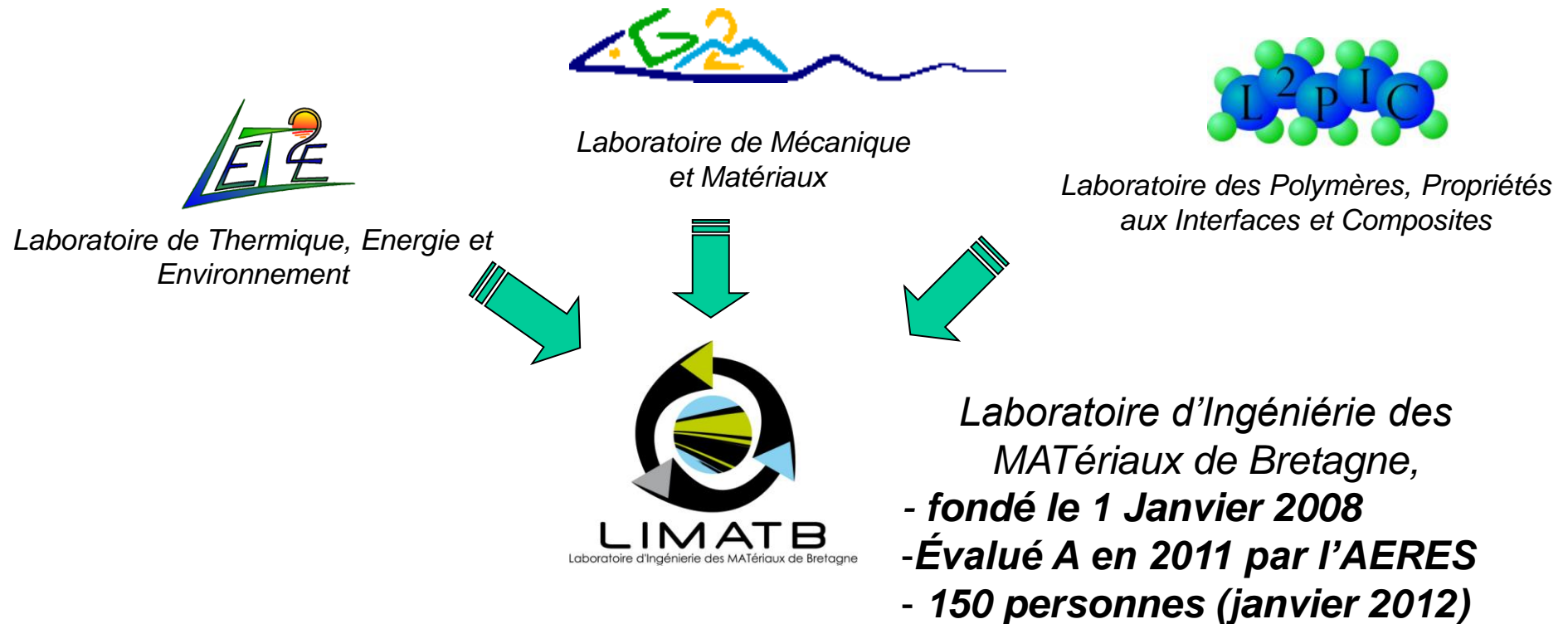


Avancées numériques et expérimentales pour la définition de source de chaleur

P. Le Masson UBS, O. Asserin CEA



Groupe de recherche sur le soudage :

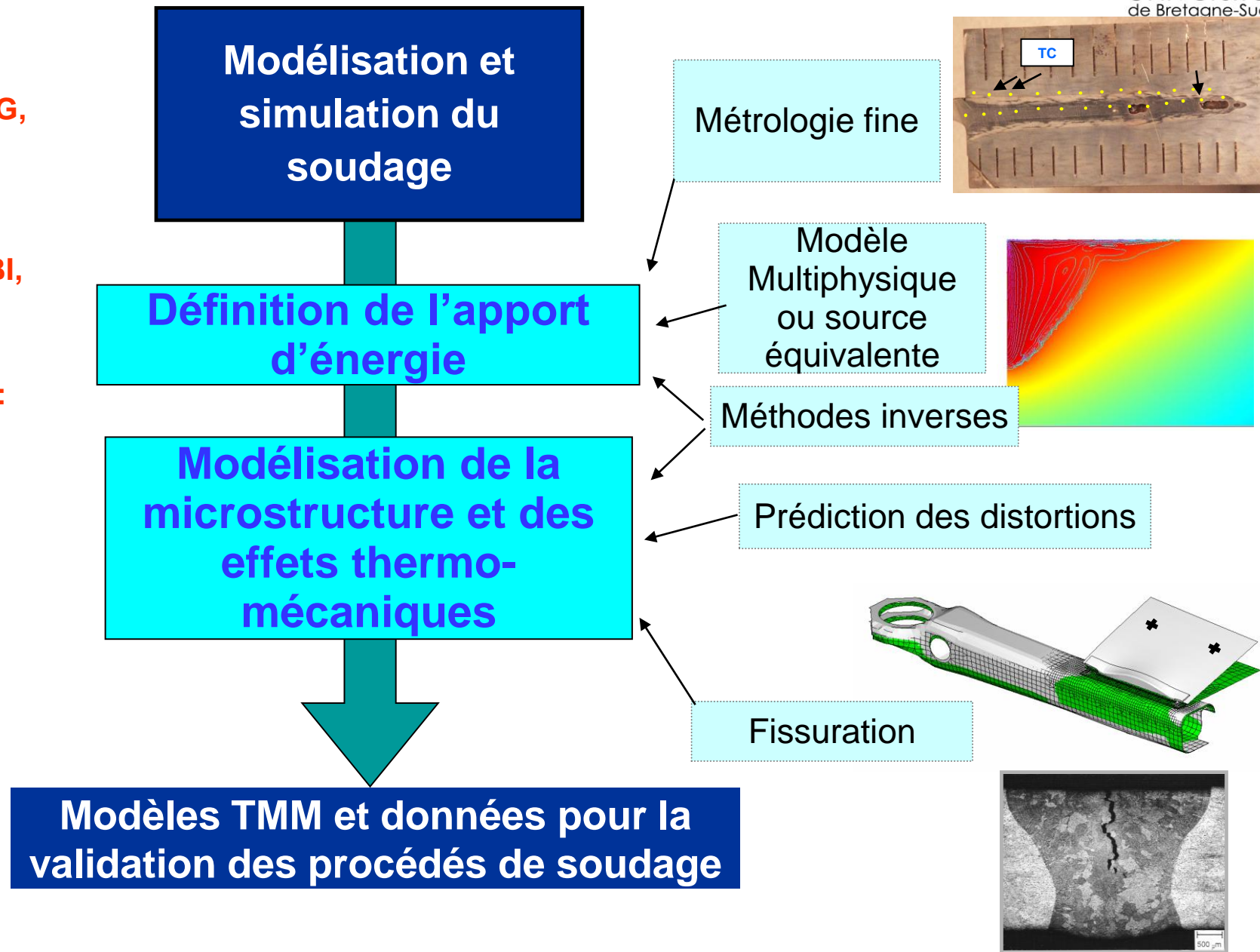
10 chercheurs

7 doctorants et Post doctorants

2 techniciens

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

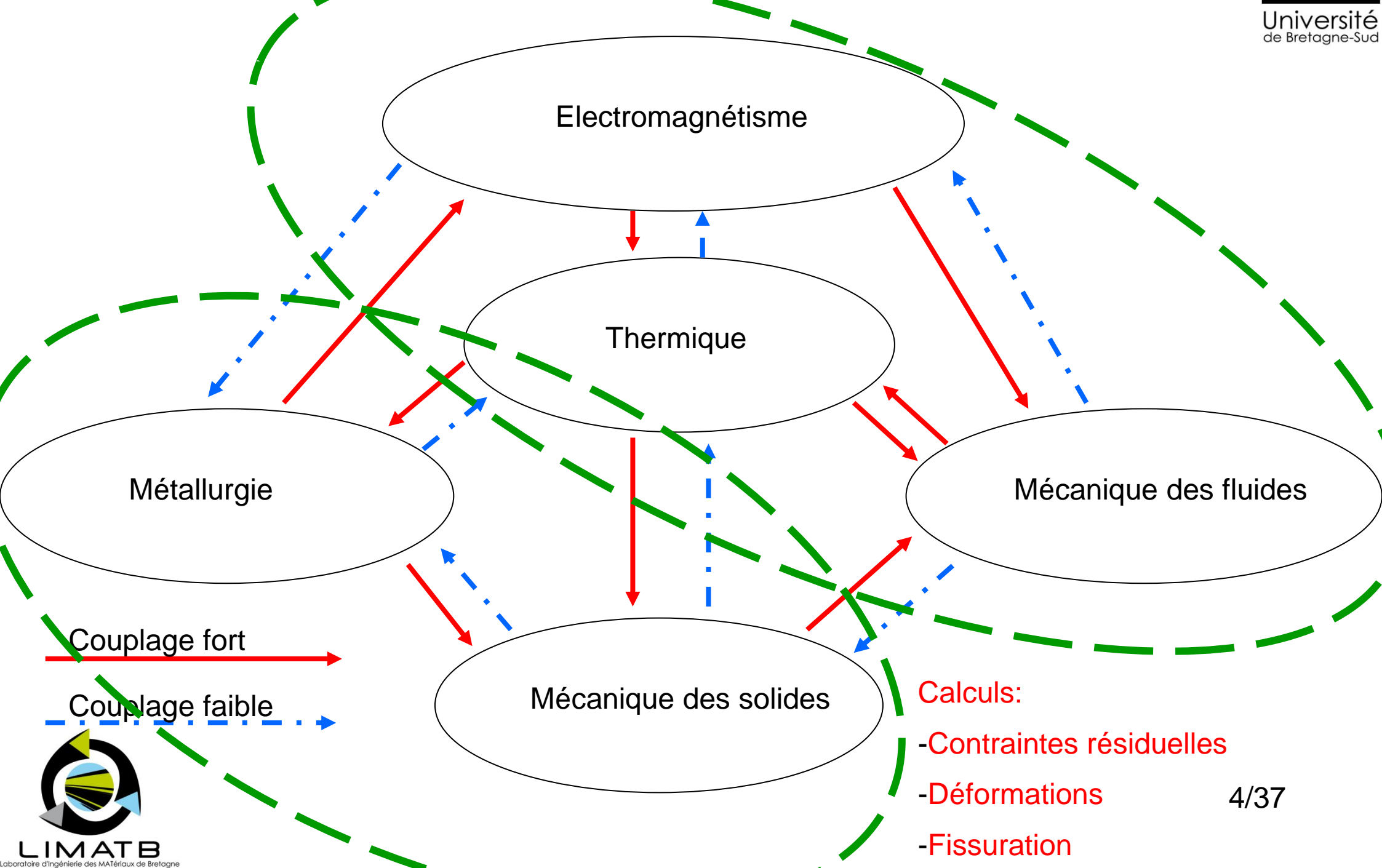


sommaire

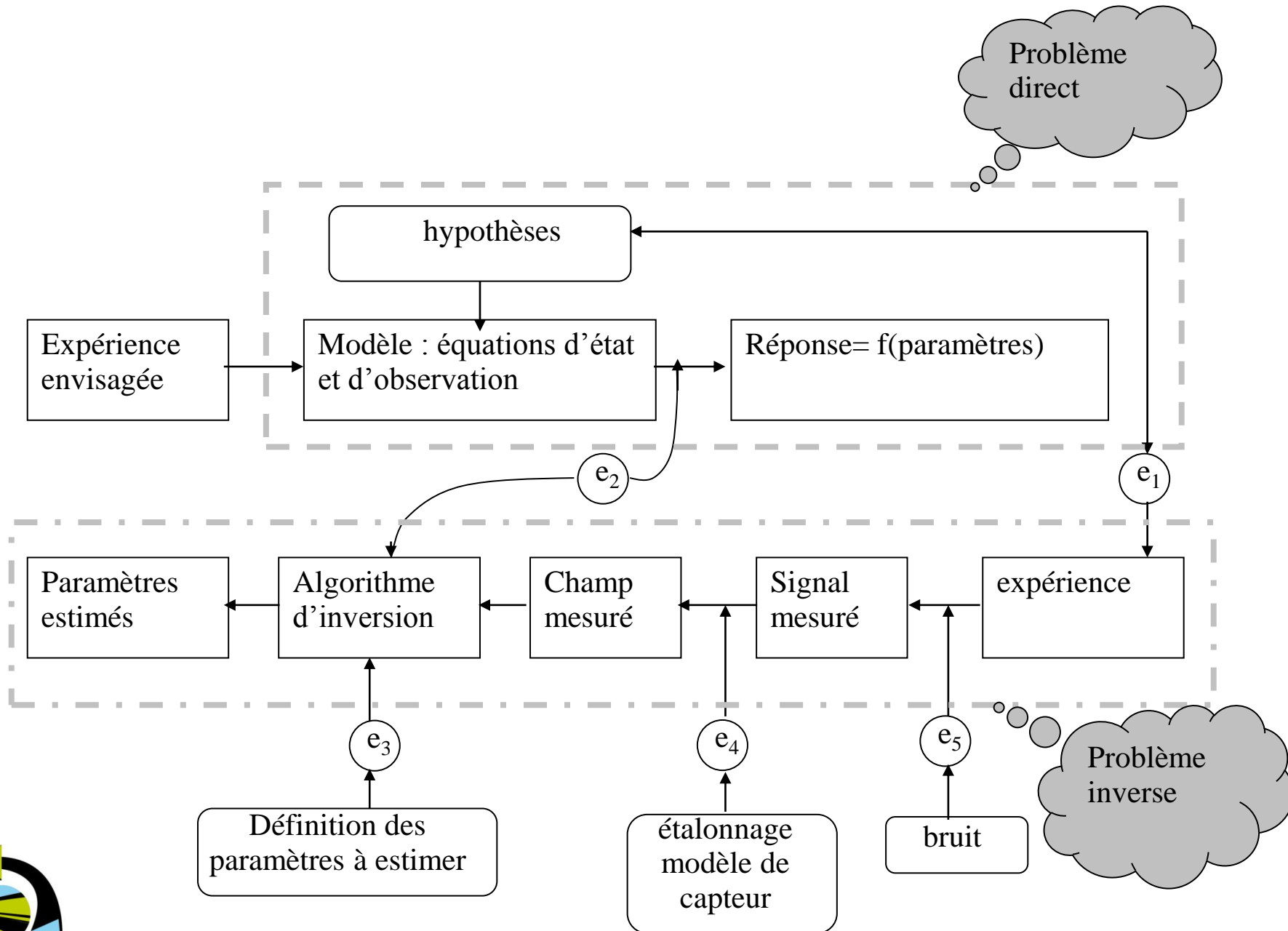
- Définition d'un problème équivalent / Définition d'une source de chaleur
- Erreurs liées au problème équivalent et à l'estimation des paramètres
- Types de sources équivalentes
- Les observables
- 2 exemples:
 - 1- estimation des paramètres de source: projet européen NET
 - 2- estimation des sources 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



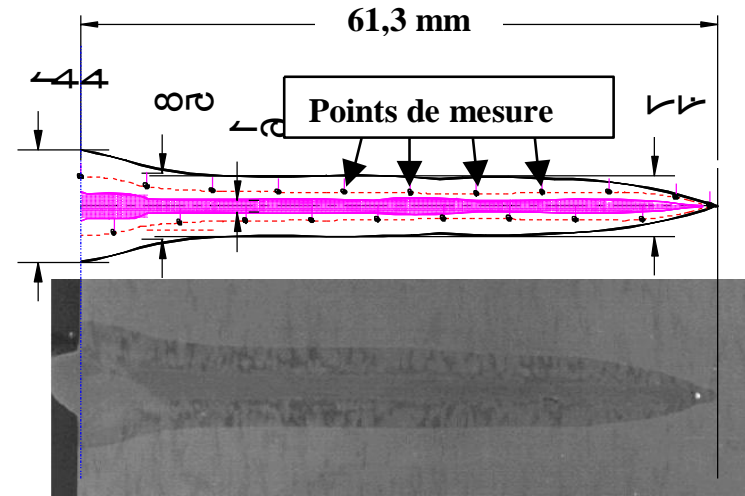
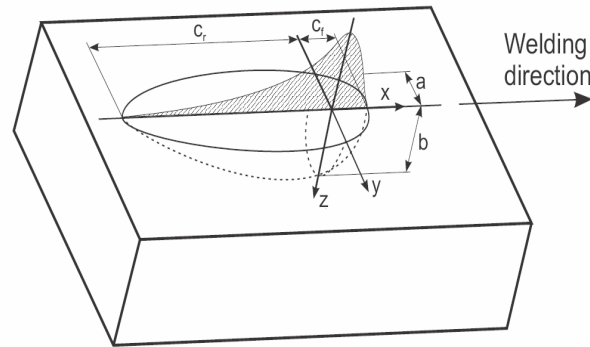
Définition du modèle équivalent



Simulation Thermique / Apport d'énergie

- 2 approches :
 - Multiphysique
 - Sources thermiques équivalentes :

Modèle de Goldak



Modèle CIN

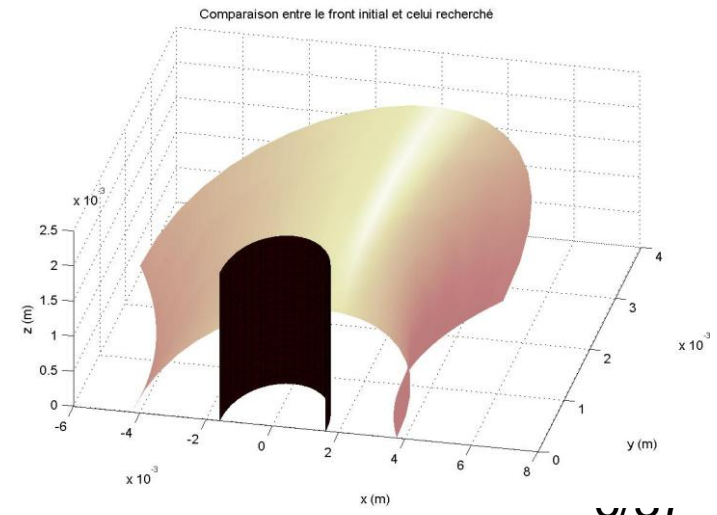
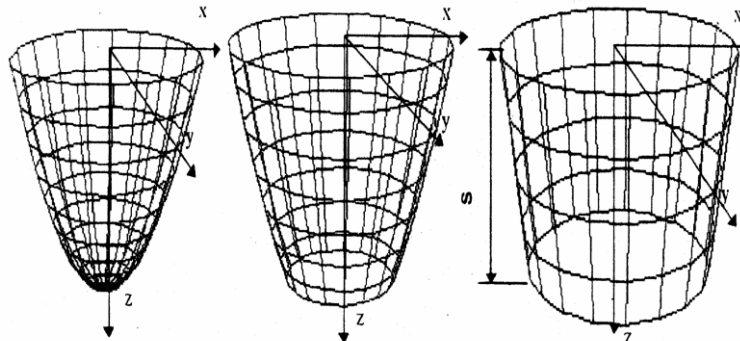
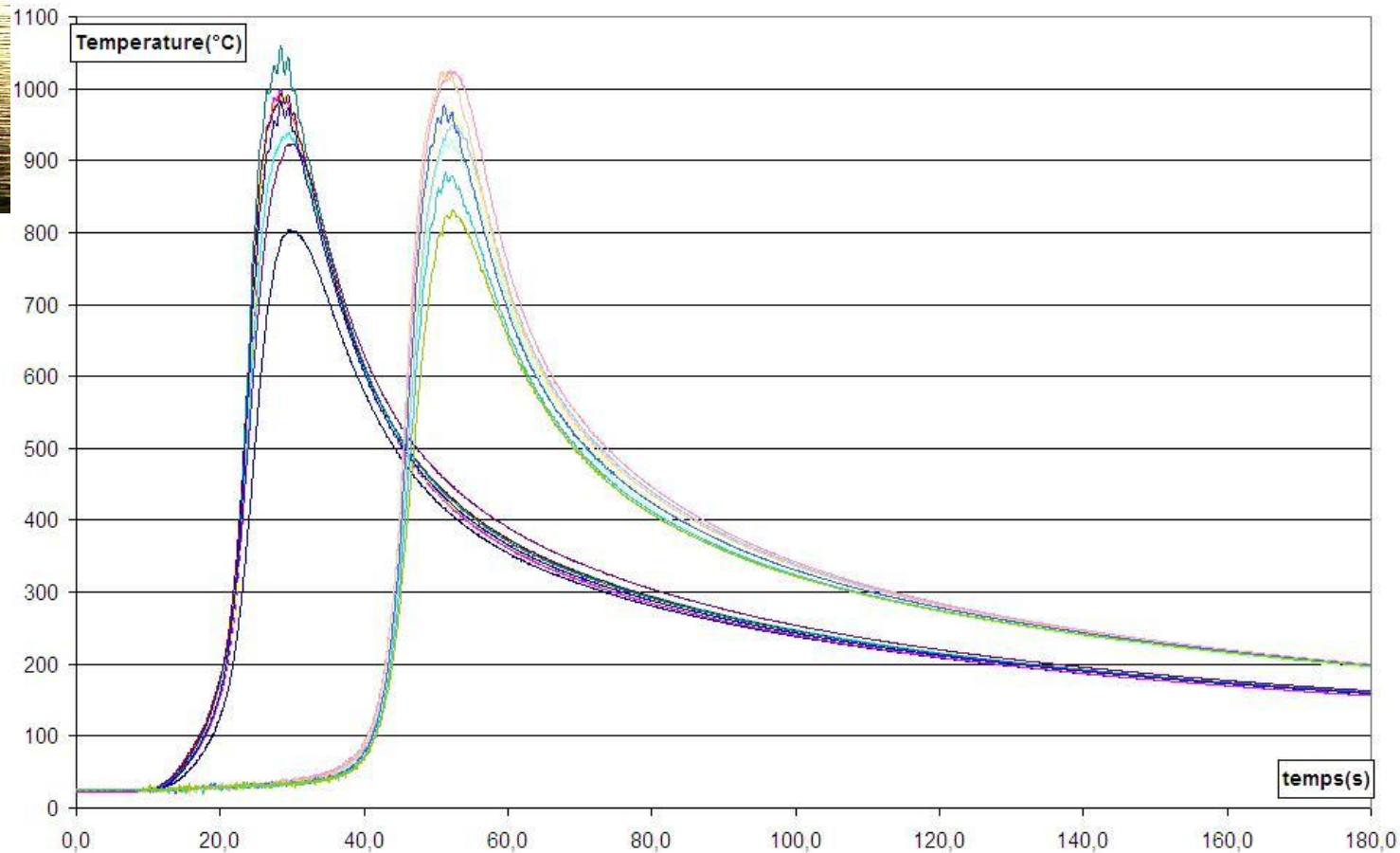
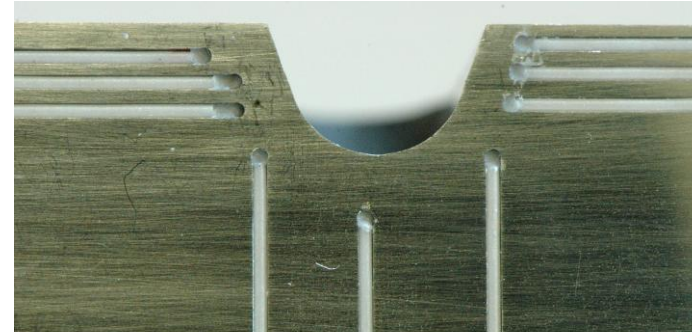
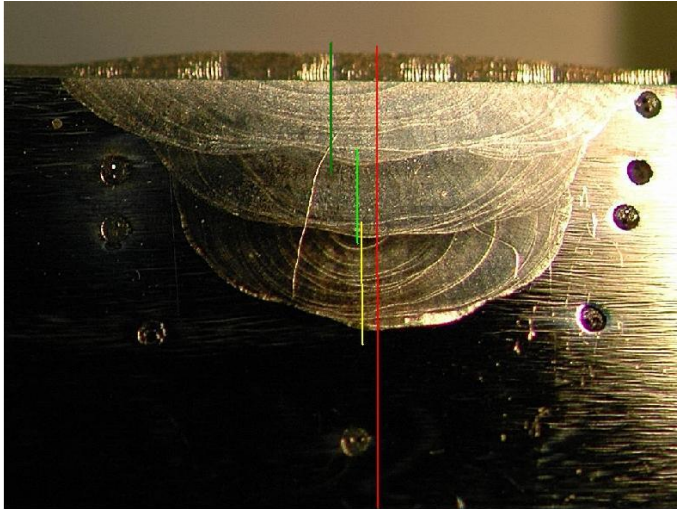


Fig. 2 Examples of the paraboloids of constant values of q_0 .



Les observables

Instrumentation thermocouples - Macrographies

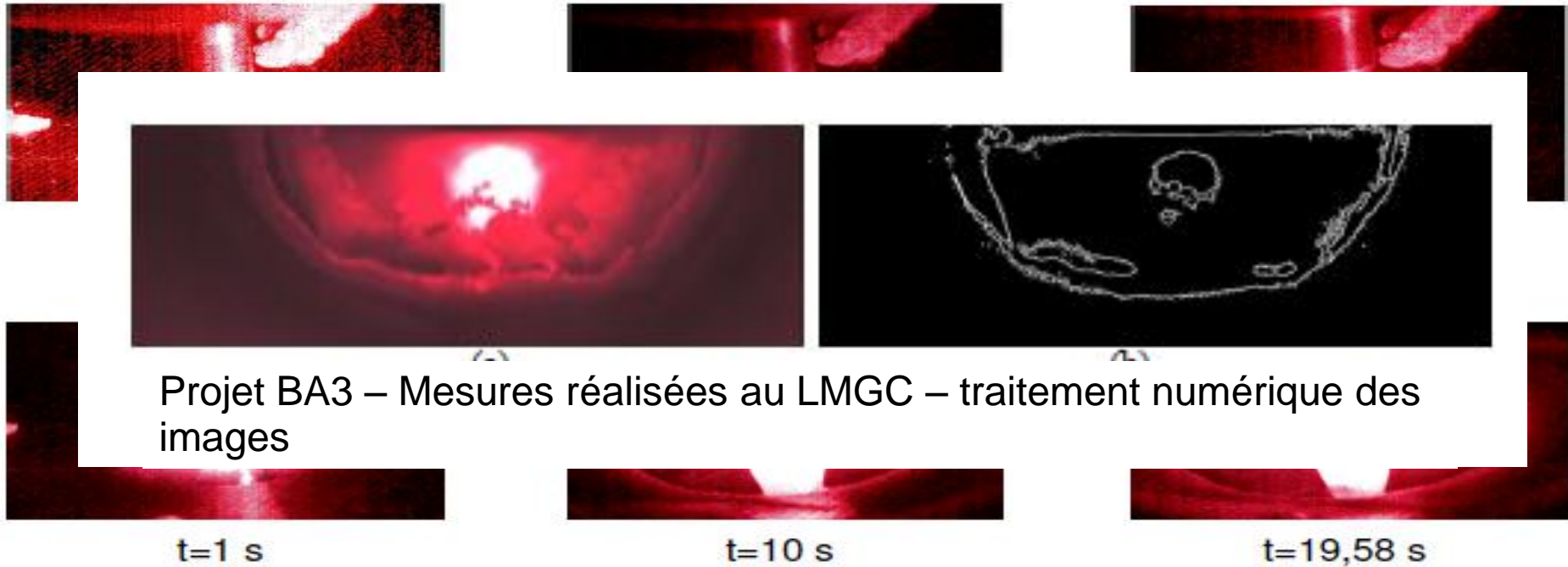


- Interaction entre le capteur et le matériau –perturbation sur la diffusion de la chaleur
- Étalonnage du capteur
- Températures associées à la frontière visualisée sur la macrographie



Les observables

Mesures par Caméra rapide



t=19,59 s



fin d'acquisition

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

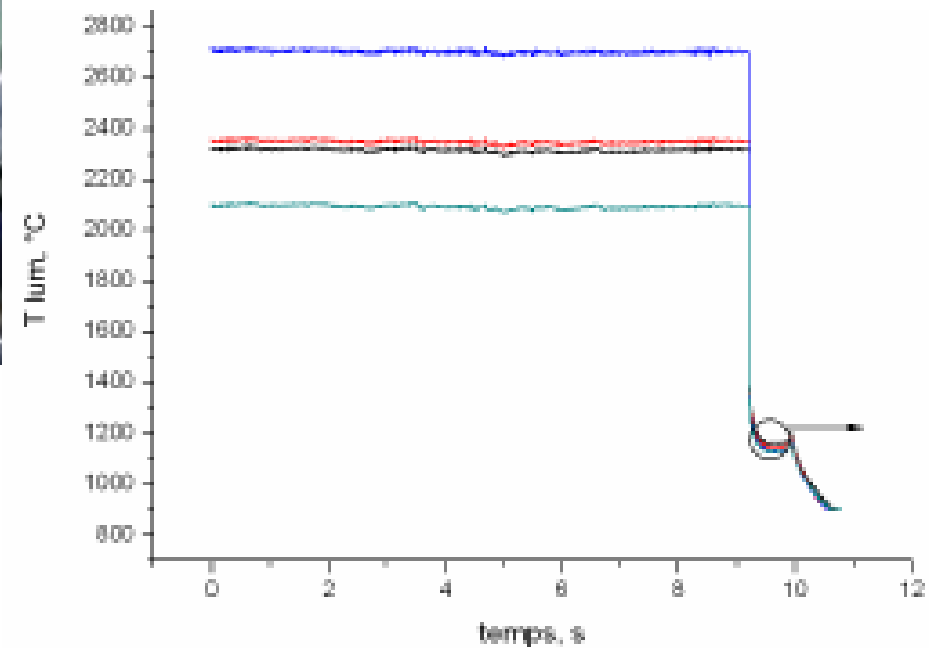
l'évolution de la
n – projet BA3
M. Dal –

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 $194 \times 150 \times 18$

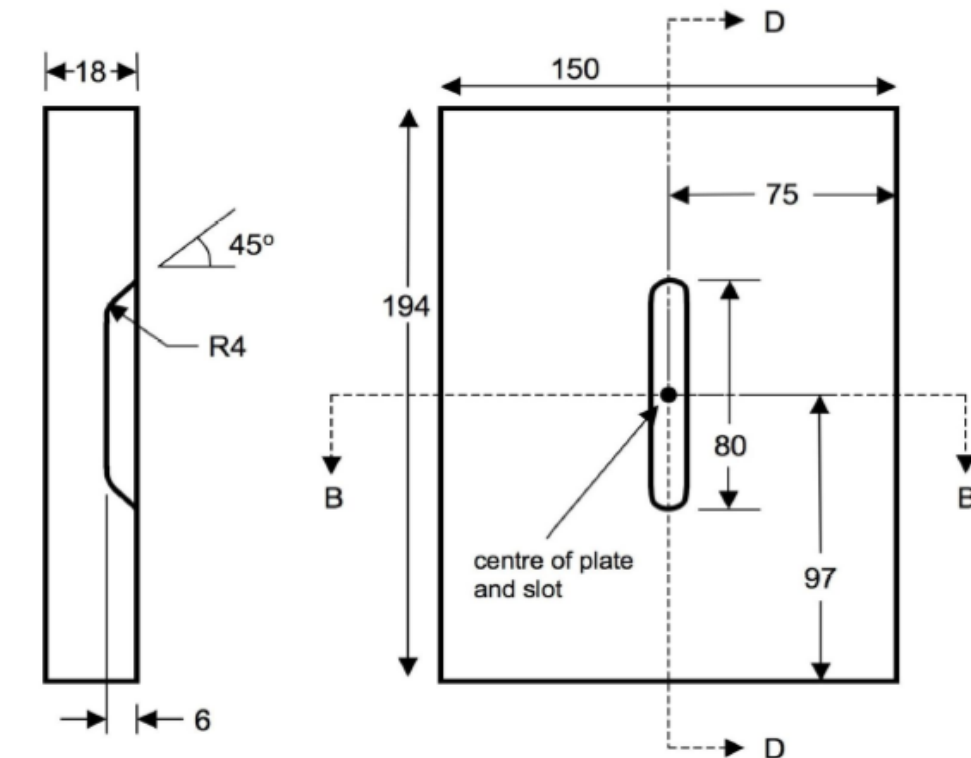
Slot 80 mm long ; 6 mm deep

Material :

316L austenic steel

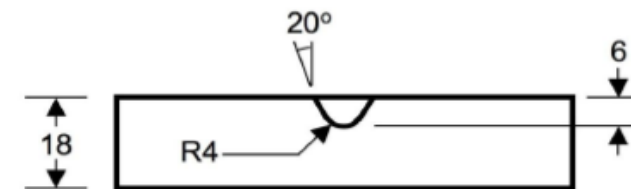
Welding parameters :

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 < 80 C	T < 60 C	T < 60 C



Section D-D

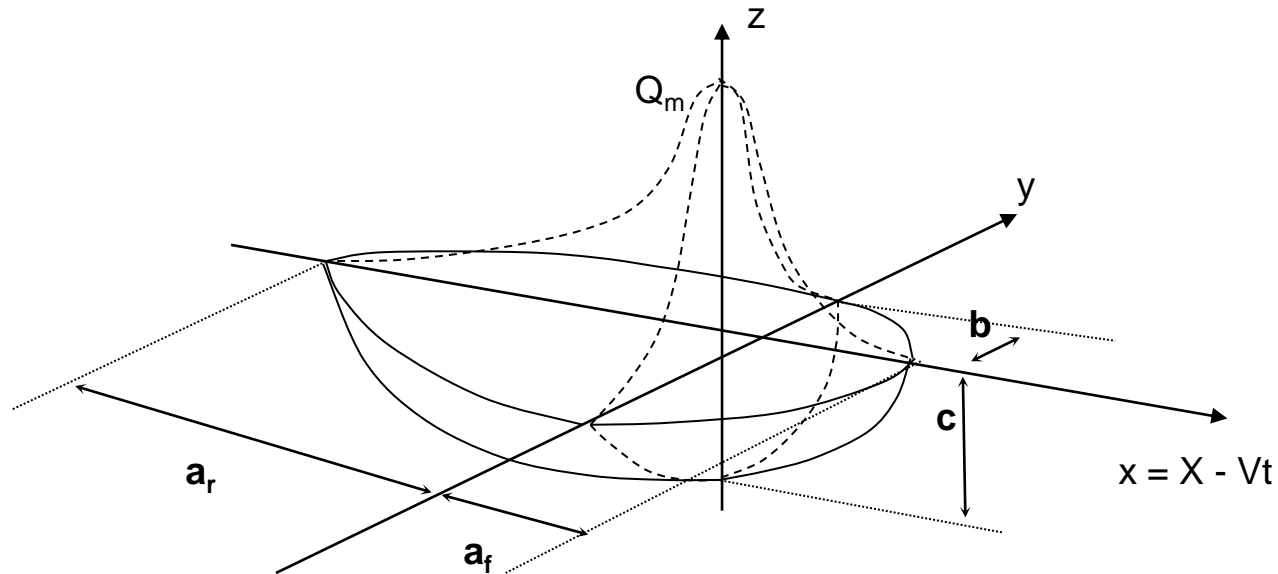
All dimensions in mm.



Section B-B



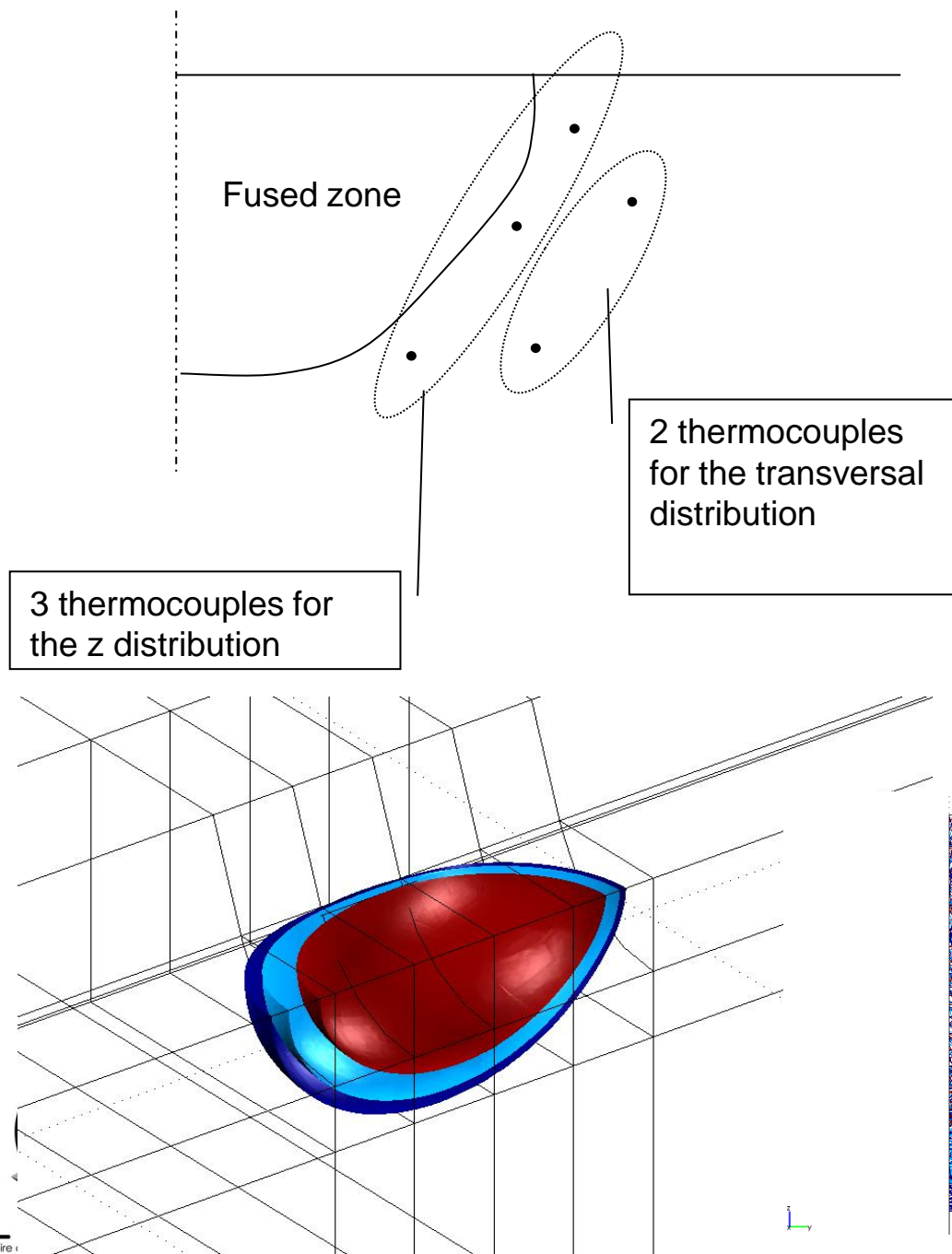
→ Double ellipsoïde de Goldak:



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

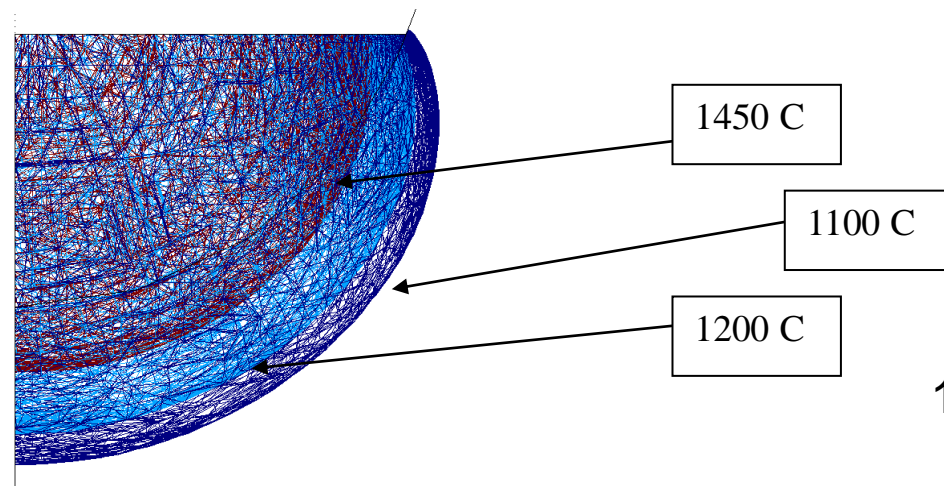
$$\int_V q(x, y, z) \cdot dV = P_0$$

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 $a_f(2 - f_f) = a_r f_f$



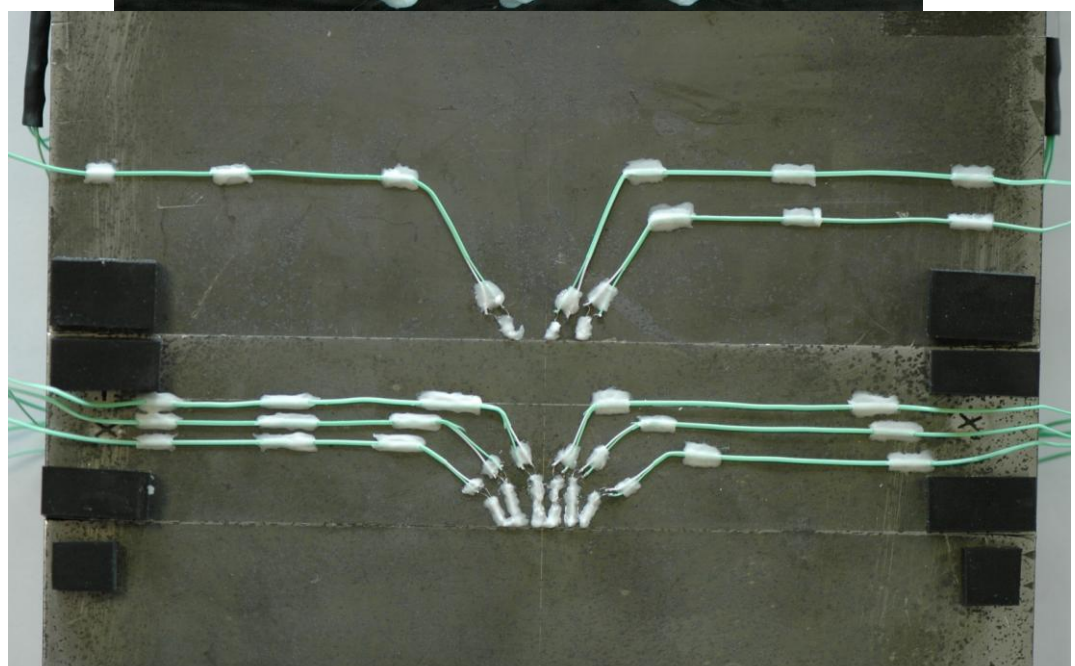
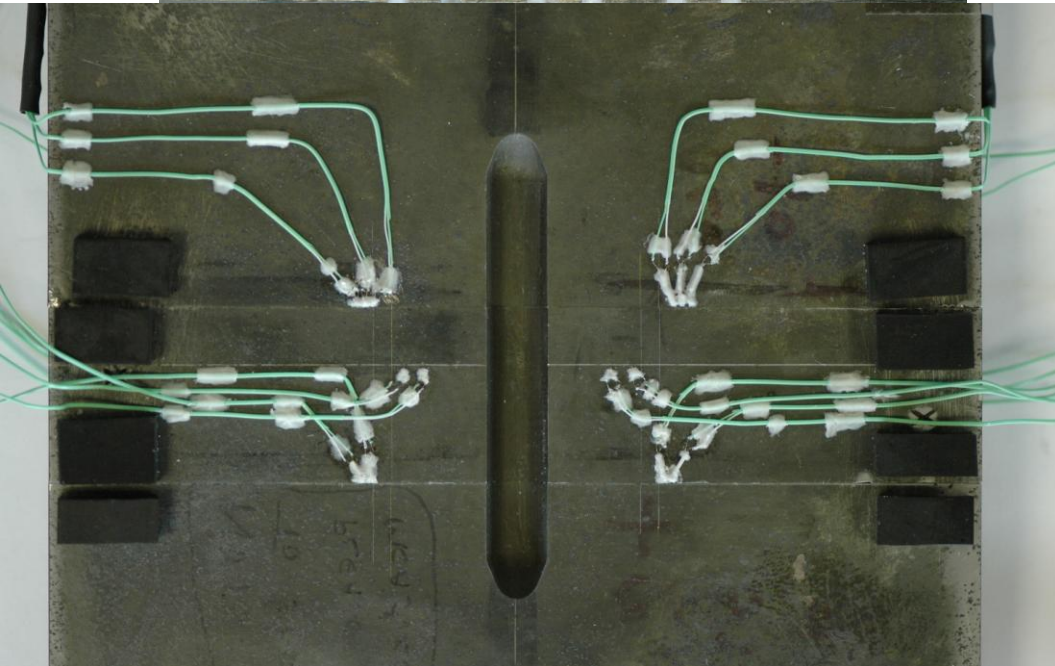
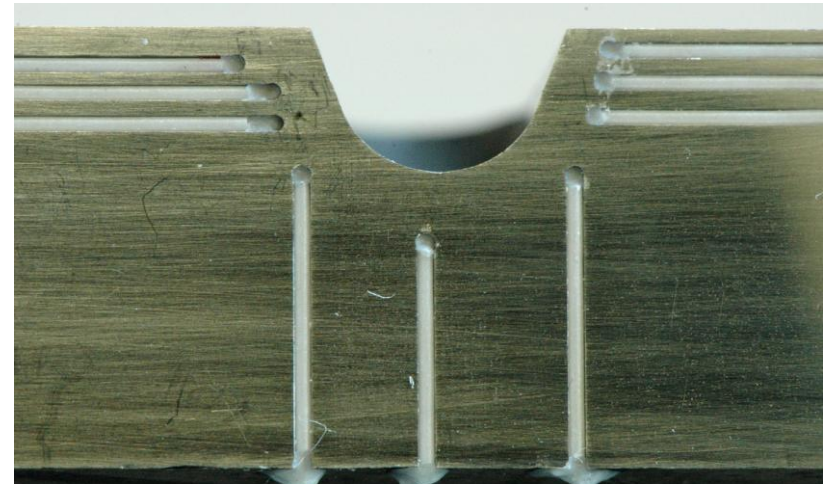
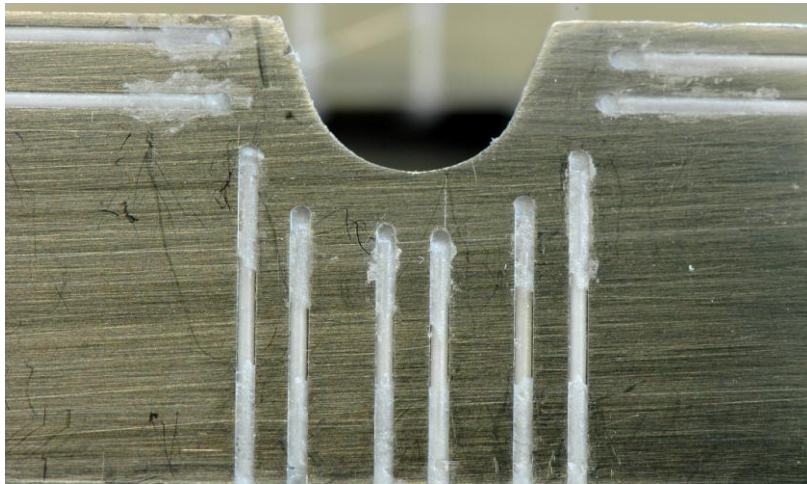
- Positionnement des thermocouples sur deux isothermes:
 - Gradients thermiques suivant la profondeur et dans la direction transverse.
 - Gradient thermique dans la direction longitudinale est obtenue grâce aux mesures temporelles (modélisation en quasi stationnaire)

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



Instrumentation

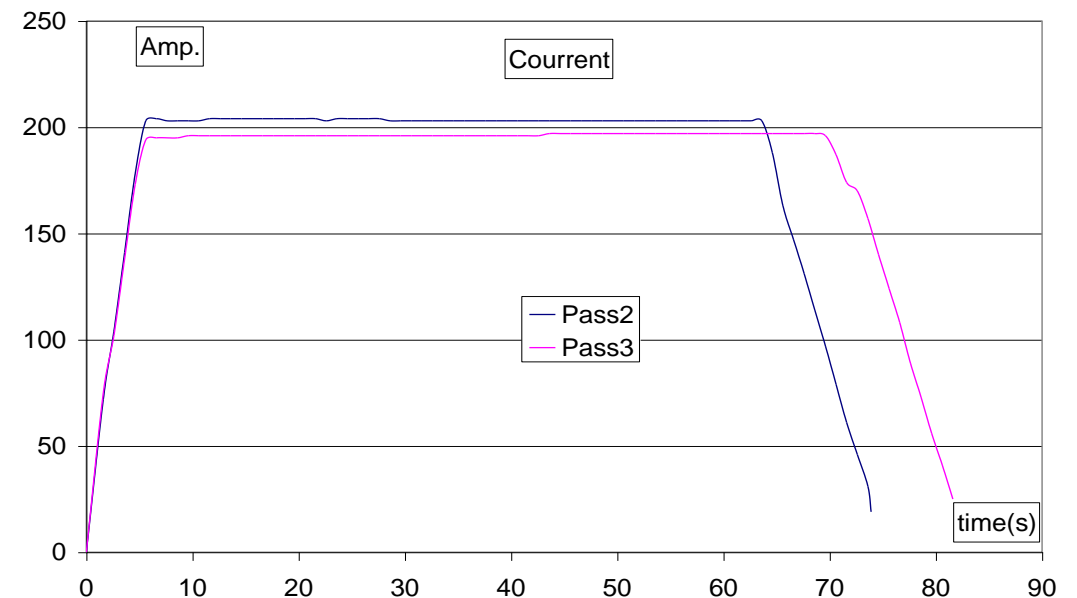
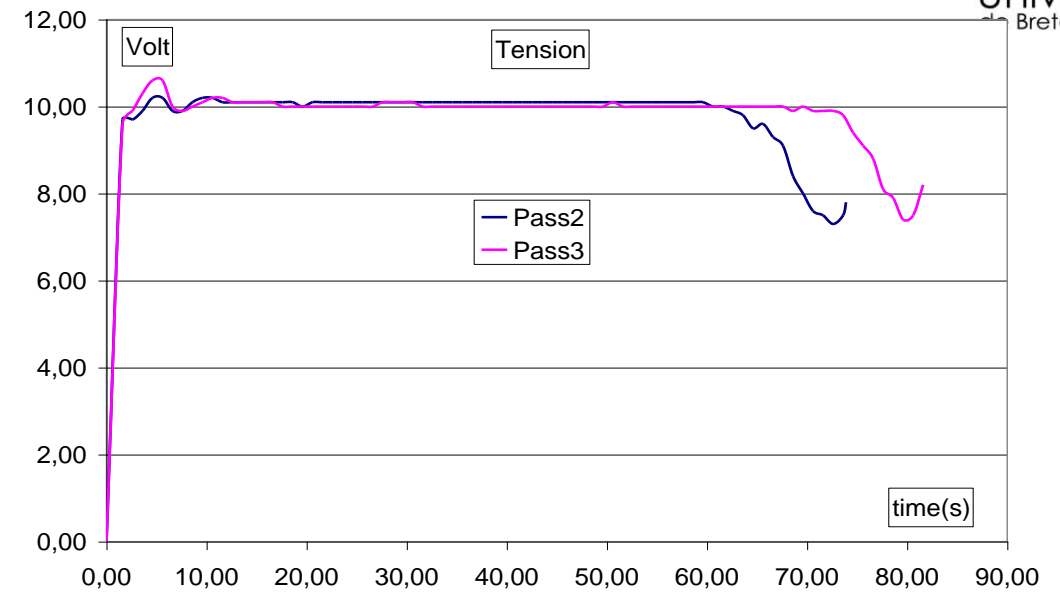
23 thermocouples (type K, 50 μ m) soudés dans les trous de profondeur 7mm et de diamètre 0,65mm. Les fils sont ensuite protégés par des tubes d'alumine.



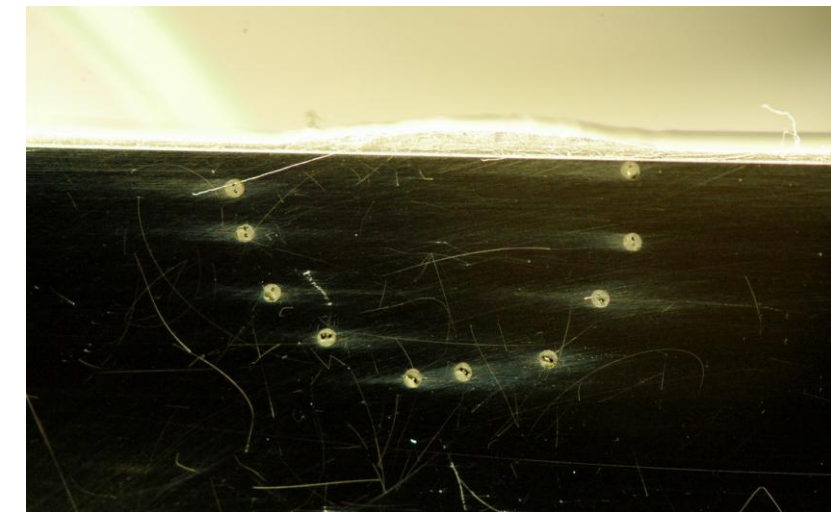
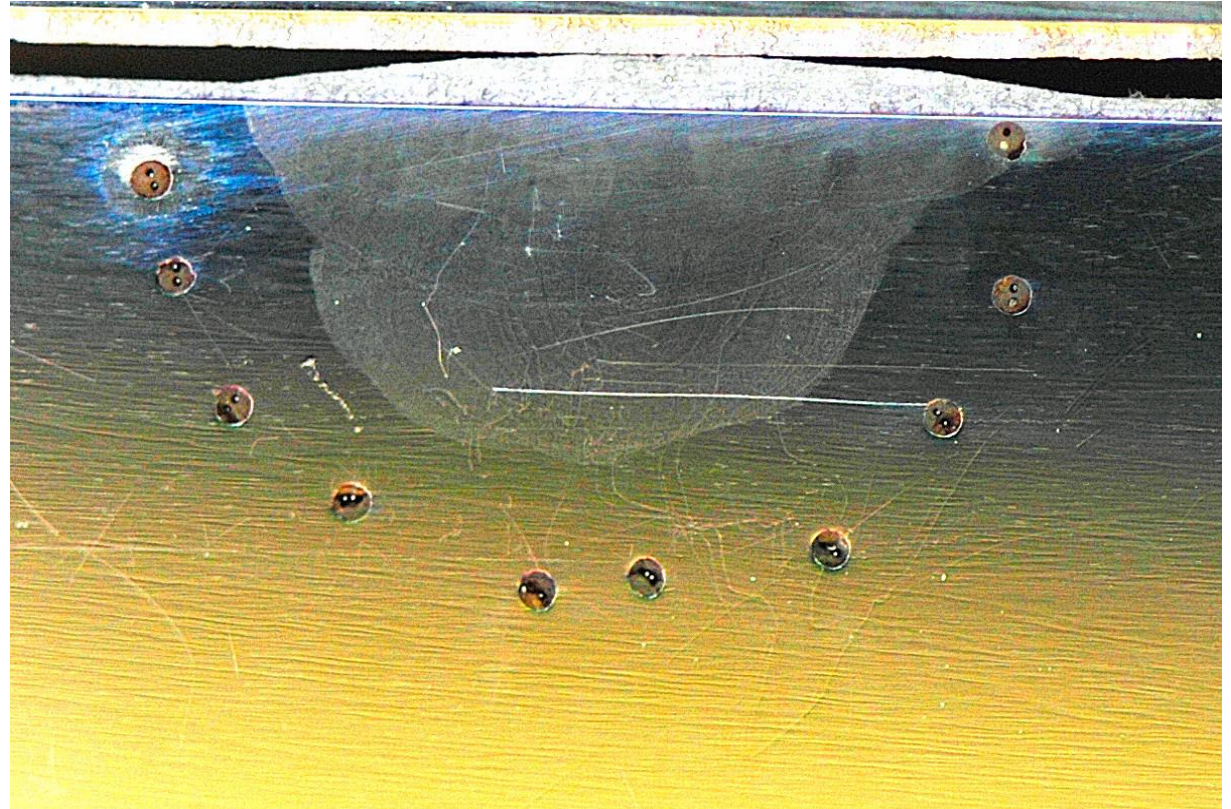
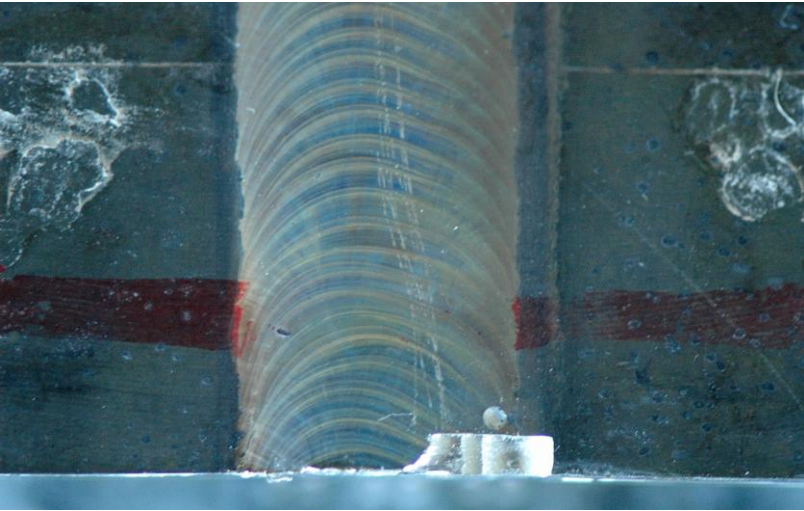
NET TG4 : general hypothesis

Welding parameters :

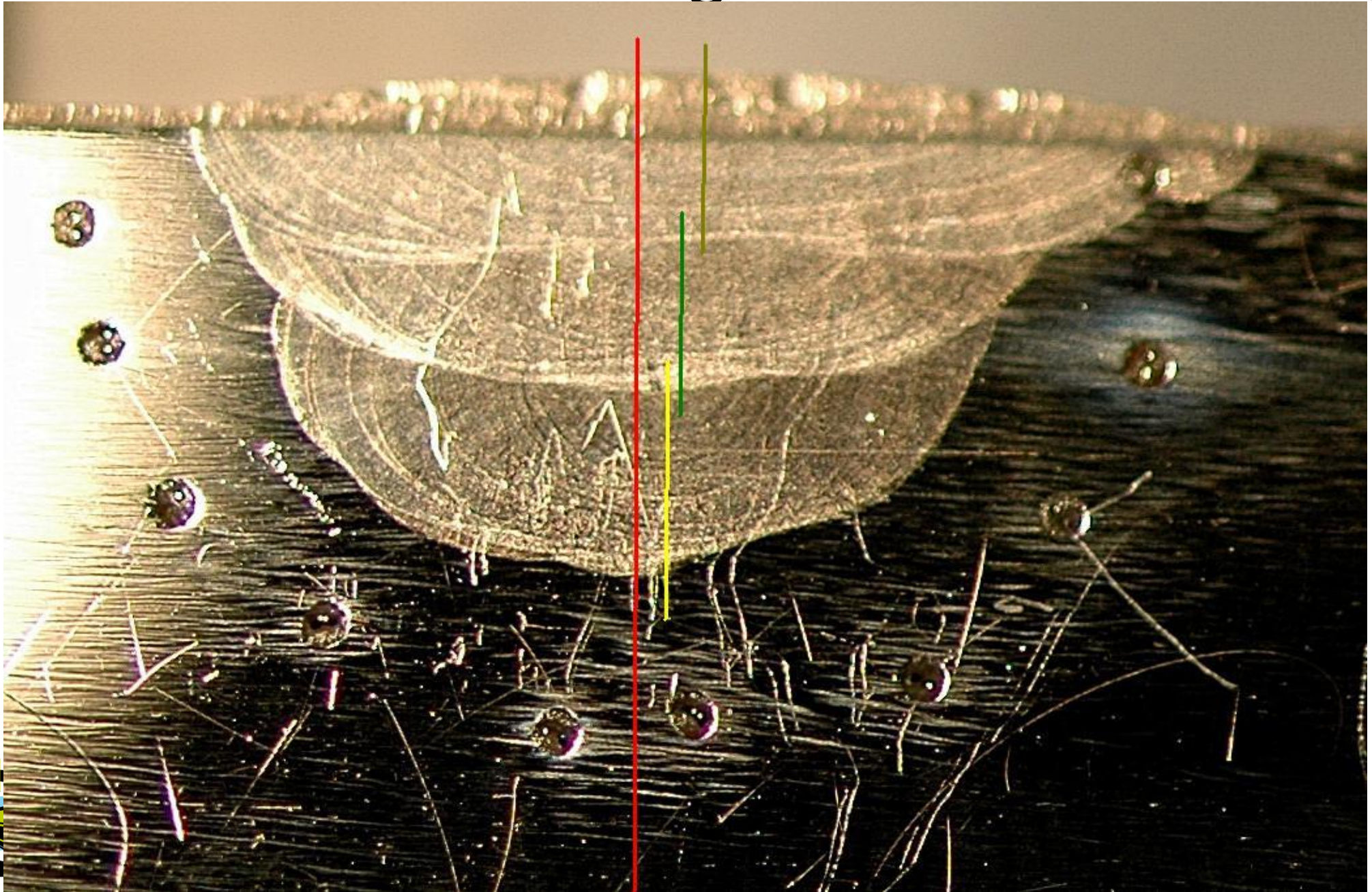
		PASS 2	PASS 3
JOB NO		0	0
WELD NO		0	0
RUN NO		0	0
WELDER		"G LITTLE"	"G LITTLE"
DATE		22-Oct-09	22-Oct-09
TIME		10:27 AM	11:24 AM
CURRENT		185	180
VOLTS		9,8	9,9
WIRE SPEED		0,1	0,0
TRAVEL SPEED		0,0	0,0
ARC TIME		73,9	81,6
WELD LENGTH (mm)		80	82
ENERGY (kJ)		134	145
HEAT INPUT (J/mm)		1675	1768
GAS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



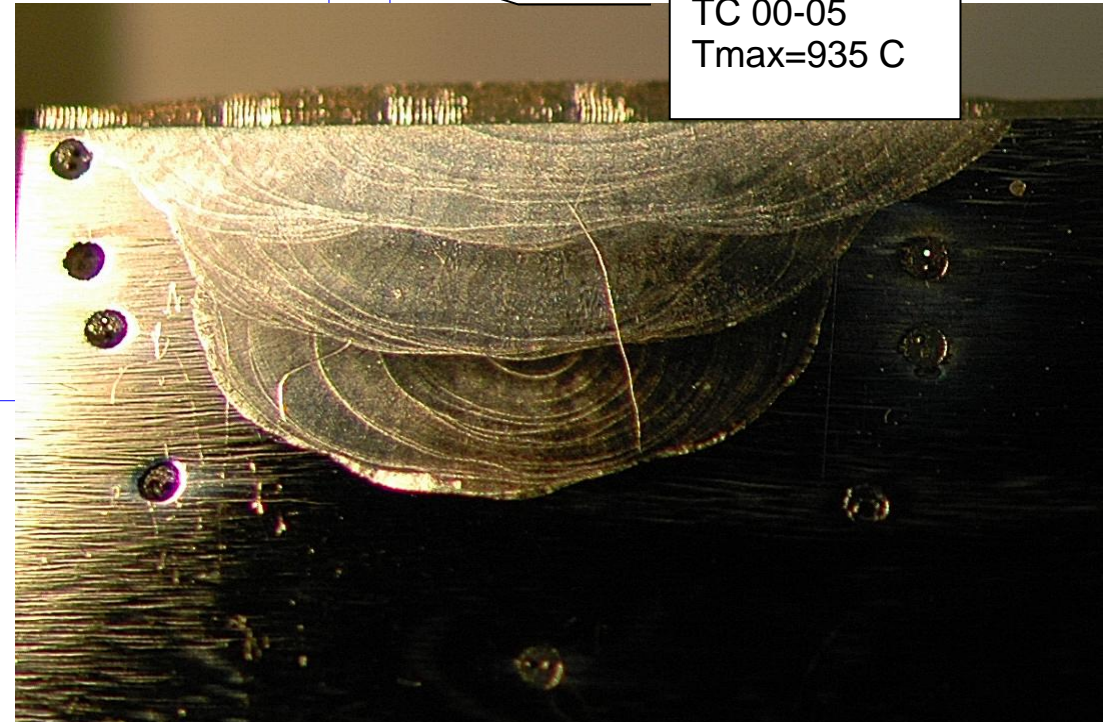
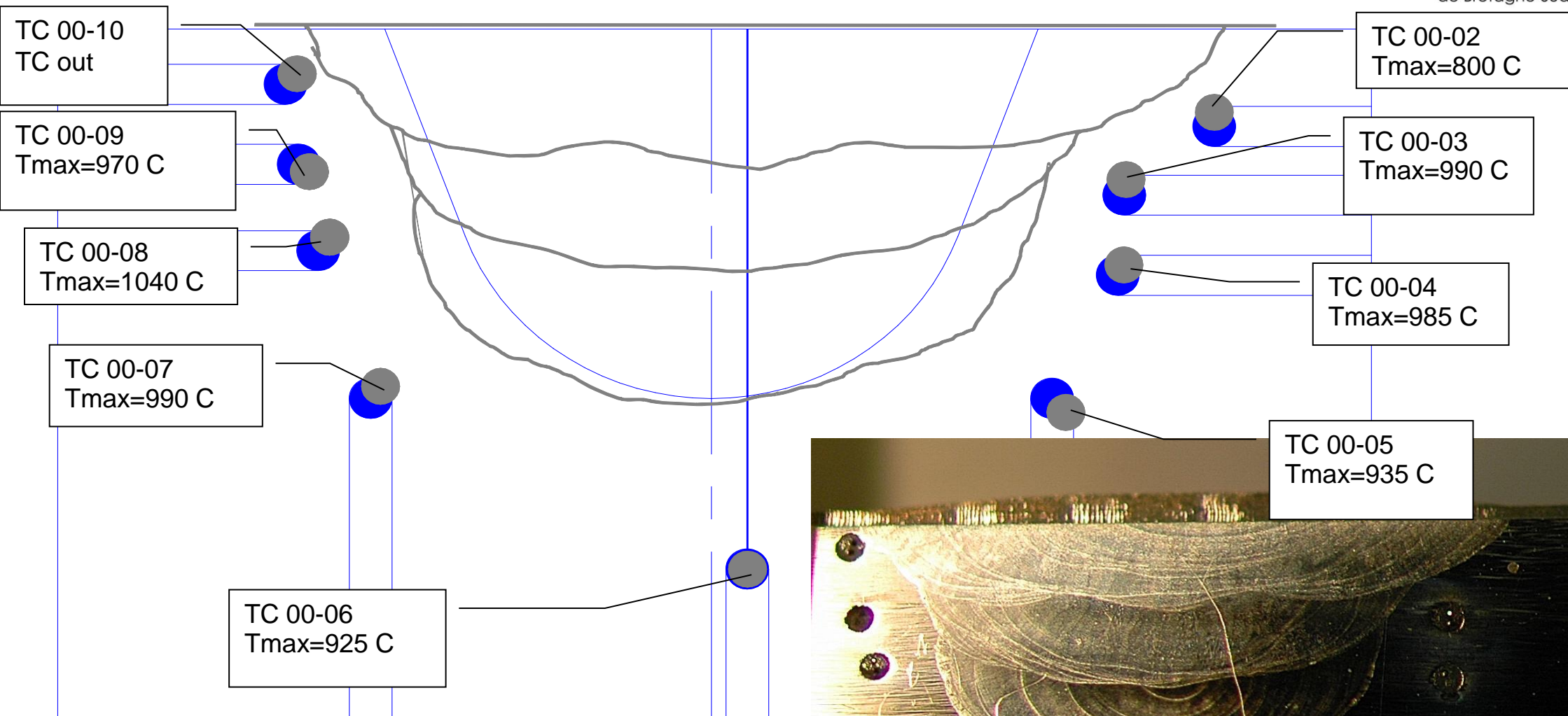
Exploitation



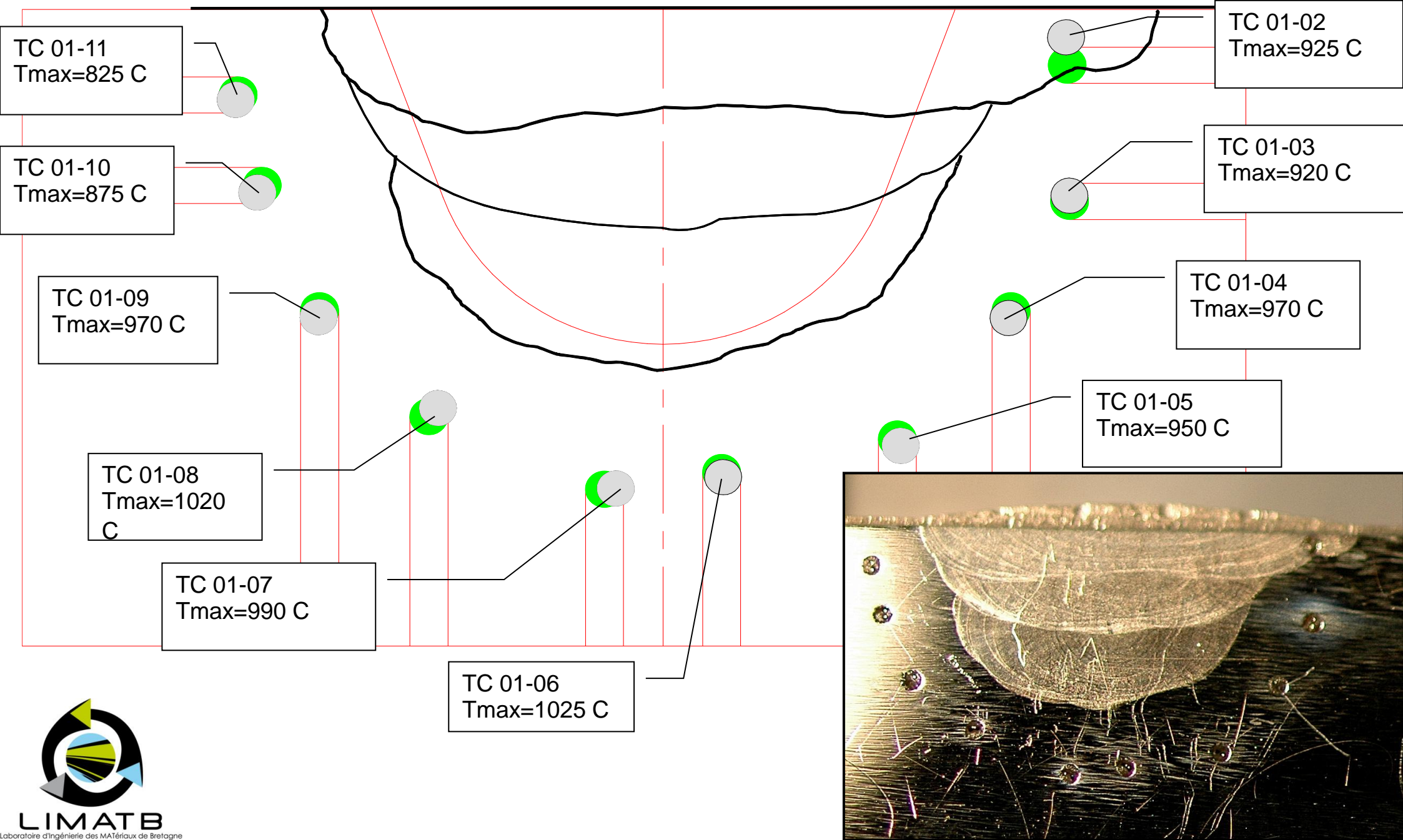
Welding axis



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 (ρ ; c_p ; λ).
- 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:

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

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

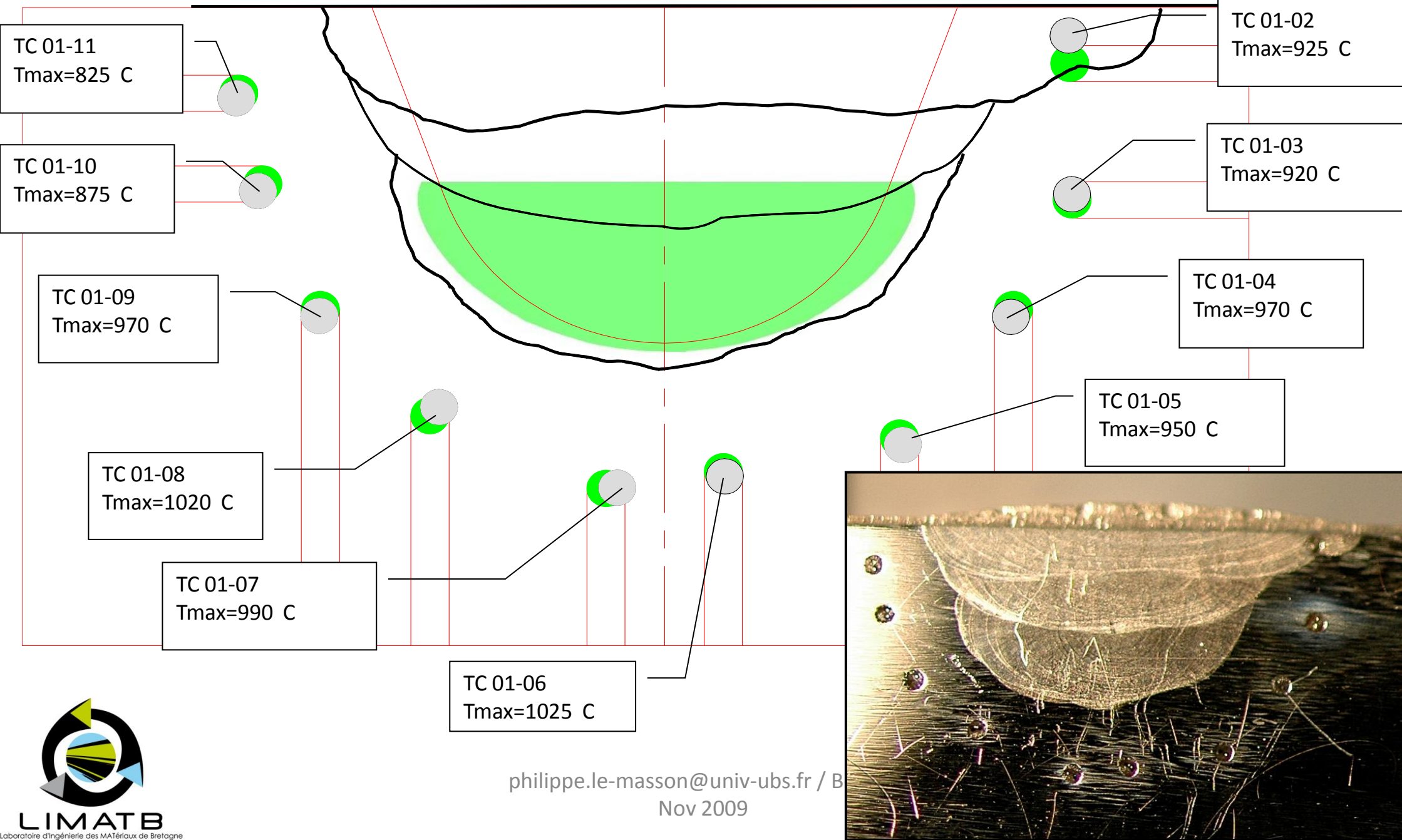
The standard deviation = 13 C

	Passe 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	$2 \cdot f_{fo}$
η	0.885
hcv (W/m ² .k)	115.18



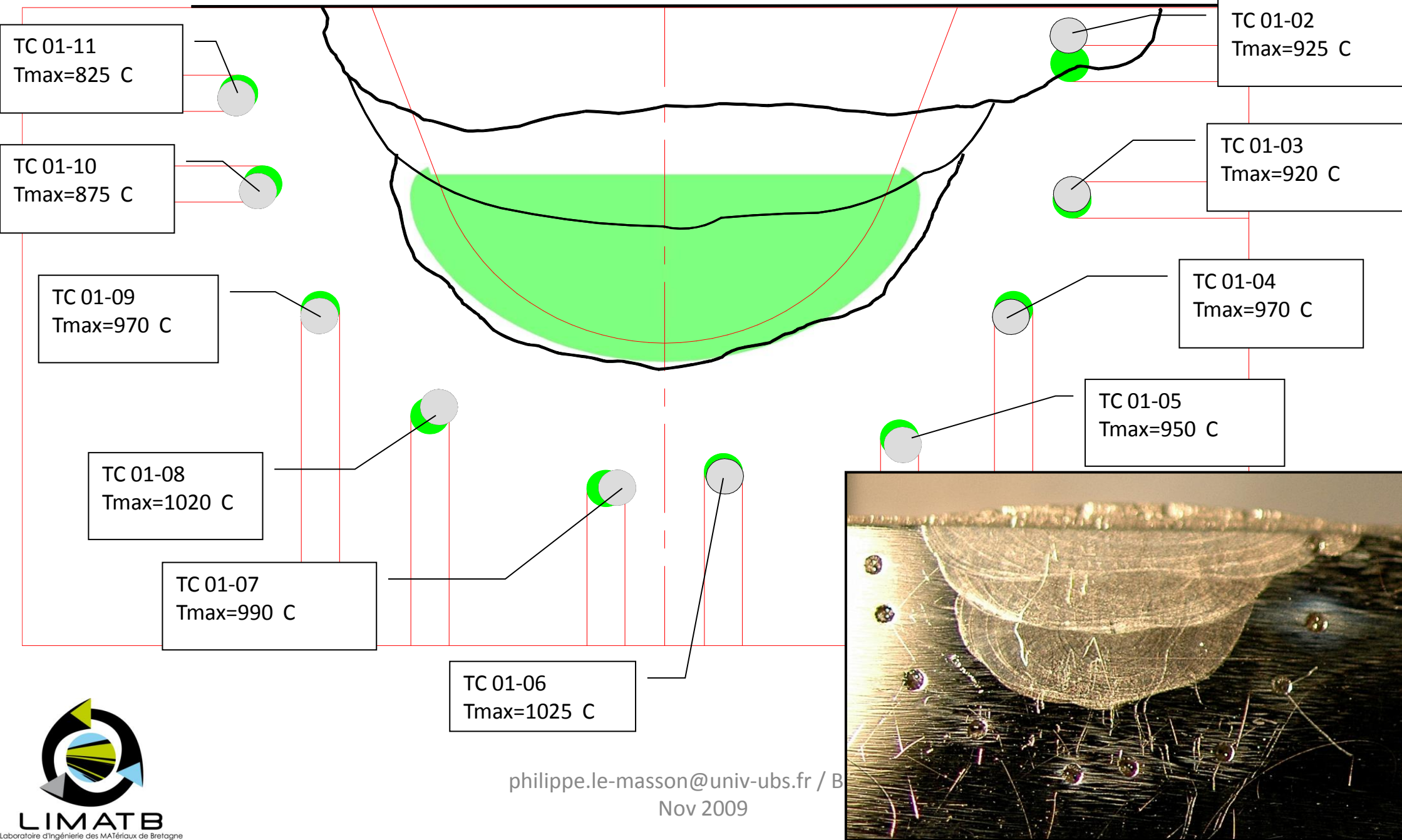
Interface 2- Pass1

warning
 $T_f = 1450\text{ C}$

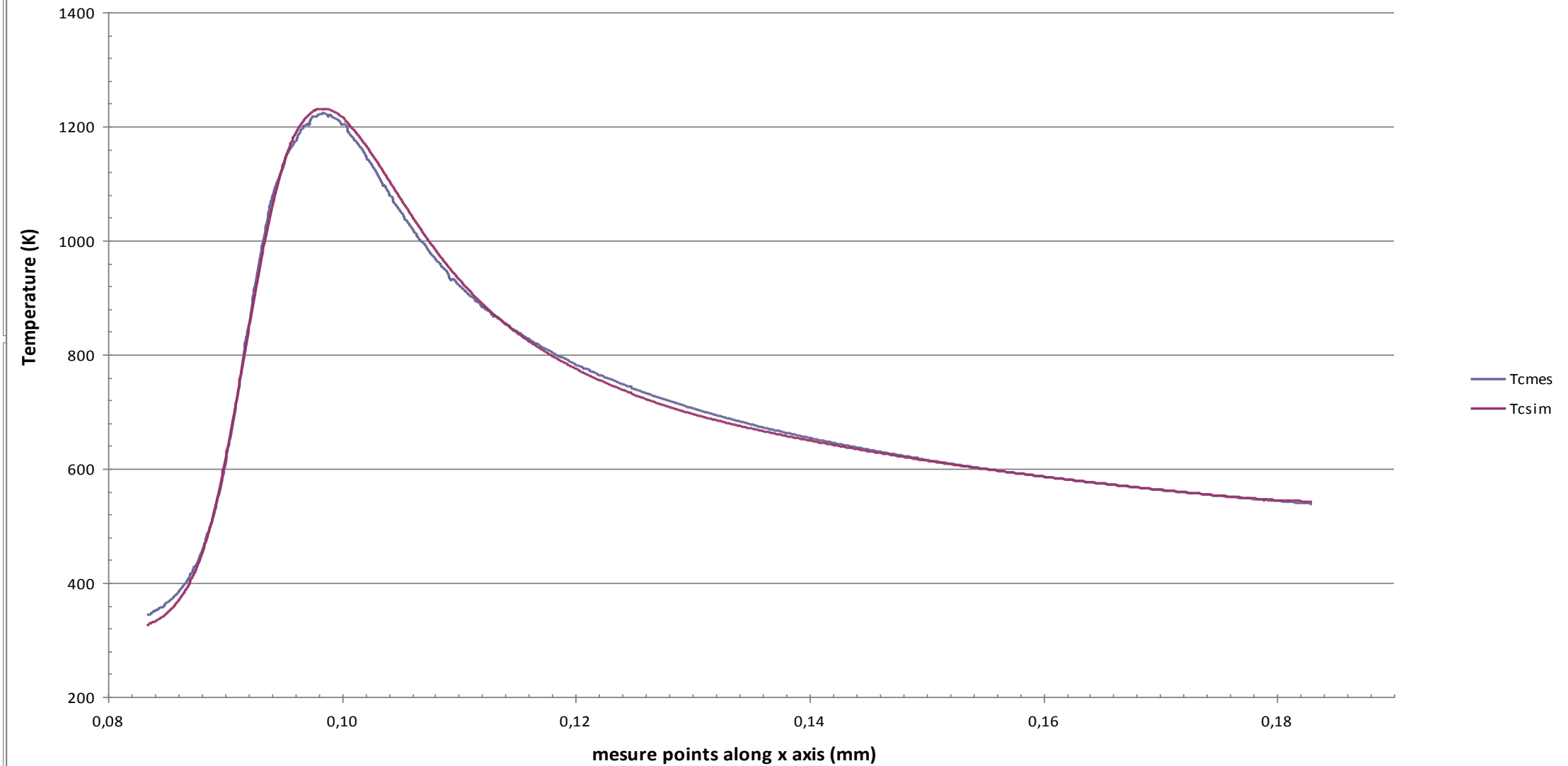


Interface 2- Pass1

warning
 $T_f = 1400\text{ C}$



TC 01_03



Exemple 2: Le soudage en T

(*MUSICA – CETIM – Institut de Soudure*)

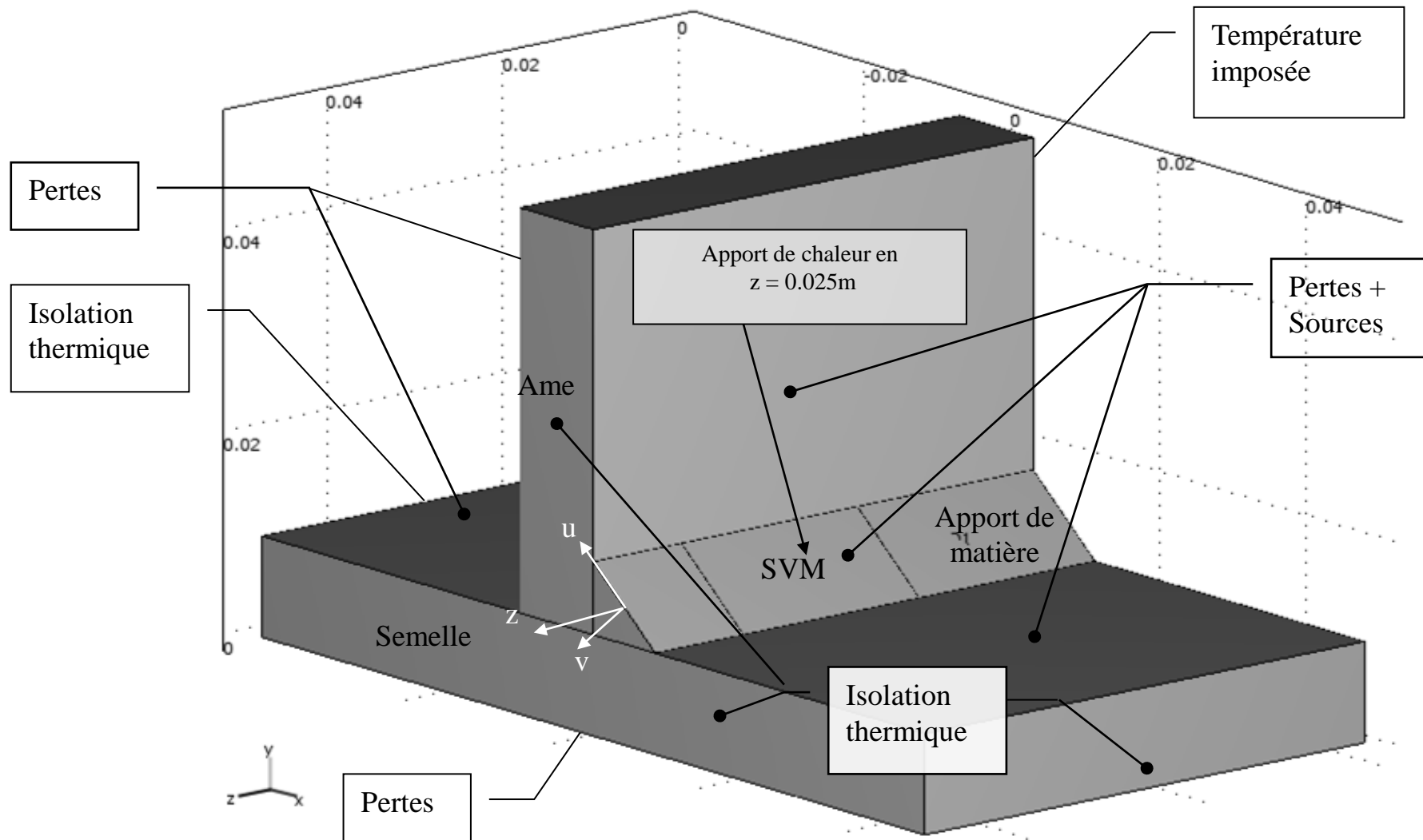


Figure : Géométrie et conditions aux limites – Soudage en T.

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*)

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

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

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

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

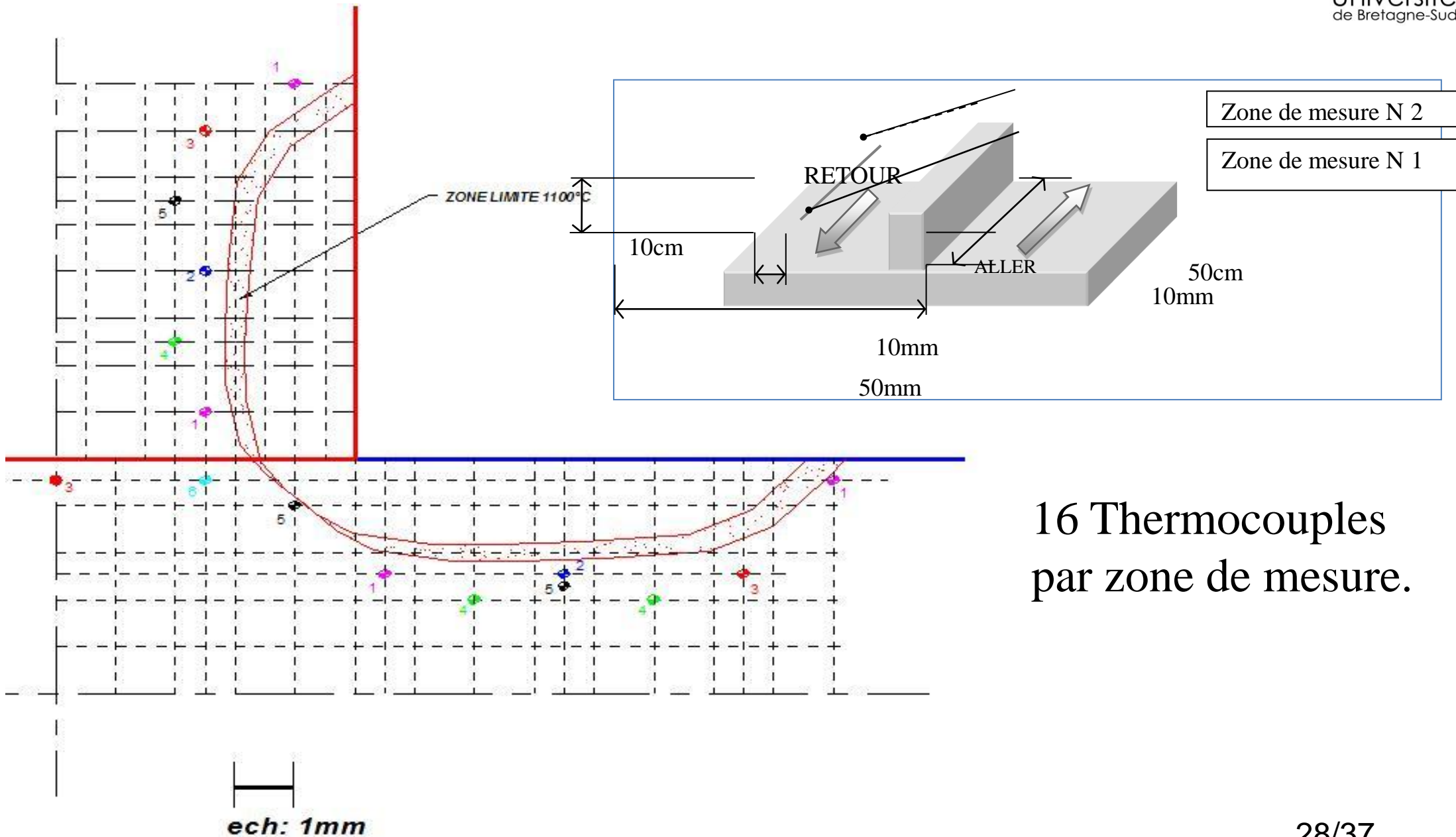
Pour une source de type "CIN":

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

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



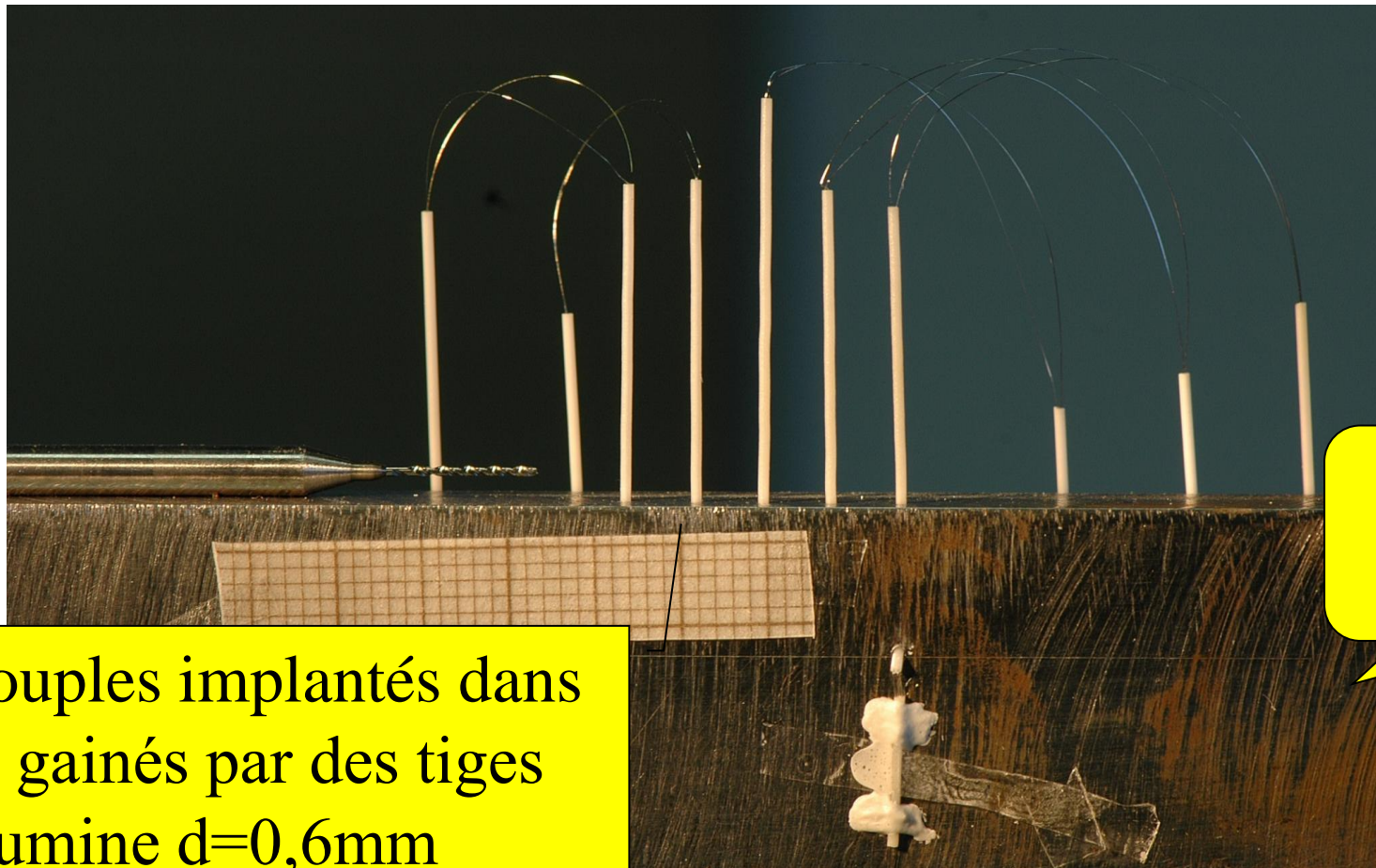
Instrumentation du soudage en T



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 ($\Delta=4\text{mm}$)

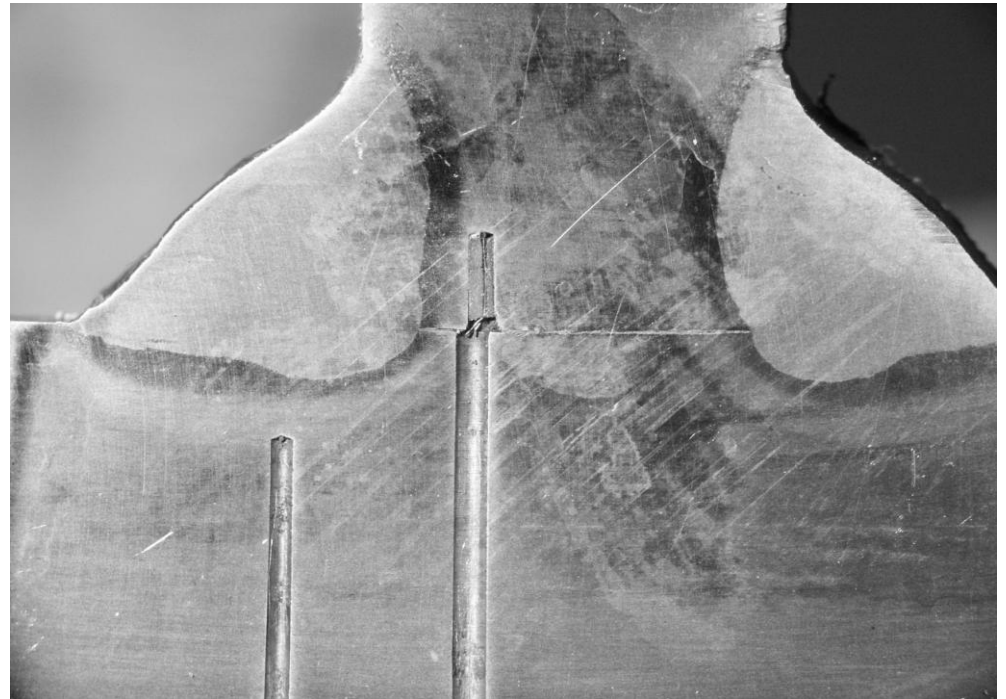
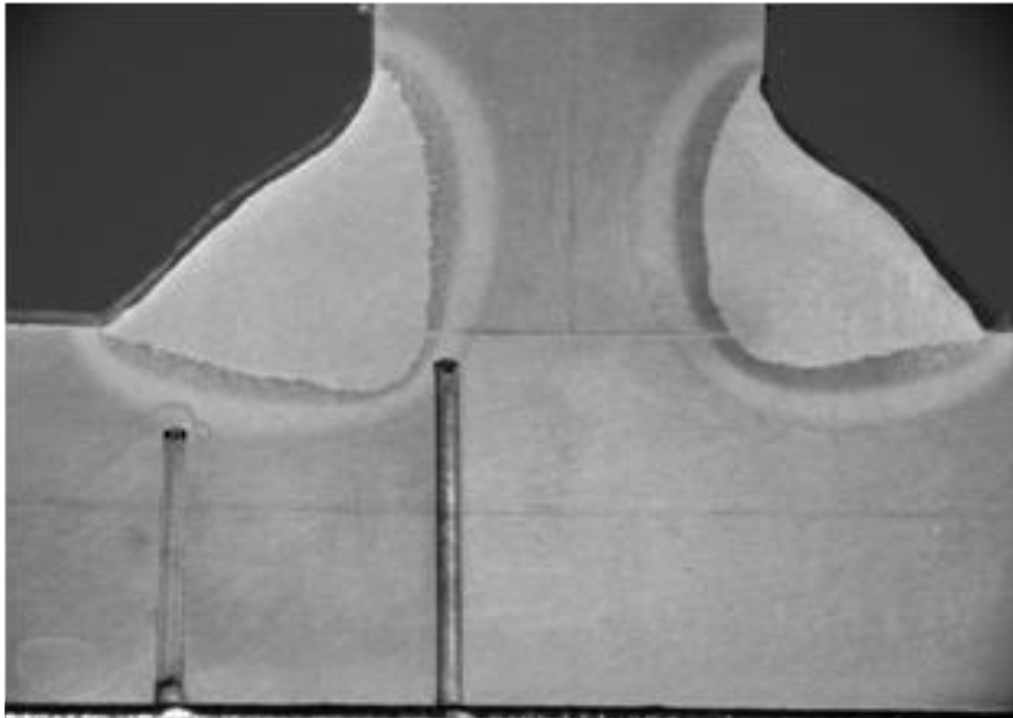


ame

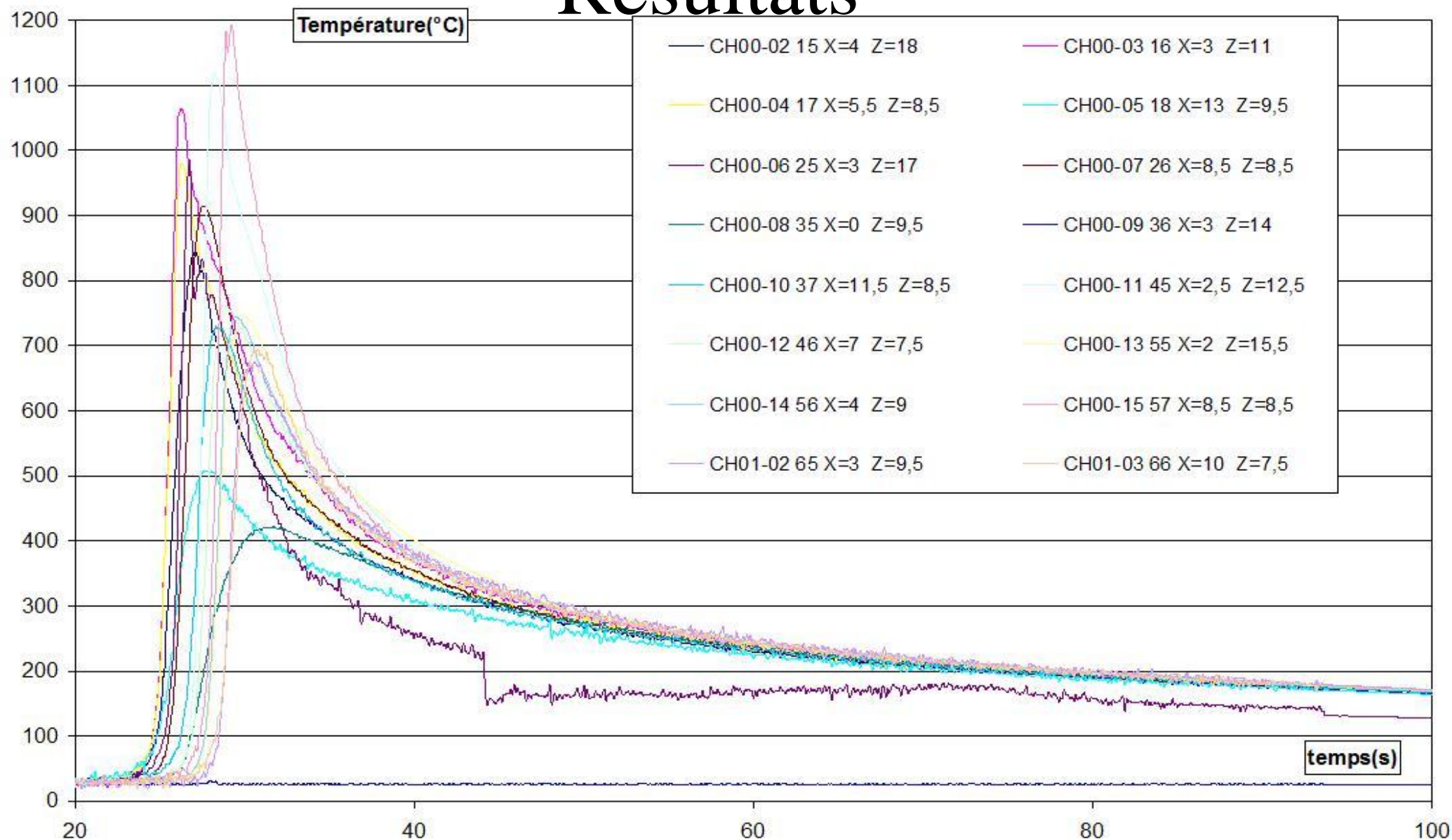
Thermocouples implantés dans l'ame et gainés par des tiges d'alumine $d=0,6\text{mm}$

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 ?

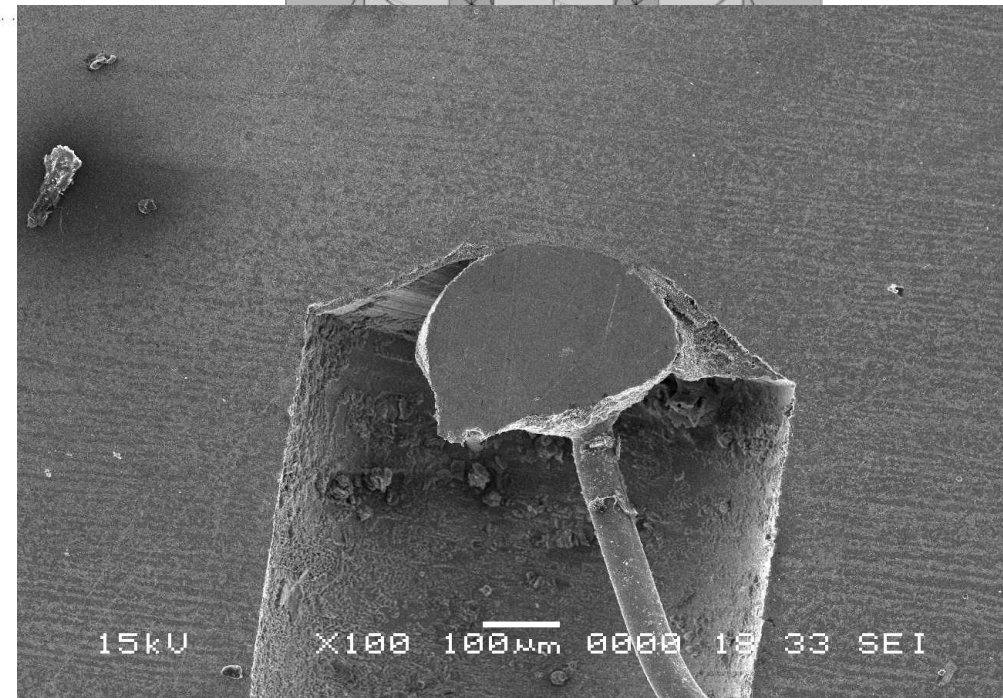
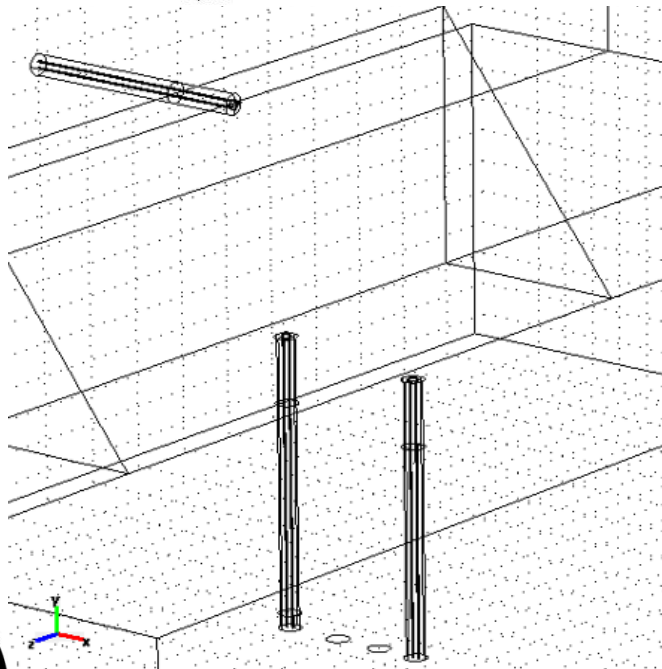
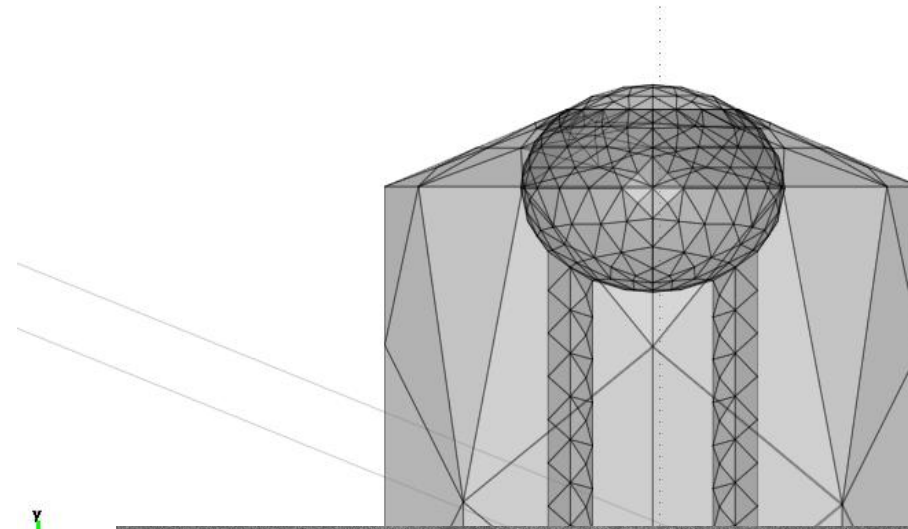
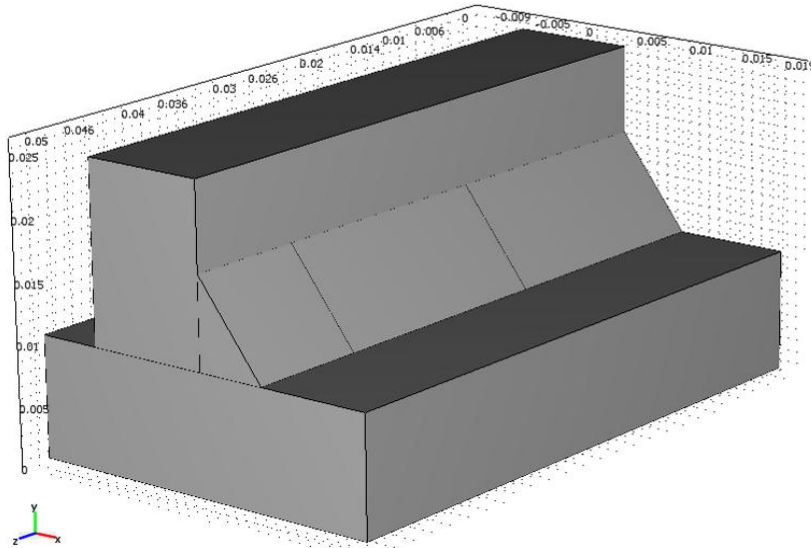
Plusieurs simulations:

- 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

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

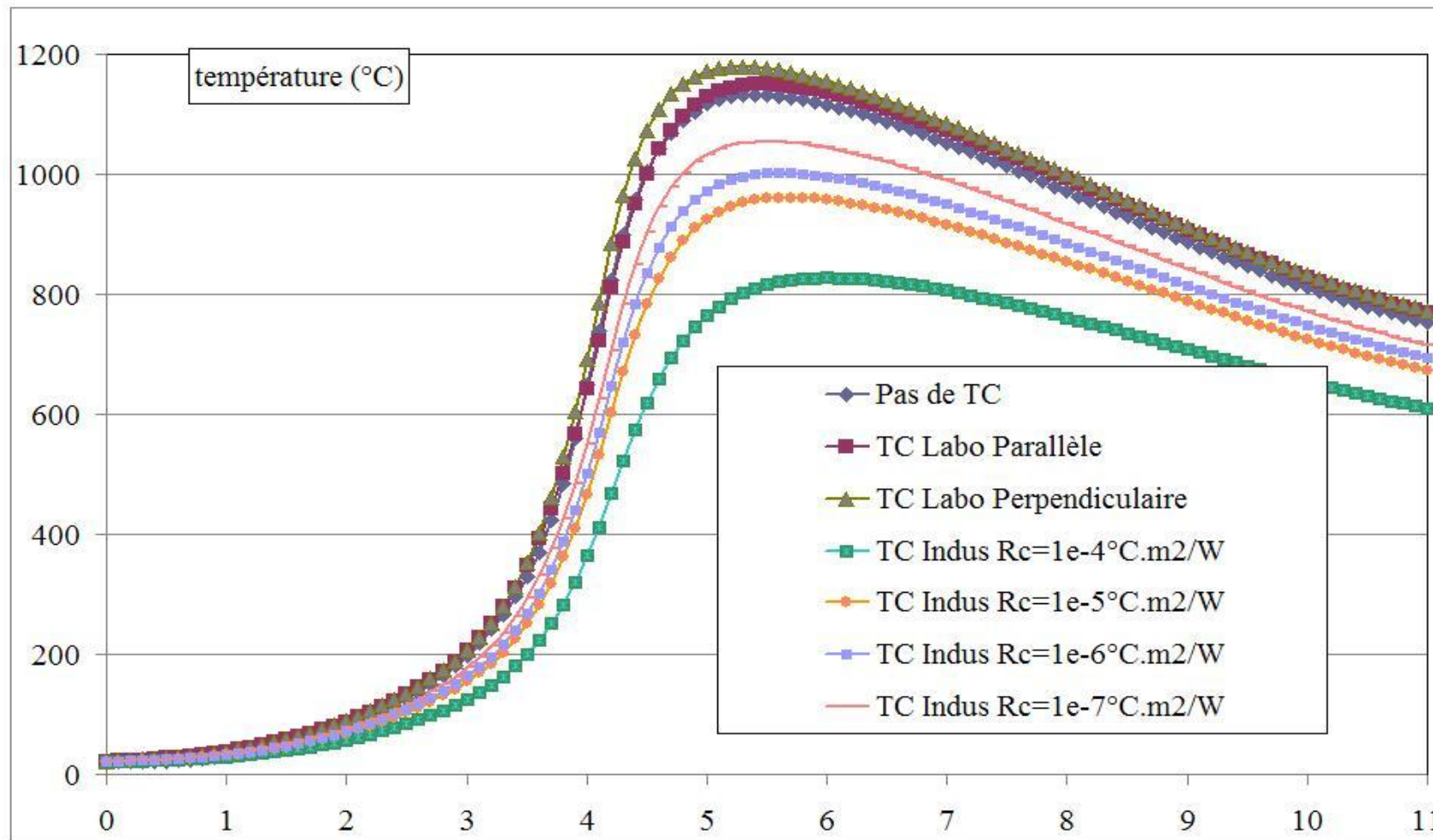


Analyse des erreurs

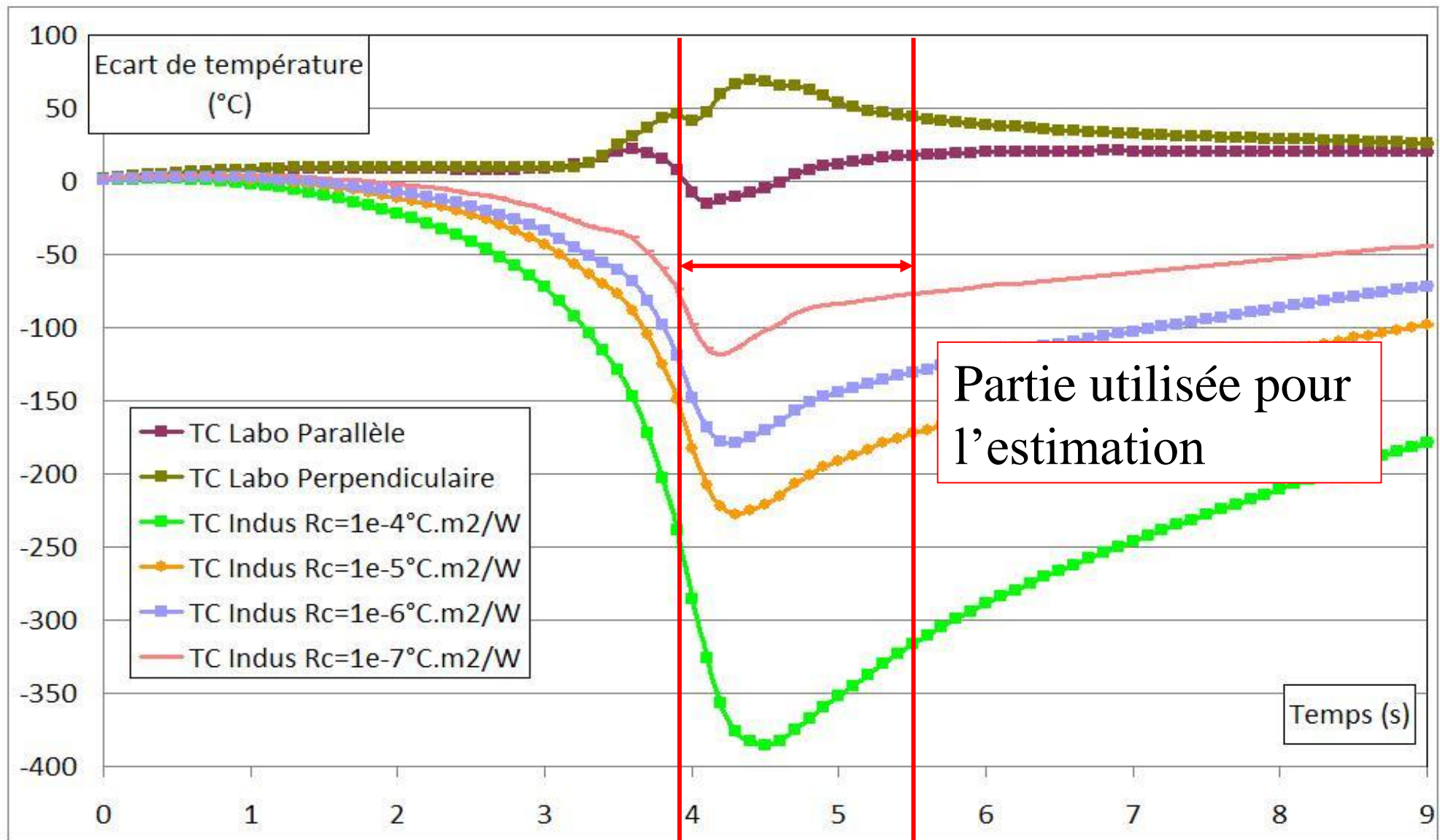


Analyse des erreurs

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



Analyse des erreurs



Partie utilisée pour l'estimation

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