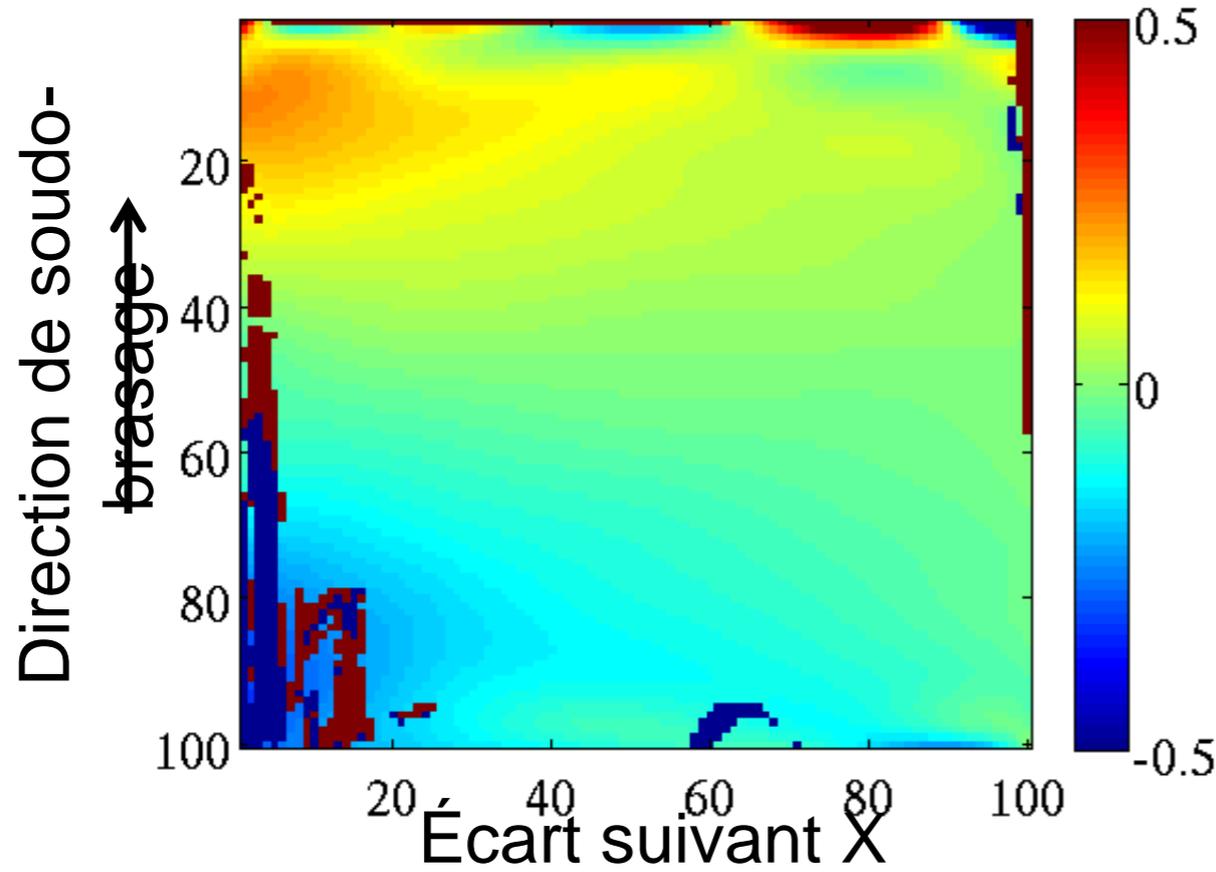
Joint de
soudo-brasage

Côté de
caisse

pavillon



Écart géométrique avant et après soudage





Plan de la présentation

Analyse thermique d'essais de soudo-brasage en laboratoire

Identification de la source de chaleur

Identification du comportement des tôles

Essais de validation sur pièce automobile

Conclusions et perspectives

Conclusions et *perspectives*

Essais de caractérisation du comportement mécanique anisotherme

Validation de la CIN à chaud à partir de nouveaux essais de dilatométrie

Identification du comportement des tôles

Identification inverse du comportement du cordon d'alliage cupro-silicium

Essais de caractérisation de la résistance thermique

Identification inverse de la résistance thermique

Mise au point d'un outil de corrélation d'images numériques 3D

Développement d'un système de stéréocorrélation (CIN 3D) basée sur la CAO

Application de la technique à des essais de soudo-brasage industriels

Développement d'un outil de CIN en 3D-coques

Mise au point d'un outil de simulation du procédé de soudo-brasage

Implémentation dans ABAQUS des modèles identifiés

Premières simulations d'essais sur pièce réelle

avec et sans défaut (instabilités géométriques

[AFM SNS 2013 - 28 mars 2013]



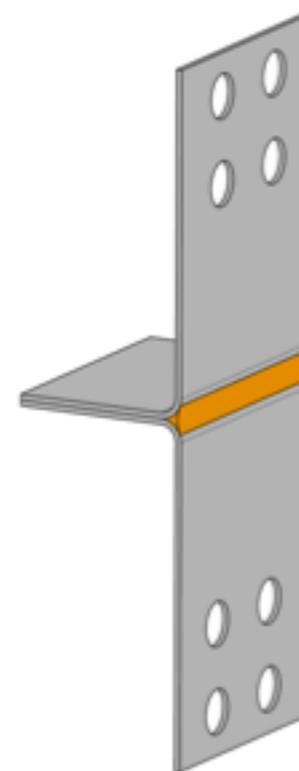
Merci de votre attention



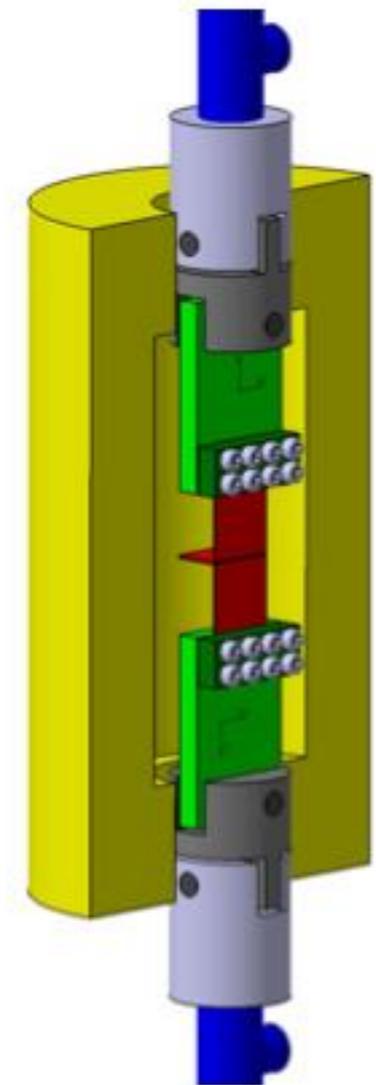
Caractérisation expérimentale du cordon

Essais réalisés sur éprouvette structure [Antoine 12]

- CuSi livré en bobine de fil
et transformations métallurgiques complexes lors du dépôt
-> caractérisation impossible sur matériau vierge
- Géométrie d'éprouvette définie
- Montage conçu et fabriqué
- Même méthodologie que pour les essais mono-matériau
Acquisition par CIN à chaud
Essais isothermes



Éprouvette



Montage

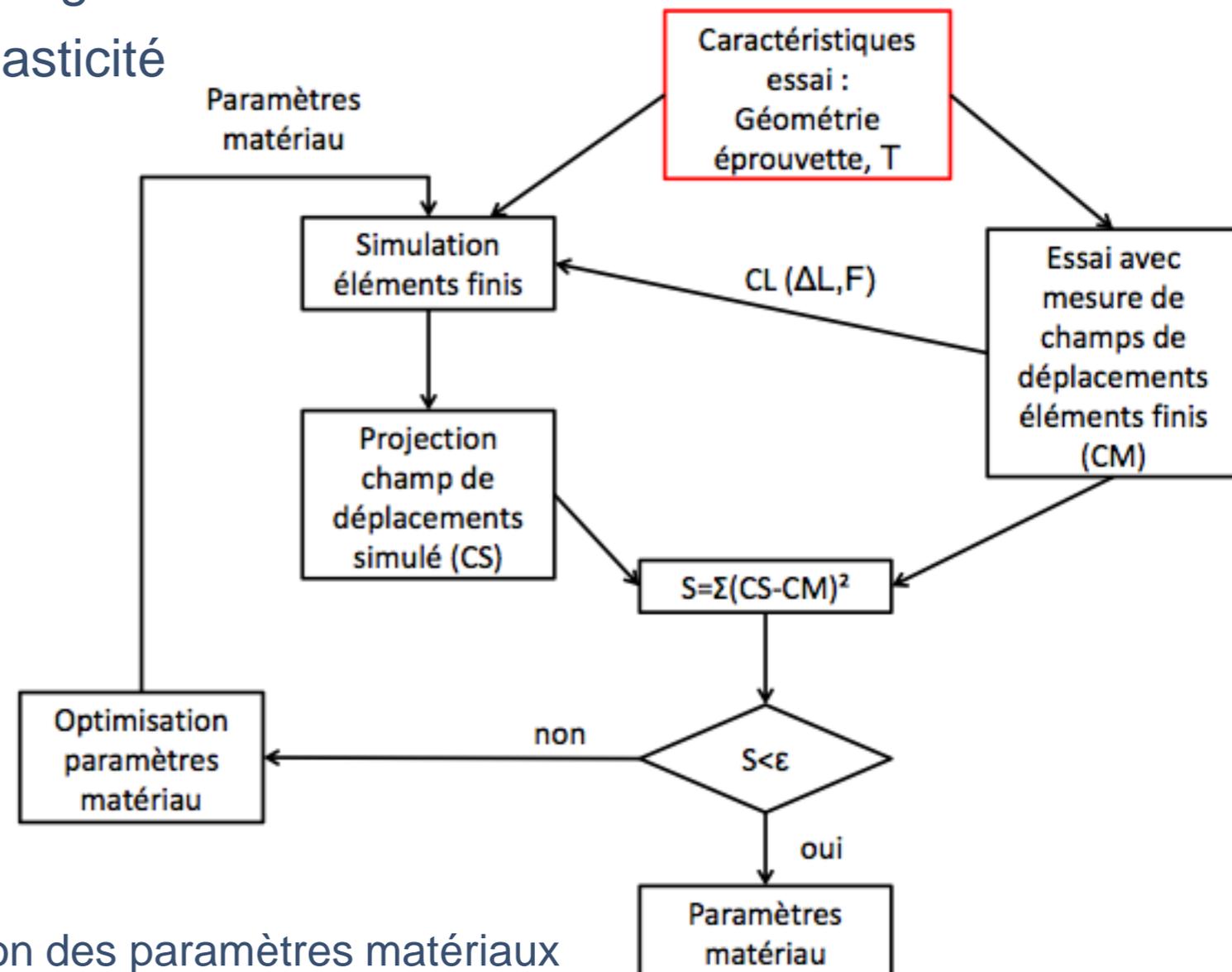
Identification inverse

Identification inverse par comparaison des champs de déplacements

Corrélation d'Images Numériques et Éléments Finis

la loi de comportement de l'acier XES étant déjà connue

- Détermination d'un modèle monphasé
à 2 paramètres d'écrouissage et
2 paramètres de visco-élasticité



Algorithme de détermination des paramètres matériaux

Résistance thermique de contact entre tôles

Modélisation de la résistance thermique entre tôles

● **Objectif :**

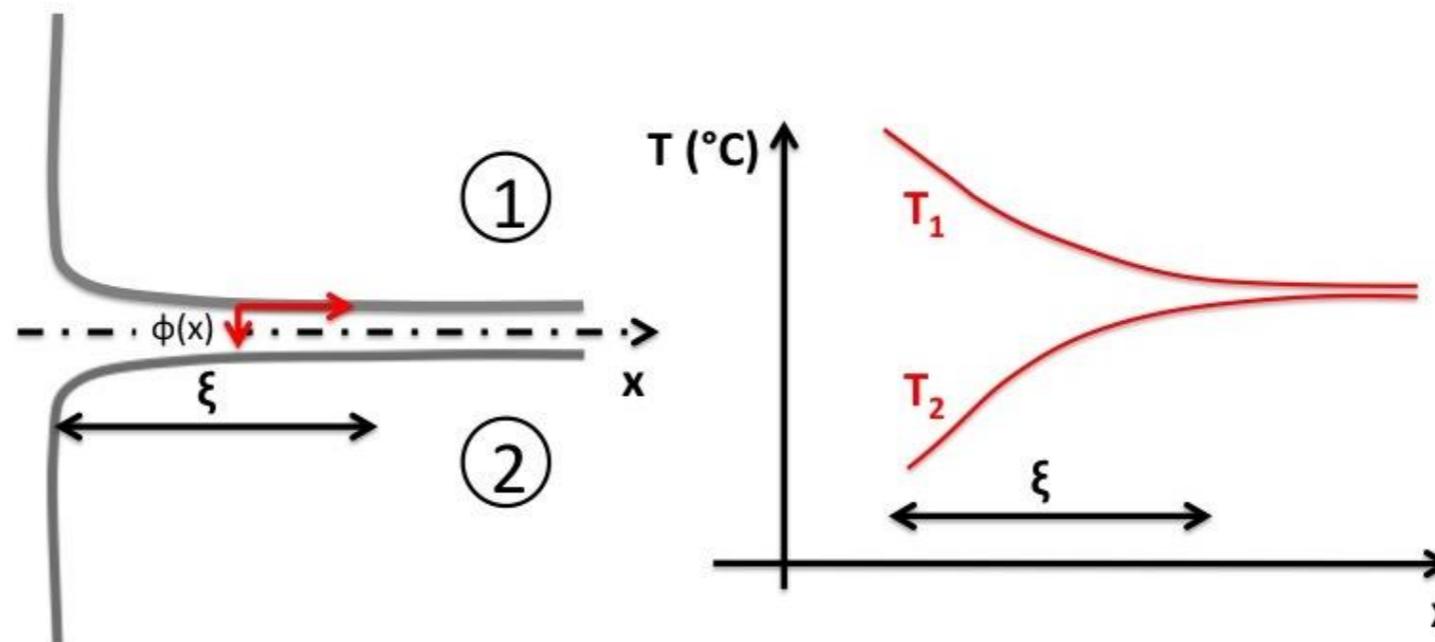
Modèle simple, robuste, facile à identifier

Prenant en compte

- la distance variable entre tôles (si non en contact)
- la pression de contact entre tôles (si en contact)
- le mouillage éventuel par le revêtement ?

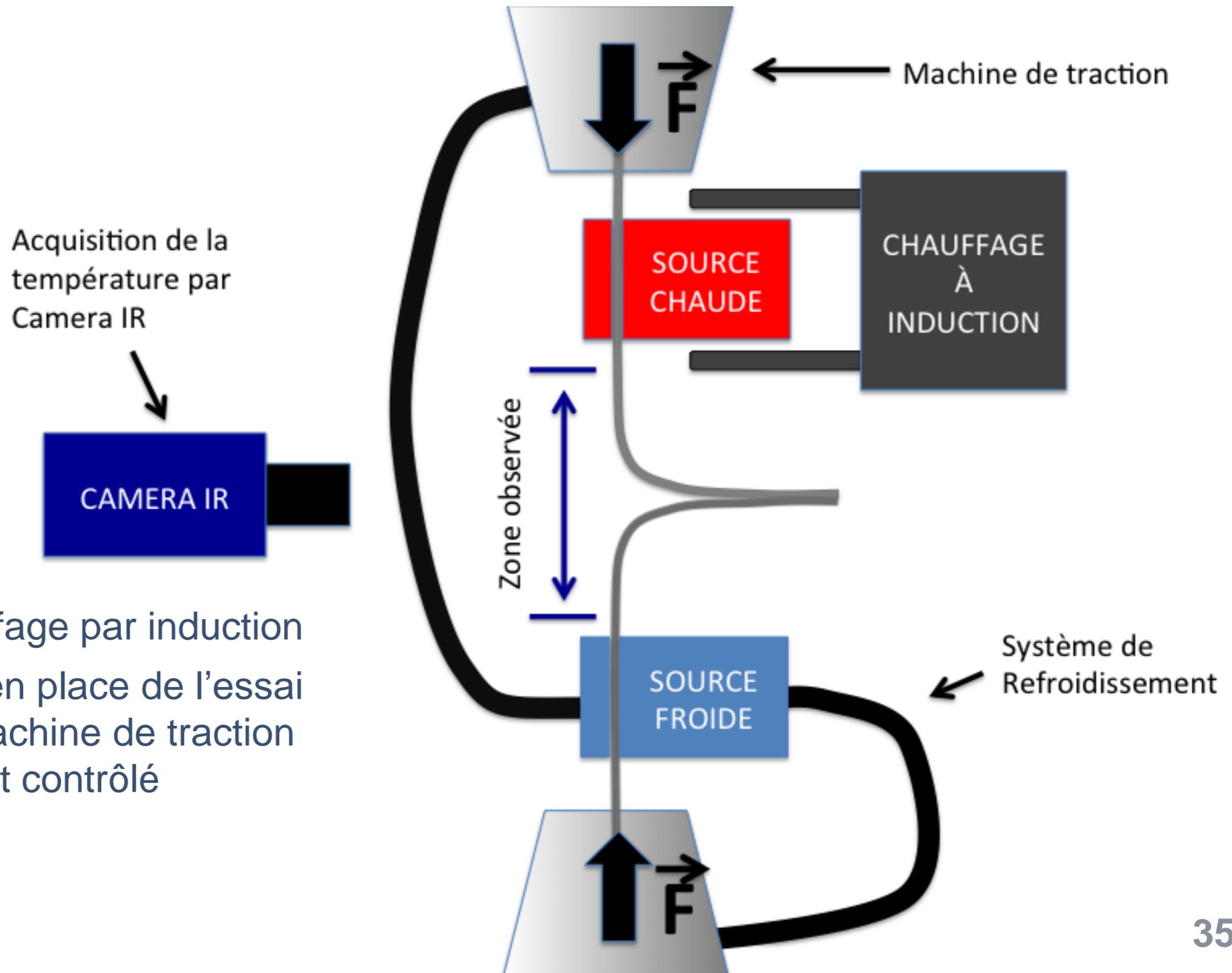
● **Modèle :**

$\phi(x) = \alpha(T(x), e(x), \sigma_n(x)) \cdot (T_1 - T_2)$ avec σ_n pression entre les tôles, e écart entre les tôles, et T champs de température



Essai d'identification de la résistance thermique

Objectif : Déterminer la température en fonction de l'écartement et de la pression entre les deux tôles ainsi que de la température



- Chauffage par induction
- Mise en place de l'essai sur machine de traction à effort contrôlé