



**HAL**  
open science

## Simulation numérique des positions de soudage dans le procédé à l'arc TIG

Minh Chien Nguyen, Olivier Asserin, Stephane Gounand, Philippe Gilles,  
Marc Medale

► **To cite this version:**

Minh Chien Nguyen, Olivier Asserin, Stephane Gounand, Philippe Gilles, Marc Medale. Simulation numérique des positions de soudage dans le procédé à l'arc TIG. Club Cast3M 2015, Nov 2015, Montrouge, France. hal-04104045

**HAL Id: hal-04104045**

**<https://hal.science/hal-04104045>**

Submitted on 23 May 2023

**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.

# Simulation numérique des positions de soudage dans le procédé à l'arc TIG

Minh Chien NGUYEN<sup>1,3,\*</sup>, Olivier ASSERIN<sup>1</sup>, Stéphane GOUNAND<sup>1</sup>,  
Philippe GILLES<sup>2</sup> et Marc MEDALE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CEA Saclay, DEN, DANS, DM2S, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

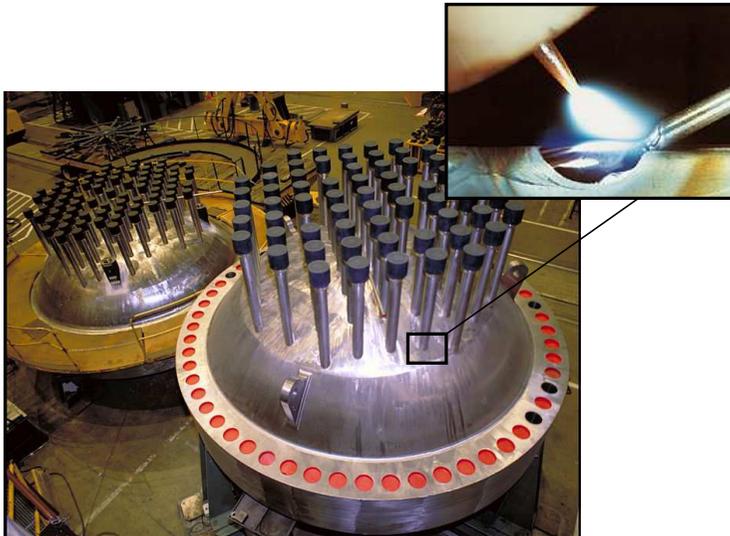
<sup>2</sup>AREVA NP, F-92084, Paris La Défense, France 

<sup>3</sup>Aix Marseille Université, IUSTI, UMR 7343 CNRS, F-13453, Marseille, France 

\*minhchienxf@gmail.com

le 27 novembre 2015

## Contexte et enjeux



PWR Reactor Vessel Head ©NRC

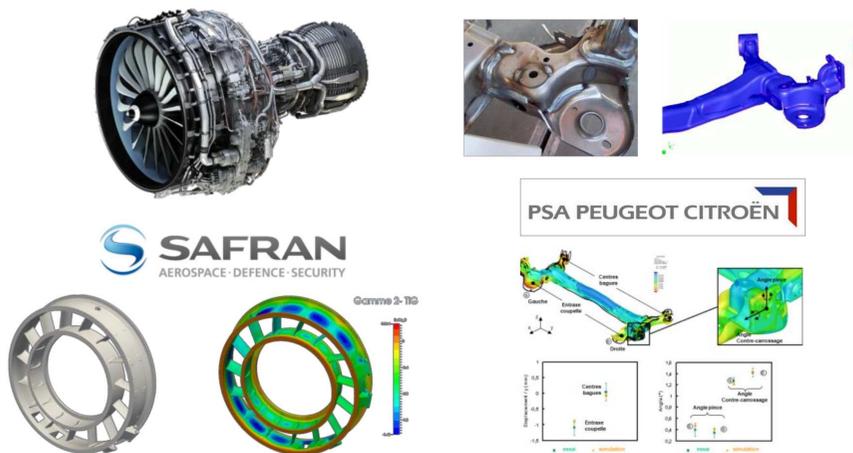
### L'industriel

Il s'agit d'accroître la **productivité** par :

- l'amélioration de la **performance** du process (*optimisation de la gamme d'assemblage*)
- la réduction des **coûts** (*moins de mise au rebut*)

### Le soudage

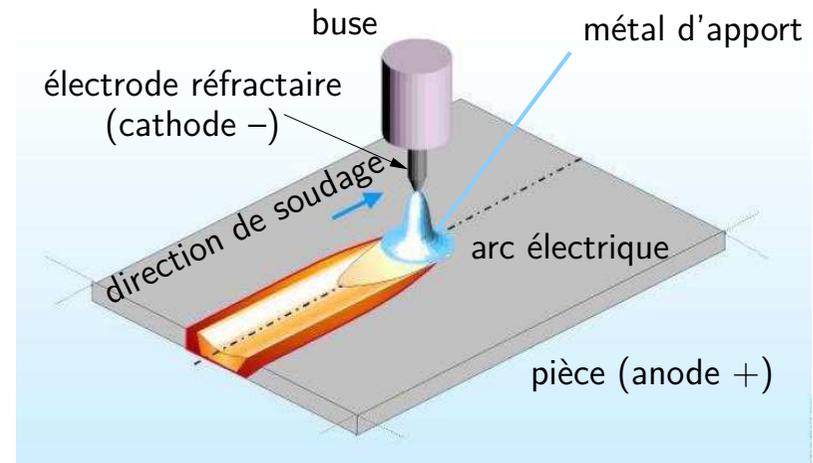
- intervient dans nombreux secteurs (aéronautique, **nucléaire**, automobile ...)
- garantir la qualité, la fiabilité ...  
→ procédé à l'arc **Tungsten Inert Gas**



## *Procédé de soudage à l'arc TIG*



Procédé Tungsten Inert Gas (TIG)



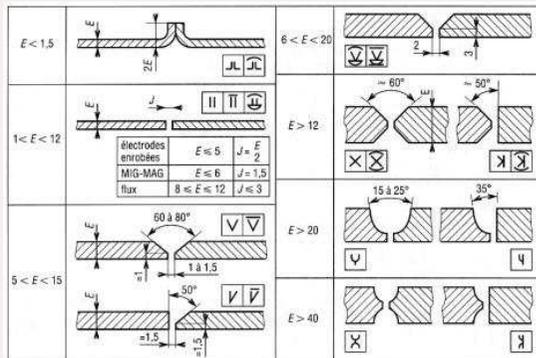
Modélisation du procédé TIG

### Soudage TIG

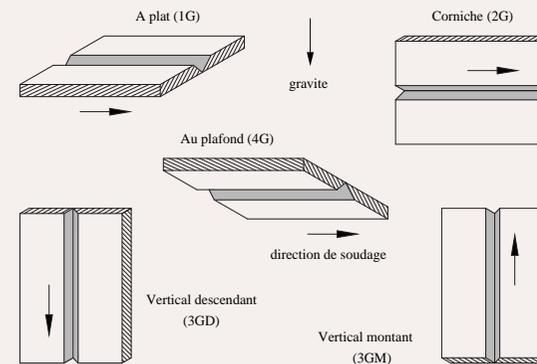
- électrode non fusible
- paramètres d'entrée : tension, intensité, vitesse de défilement, hauteur d'arc
- paramètres de sortie : forme du bain de soudage, écoulement, température

# Défis de simulation

## Différents jeux d'assemblage



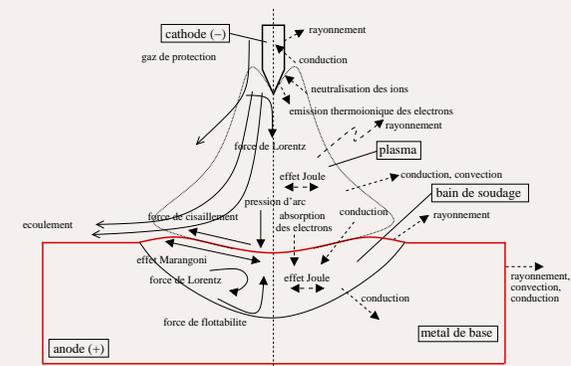
## Positions de soudage



## Métal d'apport

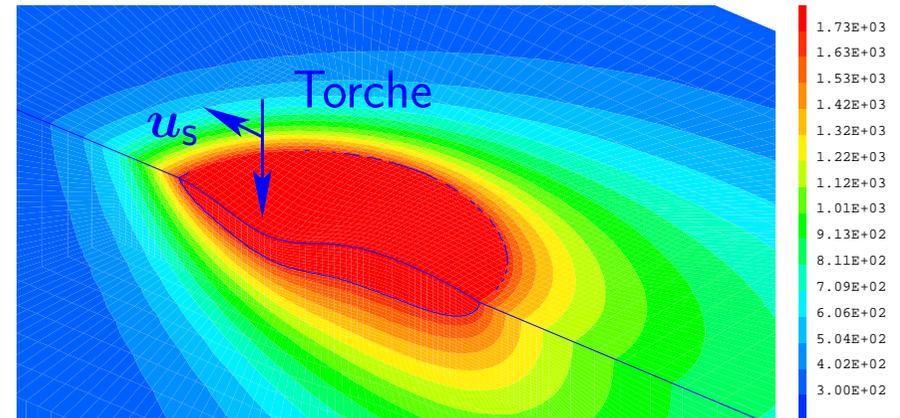


## Nombreux phénomènes physiques

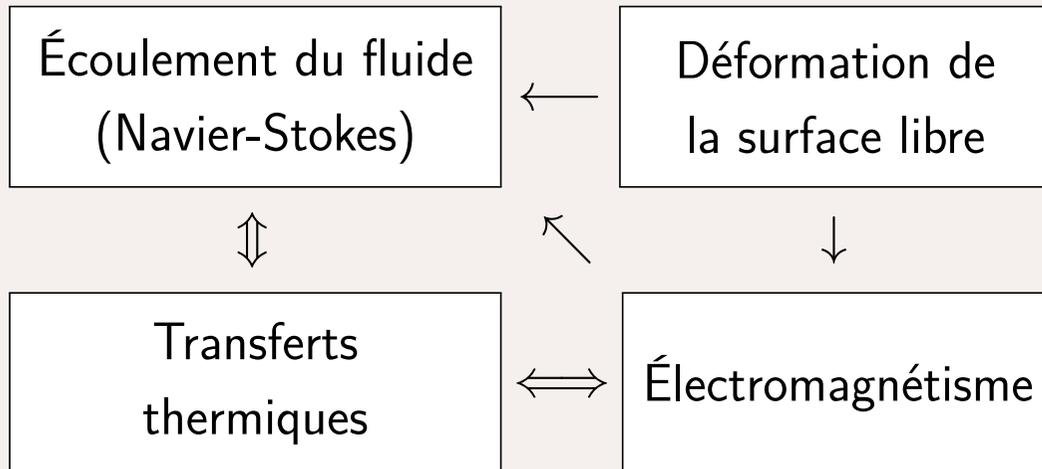


## Approche & Objectifs

Modèle bain 3D



### Approche multiphysique



- les données d'entrée sont les paramètres opératoires du procédé : modèle direct
- permet de limiter le nombre d'expériences préalables

### Objectifs

- effet des paramètres opératoires
- phénomène électromagnétique
- positions de soudage
- apport de matière
- logiciel WPROCESS (MUSICAS)

## Sommaire

### 1 Modèle

- Choix du modèle physique
- Équations à résoudre
- Modèle numérique

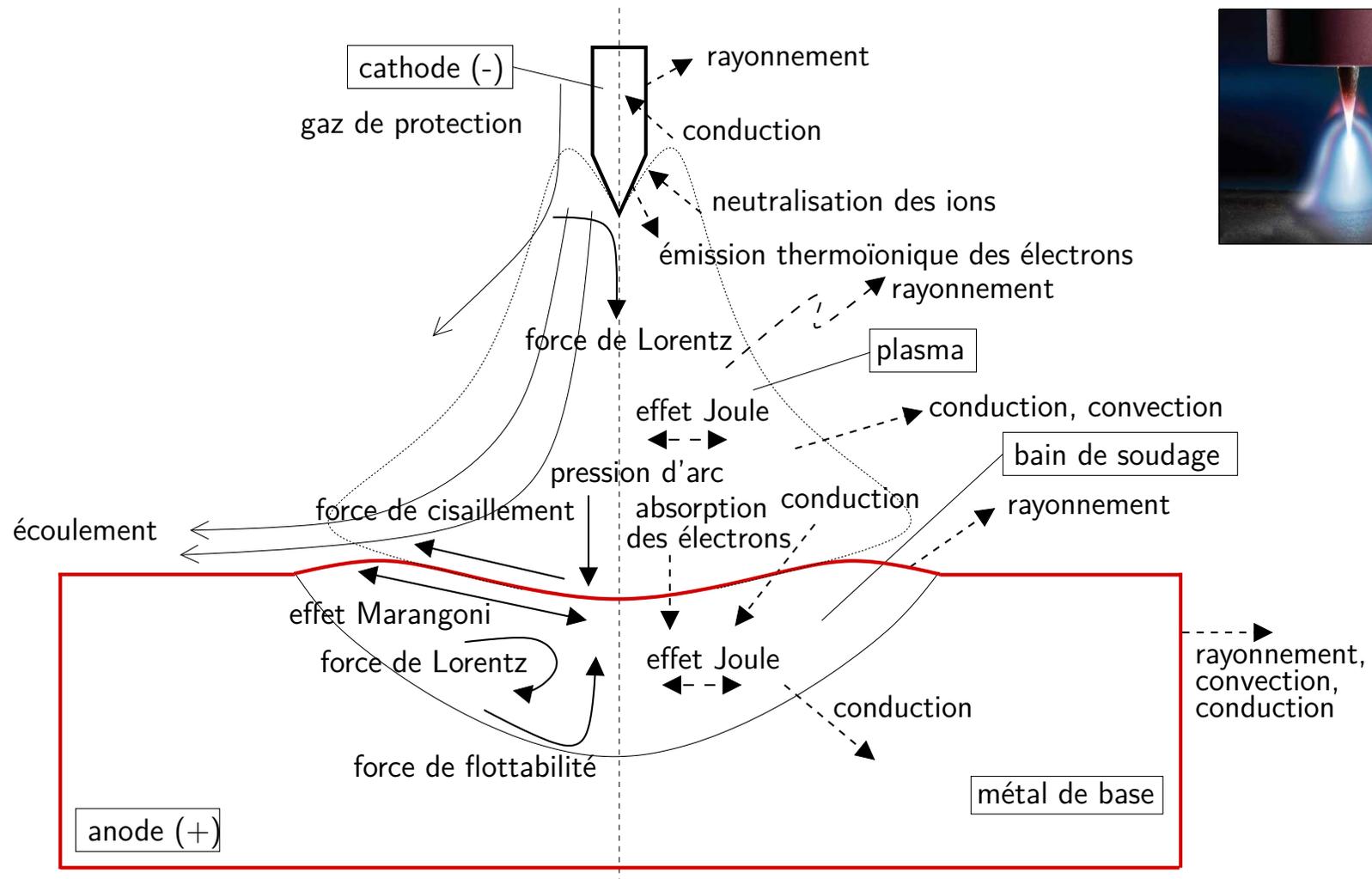
### 2 Comparaison à l'expérience

### 3 Résultats et discussion

- Influence de l'effet Marangoni
- Bilan des puissances mécanique et thermique
- Positions de soudage

### 4 Conclusions & Perspectives

*Modèle : Modèle physique (I)*



*Phénomènes physiques pris en compte [Brochard, 2009], [Kong, 2012]*

## *Modèle : Principales hypothèses (II)*

- Régime stationnaire
- Fluide Newtonien, écoulement incompressible et laminaire
- Approximation de Boussinesq
- Forme gaussienne pour les distributions de sources
- Vitesse de défilement constante, repère lié à la source pour écrire les équations
- Force de cisaillement non prise en compte
- Phase solide : équations de l'énergie et de l'électromagnétisme
- Phase liquide : toutes les équations

## Modèle : Équations de conservation (III)

### Modèle mathématique

- Navier-Stokes incompressible et énergie :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho(\nabla \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^t \mathbf{u}) + \mathbf{f}_{\text{Bou}} + \mathbf{f}_{\text{Lor}} + \mathbf{f}_{\text{Ext}}$$

$$\rho(\nabla h) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) = \nabla \cdot \lambda \nabla T + s_{\text{Joule}}$$

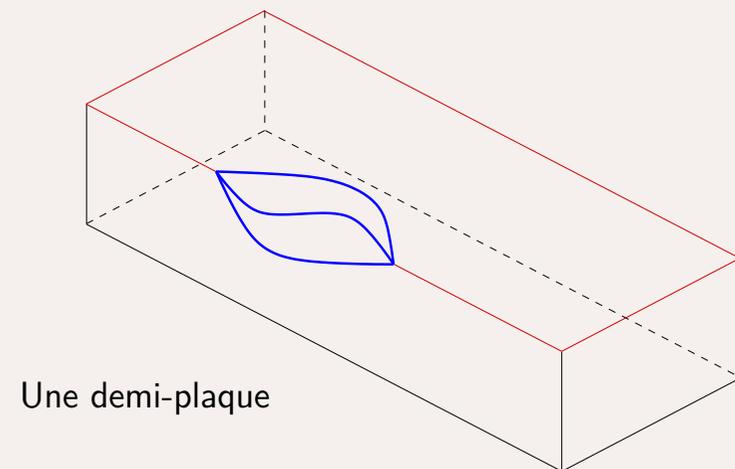
- Électromagnétisme :

- densité de courant  $\mathbf{j}$  ( $\mathbf{j} = -\sigma \nabla \phi$ )

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0$$

- induction magnétique  $\mathbf{B}$  ( $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ )

$$-\Delta \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{j}$$



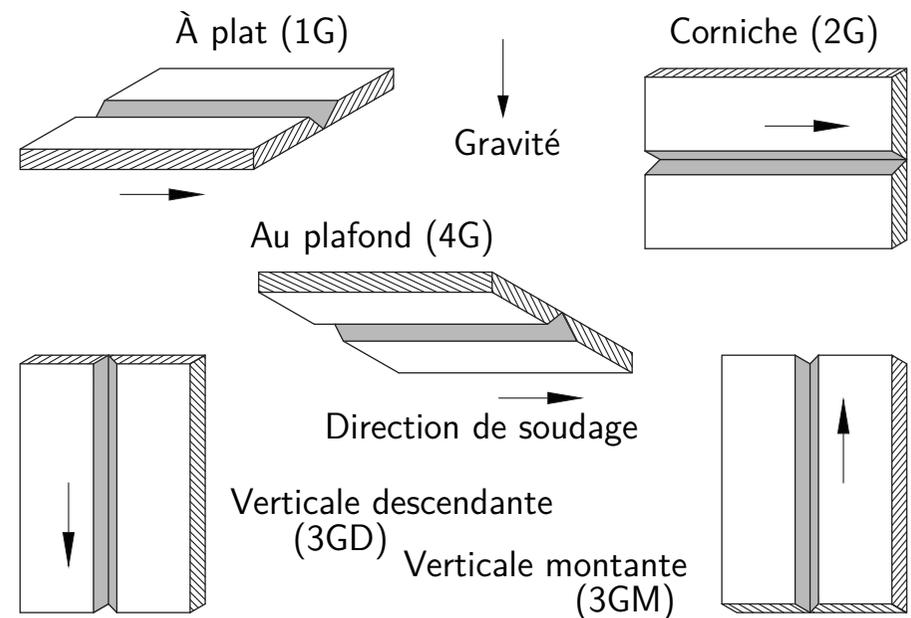
## Modèle : Équation de la surface déformée (IV)

- Surface déformée

$$\begin{aligned}
 & -p + (\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^t \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} + \\
 & \rho g(x \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + z \cos \alpha_1) \\
 & = \frac{\gamma(T, a_k)}{R_1(x, y) + R_2(x, y)} + \mathbf{f}_{Arc} \cdot \mathbf{n}
 \end{aligned}$$

- Valeurs des angles  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$

Position	1G	2G	3GD	3GM	4G
$\alpha_1$	$0^\circ$	$90^\circ$	$90^\circ$	$-90^\circ$	$180^\circ$
$\alpha_2$	$0^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$



Principales positions de soudage

## *Modèle : Méthode numérique (V)*

### Difficultés du problème

- Non-linéarité du terme convectif de l'équation de Navier-Stokes
- Non-linéarité du terme de perte par rayonnement de l'équation de l'énergie
- Non-linéarité thermique due au changement de phase solide – liquide
- Non-linéarité géométrique due au changement de phase et à la surface libre

### Problème non-linéaire

- Méthode itérative découplée de type Newton-Raphson approché
- Code de calcul aux éléments finis Cast3M [Cast3M, 2015]



## Modèle : Discrétisation et procédure numérique (VI)

### Discrétisation

- $\mathbb{Q}_2$  (hexaèdres) pour la vitesse d'écoulement  $\mathbf{u}$
- $\mathbb{Q}_2$  (quadrangles) pour la position de la surface  $h_z$
- $\mathbb{Q}_1$  (hexaèdres) pour les autres variables  $p, h, T, \phi, \mathbf{B}, \mathbf{A}$

### Procédure numérique

#### Conditions initiales

#### répéter

$$i \leftarrow i + 1$$

Construction du maillage fluide

Calcul des équations électromagnétiques

Calcul des équations de Navier-Stokes

Calcul du déplacement de la surface libre

Calcul de l'équation de l'énergie

Mise à jour des coefficients dépendant de  $T$

**si**  $\delta_{\text{inc}} = \|(\delta\mathbf{u}, \delta h_z, \delta T)\| < \delta_{\text{conv}}$  **alors**

$$\alpha \leftarrow \min(\alpha \times f_\alpha, 1) \quad (\nearrow \text{ forces motrices})$$

**fin si**

**jusqu'à ce que** ( $\delta_{\text{inc}} < \delta_{\text{conv}}$  et  $\alpha = 1$ ) ou  $i > i_{\text{max}}$

## Sommaire

### 1 Modèle

- Choix du modèle physique
- Équations à résoudre
- Modèle numérique

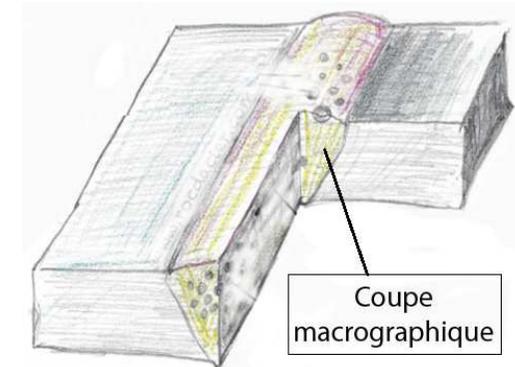
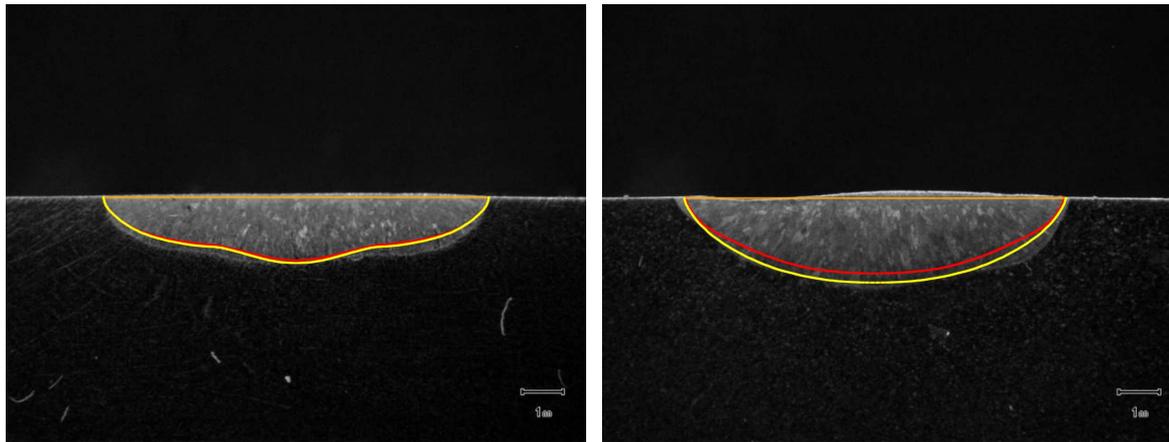
### 2 Comparaison à l'expérience

### 3 Résultats et discussion

- Influence de l'effet Marangoni
- Bilan des puissances mécanique et thermique
- Positions de soudage

### 4 Conclusions & Perspectives

## Validation : Comparaison à l'expérience



©Rocdacier

10 ppm (gauche) et 280 ppm (droite) de soufre avec le modèle de **Sahoo (S)** et de **Mills (M)**

[S] (ppm)	10		280	
Bain fondu (mm)	Larg	Péné	Larg	Péné
Expérience (K)	9,4±0,4	1,7±0,2	9,8±0,4	2,1±0,2
Écart (S/K)	0,0 %	10,6 %	3,7 %	11,4 %
Écart (M/K)	0,2 %	7,1 %	2,9 %	1,0 %

- Expériences [Koudadje, 2013]
  - Notre modèle est capable de prédire des grandeurs d'intérêts du soudage TIG
  - La fidélité de la prédiction est fortement dépendante du modèle de tension de surface

## Sommaire

### 1 Modèle

- Choix du modèle physique
- Équations à résoudre
- Modèle numérique

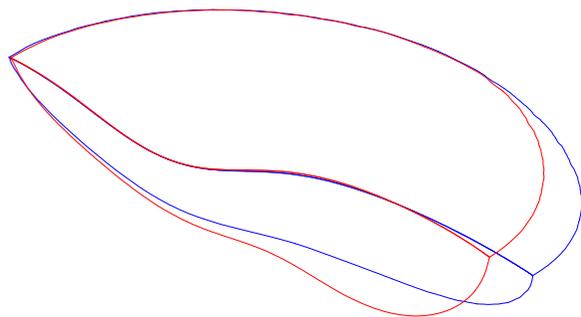
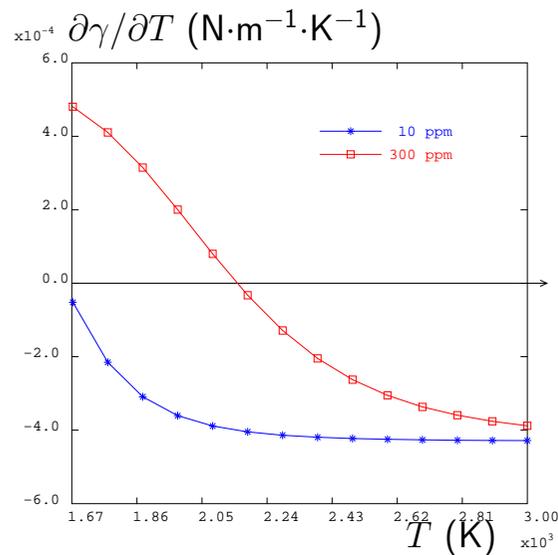
### 2 Comparaison à l'expérience

### 3 Résultats et discussion

- Influence de l'effet Marangoni
- Bilan des puissances mécanique et thermique
- Positions de soudage

### 4 Conclusions & Perspectives

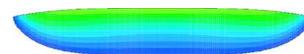
# Résultats : Influence de la quantité de soufre (I)



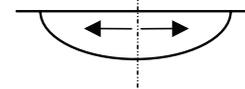
10 ppm et 300 ppm de soufre

Courants mouillants

10 ppm



$$\frac{\partial\gamma}{\partial T} < 0$$

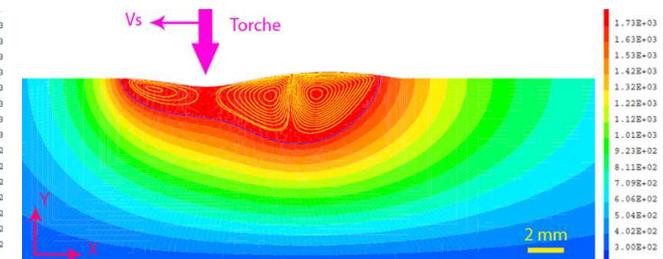
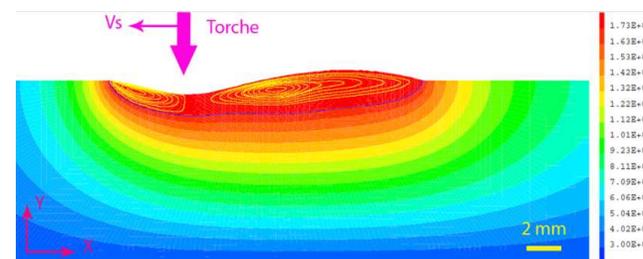
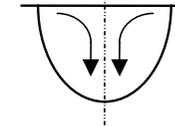


Courants pénétrants

300 ppm



$$\frac{\partial\gamma}{\partial T} > 0$$



- 10 ppm de [S]  $\rightarrow$  écoulement centrifuge
- 300 ppm de [S]  $\rightarrow$  apparition d'écoulement centripète
- Augmentation de 10 ppm à 300 ppm de [S]  
 $\rightarrow$  pénétration  $\uparrow$ , longueur  $\downarrow$ , température maximale  $\uparrow$

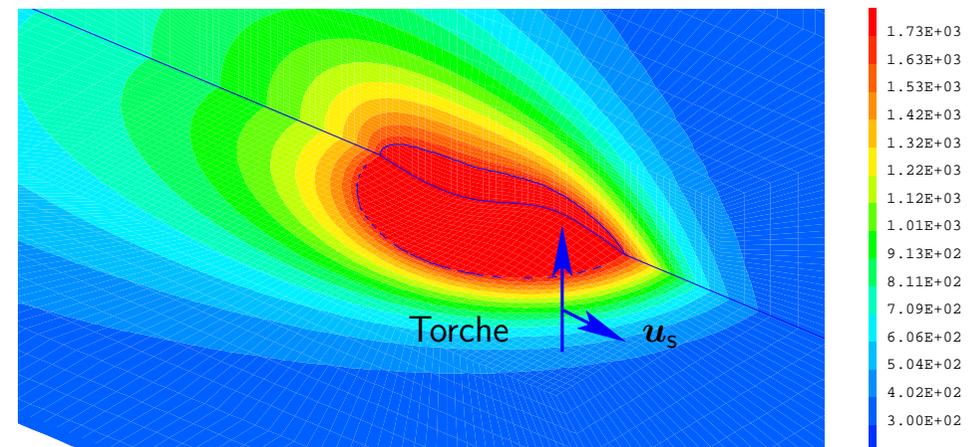
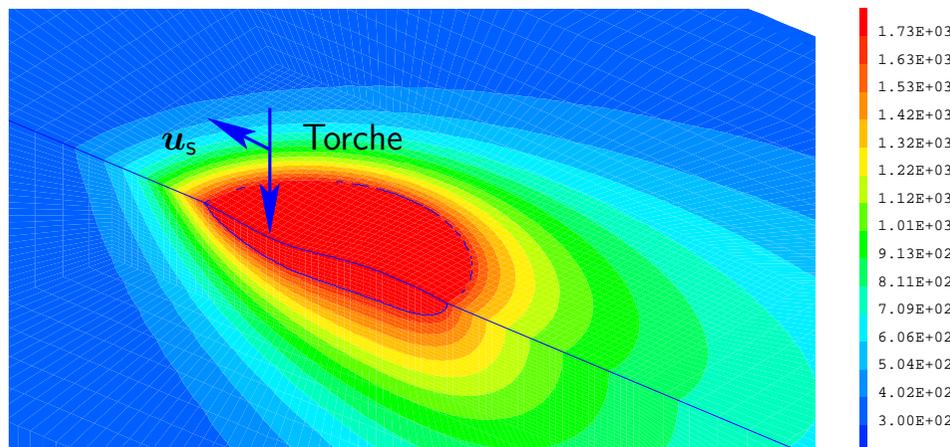
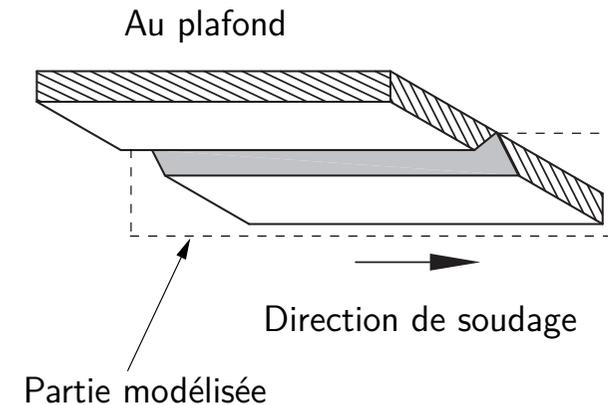
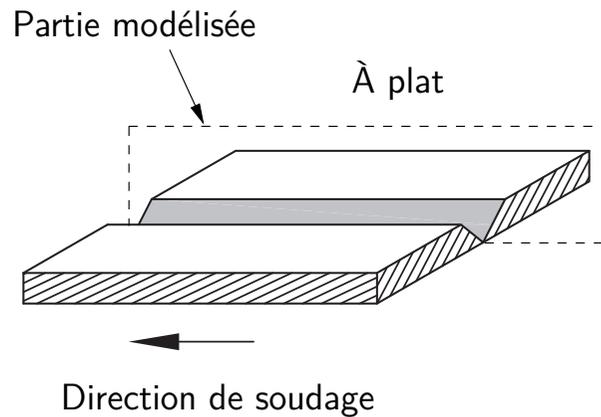
## Résultats : Bilan des puissances mécaniques (II)

Description des puissances	Bas soufre (10 ppm)	Haut soufre (300 ppm)
Puissance de la force de Marangoni $\int_{\partial\Omega_{\text{Mar}}} \frac{\partial\gamma}{\partial T} \nabla_s T \cdot \mathbf{u} \, d\partial\Omega_{\text{Mar}}$	$3,04 \times 10^{-4}$	$1,12 \times 10^{-4}$
Puissance de la force visqueuse $-\int_{\Omega} \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla^t \mathbf{u}) : \nabla \mathbf{u} \, d\Omega$	$-2,90 \times 10^{-4}$	$-1,04 \times 10^{-4}$
Puissance de la force d'extinction des vitesses $\int_{\Omega} -c(1 - f_l) \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \, d\Omega$	$-5,92 \times 10^{-6}$	$-1,11 \times 10^{-6}$
Puissance de la force de convection $-\int_{\Omega} \rho (\nabla \mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \cdot \mathbf{u} \, d\Omega$	$-5,11 \times 10^{-6}$	$-3,72 \times 10^{-6}$
Puissance de la force électromagnétique $\int_{\Omega} (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{u} \, d\Omega$	$-3,81 \times 10^{-6}$	$-3,03 \times 10^{-6}$
Puissance de la force de flottabilité $\int_{\Omega} \rho \mathbf{g} \beta (T - T_{\text{réf}}) \cdot \mathbf{u} \, d\Omega$	$4,48 \times 10^{-8}$	$7,57 \times 10^{-9}$
Puissance de la force de pression $\int_{\Omega} p \nabla \cdot \mathbf{u} \, d\Omega$	0,00	0,00
Bilan des puissances (W)	$-1,29 \times 10^{-7}$	$-4,49 \times 10^{-8}$

## Résultats : Bilan des puissances thermiques (III)

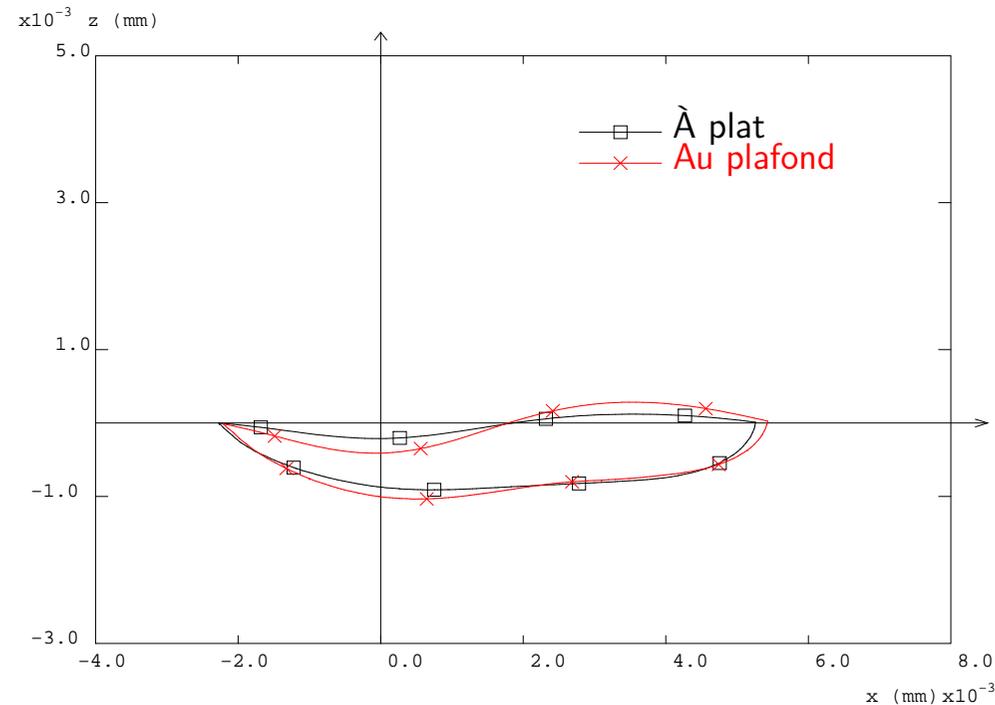
Description des puissances	Bas soufre (10 ppm)	Haut soufre (300 ppm)
Source de chaleur	612,00	612,00
$\int_{\partial\Omega_{\text{Sur}}} \frac{UI\eta}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right) d\partial\Omega_{\text{Sur}}$		
Pertes par diffusion	-441,95	-440,07
$\int_{\partial\Omega_{T=T_0}} -\lambda\nabla T d\partial\Omega_{T=T_0}$		
Pertes par transport	-137,74	-137,66
$-\int_{\Omega} \rho(\nabla h) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) d\Omega$		
Pertes par rayonnement	-27,89	-29,85
$-\int_{\partial\Omega_{\text{Ray}}} \epsilon\sigma_B (T^4 - T_{\infty}^4) d\partial\Omega_{\text{Ray}}$		
Pertes par convection en surface	-6,54	-6,51
$-\int_{\partial\Omega_{\text{Cvs}}} h_c (T - T_{\infty}) d\partial\Omega_{\text{Cvs}}$		
Effet Joule	2,12	2,11
$\int_{\Omega} \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} d\Omega$		
Bilan des puissances (W)	$4,14 \times 10^{-3}$	$2,09 \times 10^{-2}$

*Résultats : Positions de soudage – 1G & 4G (IV)*



Champ de température (K) et forme du bain liquide en position à plat (1G) et au plafond (4G)

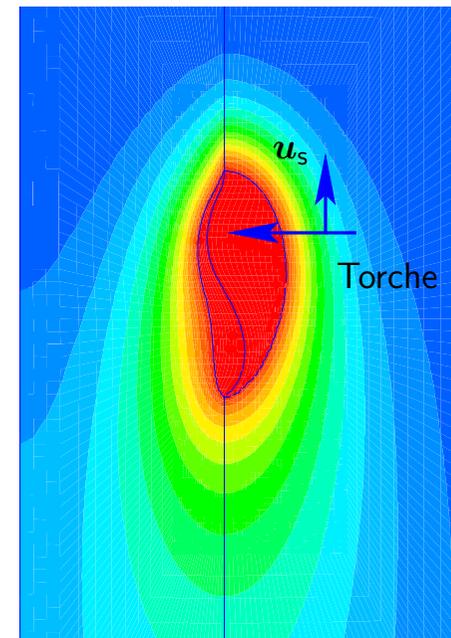
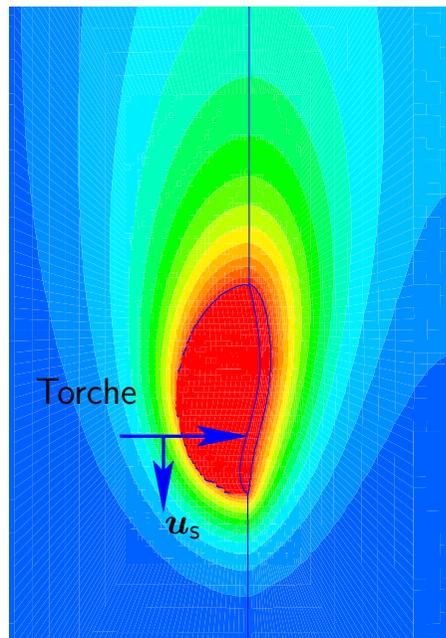
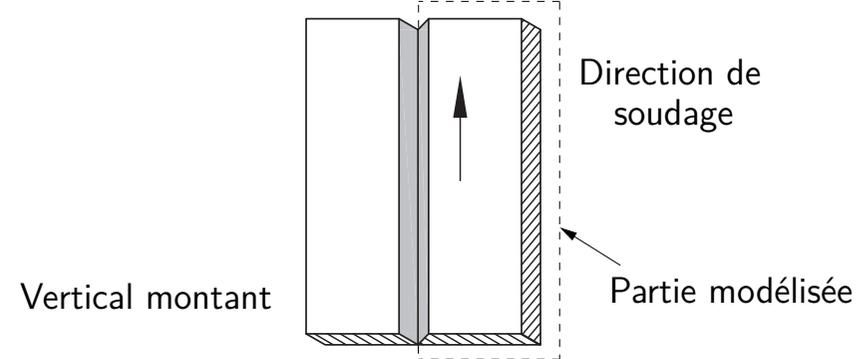
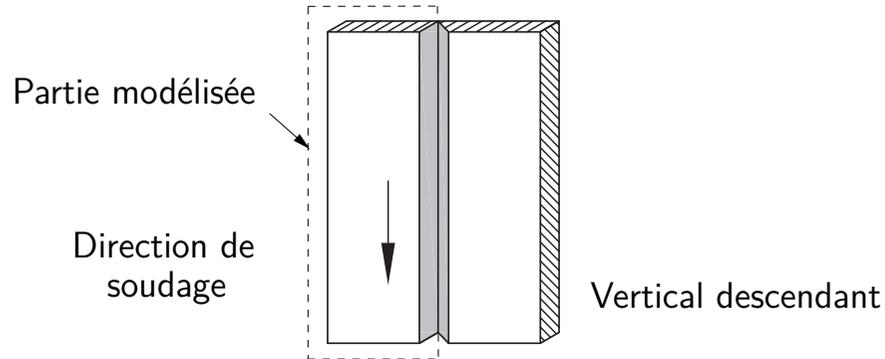
## Résultats : Positions de soudage – 1G & 4G (V)



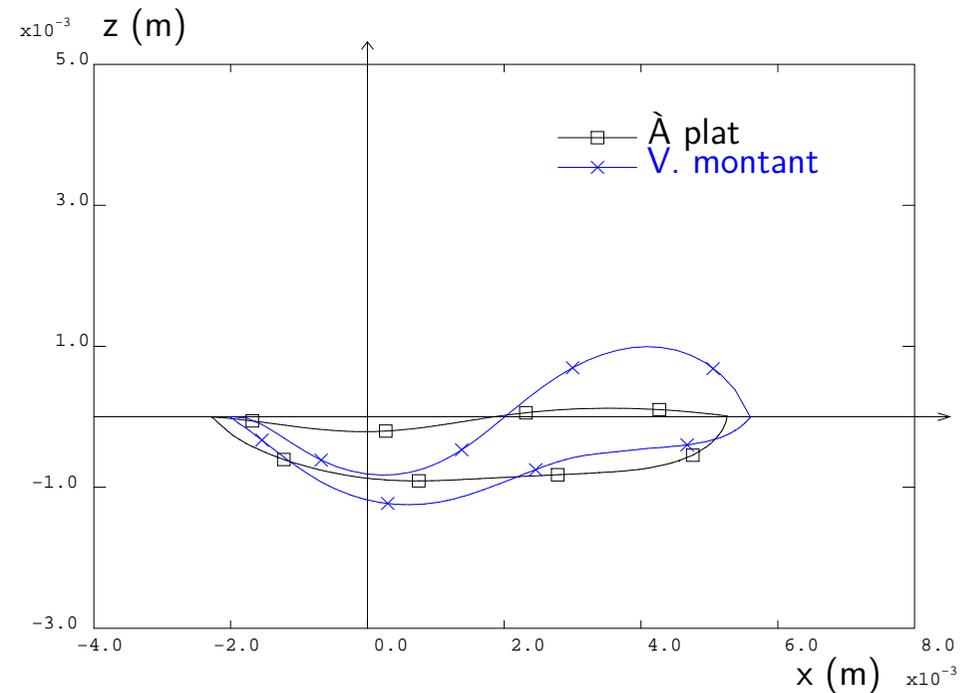
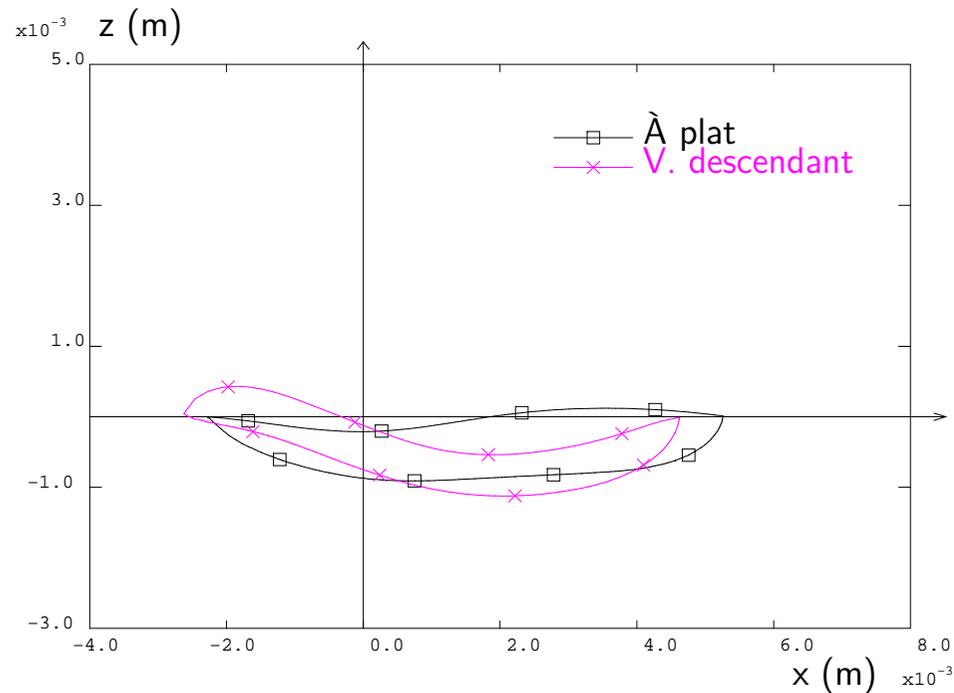
Comparaison de la forme du bain entre les positions à plat et au plafond

→ Les formes de bain dans des cas 1G et 4G sont assez semblables

*Résultats : Positions de soudage – 3GD & 3GM (VI)*

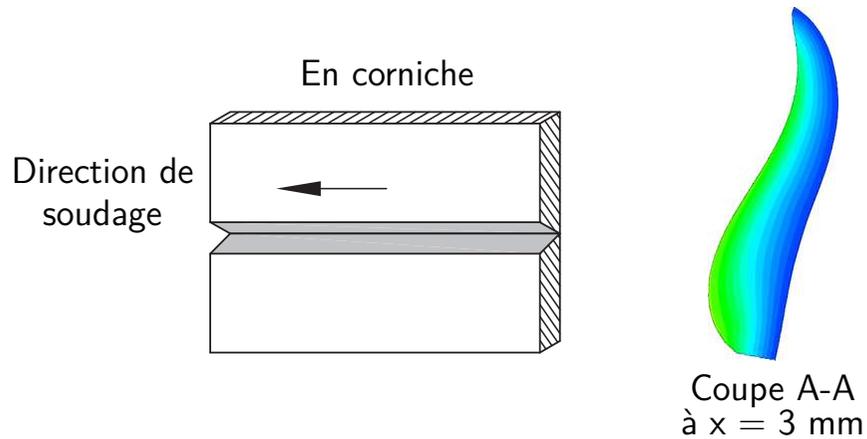


## Résultats : Positions de soudage – 3GD & 3GM (VII)



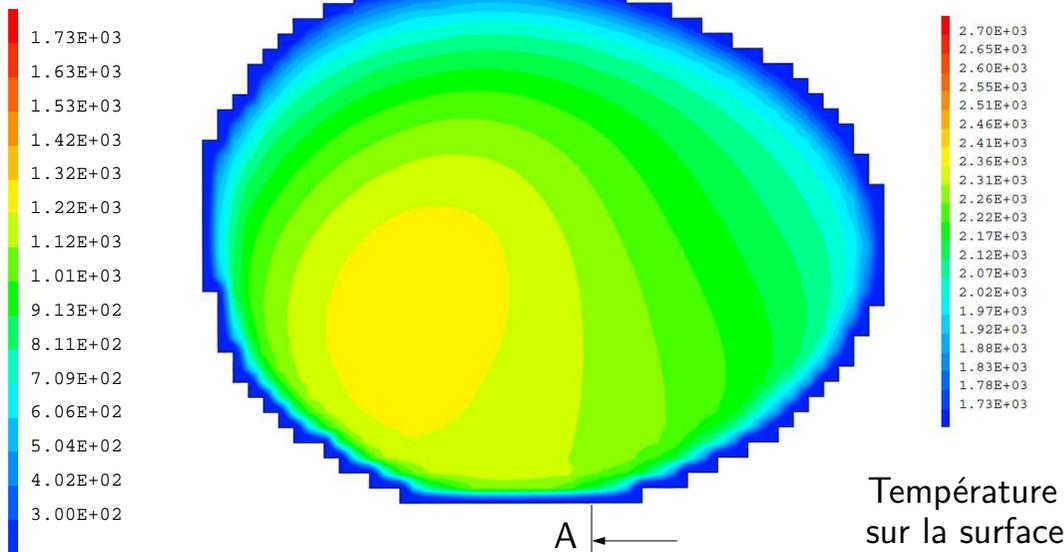
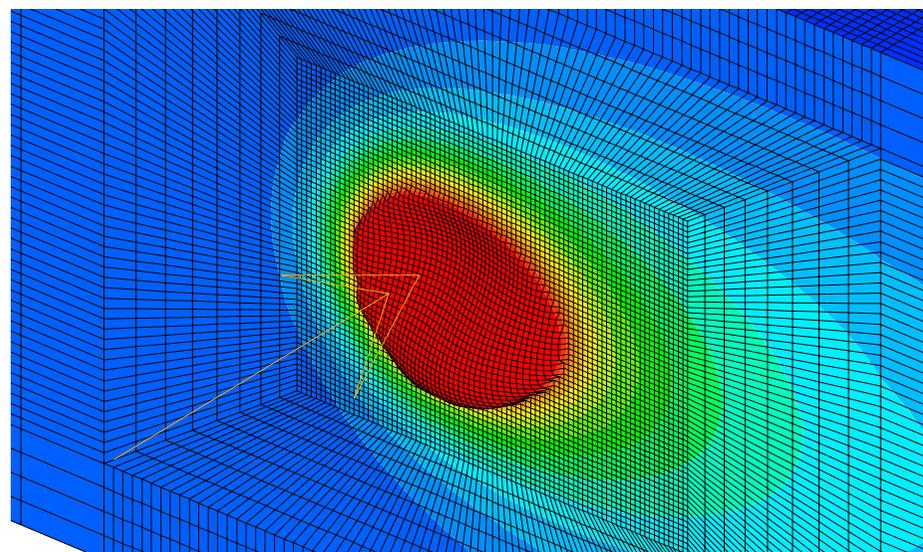
- 3GD : une déformation convexe de la surface libre sous la source
- 3GM : la pénétration est maximale  
(tendance similaire au cours du soudage MAG [Kumar, 2007])

*Résultats : Positions de soudage – 2G (VIII)*



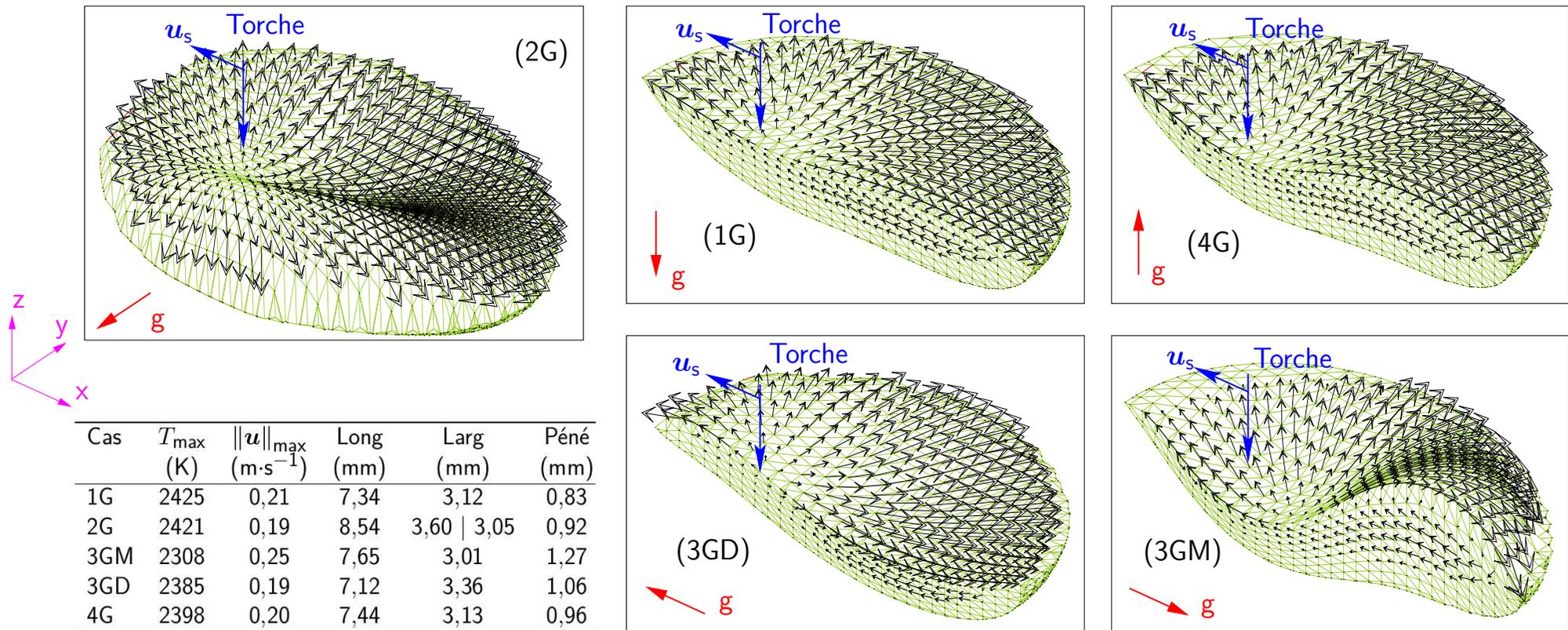
→ on utilise un domaine modélisant toute la plaque

→ la déformation est clairement asymétrique autour de la position de l'électrode



Température sur la surface

## Résultats : Écoulement dans le bain liquide (IX)



→ toutes les positions donnent le même ordre de grandeur de vitesse max. de  $0,20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

→ le sens de l'écoulement dans le bain n'est pas influencé par la position de soudage

## *Sommaire*

### 1 Modèle

- Choix du modèle physique
- Équations à résoudre
- Modèle numérique

### 2 Comparaison à l'expérience

### 3 Résultats et discussion

- Influence de l'effet Marangoni
- Bilan des puissances mécanique et thermique
- Positions de soudage

### 4 Conclusions & Perspectives

## *Conclusions & Perspectives de développement*

- les simulations des différentes conditions opératoires permettent de bien reproduire les résultats de la littérature ;
- bon accord entre la simulation et l'expérience en soudage à plat ;
- le modèle permet d'accéder à l'effet de la position de soudage :
  - les positions verticale et en corniche influencent nettement la forme du bain de fusion ;
  - la gravité influence faiblement la forme du bain pour la position au plafond ;
  - la déformation du bain de soudage est asymétrique autour de la position de l'électrode pour la position en corniche.
- la prise en compte du couplage arc–bain permettra d'évaluer l'influence de la déformation de la surface libre sur les écoulements dans le plasma d'arc ;
- l'amélioration du modèle d'apport de matière (numérique : convergence ; physique : mouillage, transfert d'énergie) permettra de traiter une configuration réaliste de soudage.

## Bibliographie

- [Cast3M, 2015] CEA Saclay. Téléchargeable sur <http://www-cast3m.cea.fr/>, 2015.
- [Kumar, 2007] A. Kumar and T. DebRoy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(3) :506–519, 2007.
- [Brochard, 2009] M. Brochard. *Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, Université de Provence – CEA, 2009.
- [Kong, 2012] X. Kong. *Modélisation 3D d'écoulement avec surface libre pour le soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne – CEA, 2012.
- [Koudadje, 2013] K. Koudadje. *Étude expérimentale et modélisation numérique du bain de fusion en soudage TIG d'aciers*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille – EDF, 2013.
- [Nguyen, 2015] M. C. Nguyen. *Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille – CEA, 2015.

Merci de votre attention.