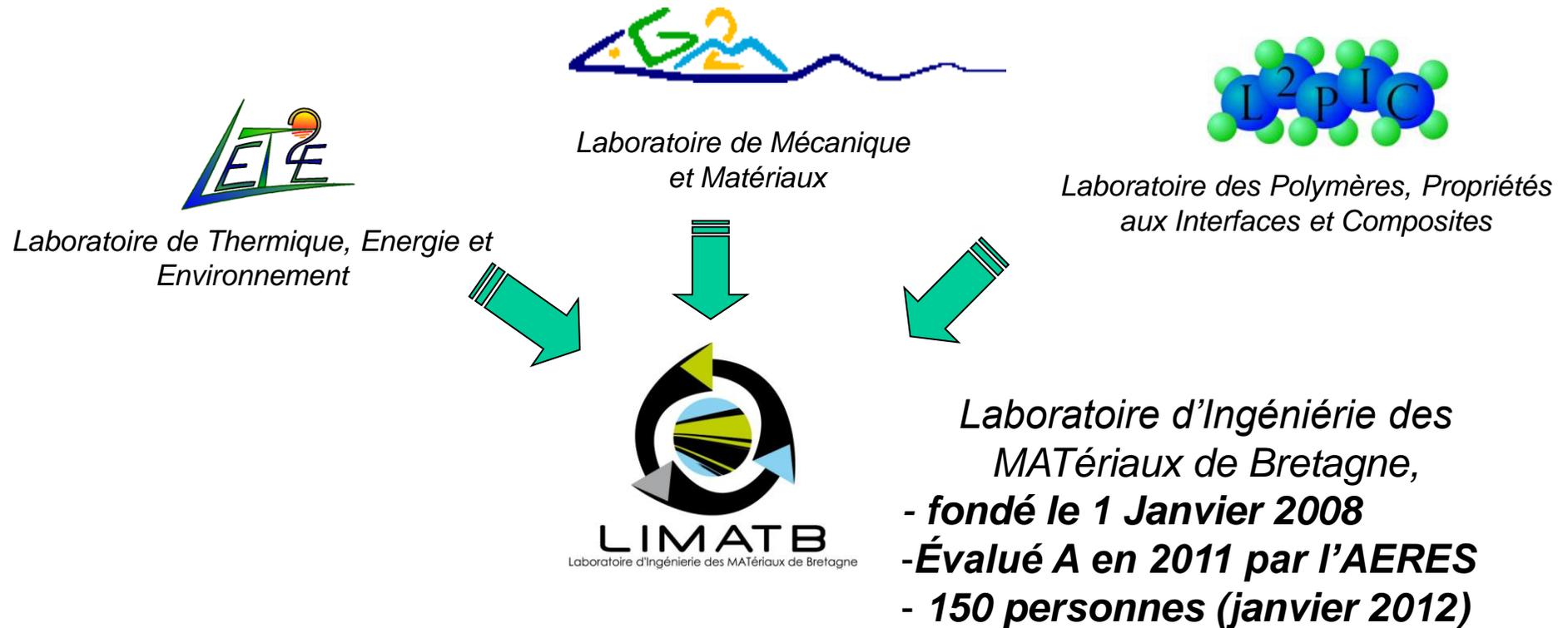


# Avancées numériques et expérimentales pour la définition de source de chaleur

*P. Le Masson UBS, O. Asserin CEA*



## Groupe de recherche sur le soudage :

10 chercheurs

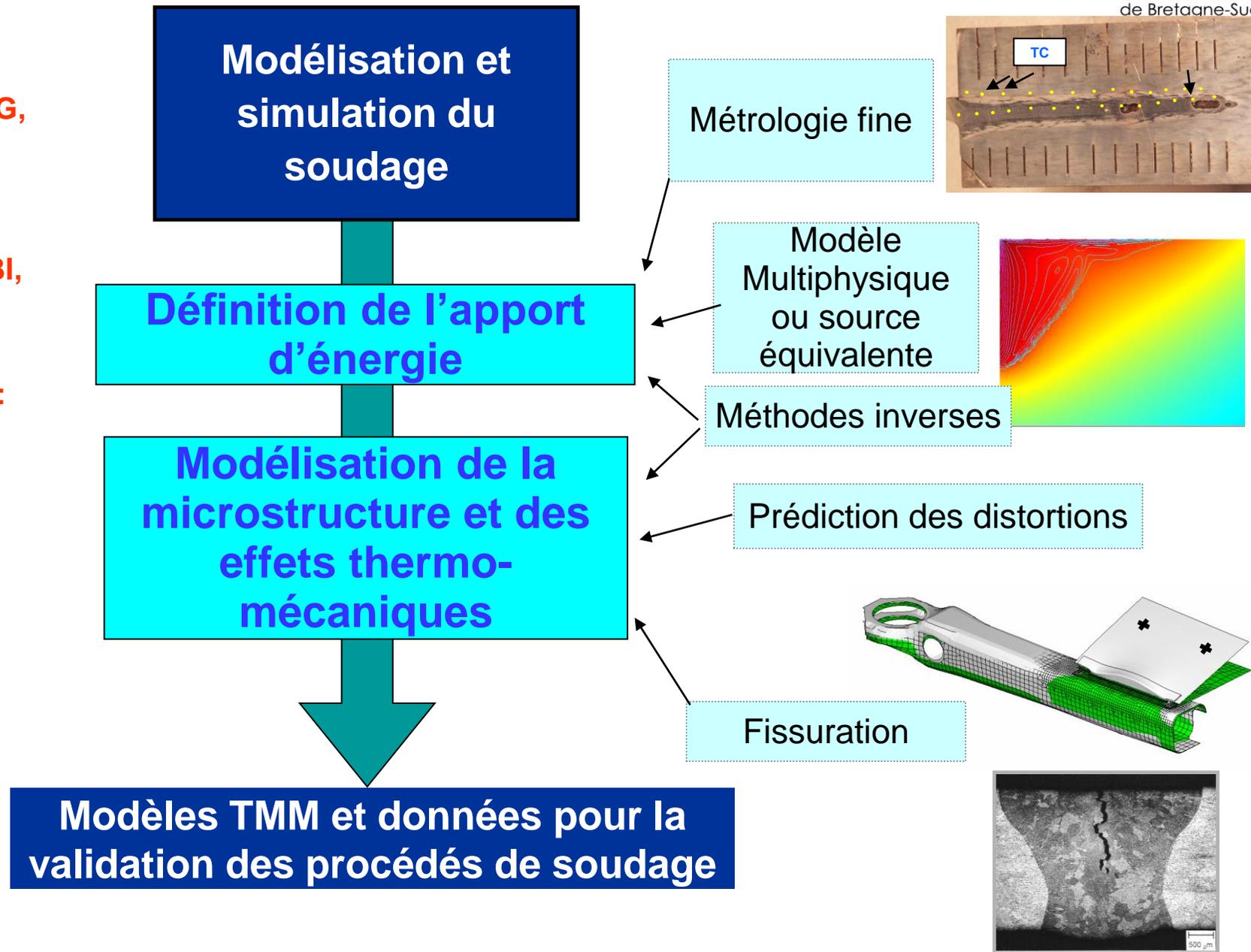
7 doctorants et Post doctorants

2 techniciens

1/37

# Groupe de recherche sur le soudage

- Procédés : TIG, A-TIG, FE, Hybride: Laser/MIG ou MAG, soudage par point ...
- Partenaires industriels : DCNS, AREVA, IS, CEA, LBI, PSA...
- Partenaires universitaires : IMN, PIMM, ICB, LMGC, IUSTI...
- Projets nationaux et européens : ODAS, MUSICA, ITER, NET

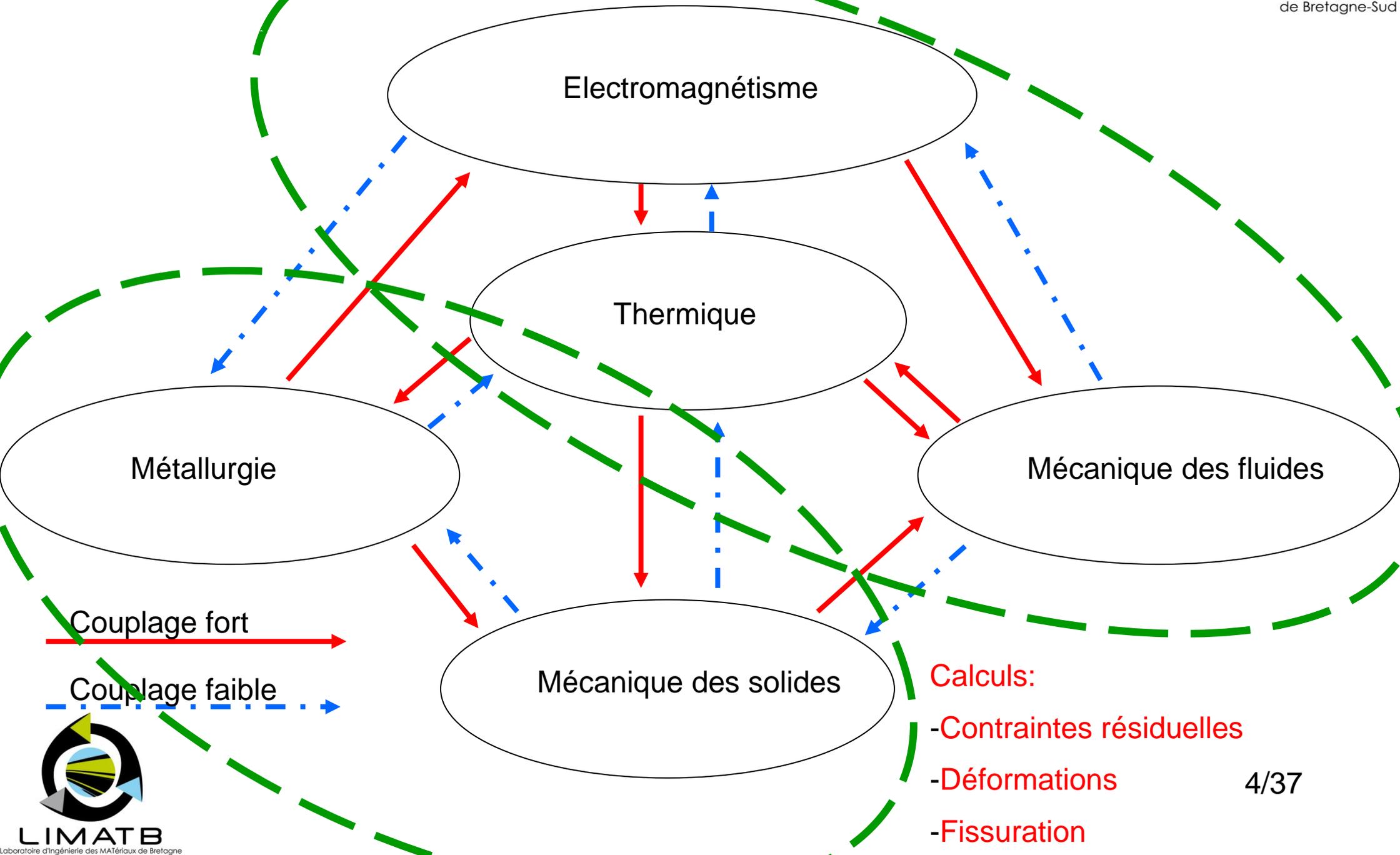


# sommaire

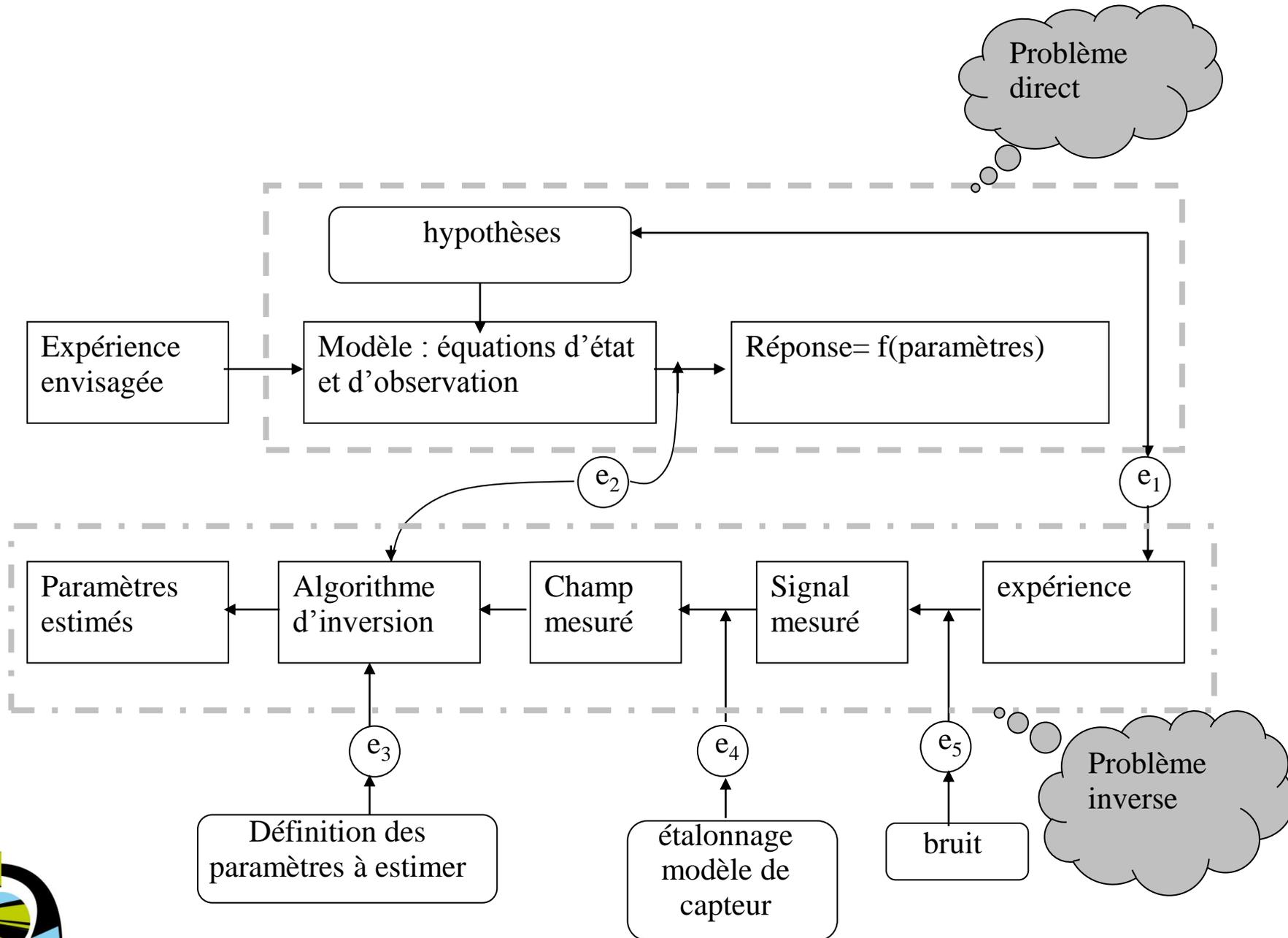
- Définition d'un problème équivalent / Définition d'une source de chaleur
- Erreurs liées au problème équivalent et à l'estimation des paramètres
- Types de sources équivalentes
- Les observables
- 2 exemples:
  - 1- estimation des paramètres de source: projet européen NET
  - 2- estimation des sources et analyse des erreurs de mesure par thermocouple (erreur liée à l'aspect intrusif du capteur): projet MUSICA – cas test CETIM – IS.



# Simulation du soudage: Problèmes Multiphysiques



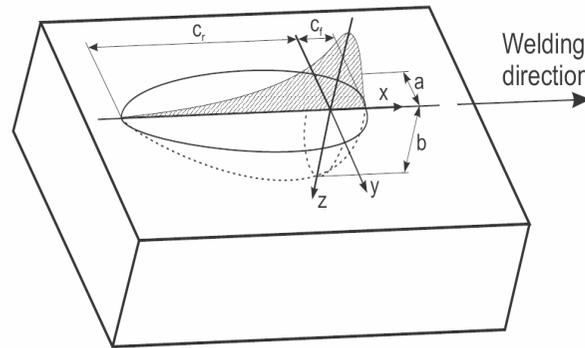
# Définition du modèle équivalent



# Simulation Thermique / Apport d'énergie

- 2 approches :
  - Multiphysique
  - Sources thermiques équivalentes :

## Modèle de Goldak



## Modèle CIN

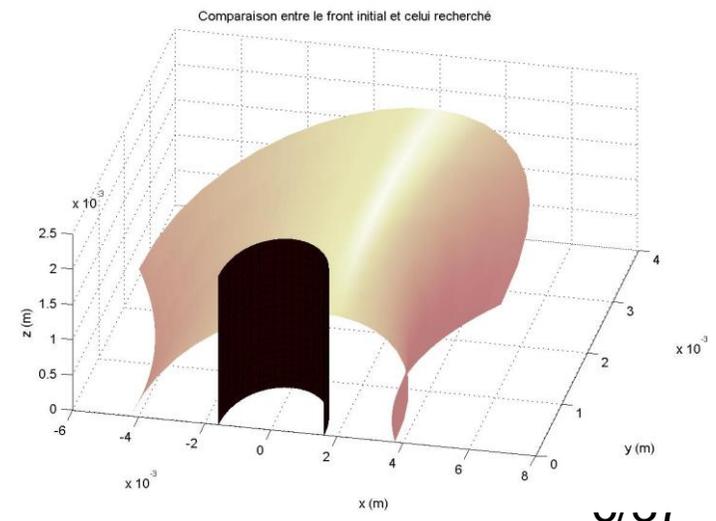
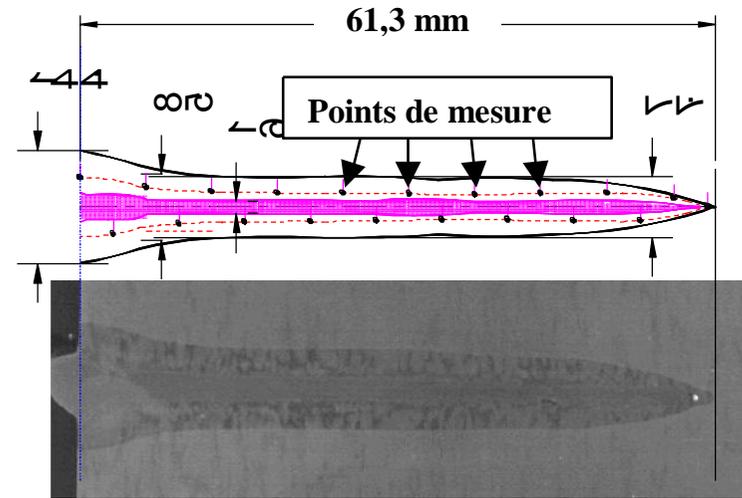
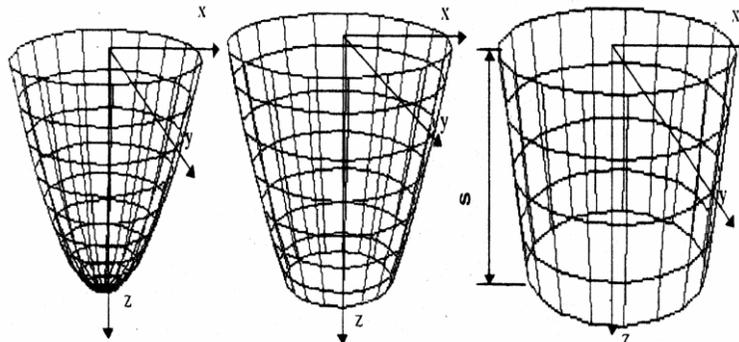
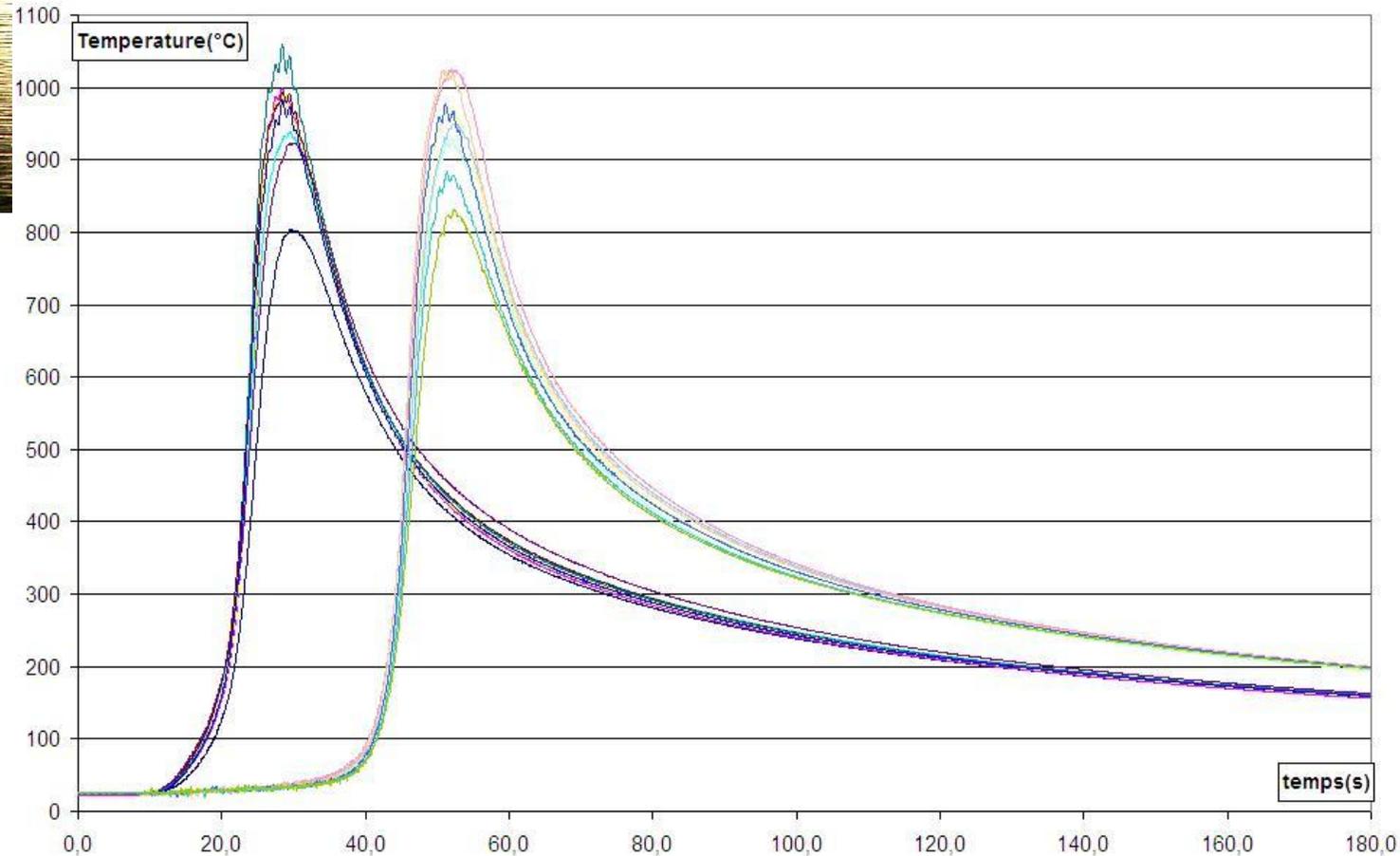
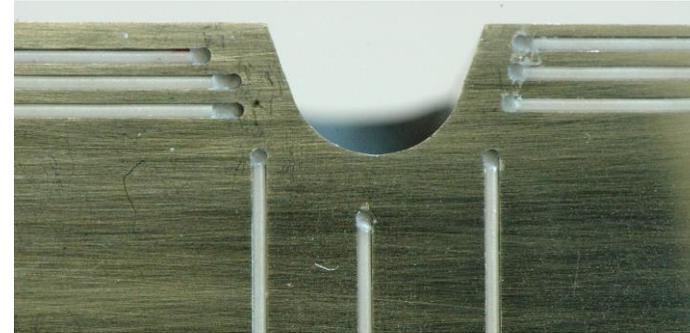
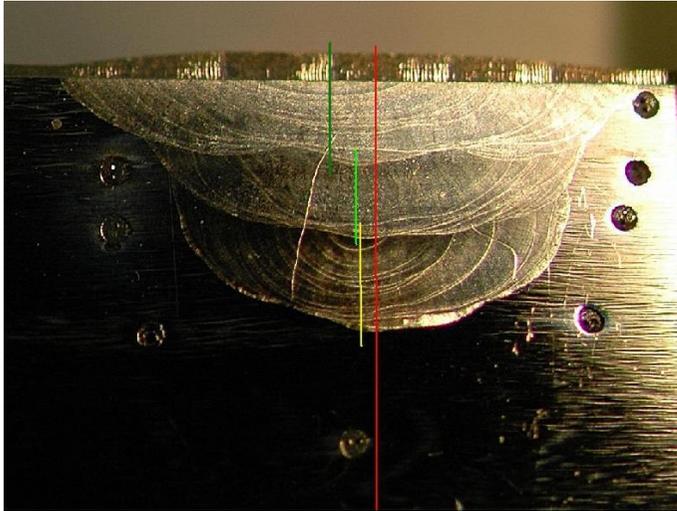


Fig. 2 Examples of the paraboloids of constant values of  $q_w$ .



# Les observables

## Instrumentation thermocouples - Macrographies

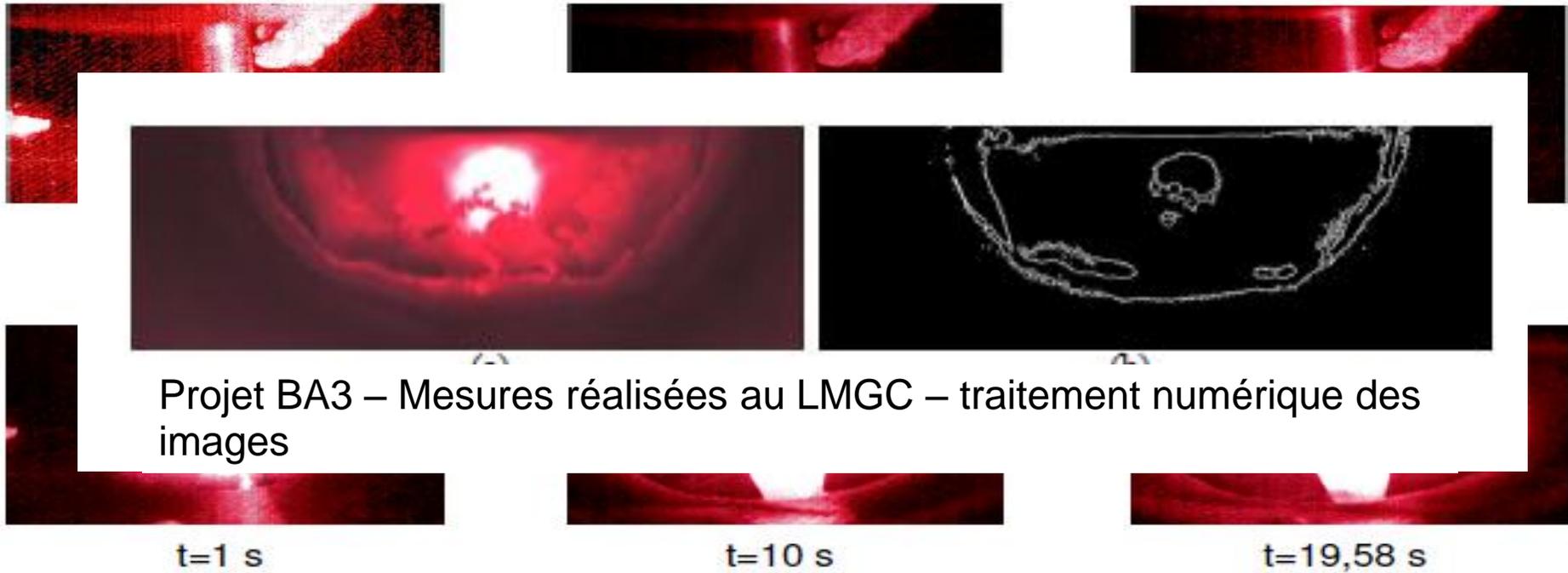


- Interaction entre le capteur et le matériau – perturbation sur la diffusion de la chaleur
- Étalonnage du capteur
- Températures associées à la frontière visualisée sur la macrographie



# Les observables

Mesures par Caméra rapide



t=19,59 s

- Ecoulement dans la zone fondue
- Dimensions du bain
- Analyse d'images?



fin d'acquisition

l'évolution de la  
n – projet BA3  
M. Dal –

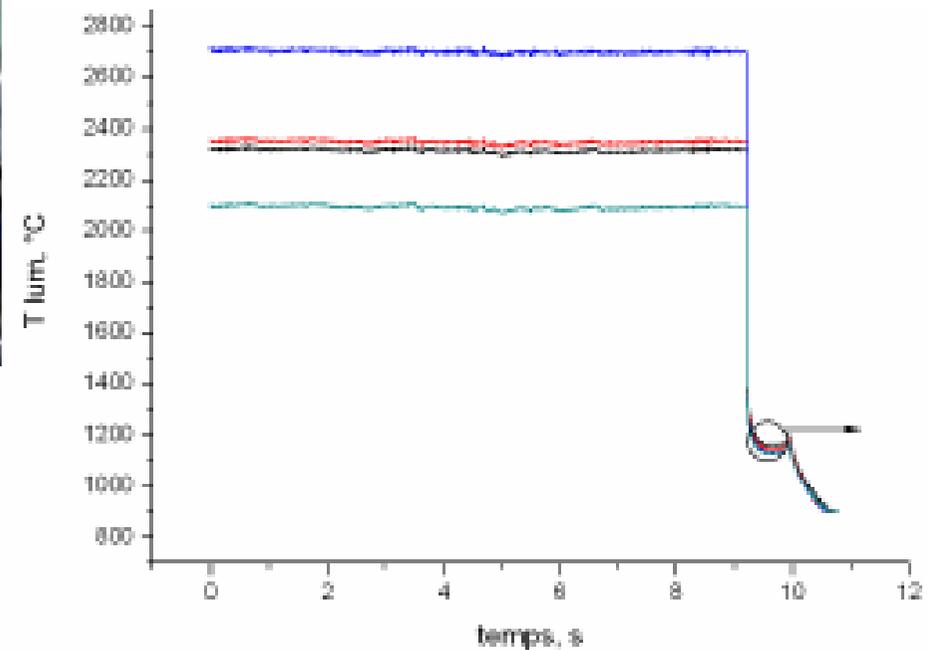


# Les observables

Pyrométrie multichromatique et caméra infrarouge



Projet BA3 – Mesures LMGC et ENISE



-Rayonnement de l'arc / mesure de la température du bain: Exploitation de la température de luminance après extinction de l'arc

-Étalonnage vis-à-vis de l'émissivité du métal en fonction de la température



# Exemple 1: NET TG4

**Specimen geometry considered in the simulation :**

**Plate 194 × 150 × 18**

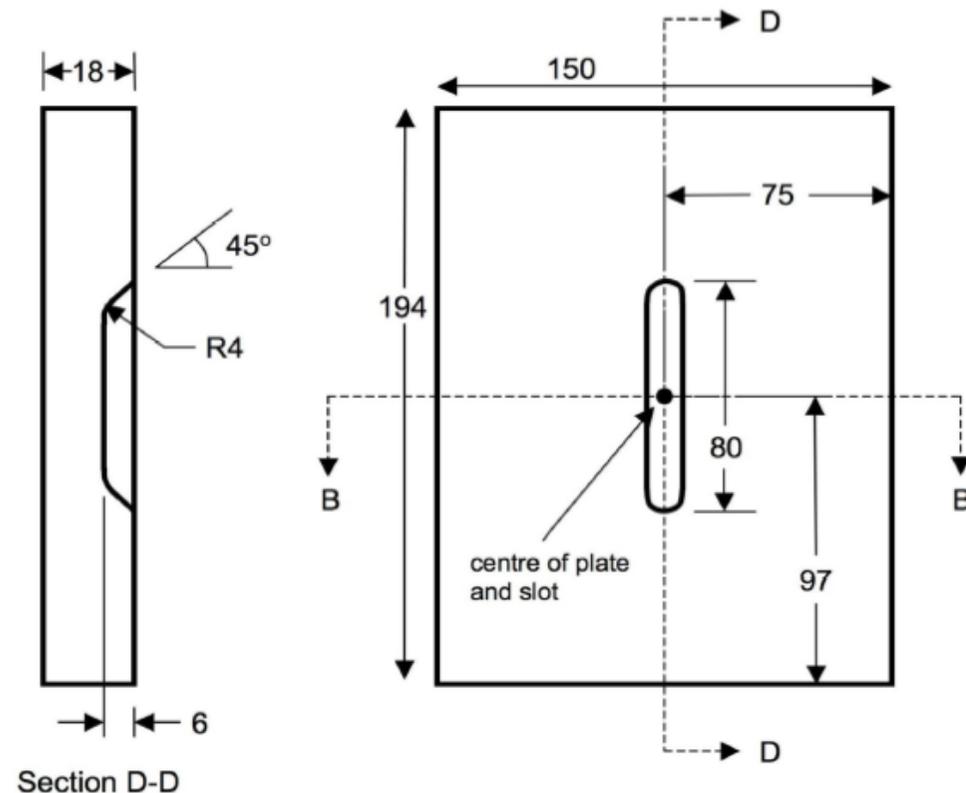
**Slot 80 mm long ; 6 mm deep**

**Material :**

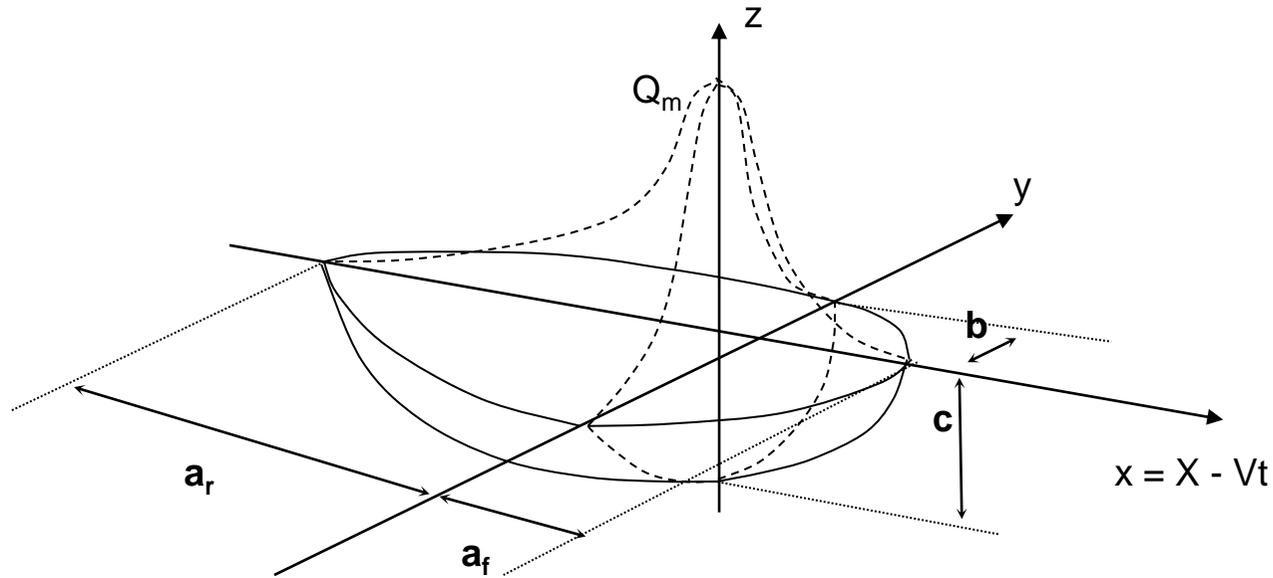
**316L austenitic steel**

**Welding parameters :**

GTAW – 3 weld passes	Pass 2	Pass 3
U = 10 V	U=10 V	U= 10V
I = 150 – 180 A	I= 204 A	I = 196 A
V = 1.667 mm/s	V=76.2mm/mn (1.27mm/s)	V=76.2mm/mn (1.27mm/s)
E = 0.7 to 1.0 KJ/mm	1.675 KJ/mm	1.768 KJ/mm
Interpass T <	T < 60 C	T < 60 C



→ Double ellipsoïde de Goldak:



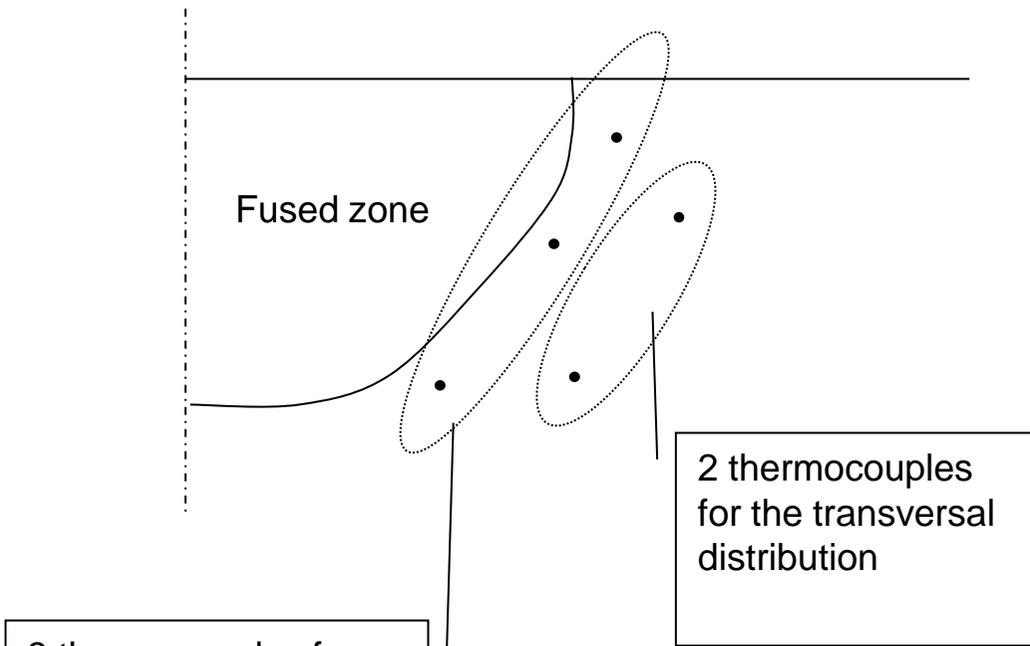
$$q(x, y, z) = Q_0 \cdot \frac{6\sqrt{3} \cdot f_f}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$$

$$\int_V q(x, y, z) \cdot dV = P_0$$

With this function: 7 parameters:  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $Q_0$ ,  $f_f$  and  $f_r$ . Moreover,  $f_f + f_r = 2$  and  $a_f(2 - f_f) = a_r f_r$

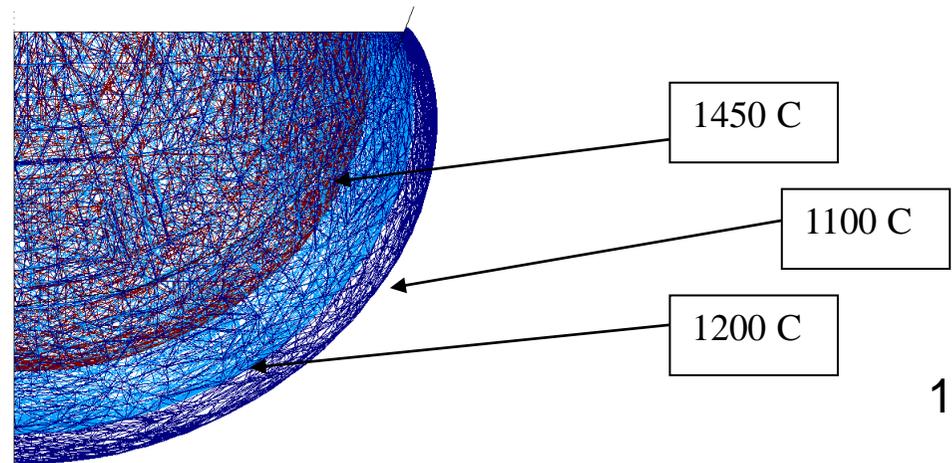
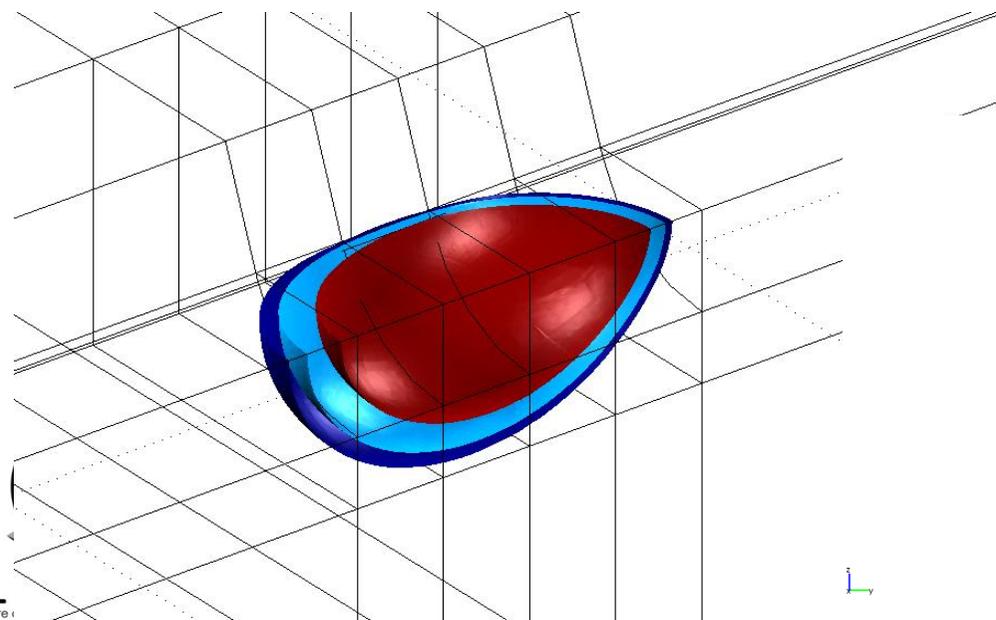


# Instrumentation



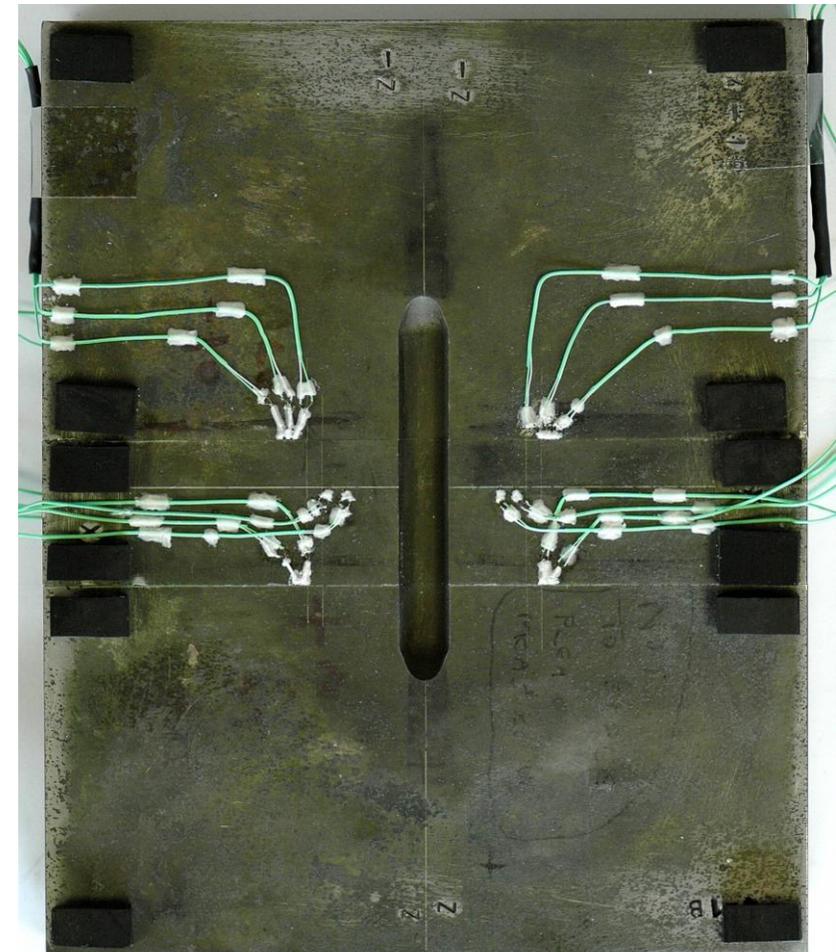
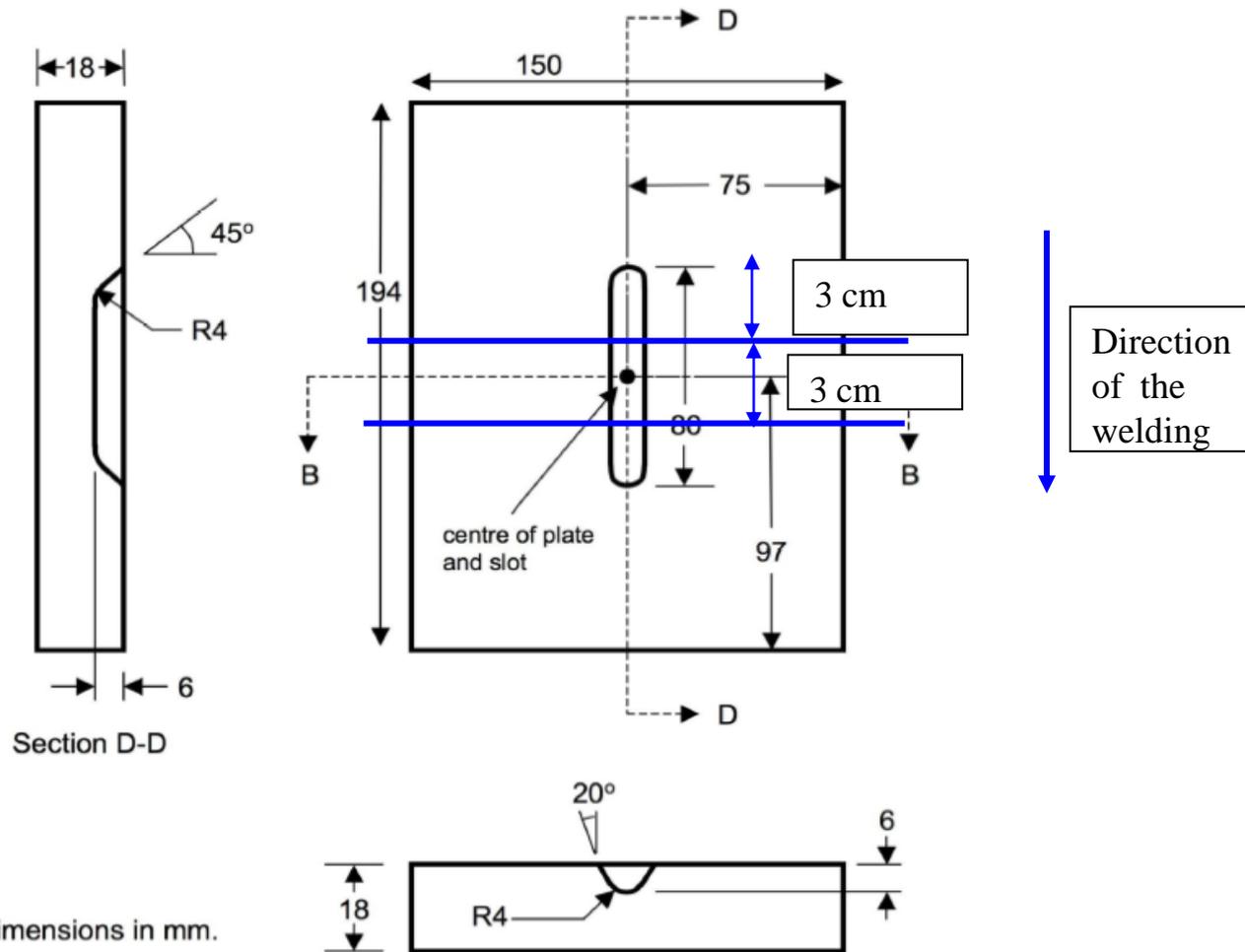
- Positionnement des thermocouples sur deux isothermes:
  - Gradients thermiques suivant la profondeur et dans la direction transverse.
  - Gradient thermique dans la direction longitudinale est obtenue grâce aux mesures temporelles (modélisation en quasi stationnaire)

La simulation préliminaire + la macrographie permet de définir les zones d'instrumentation



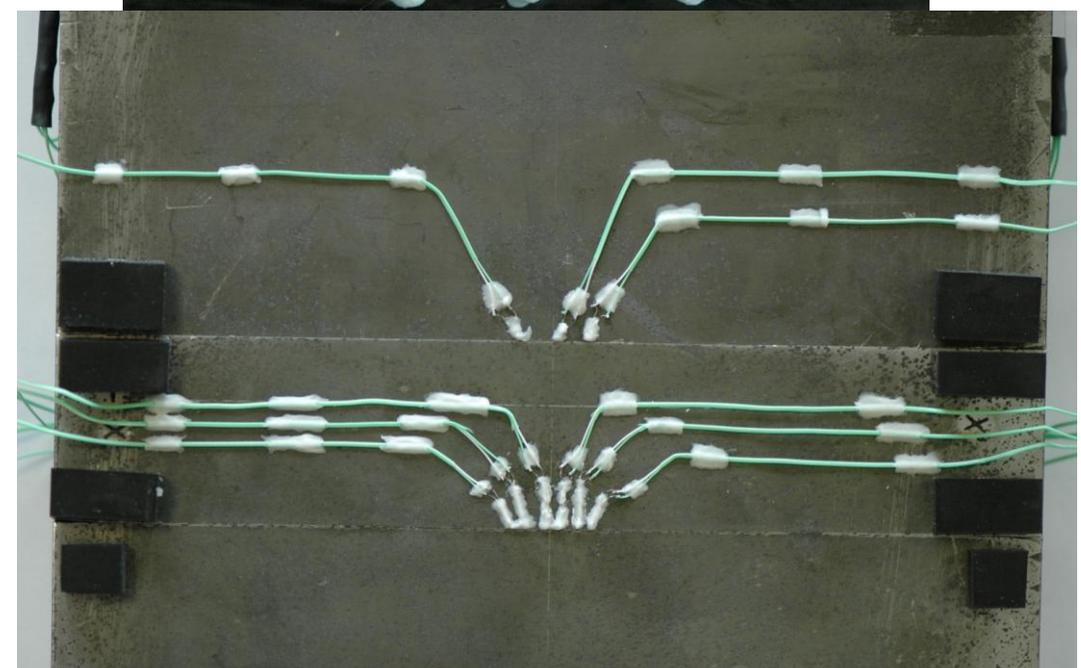
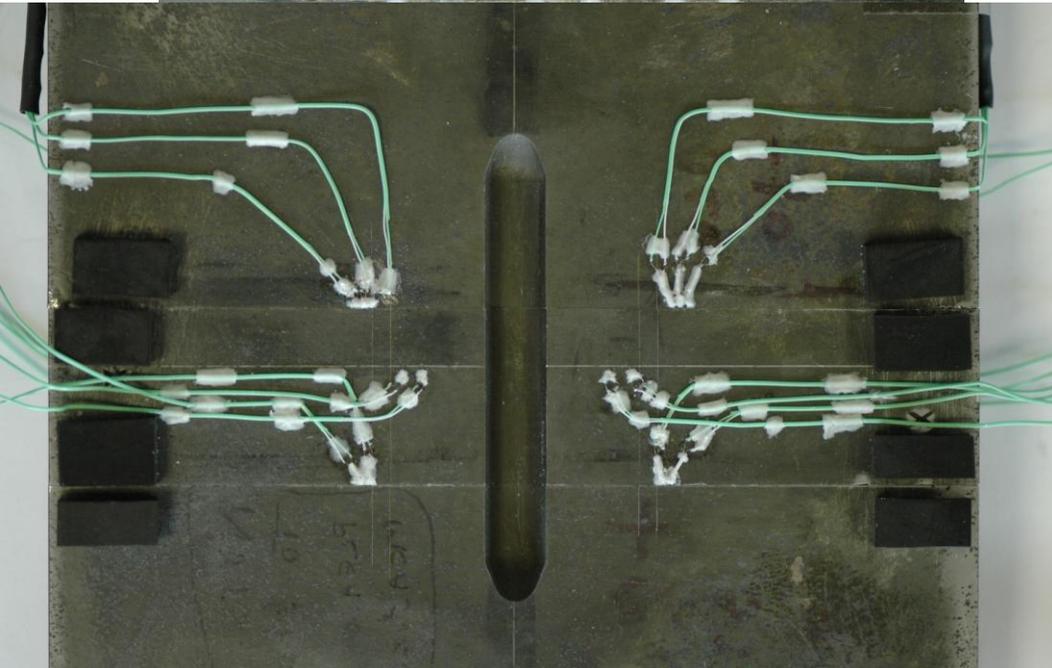
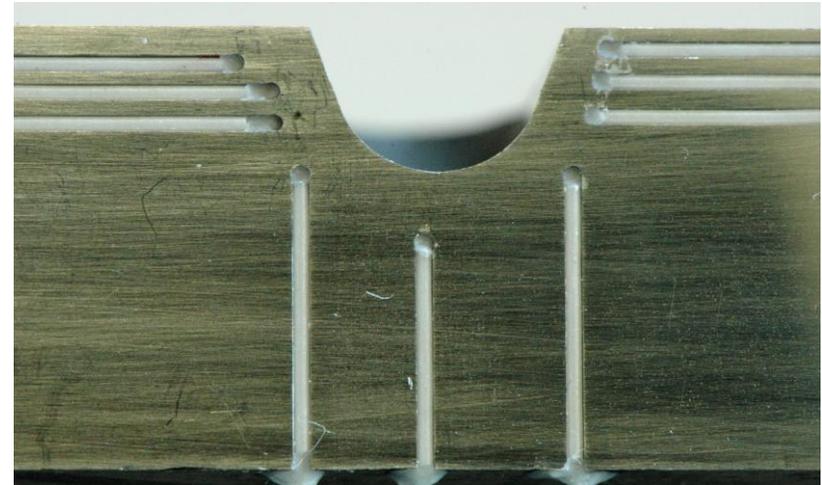
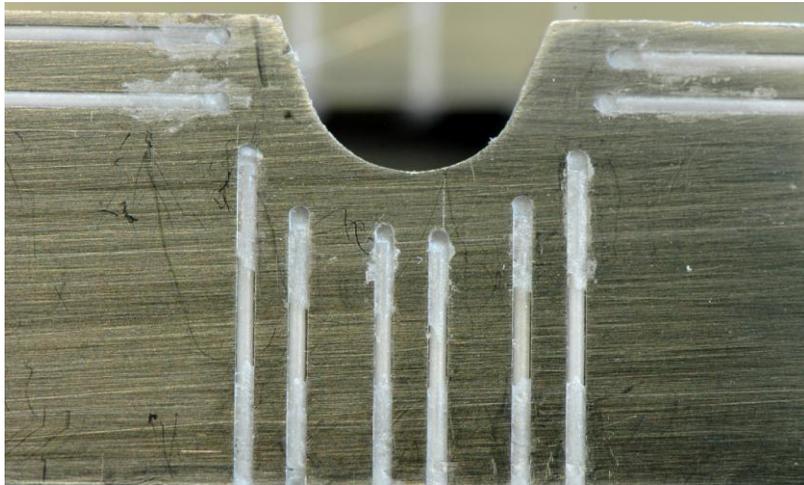
# Instrumentation

Pour les mesures, nous coupons les échantillons et perçons des trous parallèlement au chanfrein. Ce type de démarche a pour objectif de rechercher le plus possible des isothermes



# Instrumentation

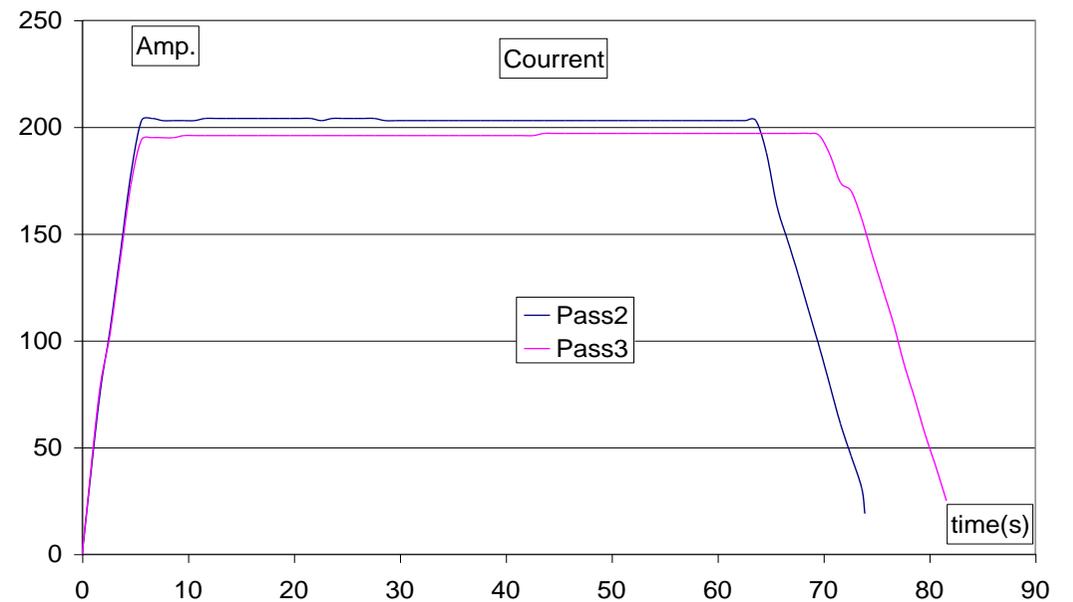
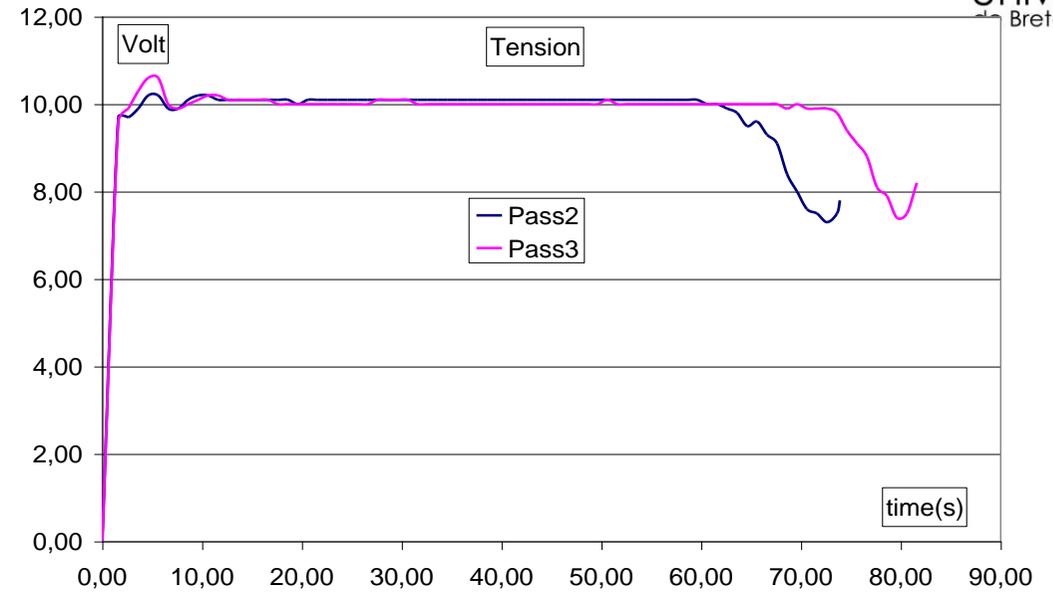
23 thermocouples (type K, 50 $\mu$ m) soudés dans les trous de profondeur 7mm et de diamètre 0,65mm. Les fils sont ensuite protégés par des tubes d'alumine.



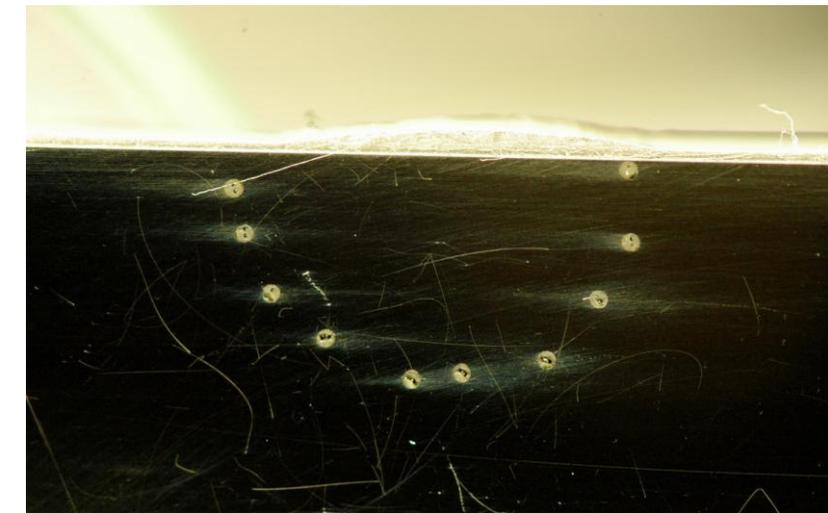
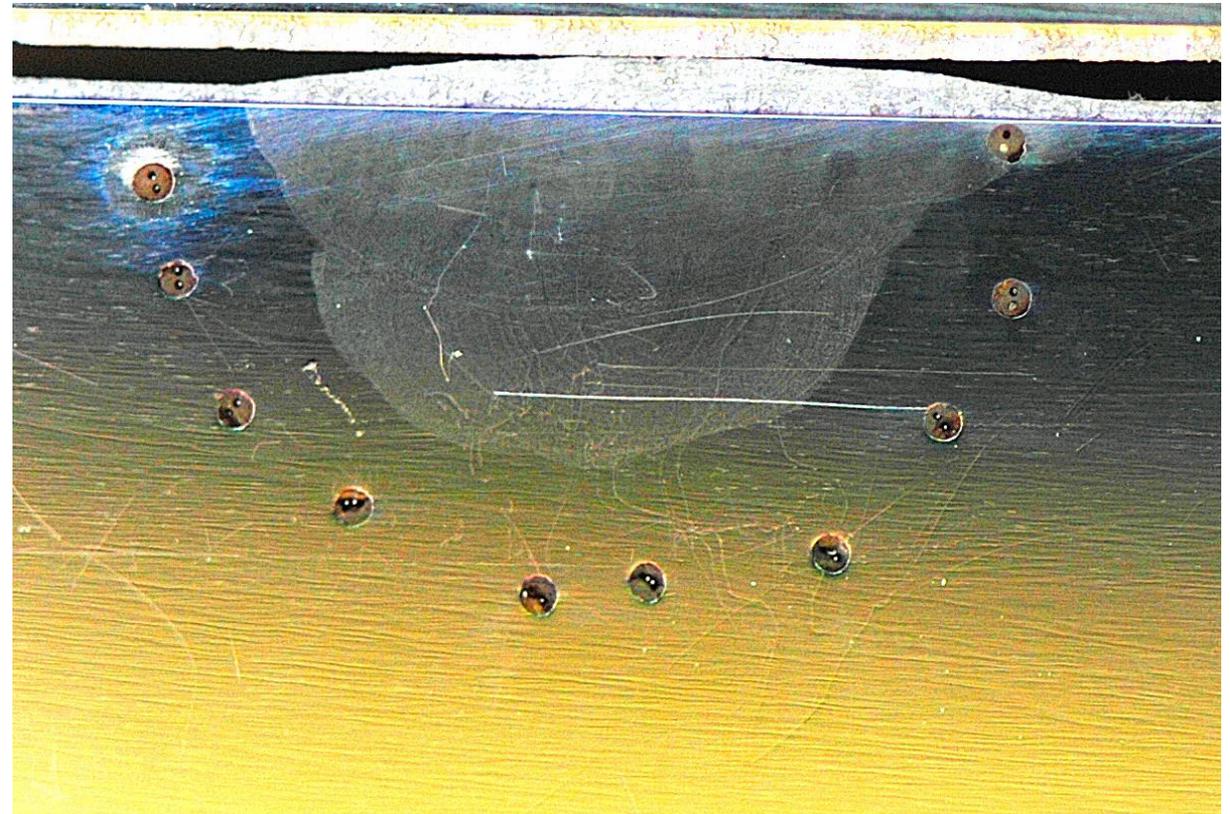
# NET TG4 : general hypothesis

## Welding parameters :

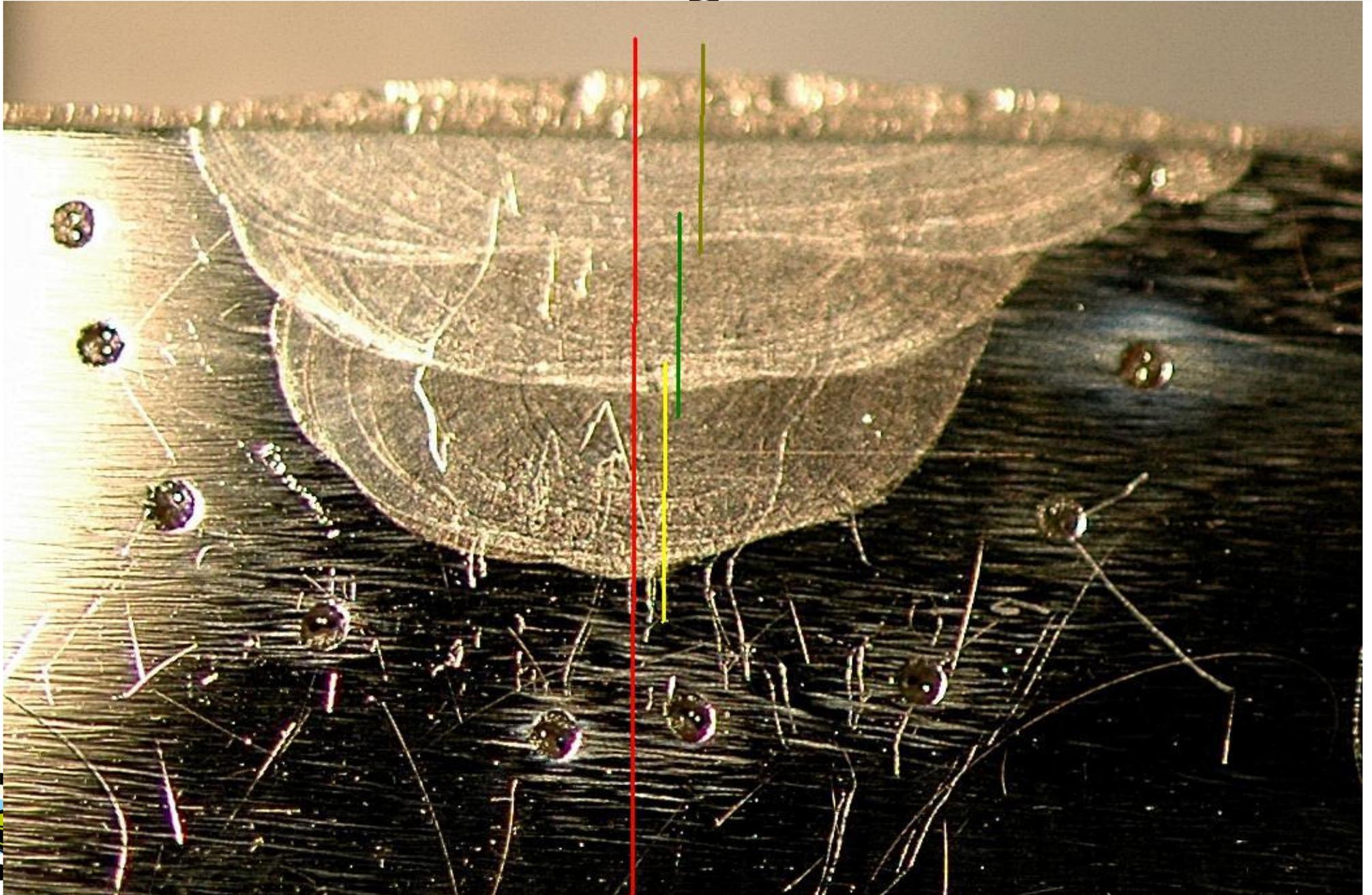
	PASS 2	PASS 3
JOB NO	0	0
WELD NO	0	0
RUN NO	0	0
WELDER	"G LITTLE"	"G LITTLE"
DATE	22-Oct-09	22-Oct-09
TIME	10:27 AM	11:24 AM
CURRENT	185	180
VOLTS	9,8	9,9
WIRE SPEED	0,1	0,0
TRAVEL SPEED	0,0	0,0
ARC TIME	73,9	81,6
WELD LENGTH (mm)	80	82
ENERGY (kJ)	134	145
HEAT INPUT (J/mm)	1675	1768
GAS FLOW (Lt/Min)	0,0	0,0
INTERPASS TEMP	0,0	0,0
WIRE CONSUMED (mt)	0,0	0,0
GAS TYPE	0,0	0,0



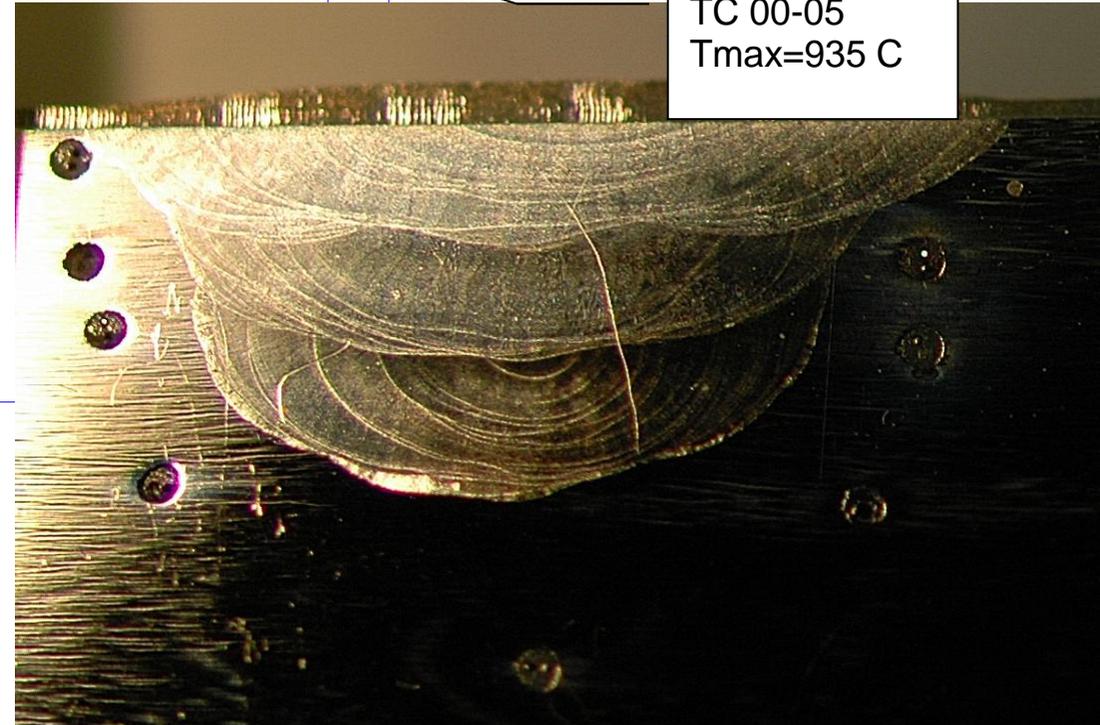
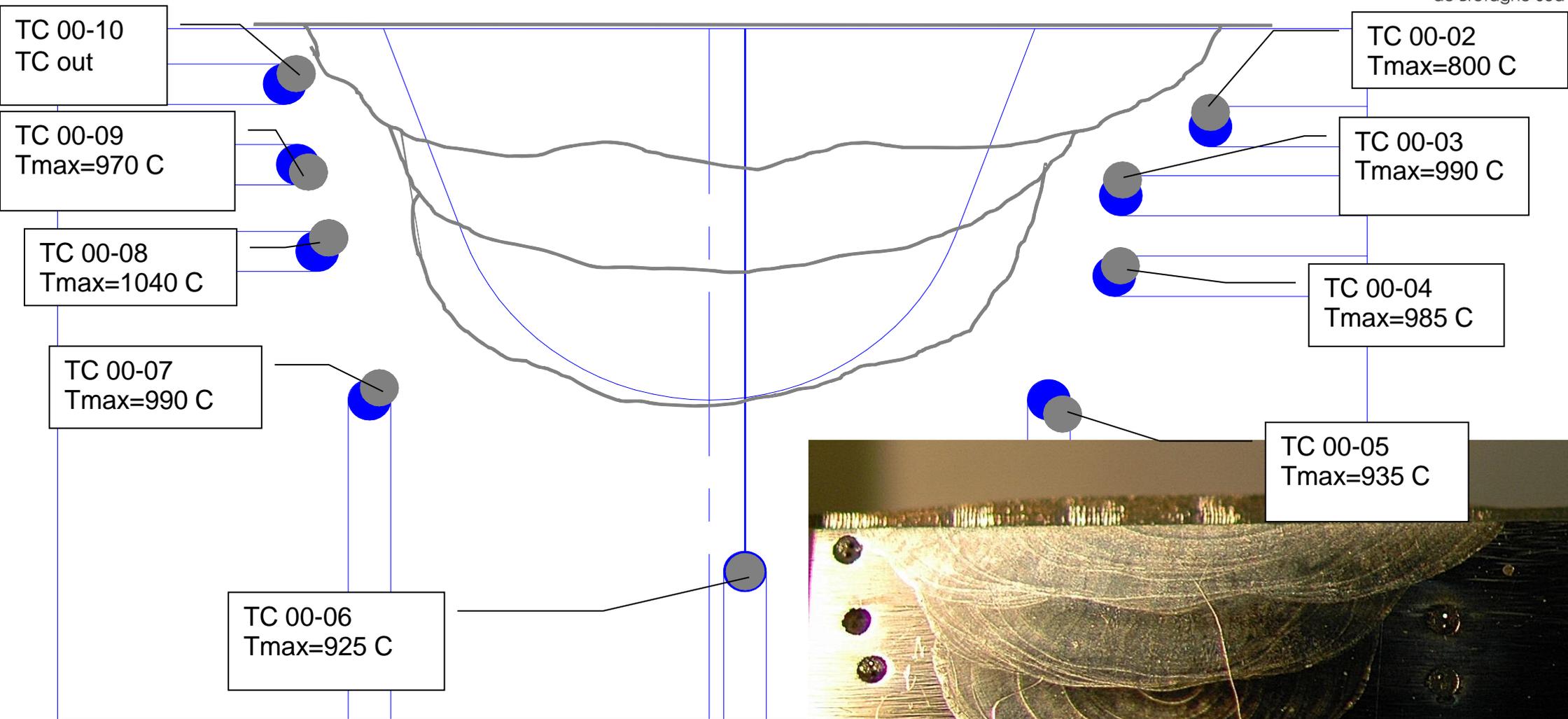
# Exploitation



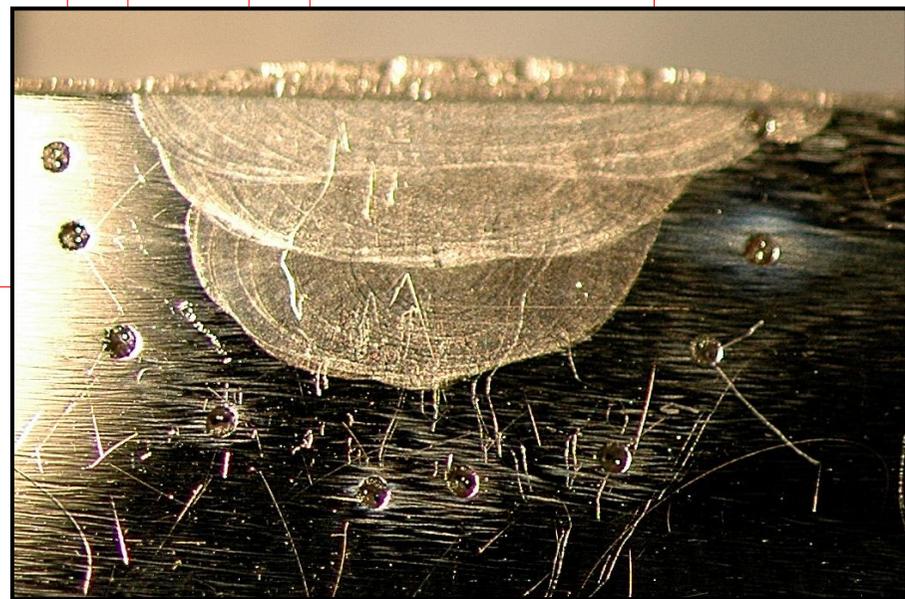
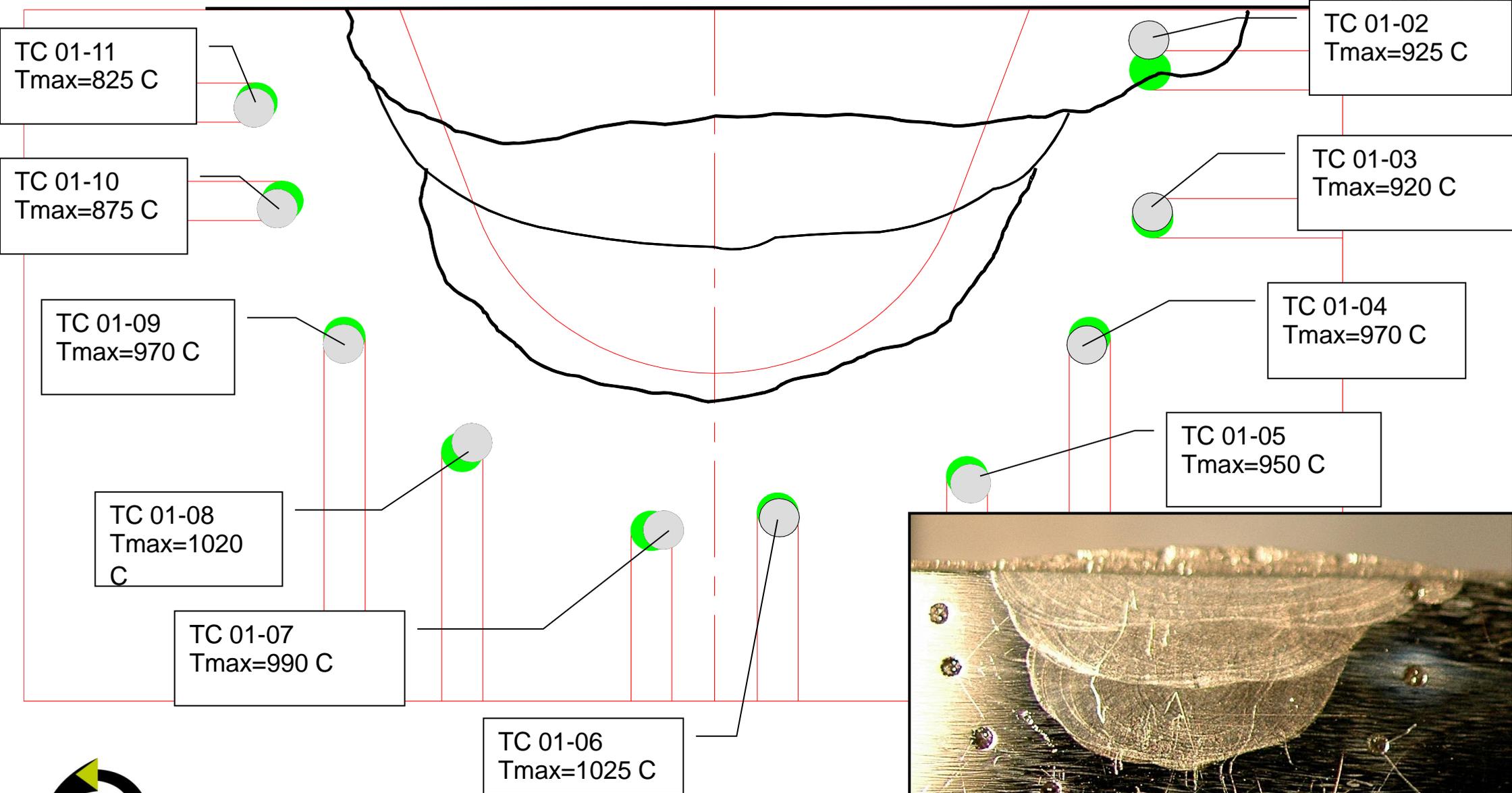
# Welding axis



# Interface 1- Pass1



# Interface 2- Pass1



# Hypothèses pour le modèle équivalent

- Source de chaleur de type Goldak
- Les caractéristiques thermophysiques sont fonction de la température ( $\rho$ ;  $c_p$ ;  $\lambda$ ).
- Du fait de l'écoulement de la matière, nous imposons une conductivité équivalente de :  $\lambda_{eq} = 4 * \lambda_{fusion}$  W/m.K
- La zone fondue est définie à 1450°C pour la comparaison avec la macrographie
- Sur la surface, nous imposons un transfert de la chaleur:

$$h_{eq} = hcv + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^2 + Tamb^2) * (T + Tamb) \quad \text{où } \varepsilon = 0.8$$

( l'émissivité), et le paramètre  $hcv$  est estimé.



# Estimation passe 1

- Goldak heat source:

$$Q_{av}(x, y, z) = \frac{\eta 6 \sqrt{3}}{ab_{fo}c\pi^{3/2}} f_{fo} Q \cdot e^{-3\left(\frac{y}{a}\right)^2} e^{-3\left(\frac{x}{b_{fo}}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2}$$

$$Q_r(x, y, z) = \frac{\eta 6 \sqrt{3}}{ab_r c\pi^{3/2}} f_r Q \cdot e^{-3\left(\frac{y}{a}\right)^2} e^{-3\left(\frac{x}{b_r}\right)^2} e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2}$$

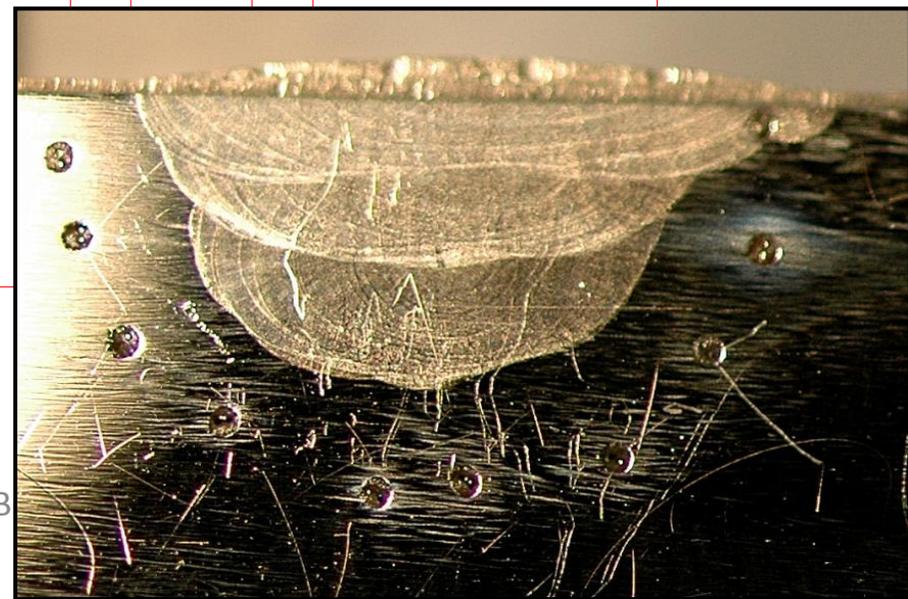
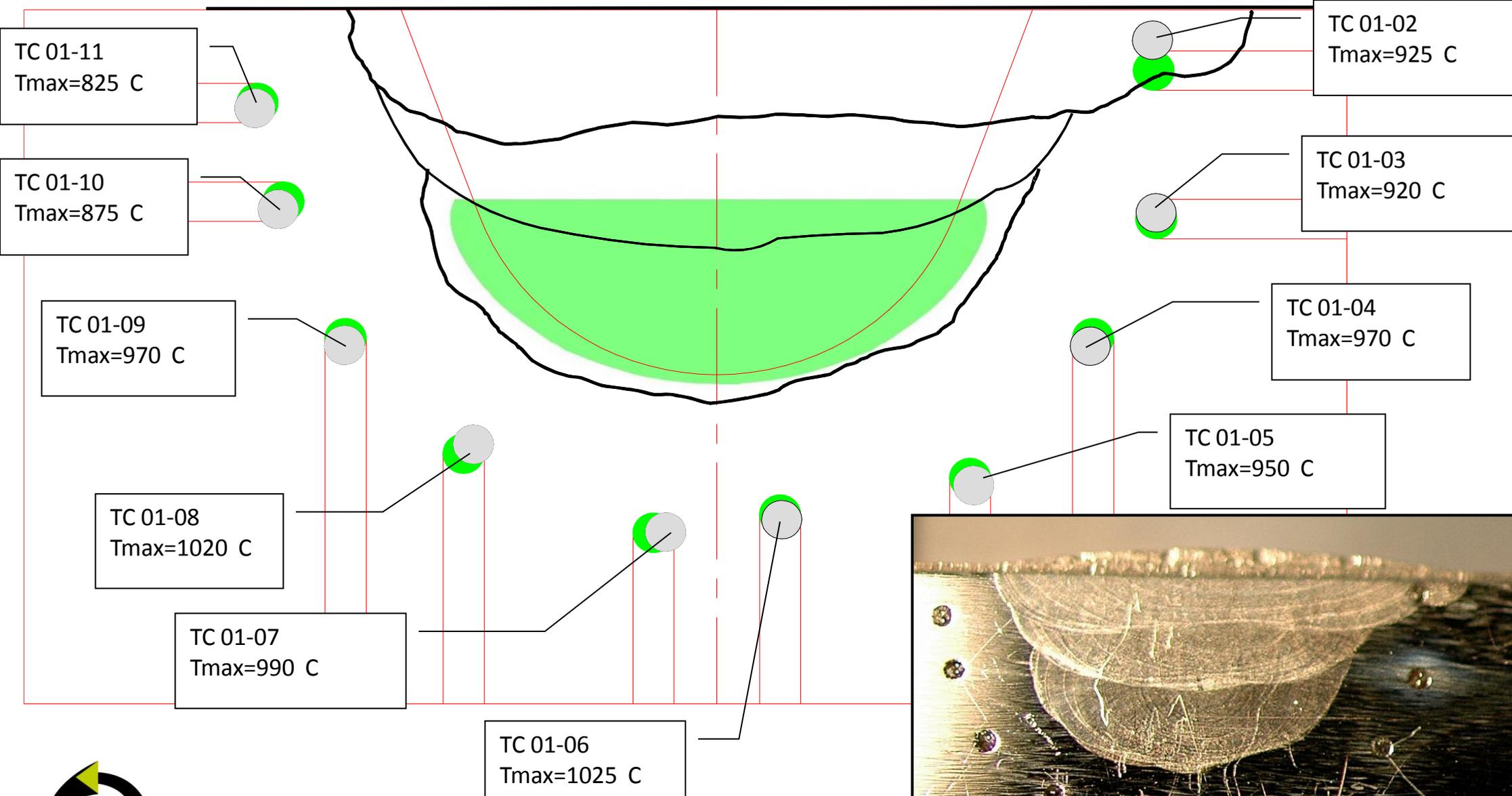
The standard deviation = 13 C

	Passé 1
Paramètres	Valeurs
$a$ (mm)	5.89
$c$ (mm)	1.5
$b_r$ (mm)	11.89
$b_f$ (mm)	3.72
$f_{fo}$	1.144
$f_r$	$2 \cdot f_{fo}$
$\eta$	0.885
$hcv$ (W/m <sup>2</sup> .k)	<b>115.18</b>



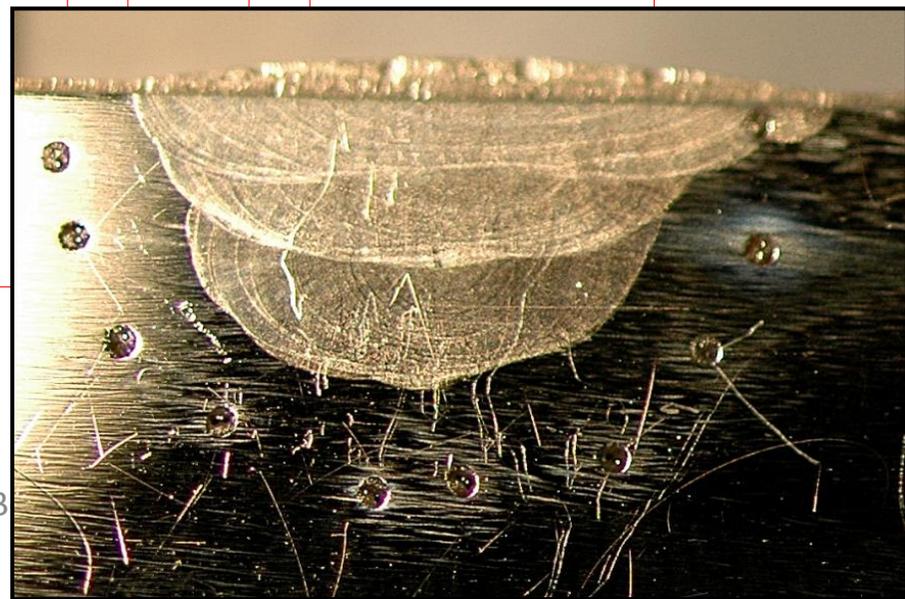
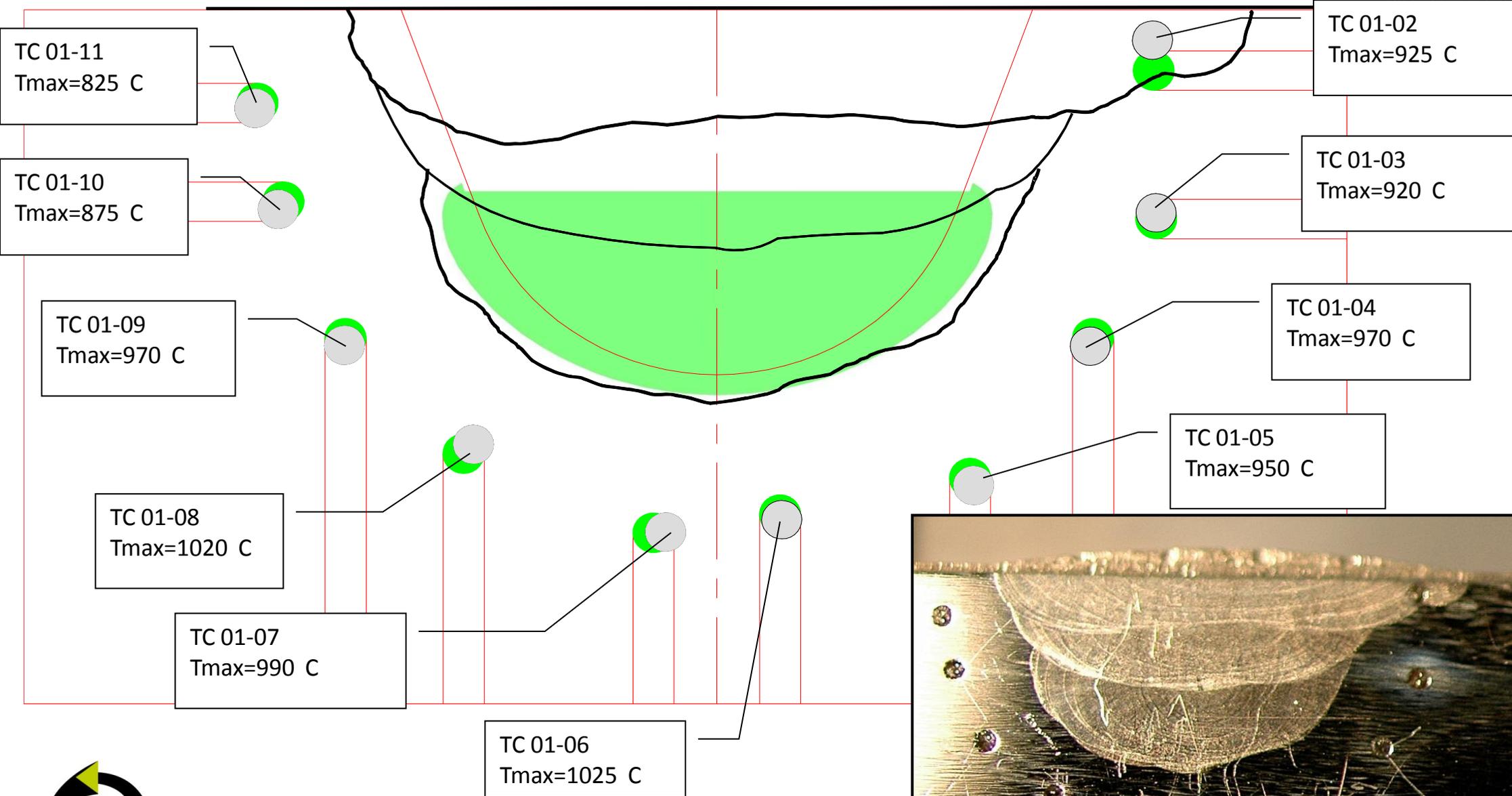
# Interface 2- Pass1

warning  
Tf=1450 C

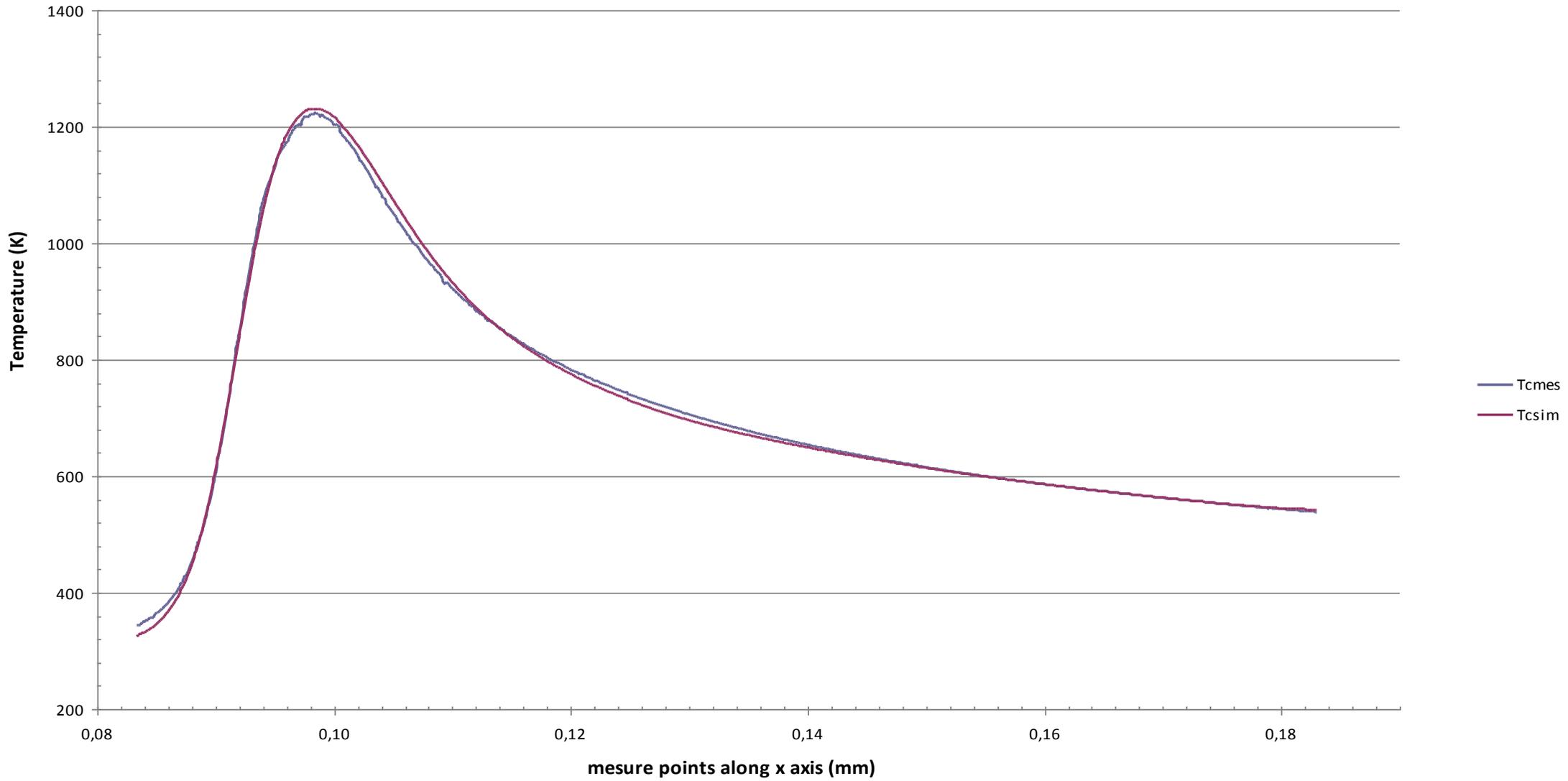


# Interface 2- Pass1

warning  
Tf=1400 C



# TC 01\_03



# Exemple 2: Le soudage en T

*(MUSICA – CETIM – Institut de Soudure)*

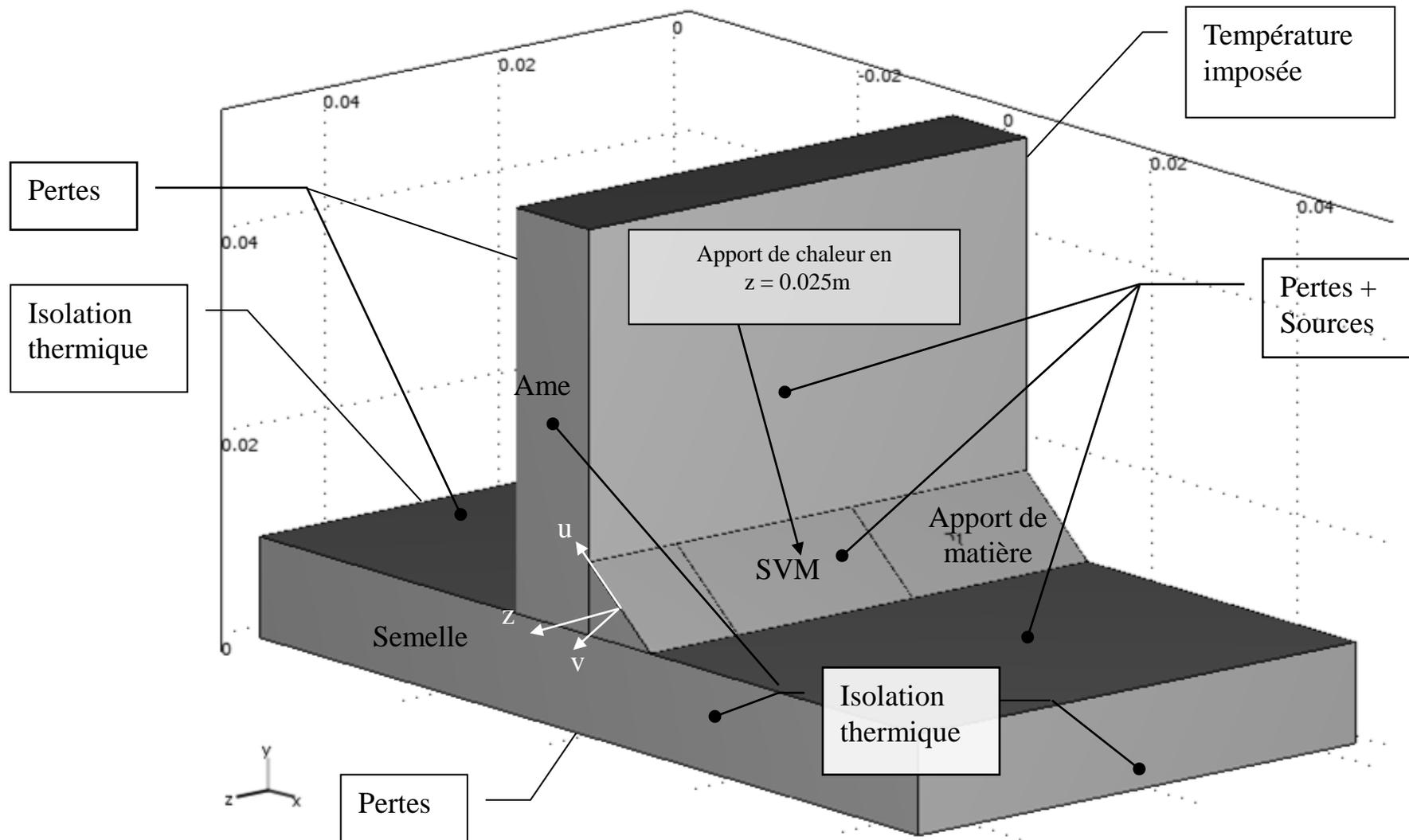


Figure : Géométrie et conditions aux limites – Soudage en T.

# Le soudage en T

*(MUSICA – CETIM – Institut de Soudure)*

*Dans notre problème :*

- 1. La source de chaleur est définie comme une source volumique*
- 2. Le problème est traité en quasi stationnaire*
- 3. Un modèle conductif est appliqué dans la zone fondue*
- 4. Les caractéristiques thermophysiques sont définies en fonction  
de la température*



# Le soudage en T

## (MUSICA – CETIM – Institut de Soudure)

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + S(x, y, z, t)$$

$$\rho(T)C_p(T)V\frac{\partial T}{\partial z'} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z'}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z'}\right) + S(x, y, z')$$

$$z' = 0 \quad T = T_{init}, \quad z' = z_{max} \quad \frac{\partial T}{\partial z'} = 0 \quad (z' = Vt - z)$$

$$\text{autres frontières: } -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T_\infty - T) + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T^4)$$

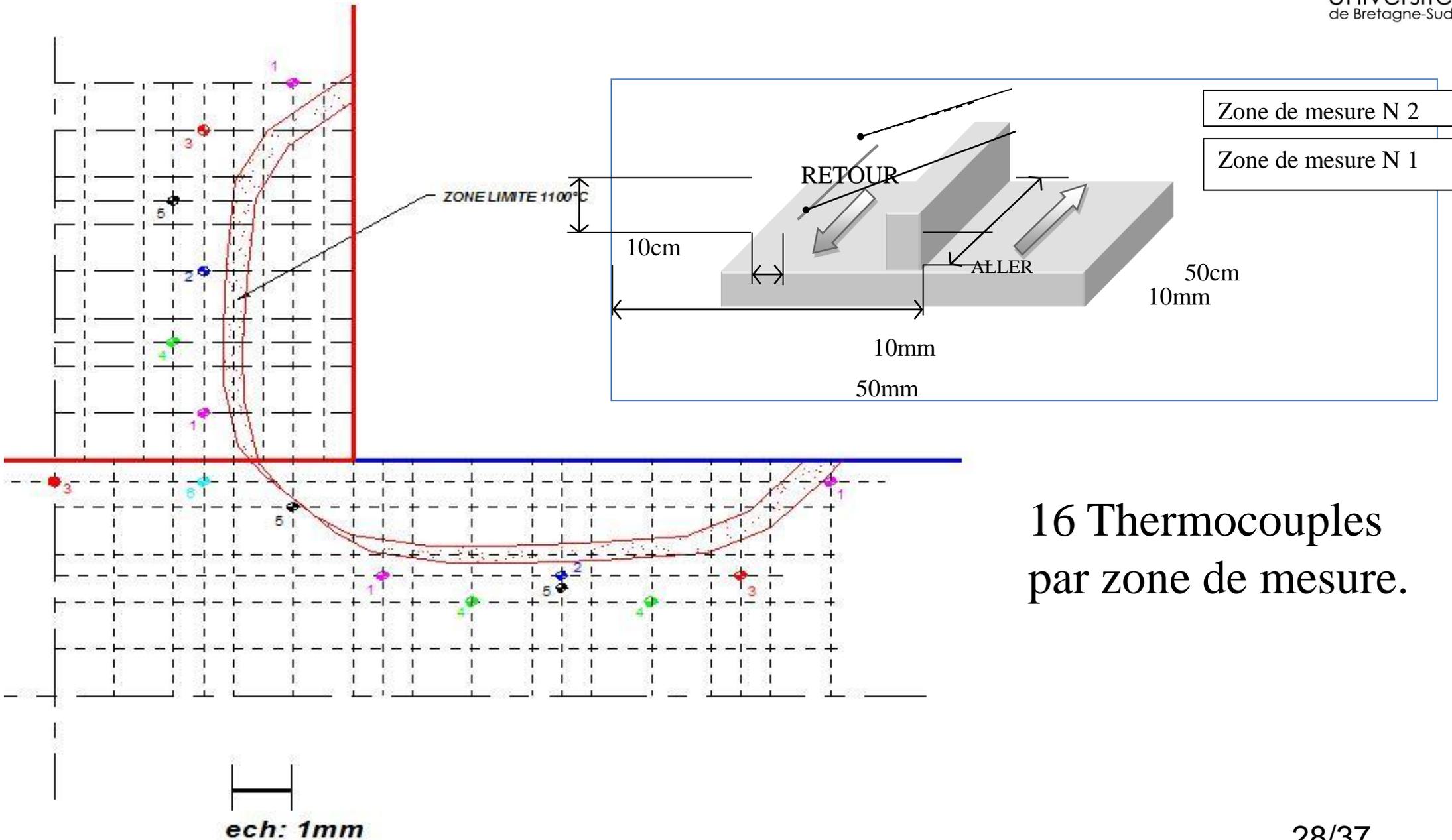
Pour une source de type "CIN":

$$S(x, y, z') = \frac{k K_z Q}{\pi(1 - e^{-K_z s})} e^{-k(x^2 + y^2) - K_z z'} (1 - u(z - s))$$

4 paramètres sont à définir:  $k, K_z, Q, s$



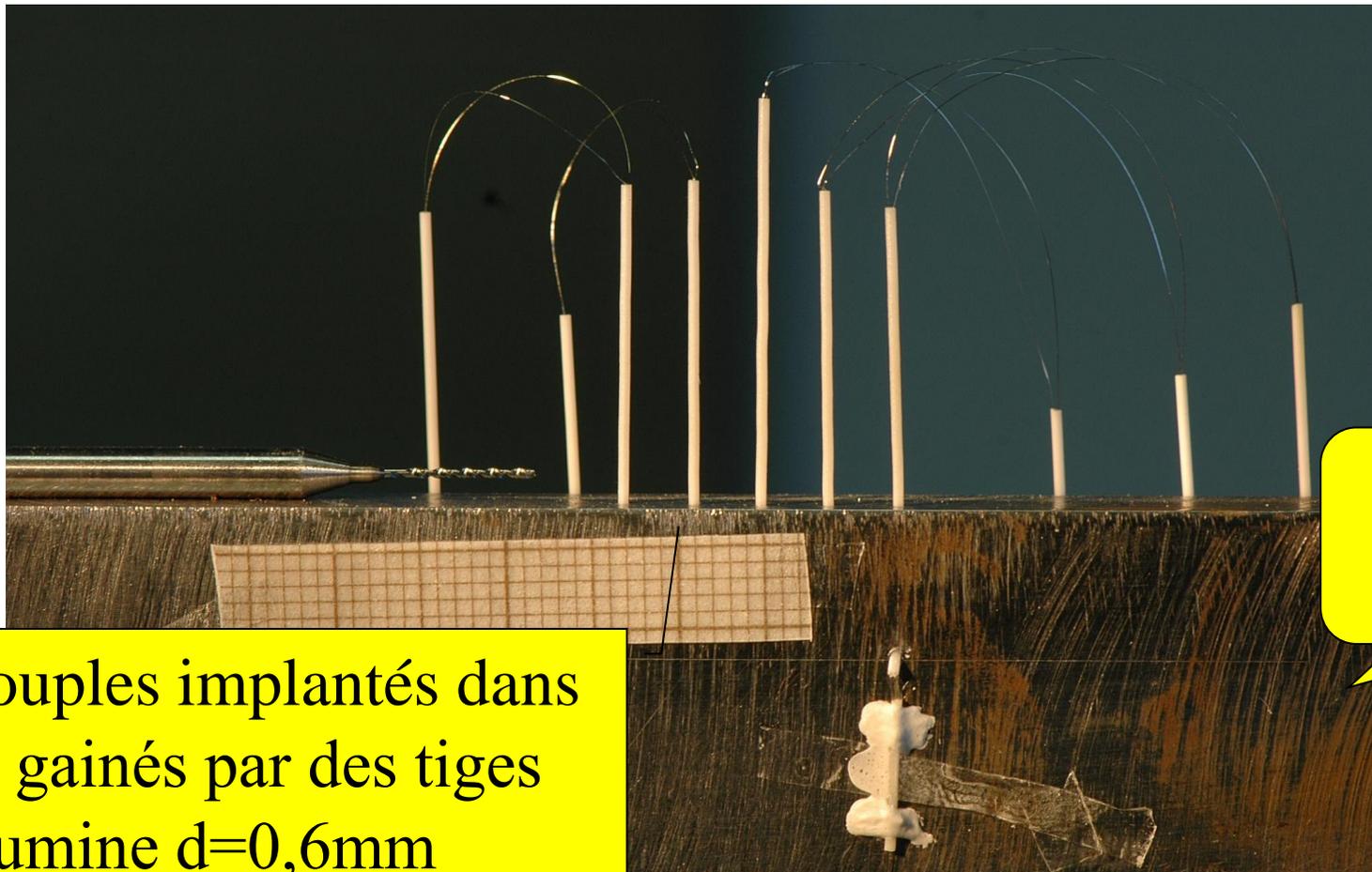
# Instrumentation du soudage en T



16 Thermocouples  
par zone de mesure.

# Instrumentation du soudage en T

- Instrumentation de deux zones avec 16 thermocouples par zone. 2 à 3 thermocouples implantés par tranche ( $\Delta=4\text{mm}$ )

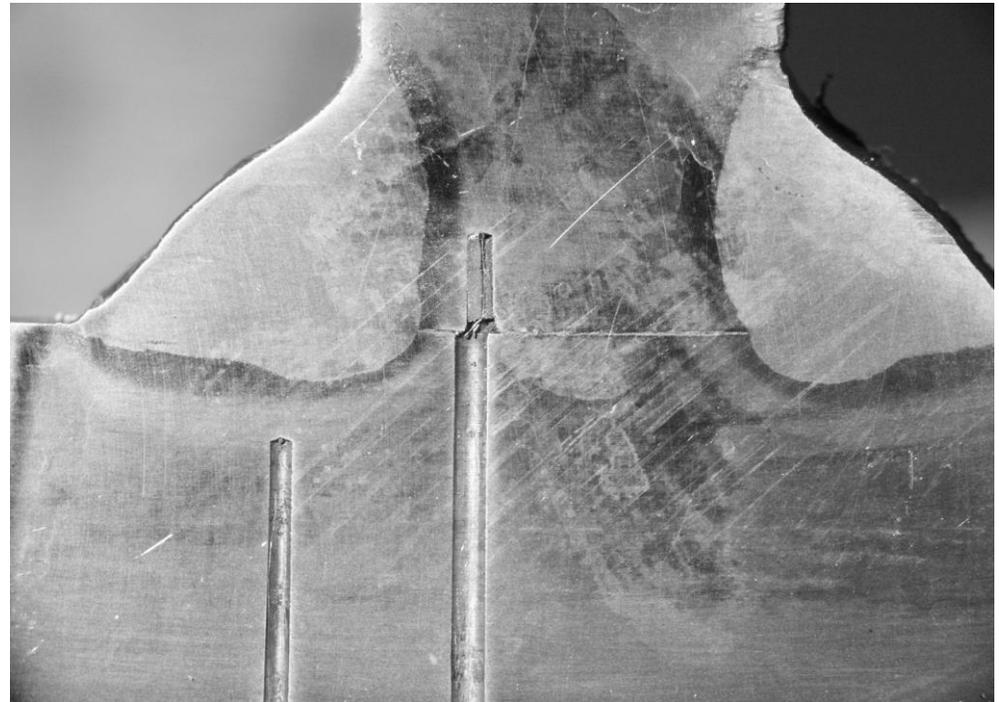
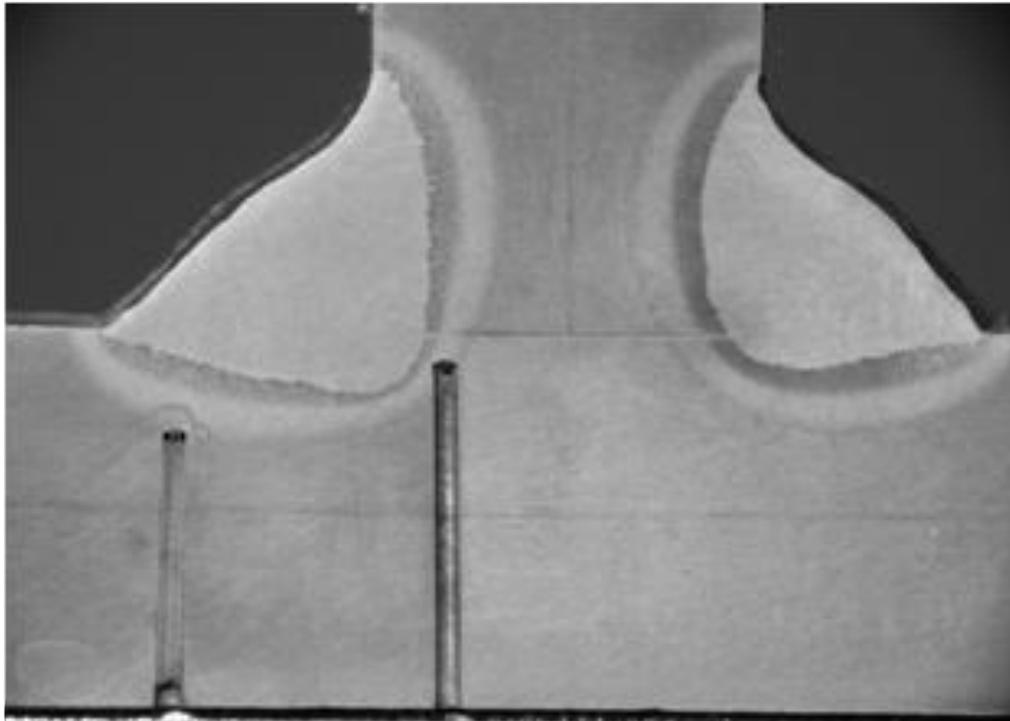


ame

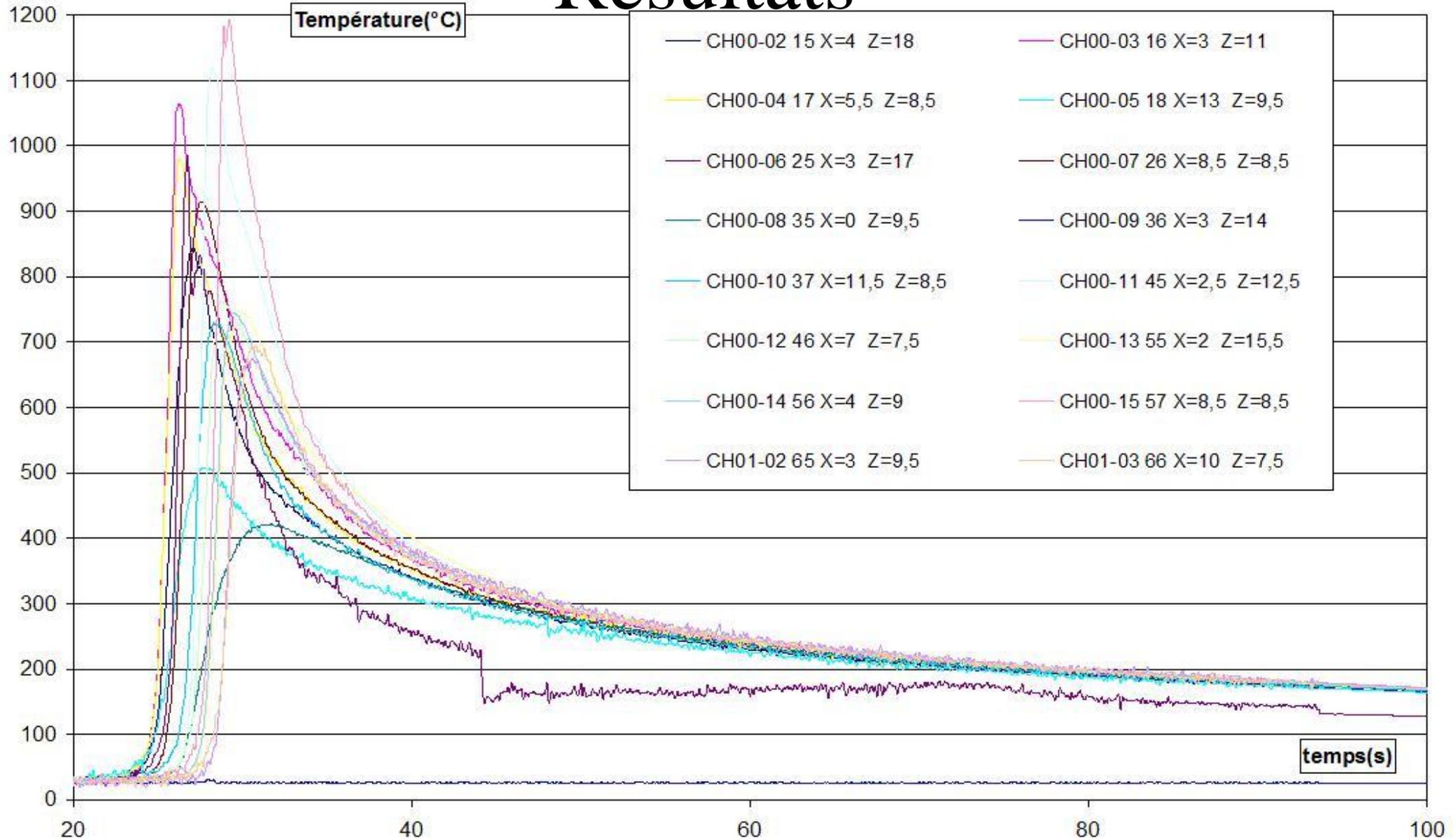
Thermocouples implantés dans  
l'ame et gainés par des tiges  
d'alumine  $d=0,6\text{mm}$

# Instrumentation du soudage en T

- Mesures réalisées en avril 2008 à l'Institut de Soudure.
- Les Thermocouples ressortent par la semelle
- Fréquence d'acquisition: 10Hz



# Résultats



# Analyse des erreurs

Quelle est la perturbation engendrée par le perçage ?

Plusieurs simulations:

a- sans thermocouple

b- Thermocouple dans la direction d'avance du procédé

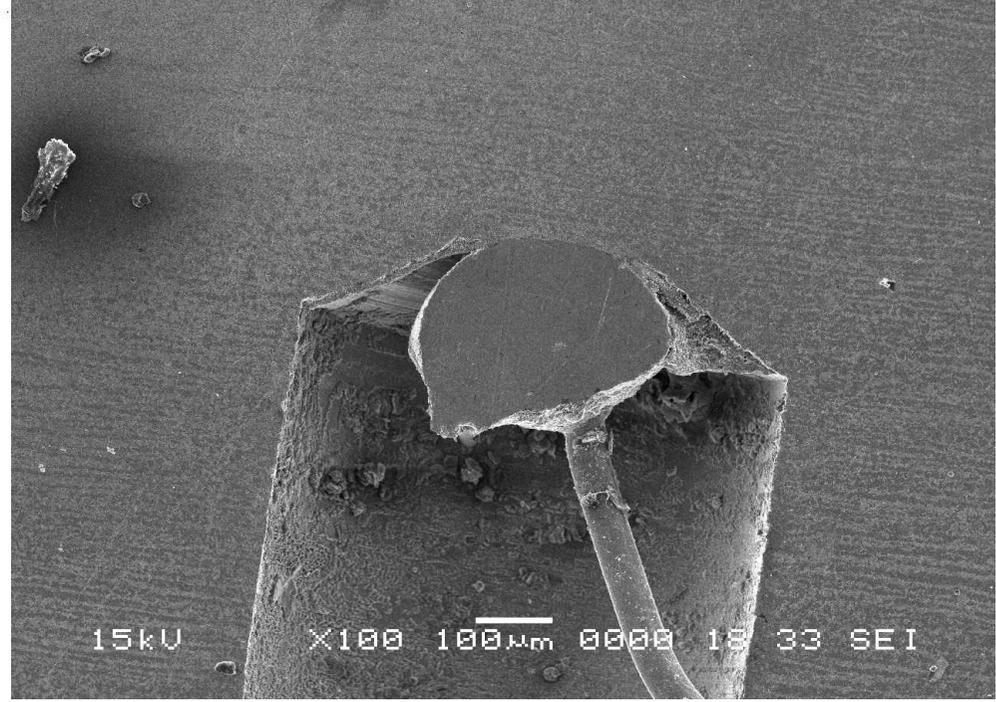
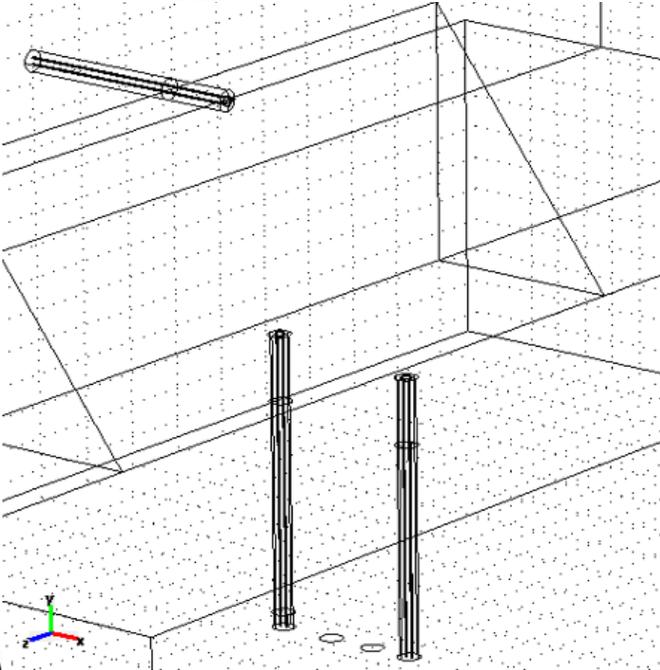
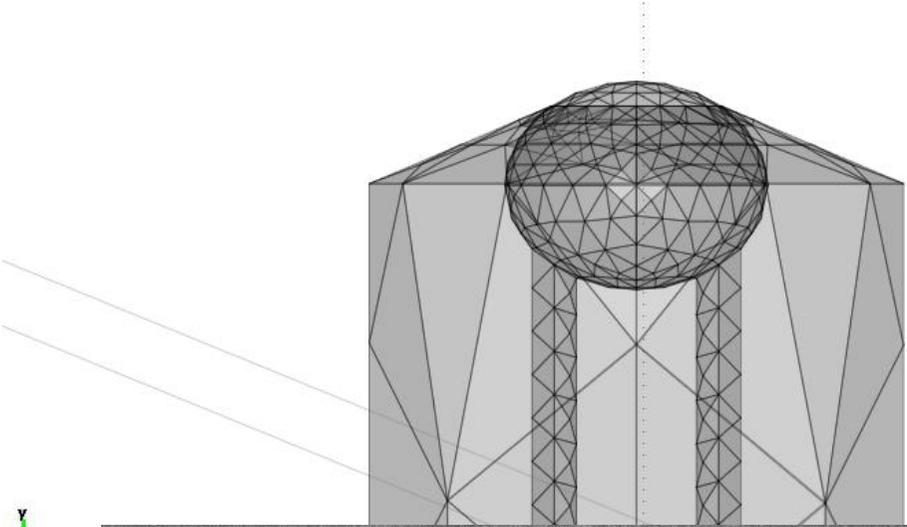
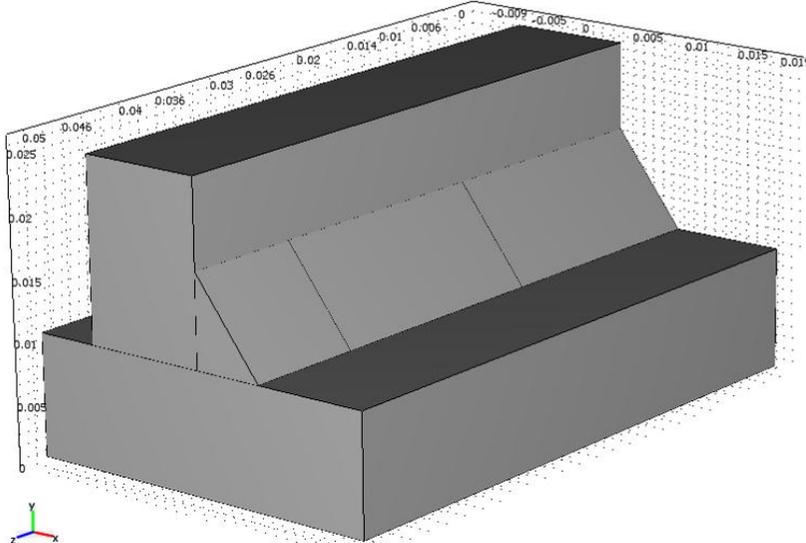
c- Thermocouple perpendiculaire à la zone fondue

d- Thermocouple perpendiculaire avec résistance de contact entre le TC et le fond du trou

	$R_c = e/\lambda$	$e$ ( $\mu\text{m}$ )
Mauvais contact	$10^{-4}$	2,6
	$10^{-5}$	0,26
	$10^{-6}$	0,026
Très bon contact	$10^{-7}$	0,0026

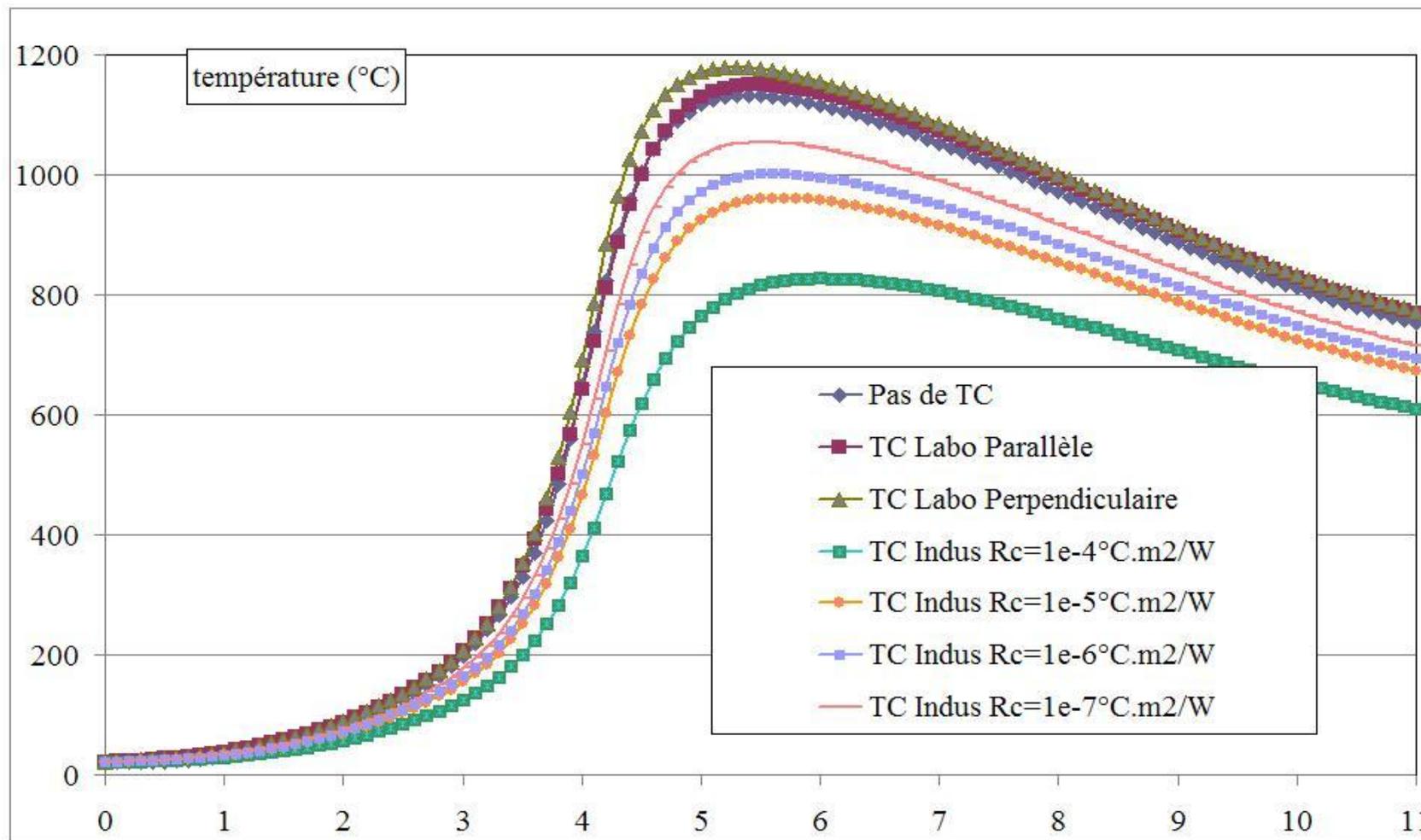


# Analyse des erreurs

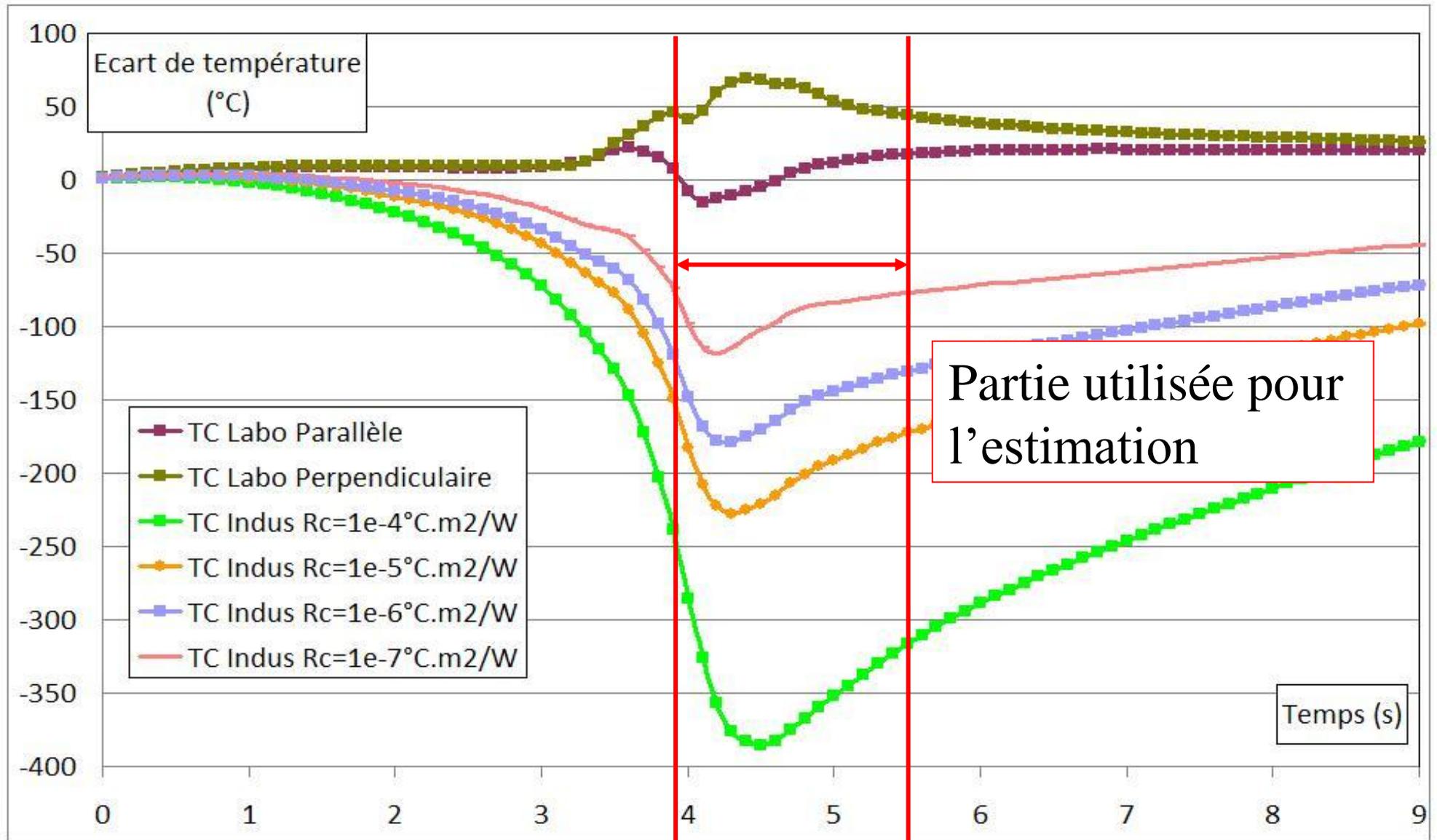


# Analyse des erreurs

- Simulation en transitoire avec source CIN mobile.
- Analyse de l'erreur par rapport au cas sans thermocouple:



# Analyse des erreurs



# Conclusions

- Modèle équivalent / Source de chaleur pour la simulation mécanique
- Les observables et l'analyse des erreurs de mesure:
  - Le soudeur et les paramètres opératoires
  - Les mesures de température par thermocouples
  - Les caméras rapides
  - Les pyromètres multichromatiques et les caméras infrarouges
- Enjeux: meilleure compréhension des phénomènes par le développement de modèles de connaissances (couplage: modèles multiphysiques – observables) afin de développer de nouvelles sources équivalentes (soudage hybride)...



# Conclusions

- Simulation – plusieurs étapes :
  - 1 – Définition du cahier des charges et des objectifs
  - 2 – Choix du type de modèle et de la technique de modélisation
  - 3 – Bilan sur les données disponibles ( paramètres procédés et caractéristiques matériaux)
  - 4 – Caractérisation matériaux complémentaires (Thermique, Electromagnétique, Métallurgique et Mécanique)
  - 5 – Etudes des phénomènes de façon indépendante sur des maquettes et détermination :
    - de l'apport de chaleur (observables : mesures de température, caméra rapide, caméra infrarouge, pyrométrie, macrographie...) à travers des simulations multiphysiques et/ou des sources équivalentes.
    - simulation des phénomènes permettant de discriminer les phénomènes prépondérants
  - 6 - Simulation avec le développement de macro-éléments pour le ou les cas industriels

