

14<sup>ème</sup> colloque modélisation et simulation numérique du soudage  
Maison de la Mécanique, Paris (17 mars 2016)

# MODÉLISATION 3D DU SOUDAGE À L'ARC, À L'AIDE D'UNE MÉTHODE DE LEVEL-SET ET D'UNE TECHNIQUE D'ADAPTATION DE MAILLAGE AUTOMATIQUE

CHRISTEL PEQUET<sup>1</sup>, ELIE HACHEM<sup>2</sup>, STÉPHANE ANDRIETTI<sup>1</sup>

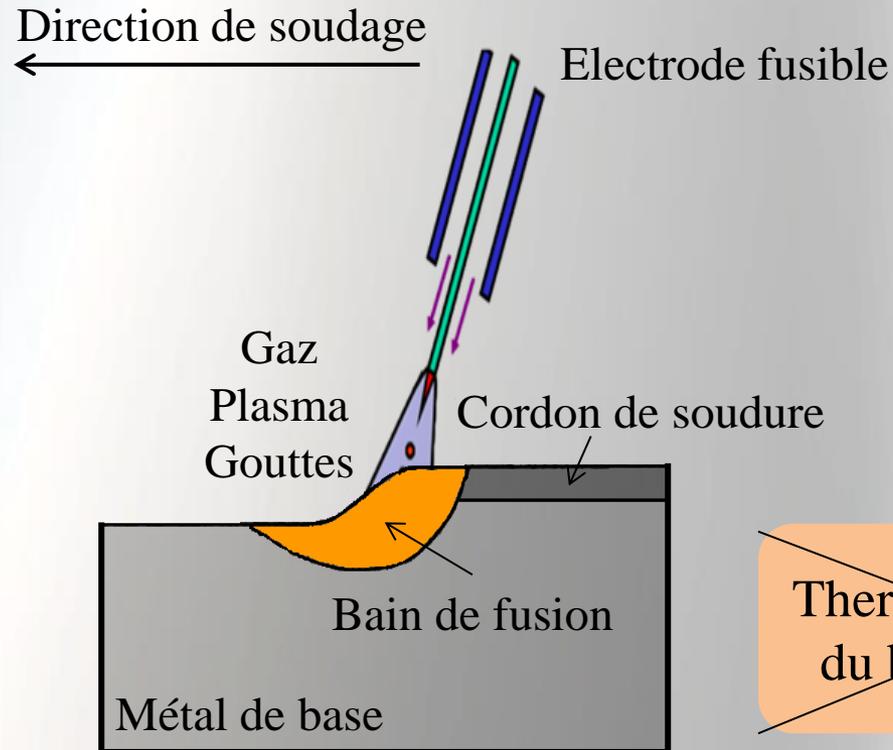
<sup>1</sup>Transvalor S.A., 694 avenue du Dr. Maurice Donat, 06255 Mougins Cedex, France.

<sup>2</sup>Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF), MINES ParisTech, Sophia Antipolis, France.



- INTRODUCTION
- MODÉLISATION DE L'APPORT DE MATIÈRE
- SUIVI DE L'INTERFACE AIR/BAIN DE FUSION
- ADAPTATION DE MAILLAGE
- EXEMPLES D'APPLICATION
- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

# INTRODUCTION



~~Plasma d'arc~~

Chauffage  
Refroidissement  
Solidification

Contraintes  
Déformations

Formation du  
cordon de soudure

~~Thermohydraulique  
du bain de fusion~~

↓

Ecoulement  
laminaire dans le  
bain de fusion

# MODÉLISATION DE L'APPORT DE MATIÈRE

Apport de matière  $\Rightarrow$  cylindre,  $Cyl_{ap}$ , de rayon  $r$  et de hauteur  $H$ <sup>[1,2,3,4]</sup> :

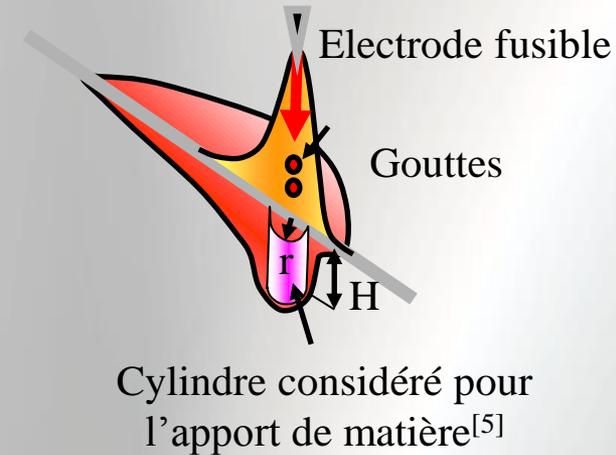
$$r = \left( \frac{3 \rho_{fil} (T_0) r_{fil}^2 v_{fil}}{4 f_{gou} \rho_{fil} (T_{gou})} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$H = -\frac{-2\gamma}{r_{gou} \rho (T_{gou}) g} + 2 \sqrt{\frac{-2\gamma}{r_{gou} \rho (T_{gou}) g} + \frac{r_{gou} v_{gou}^2}{24g}}$$

Avec,

$$f_{gou} = \frac{-243,44}{1 + \exp\left(\frac{I - 291,086}{6,06437}\right)} + 323,506 - 0,874 I + 0,0025 I^2$$

$$v_{gou} = \sqrt{-0,33692 + 0,00854 \left(\frac{I}{2r_g}\right) + 2 \underbrace{a_{gou} L_{arc}}_{\text{Valeurs expérimentales estimées}}}$$



1. J.-F. Lancaster, The Physics of welding. *Physics in technology*, 15 :73-79, 1984

2. S. Kumar and S.C. Bhaduri, Three-dimensional finite element modelling of gas metal-arc welding. *Meta. Trans. B*, 25 :435-441,

# MODÉLISATION DE L'APPORT DE MATIÈRE

Soit  $C(K) = \{K \in \Omega \text{ tel que } T(K) \geq T_L \text{ et } K \in Cyl_{ap}\}$

Contribution d'un élément  $K \in C(K)$  :

$$\int_{\Omega_K} p^* \left( \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} - \bar{\theta} \right) d\Omega_K$$

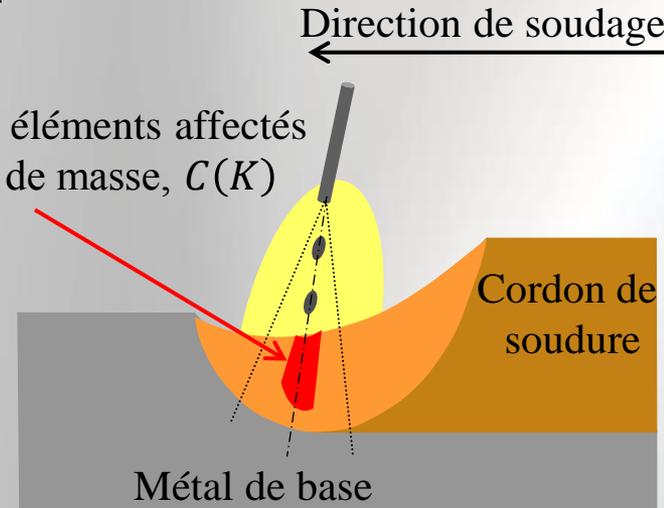
Avec,

$$\bar{\theta} = Q / \sum_{K \in C(K)} V_{\Omega_K} \quad \text{Taux de dilatation moyen (s}^{-1}\text{)}$$

$Q$  : débit volumique de métal d'apport ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$V_{\Omega_K}$  : volume de l'élément  $K$

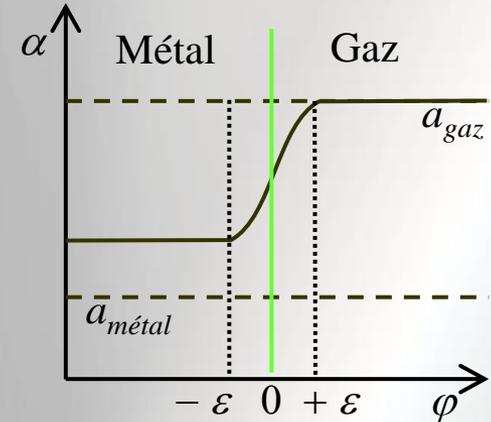
Ensemble des éléments affectés par l'apport de masse,  $C(K)$



3. C.H. Kim, W. Zhang, and T. DebRoy, Modelling of temperature field and solidified surface profile during gas/metal arc fillet welding. *Journal of Applied Physics*, 94 :2667-2679, 2003
4. Q. Lin, X. Li and S.W. Simpson, Metal transfer measurements in gas metal arc welding. *Journal of Applied Physics*, 34 :347-357, 2001
5. O. Desmaison, PhD thesis, Mines ParisTech (2013)

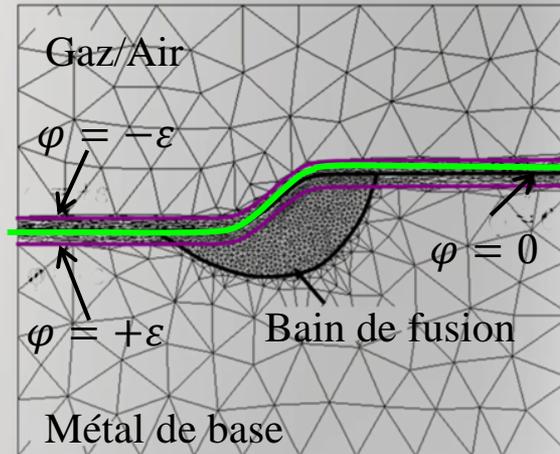
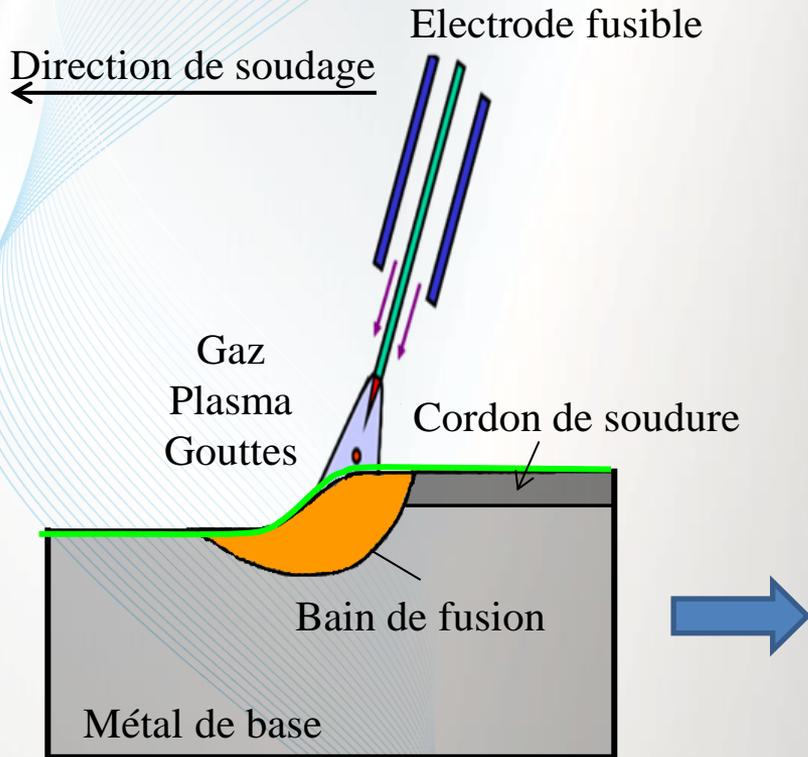
# SUIVI DE L'INTERFACE AIR/MÉTAL

- Approche eulérienne avec une méthode de Level-set<sup>[6]</sup>
  - Extension du domaine de calcul à une zone « air »
  - Fonction distance signée à l'interface air/métal,  $\varphi$
  - Propriétés moyennées sur l'intervalle  $[-\varepsilon, \varepsilon]$



Loi de mélange :

$$\alpha = [1 - H(\varphi)]\alpha_{\text{métal}} + H(\varphi)\alpha_{\text{gaz}}$$

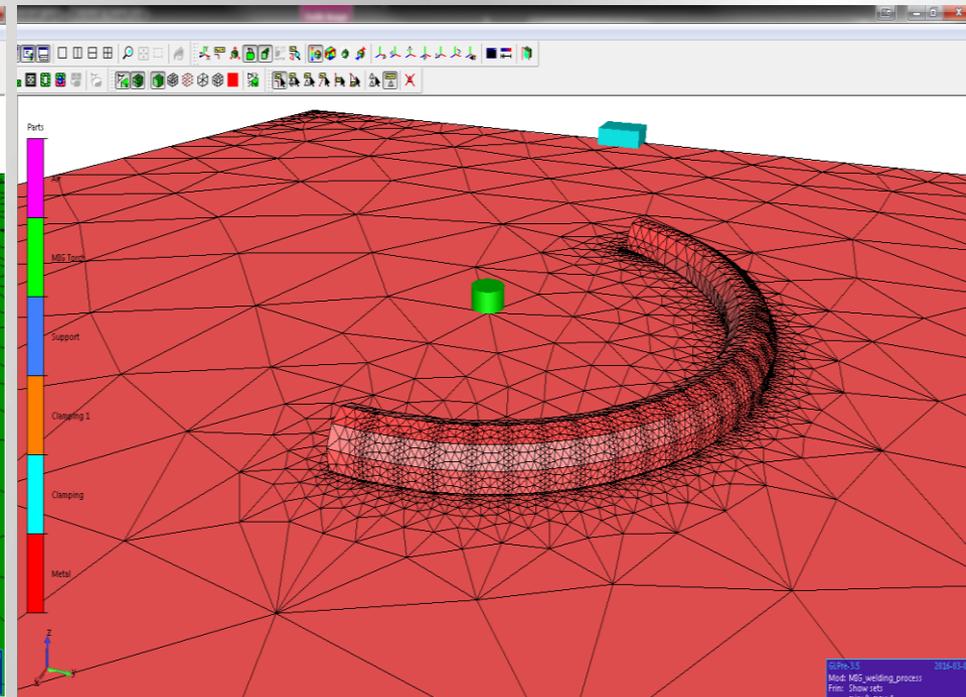
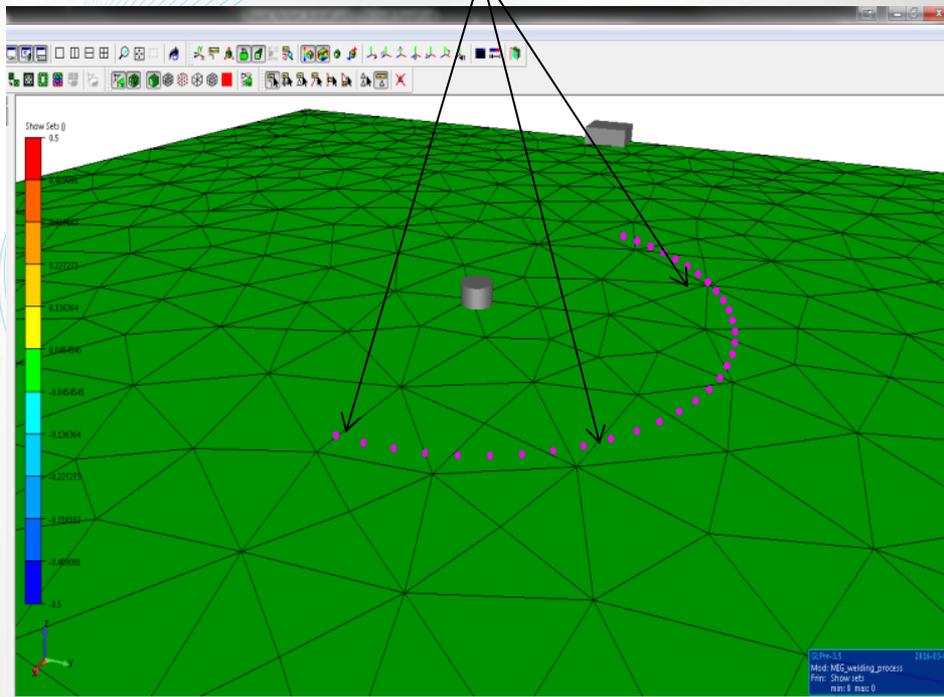


# SUIVI DE L'INTERFACE AIR/MÉTAL

- Définition géométrique de la zone « air »
  - Région dans laquelle le cordon est susceptible de se former

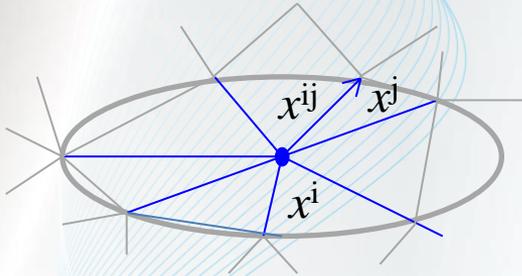
Trajectoire de la torche

Génération automatique  
du domaine de calcul « métal + air »



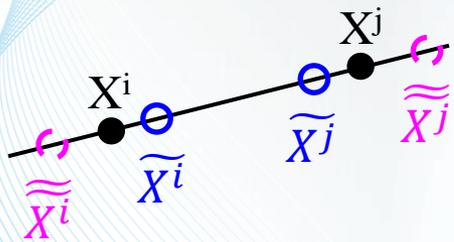
# ADAPTATION DE MAILLAGE

- Candidats pour les directions



$$X^i = \frac{1}{|\Gamma(i)|} \left( \sum_{j \in \Gamma(i)} x^{ij} \otimes x^{ij} \right) \quad \text{Tenseur de distribution des longueurs au nœud } x^i$$

- Contrôle de la taille de chaque arête  $x^{ij}$  via un facteur d'étirement,  $s_{ij}$



$$\widetilde{x}^{ij} = s_{ij} x^{ij}$$

- $s_{ij}$  piloté par un estimateur d'erreur

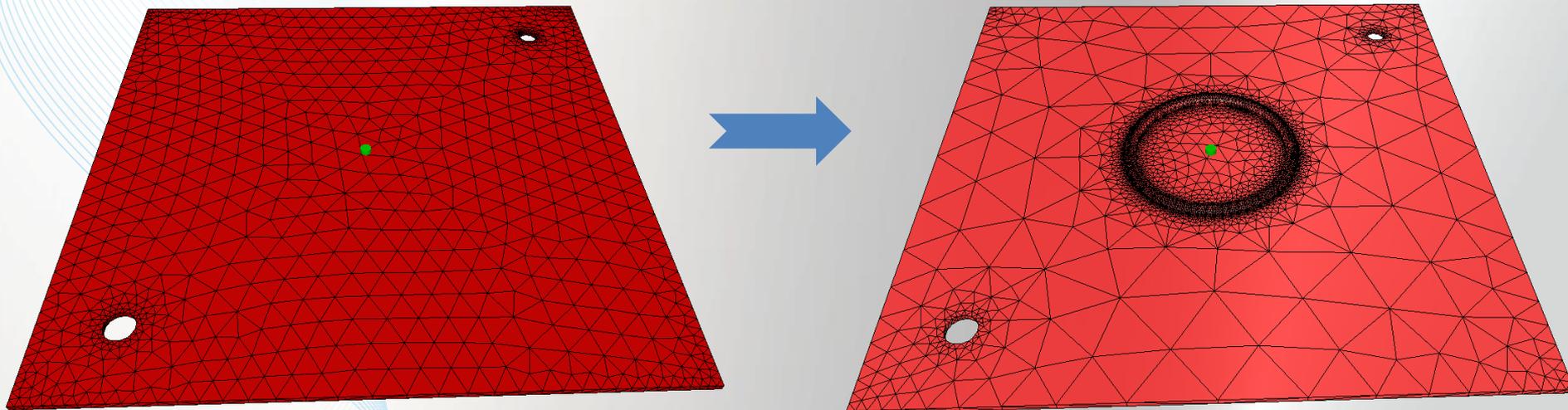
$$s_{ij} = \frac{(\sum_i n^i(1))^{\frac{1}{d}}}{N^{\frac{1}{d}}} e_{ij}^{-1/2}$$

$$\Rightarrow \widetilde{M}^i = \frac{1}{d} (\widetilde{X}^i)^{-1}$$

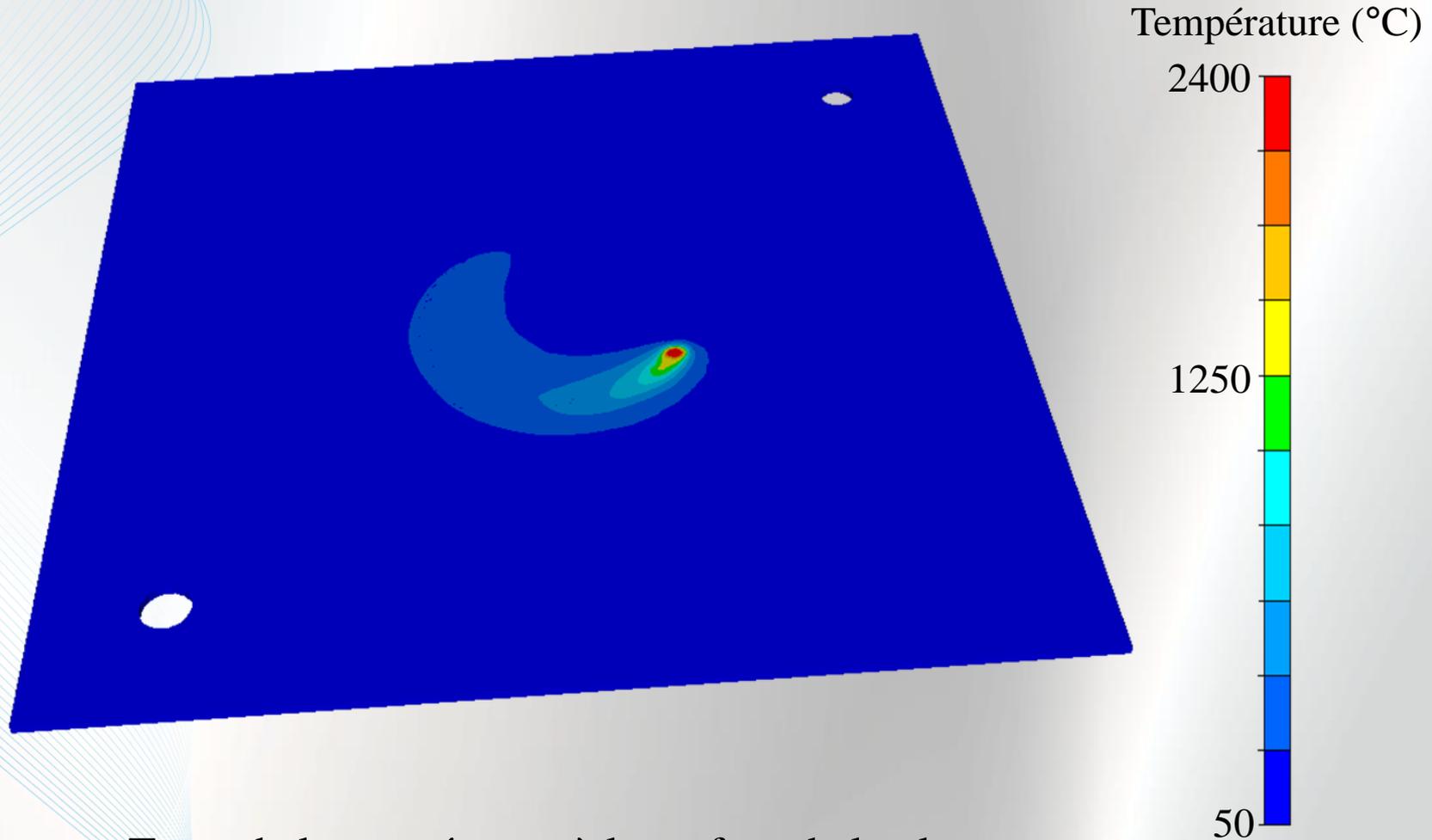
## EXEMPLES D'APPLICATION

- Soudage sur une plaque carrée de côté 200mm, et d'épaisseur 2mm
    - Trajectoire circulaire de la torche
    - Matériau acier 18Mn5
- $$T_S = 1418^\circ\text{C}, T_L = 1508^\circ\text{C}$$
- Energie 2kW
  - Débit volumique de matière  $10^{-8}\text{m}^3\text{s}^{-1}$
  - Source de chaleur surfacique de type Gaussien

Génération automatique du  
domaine de calcul « air + métal »

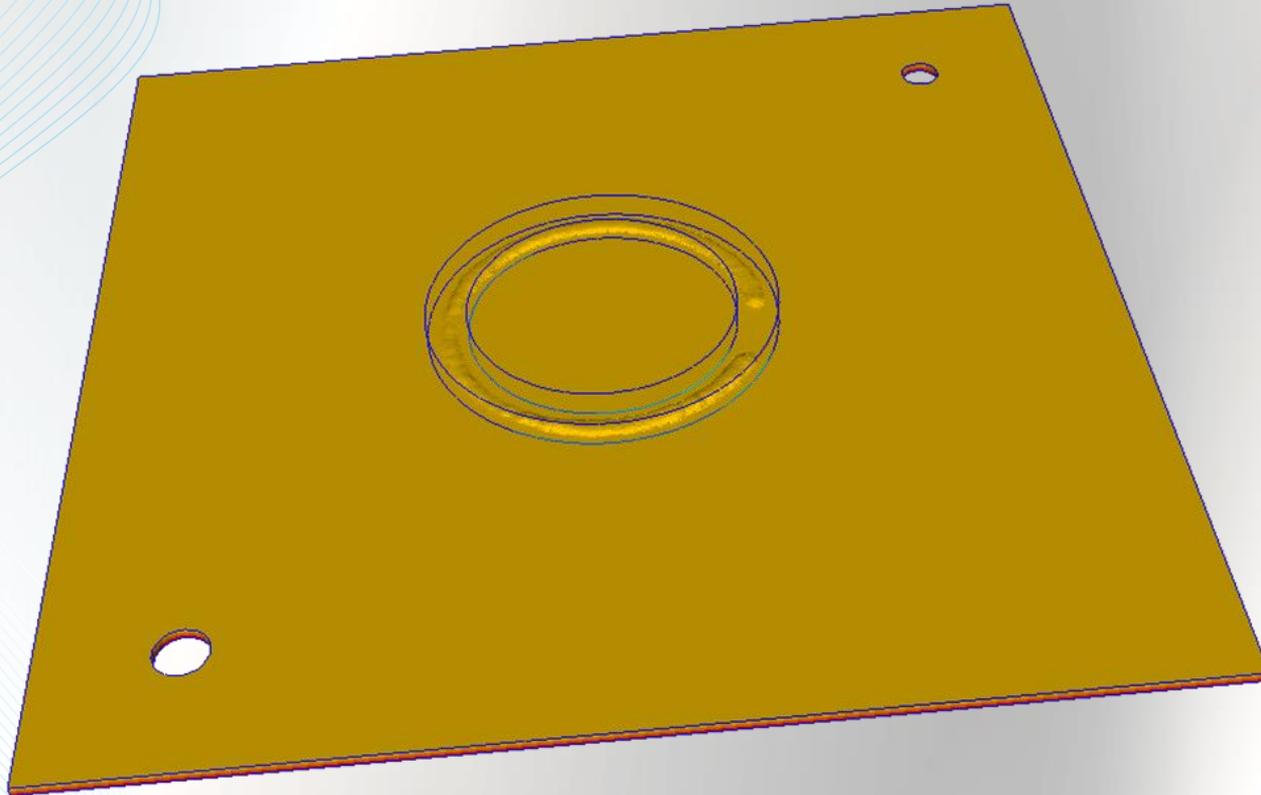


# EXEMPLES D'APPLICATION



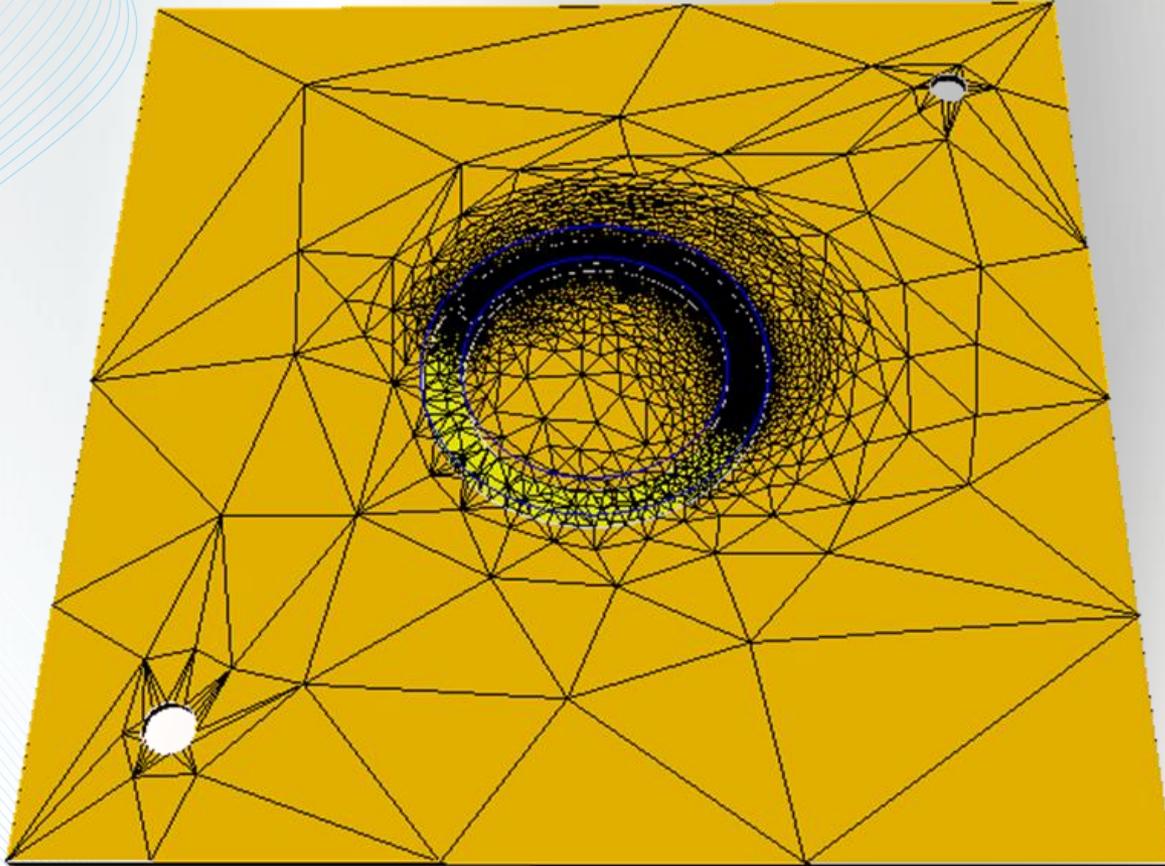
Trace de la température à la surface de la plaque

# EXEMPLES D'APPLICATION



Formation du cordon de soudure

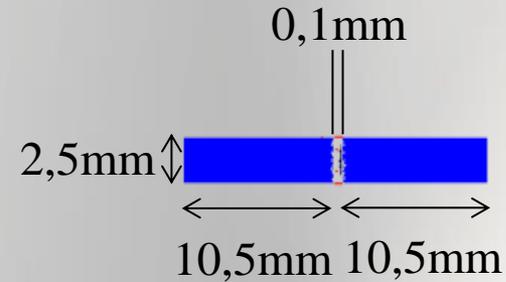
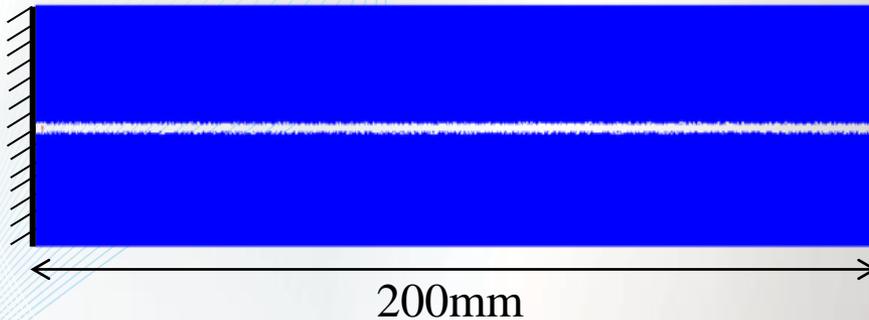
# EXEMPLES D'APPLICATION



Adaptation de maillage

## EXEMPLES D'APPLICATION

- Soudage de deux plaques présentant un jeu d'assemblage



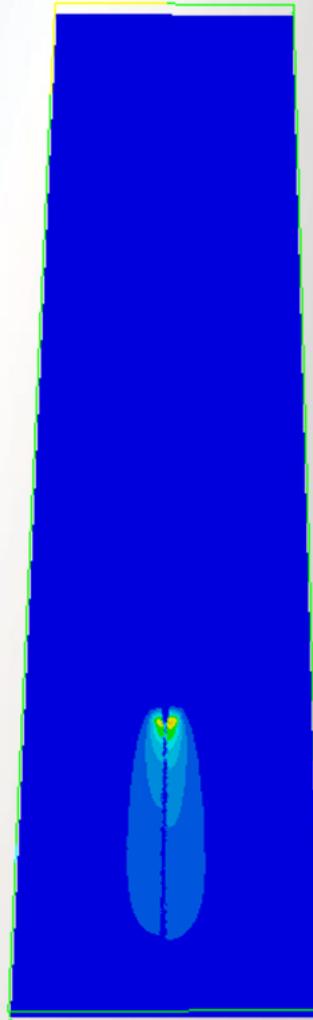
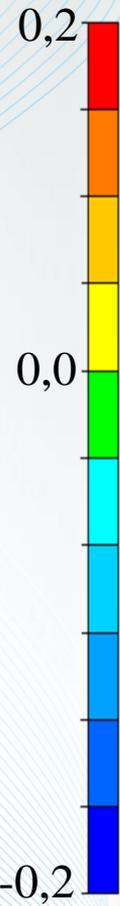
- Matériau acier X8CrNiSi25-20

$$T_S = 1425^{\circ}\text{C}, T_L = 1478^{\circ}\text{C}$$

- Energie 2kW
- Débit volumique de matière  $10^{-8}\text{m}^3\text{s}^{-1}$
- Source de chaleur volumique répartie uniformément dans un cylindre, de rayon 0,4mm et de hauteur 0,7mm

# EXEMPLES D'APPLICATION

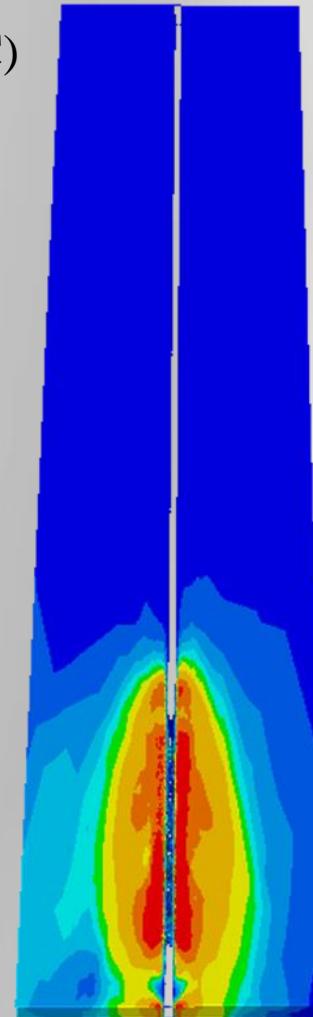
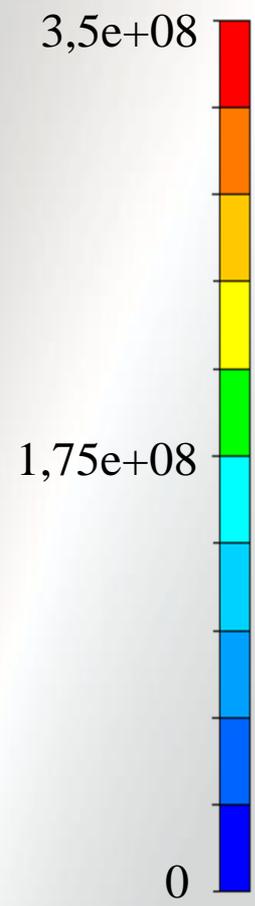
Déplacement  
transversal (mm)



Température (°C)



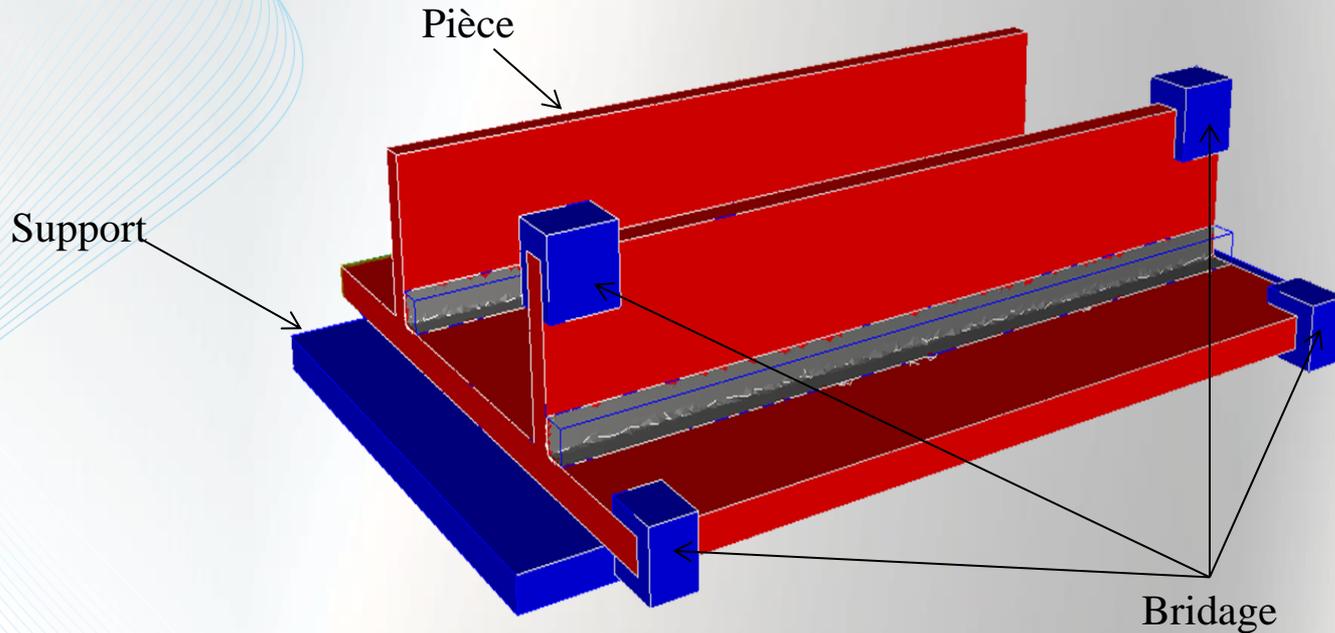
Contraintes de  
von Mises (Pa)



## EXEMPLES D'APPLICATION

### ■ Soudage en angle

*(L= 300mm, l= 250mm, H=60mm, épaisseur = 10mm)*



○ Matériau acier 18Mn5

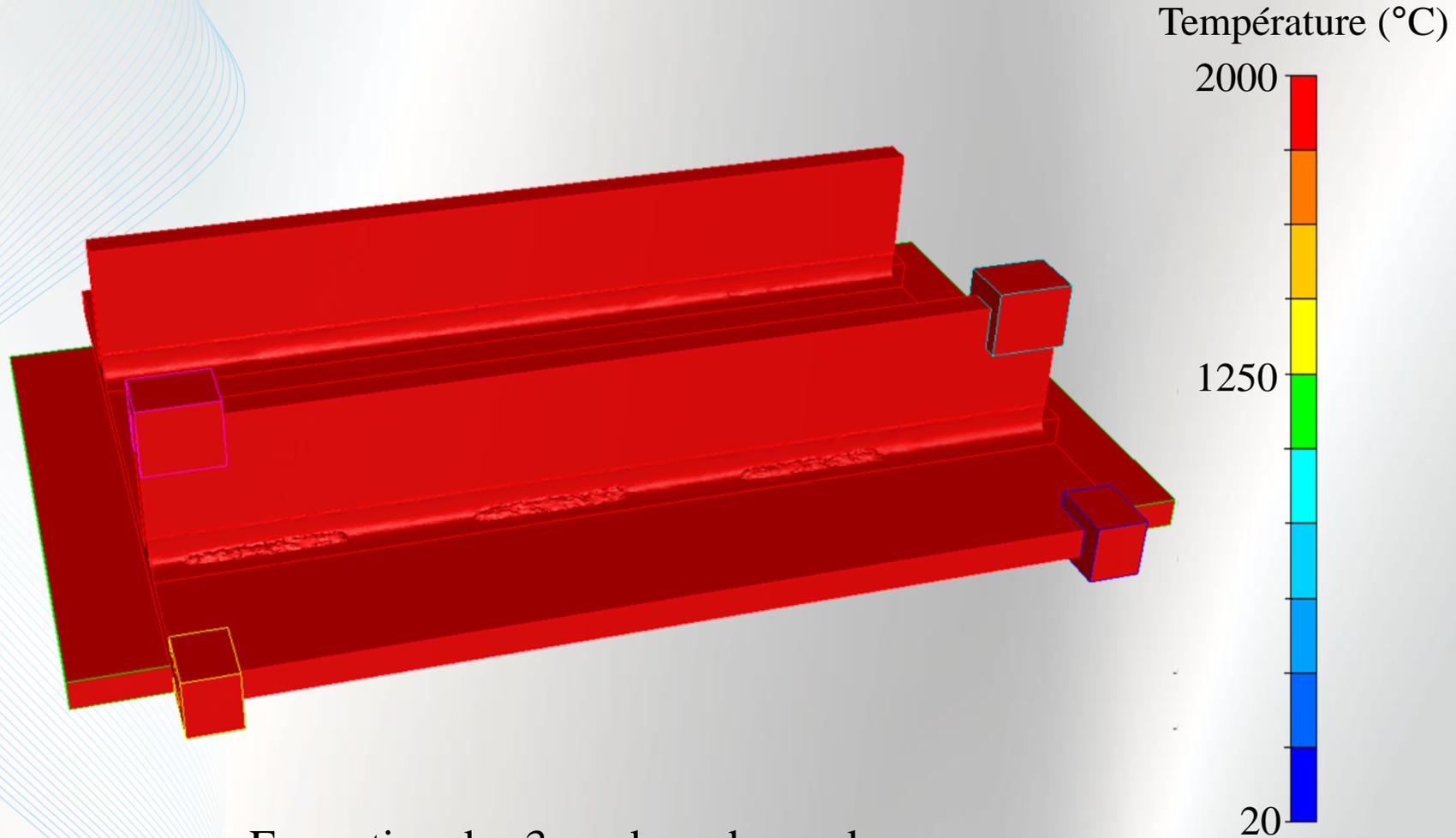
$$T_S = 1418^\circ\text{C}, T_L = 1508^\circ\text{C}$$

○ Energie 2kW

○ Débit volumique de matière  $10^{-8}\text{m}^3\text{s}^{-1}$

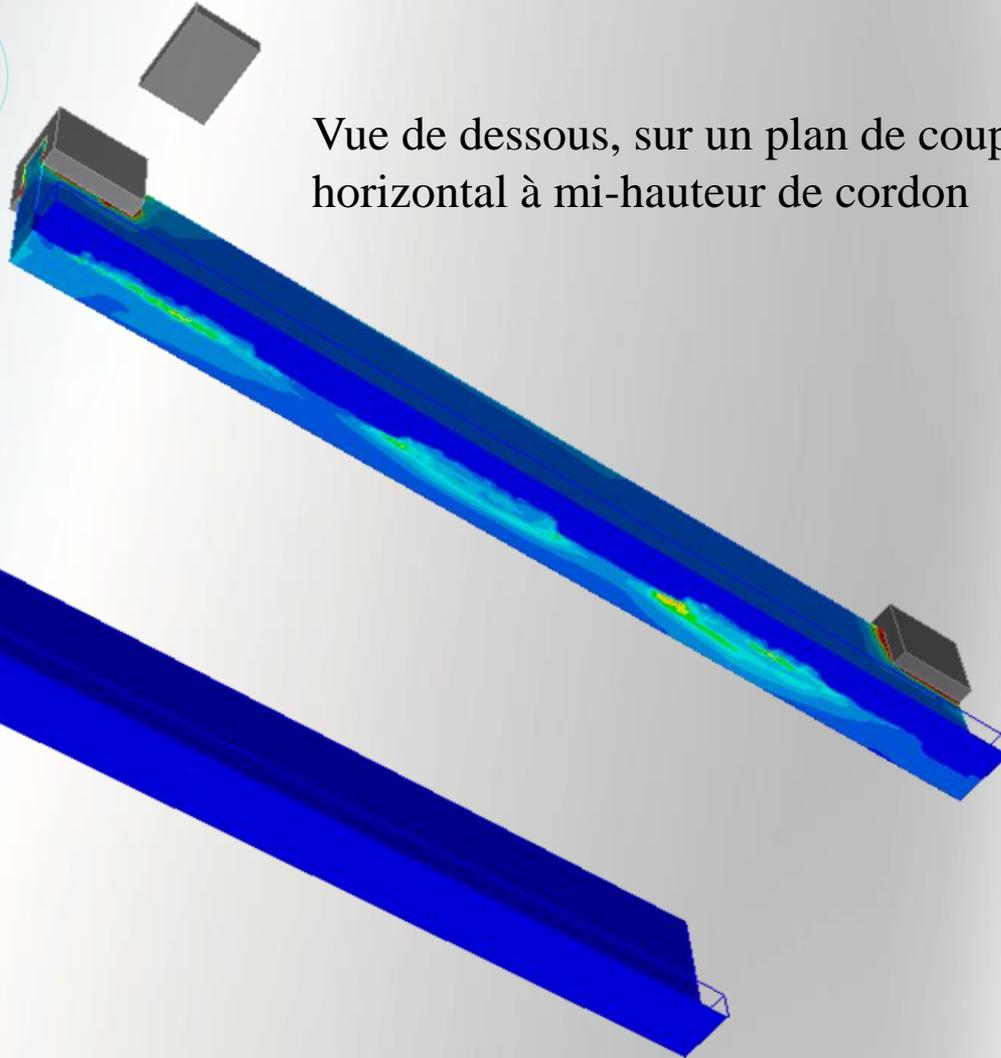
○ Source de chaleur surfacique de type Gaussien

# EXEMPLES D'APPLICATION



Formation des 3 cordons de soudure

# EXEMPLES D'APPLICATION



Vue de dessous, sur un plan de coupe horizontal à mi-hauteur de cordon

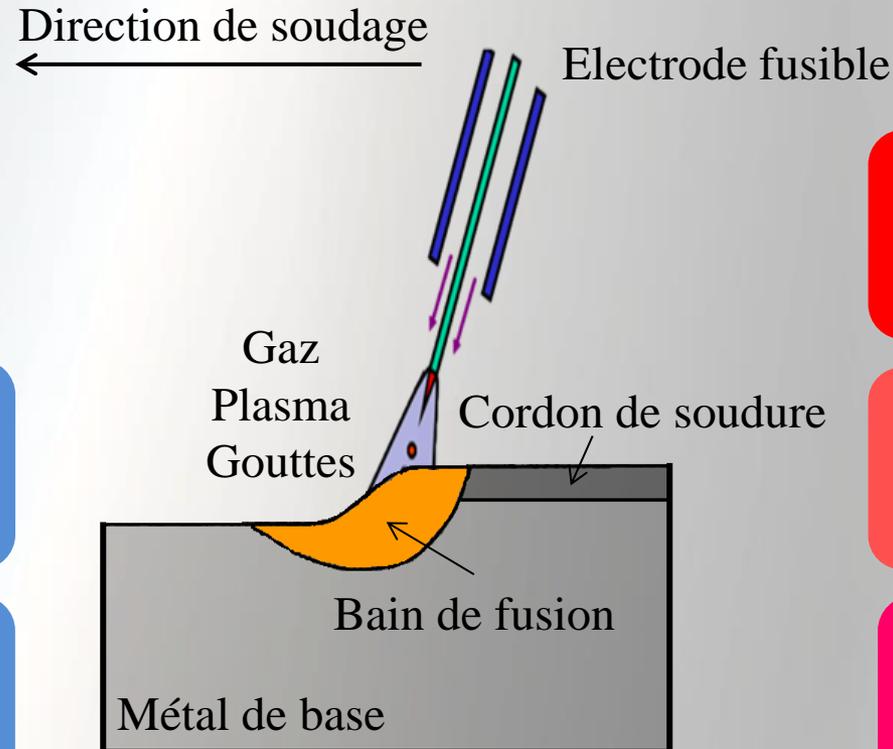
Contraintes de von Mises (Pa)

3,5e+08

1,75e+08

0

# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES



Chauffage  
Refroidissement  
Solidification

Contraintes  
Déformations

Formation du  
cordon de soudure

Ecoulement  
laminaire dans le  
bain de fusion

**Validations  
expérimentales**

**TTT  
Microstructures**

**Multimatériaux**

MERCI  
POUR VOTRE ATTENTION

**TRANSWELD® 1.0**

**CONTACT :**

☎ +33 (0)4 9292 4200

✉ [marketing@transvalor.com](mailto:marketing@transvalor.com)

<http://www.transvalor.com/>