

# 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

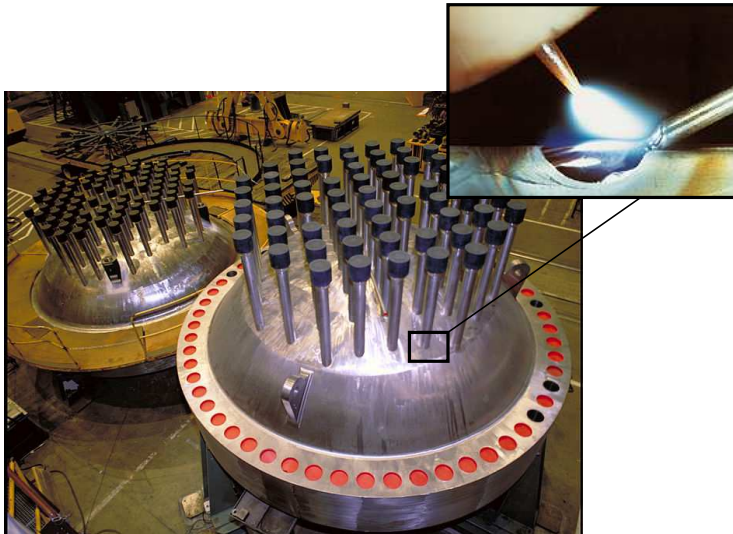
<sup>2</sup>AREVA NP, F-92084, Paris La Défense, France 

<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

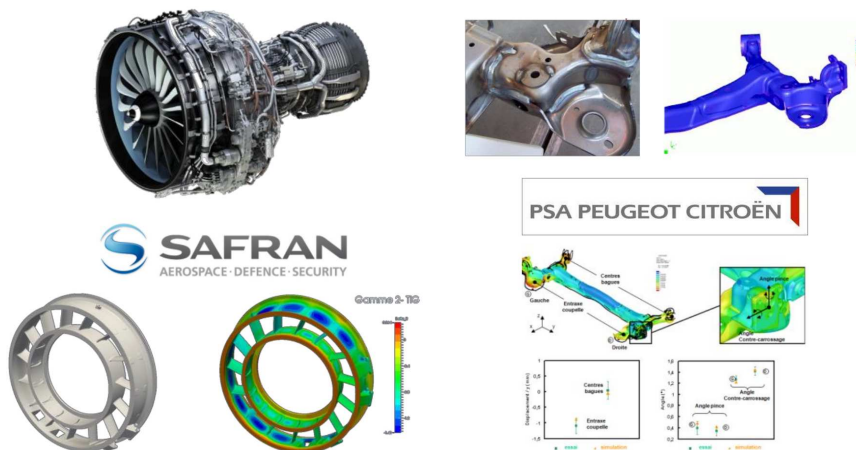
### L'industriel

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

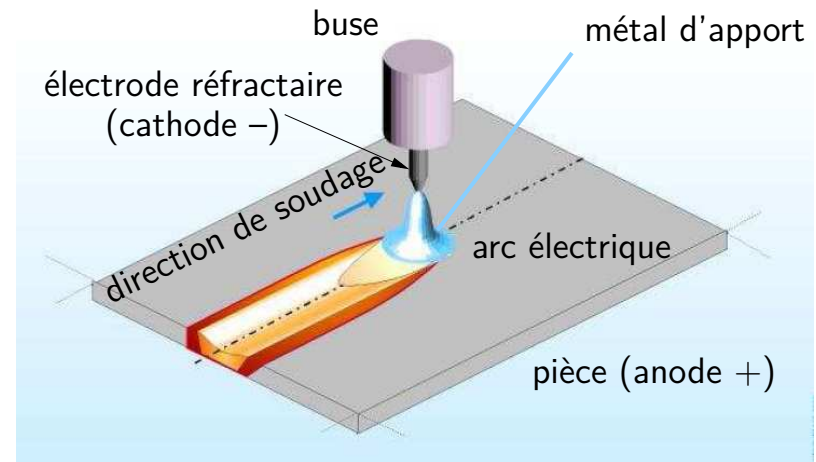
- intervient dans nombreux secteurs (aéronautique, **nucléaire**, automobile ...)
- garantir la qualité, la fiabilité ...  
→ procédé à l'arc **Tungsten Inert Gas**



## *Procédé de soudage à l'arc TIG*



Procédé Tungsten Inert Gas (TIG)



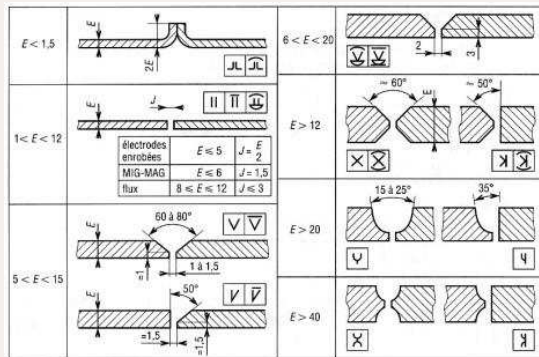
Modélisation du procédé TIG

### Soudage TIG

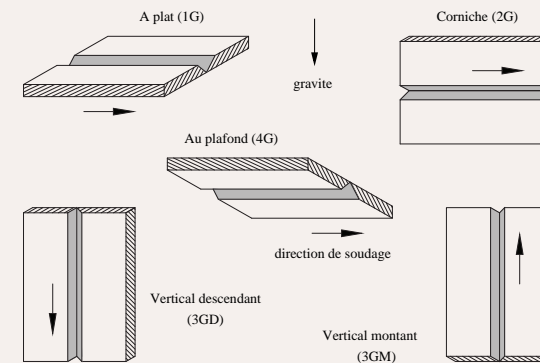
- électrode non fusible
- paramètres d'entrée : tension, intensité, vitesse de défilement, hauteur d'arc
- paramètres de sortie : forme du bain de soudage, écoulement, température

# Défis de simulation

## Différents jeux d'assemblage



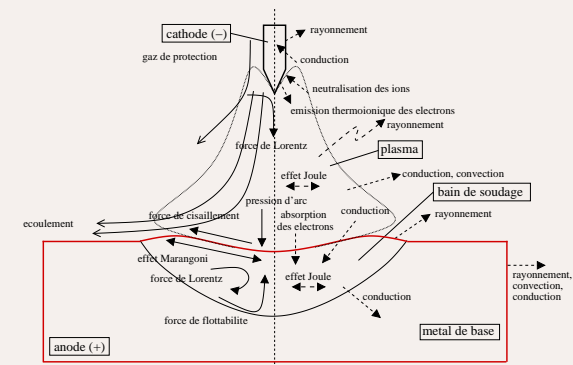
## Positions de soudage



## Métal d'apport

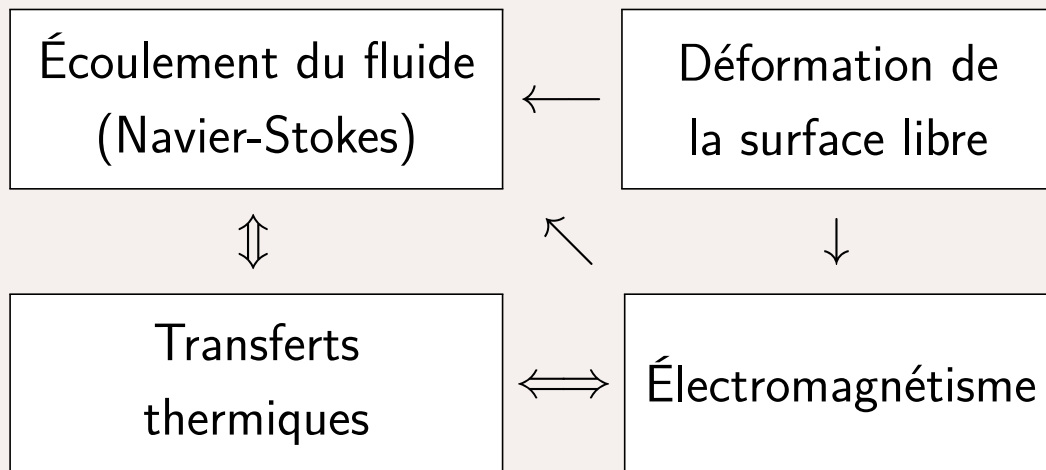


## Nombreux phénomènes physiques



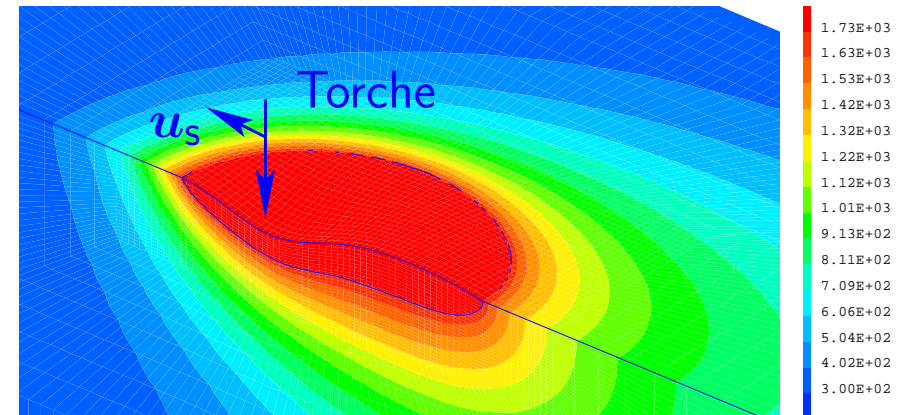
## Approche & Objectifs

### Approche multiphysique



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

### Modèle bain 3D



### 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

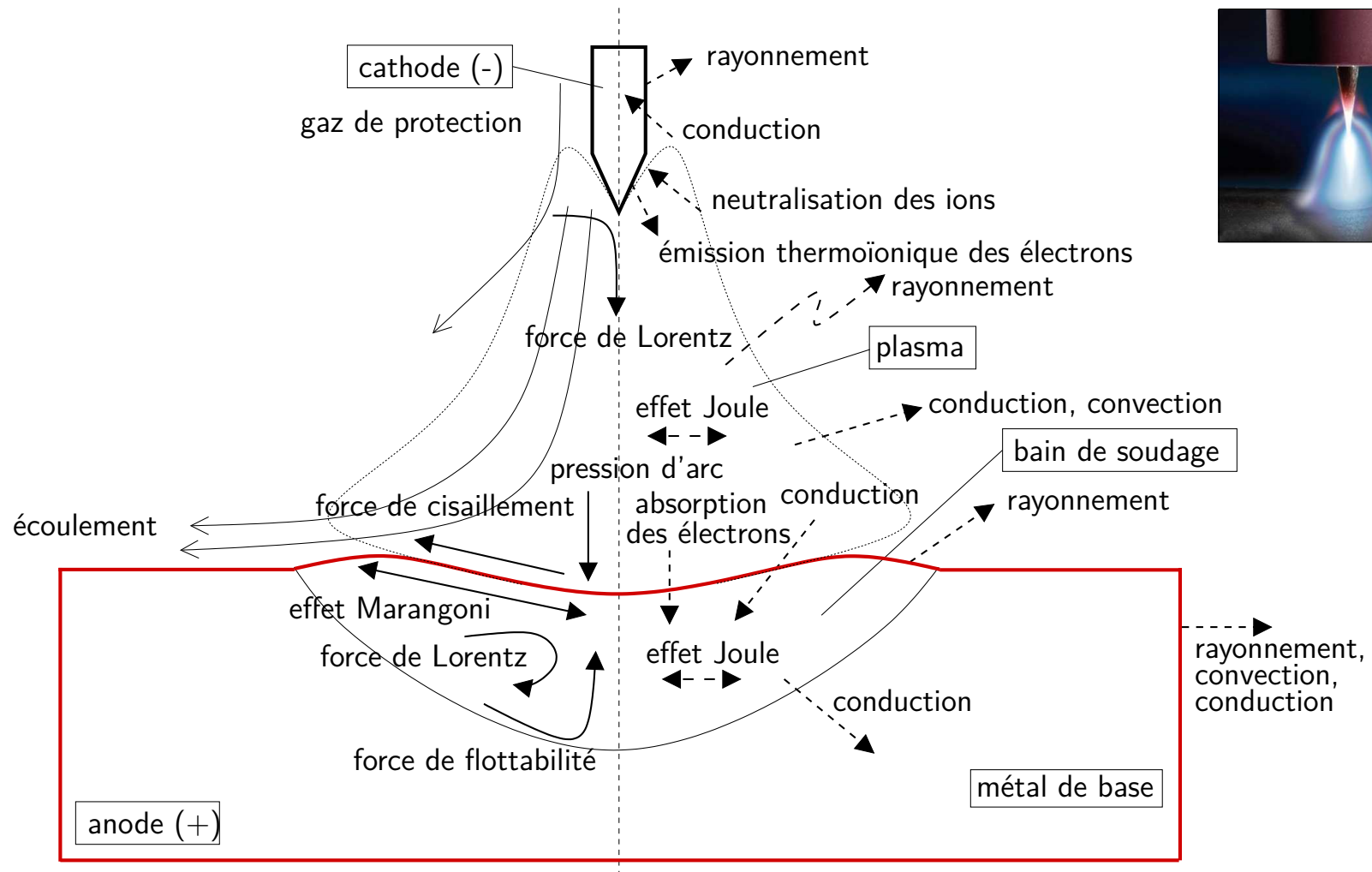
### 2 Comparaison à l'expérience

### 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 :

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

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

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

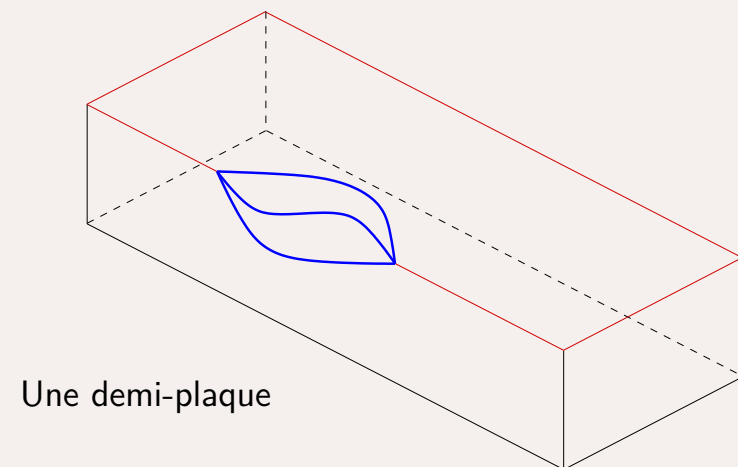
- Électromagnétisme :

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

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

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

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



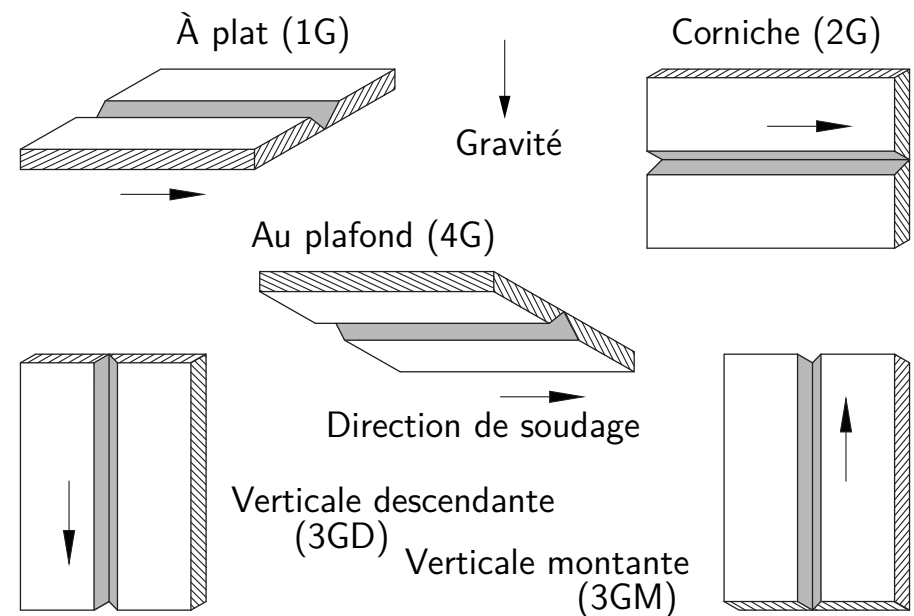
## Modèle : Équation de la surface déformée (IV)

- 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

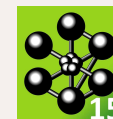
## *Modèle : Méthode numérique (V)*

### 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

- $Q_2$  (hexaèdres) pour la vitesse d'écoulement  $\mathbf{u}$
- $Q_2$  (quadrangles) pour la position de la surface  $h_z$
- $Q_1$  (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

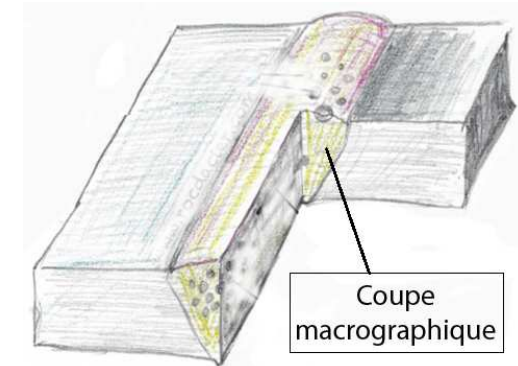
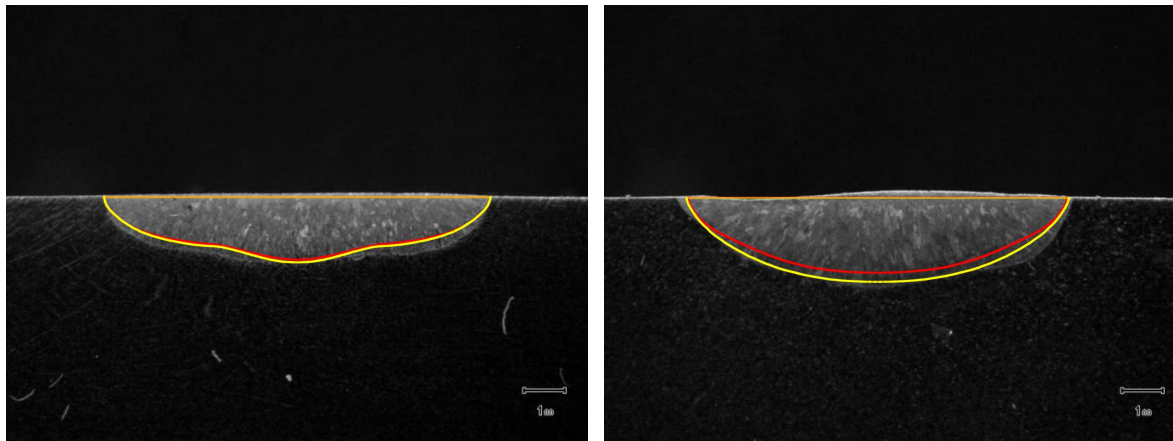
### 2 Comparaison à l'expérience

### 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

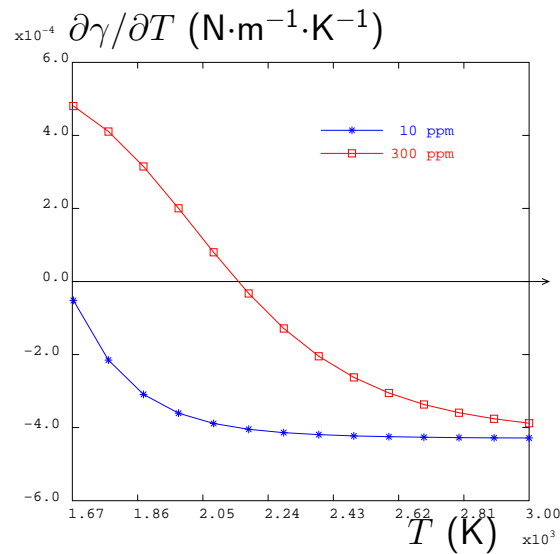
### 2 Comparaison à l'expérience

### 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)*



Courants mouillants

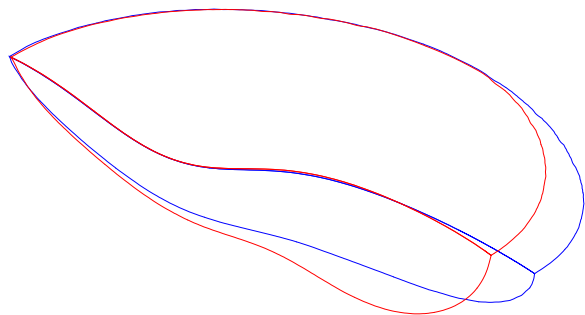
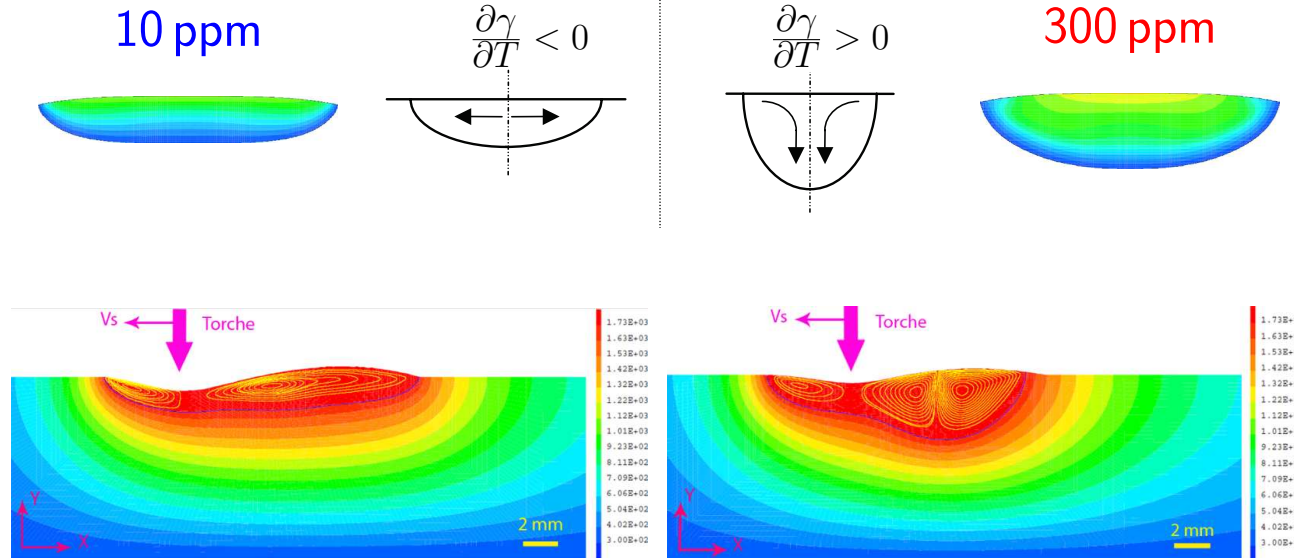
Courants pénétrants

10 ppm

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

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

300 ppm



10 ppm et 300 ppm de soufre

- 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  $\uparrow$



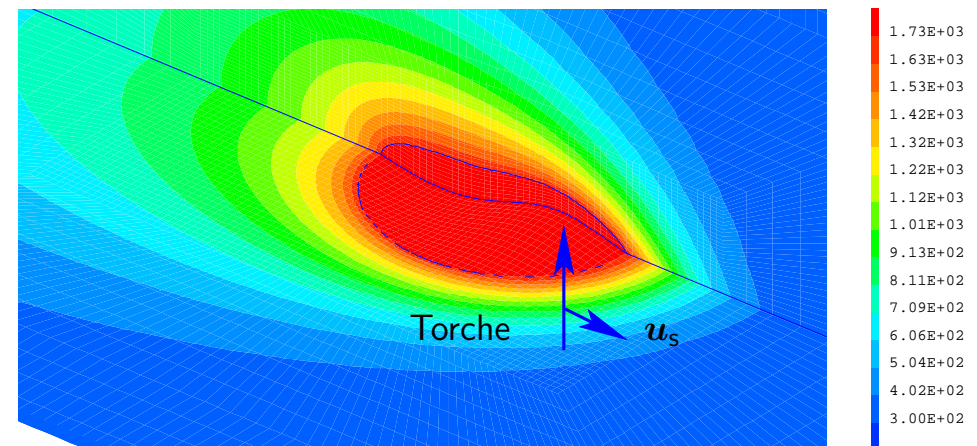
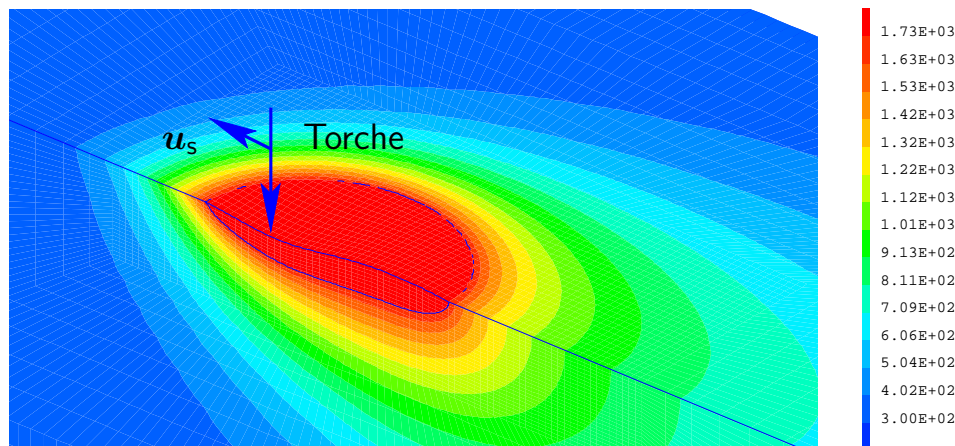
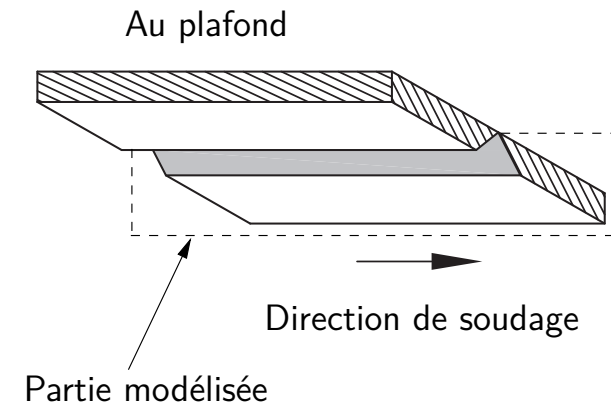
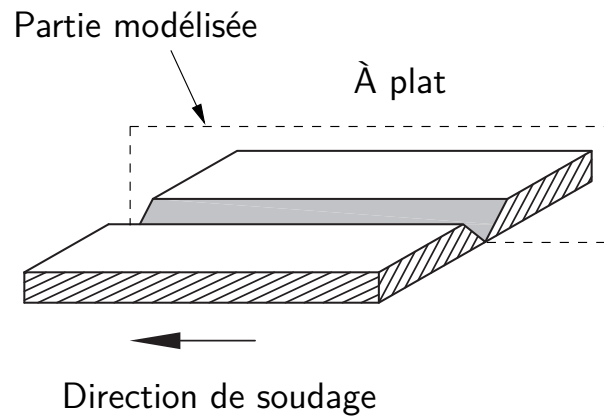
## Résultats : Bilan des puissances mécaniques (II)

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)

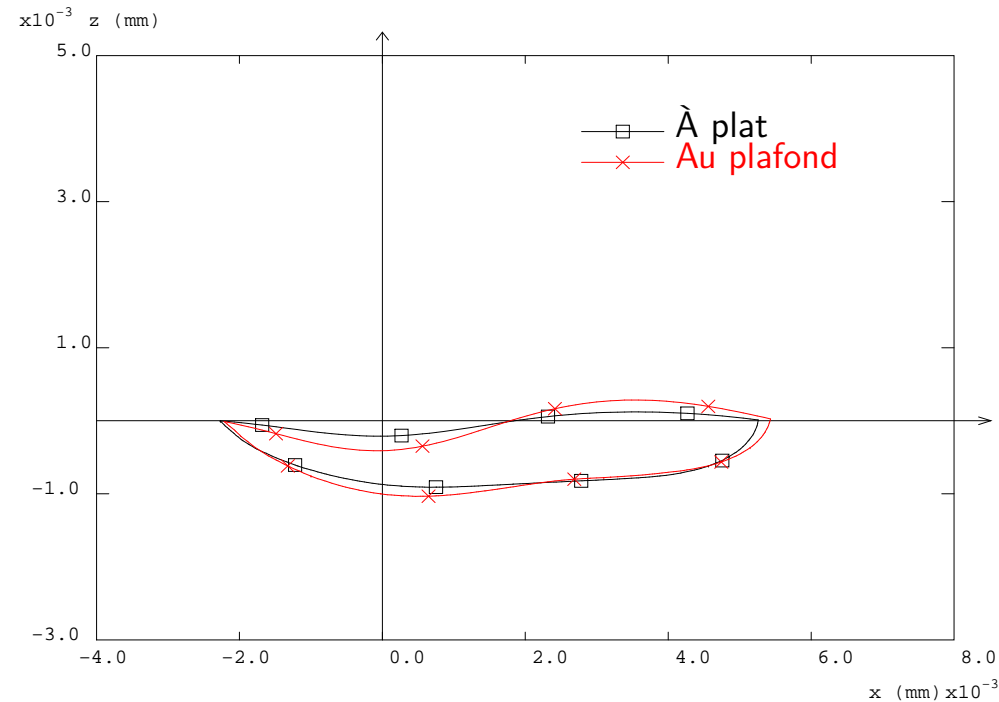
Description des puissances	Bas soufre (10 ppm)	Haut soufre (300 ppm)
Source de chaleur	612,00	612,00
$\int_{\partial\Omega_{\text{Sur}}} \frac{UI\eta}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right) d\partial\Omega_{\text{Sur}}$		
Pertes par diffusion	-441,95	-440,07
$\int_{\partial\Omega_{T=T_0}} -\lambda\nabla T d\partial\Omega_{T=T_0}$		
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)

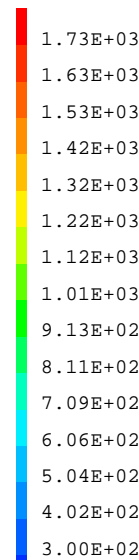
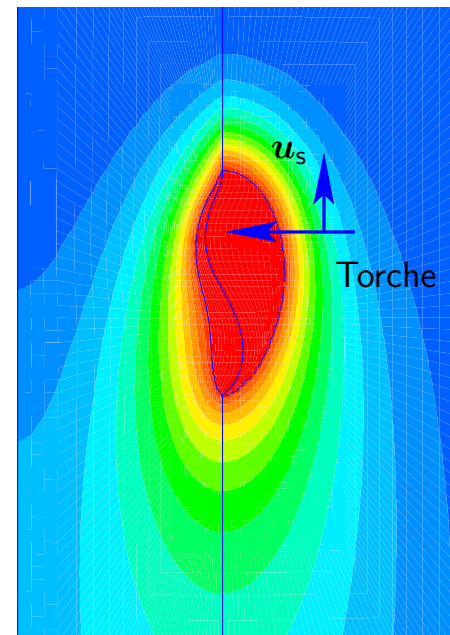
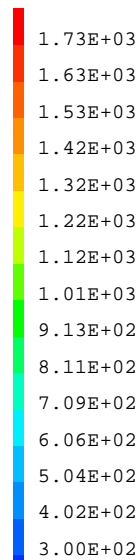
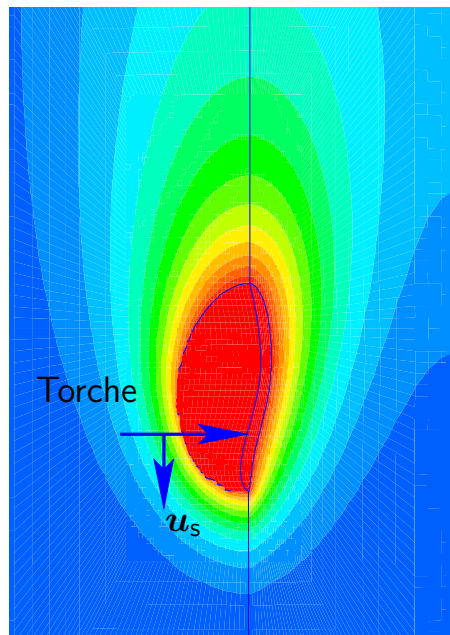
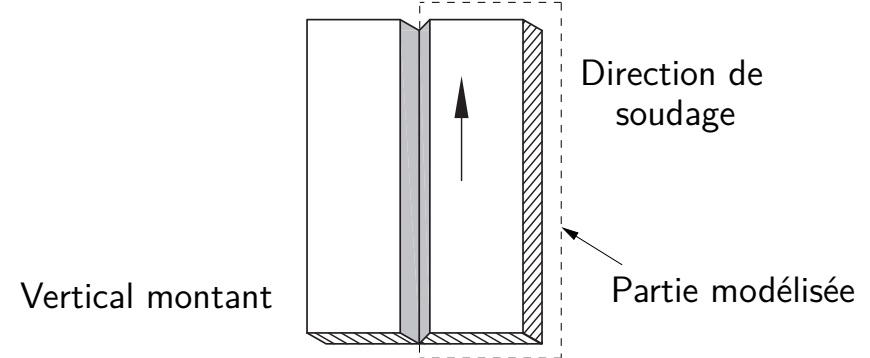
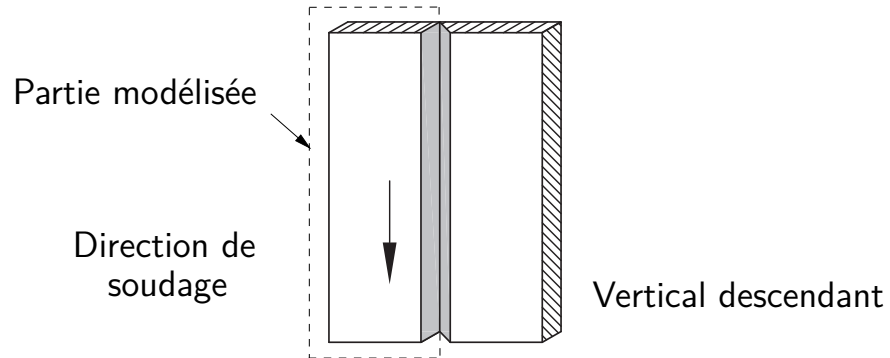
## Résultats : Positions de soudage – 1G & 4G (V)



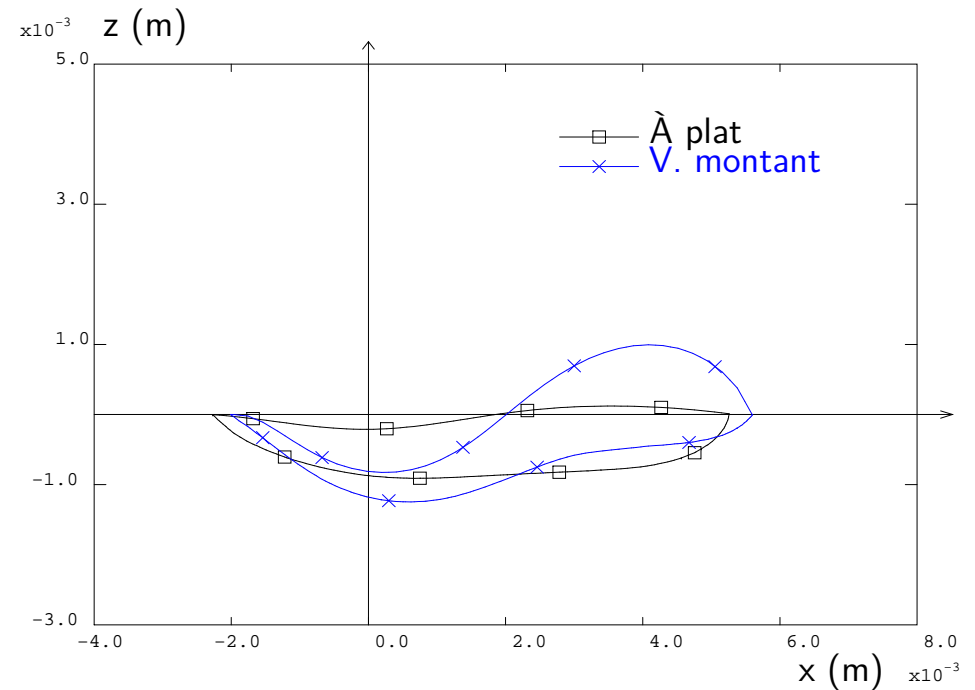
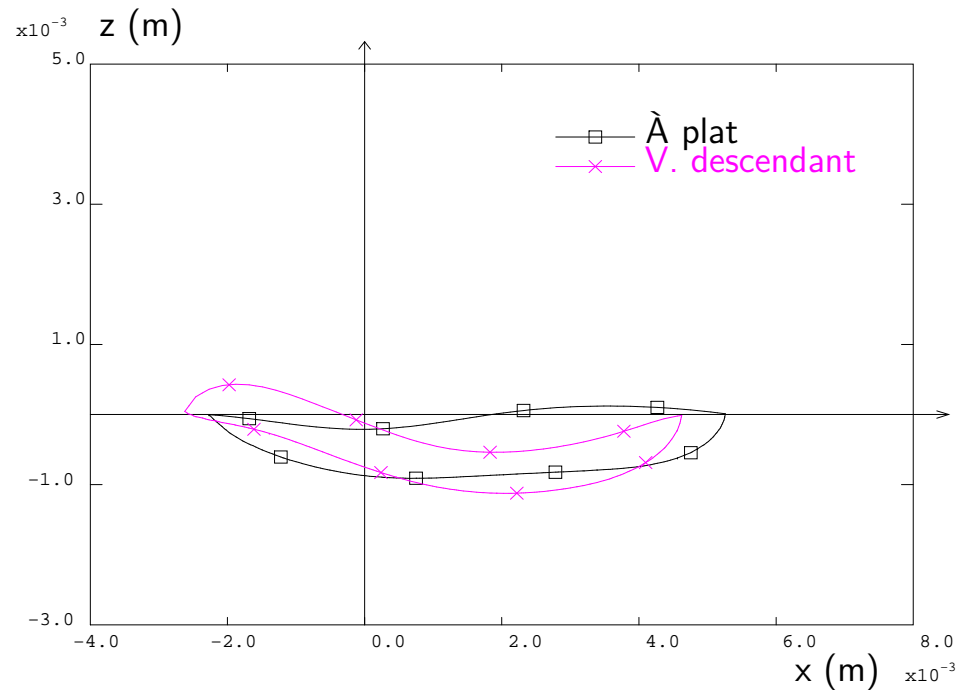
Comparaison de la forme du bain entre les positions à plat et au plafond

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

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

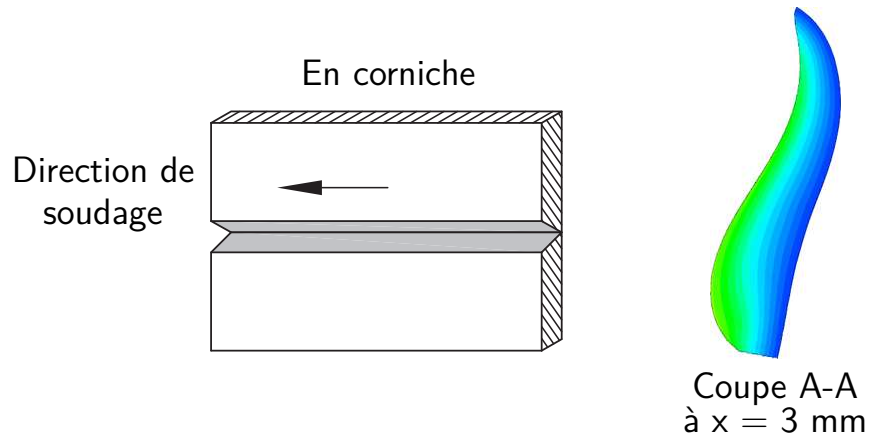


## Résultats : Positions de soudage – 3GD & 3GM (VII)



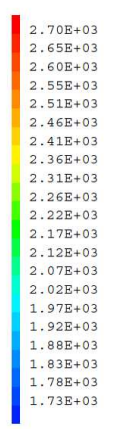
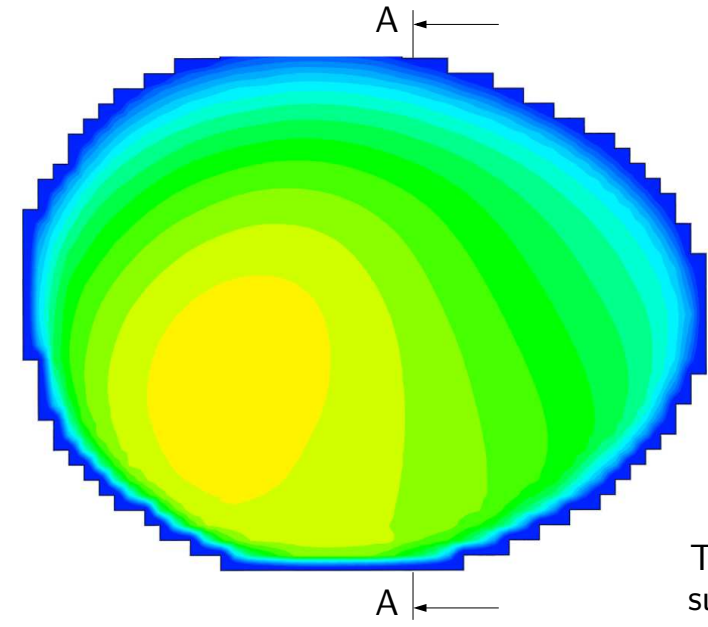
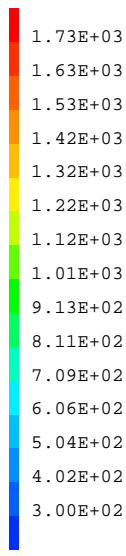
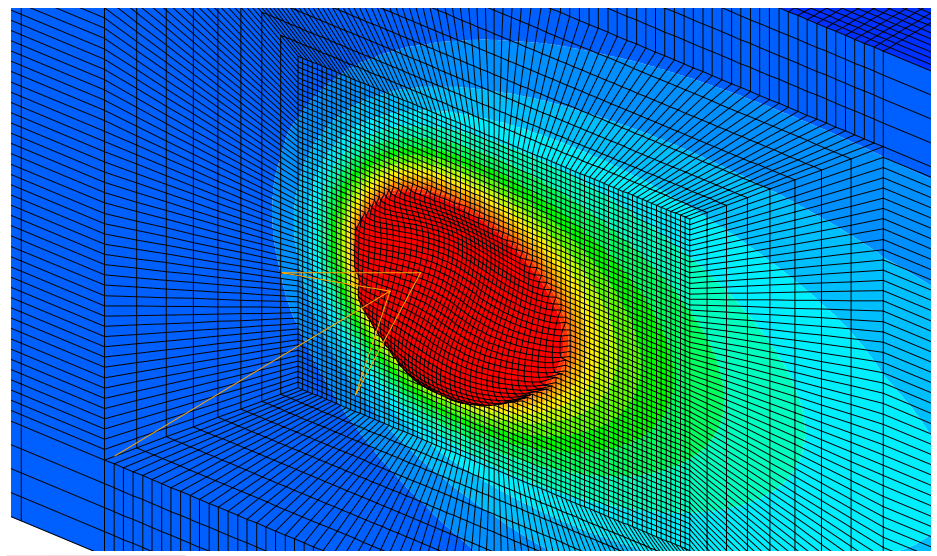
- 3GD : une déformation convexe de la surface libre sous la source
- 3GM : la pénétration est maximale  
(tendance similaire au cours du soudage MAG [Kumar, 2007])

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



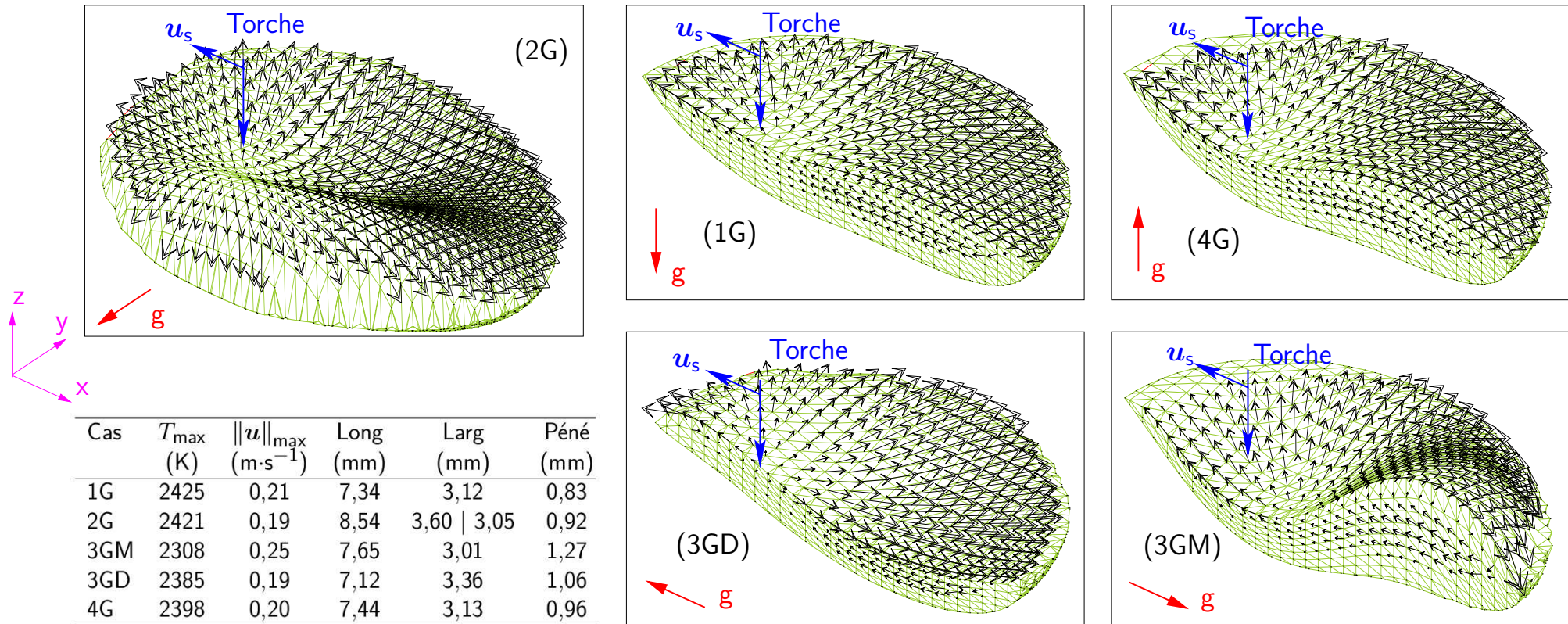
→ on utilise un domaine modélisant toute la plaque

→ 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.