

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

Minh Chien NGUYEN^{1,3,*}, Olivier ASSERIN¹, Stéphane GOUNAND¹,
Philippe GILLES² et Marc MEDALE³

¹CEA Saclay, DEN, DANS, DM2S, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

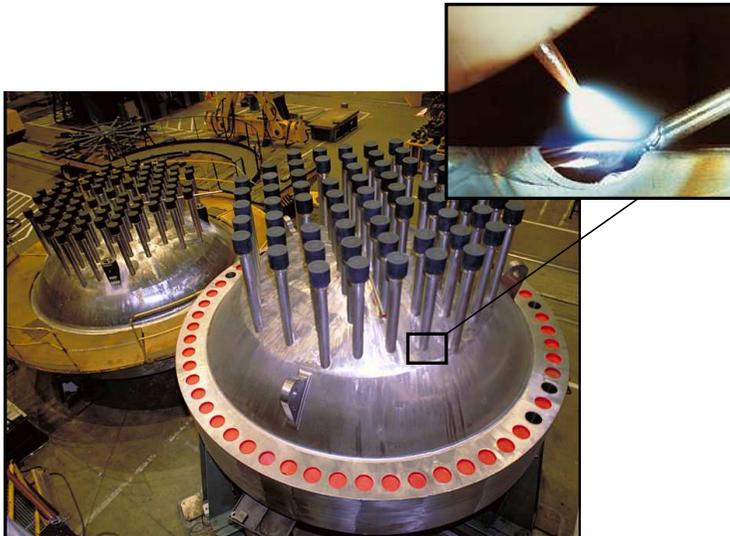
²AREVA NP, F-92084, Paris La Défense, France 

³Aix 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

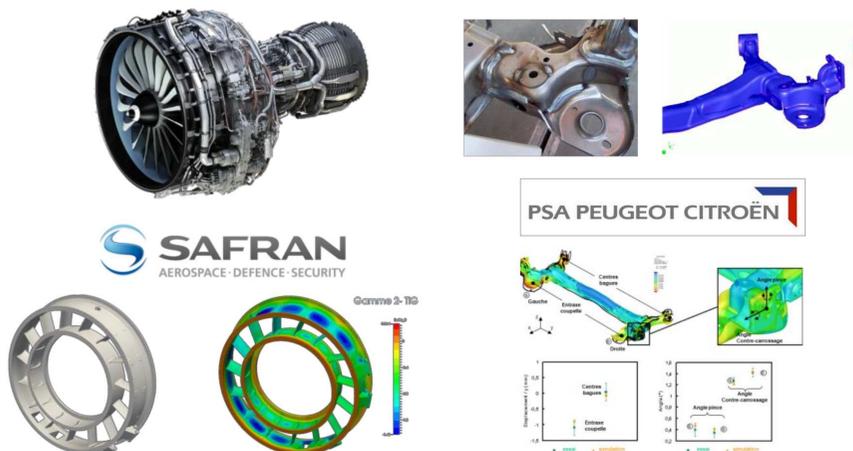
L'industriel

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

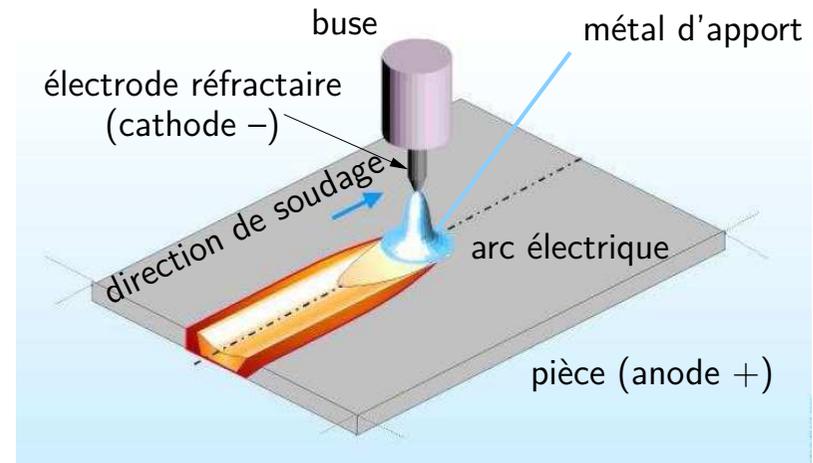
- intervient dans nombreux secteurs (aéronautique, **nucléaire**, automobile ...)
- garantir la qualité, la fiabilité ...
→ procédé à l'arc **Tungsten Inert Gas**



Procédé de soudage à l'arc TIG



Procédé Tungsten Inert Gas (TIG)



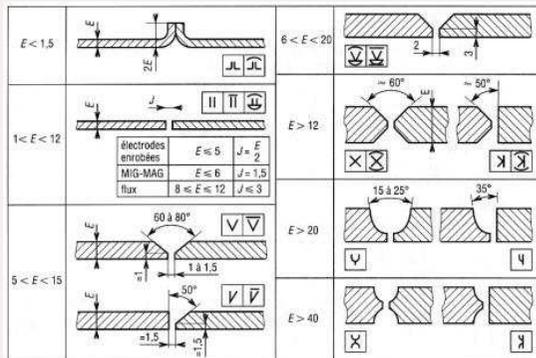
Modélisation du procédé TIG

Soudage TIG

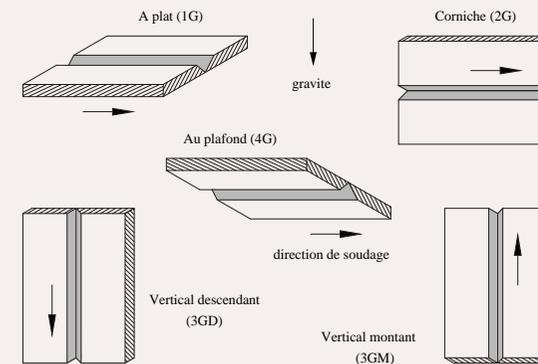
- électrode non fusible
- paramètres d'entrée : tension, intensité, vitesse de défilement, hauteur d'arc
- paramètres de sortie : forme du bain de soudage, écoulement, température

Défis de simulation

Différents jeux d'assemblage



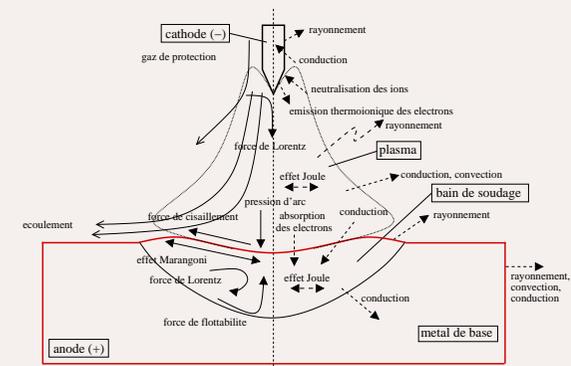
Positions de soudage



Métal d'apport

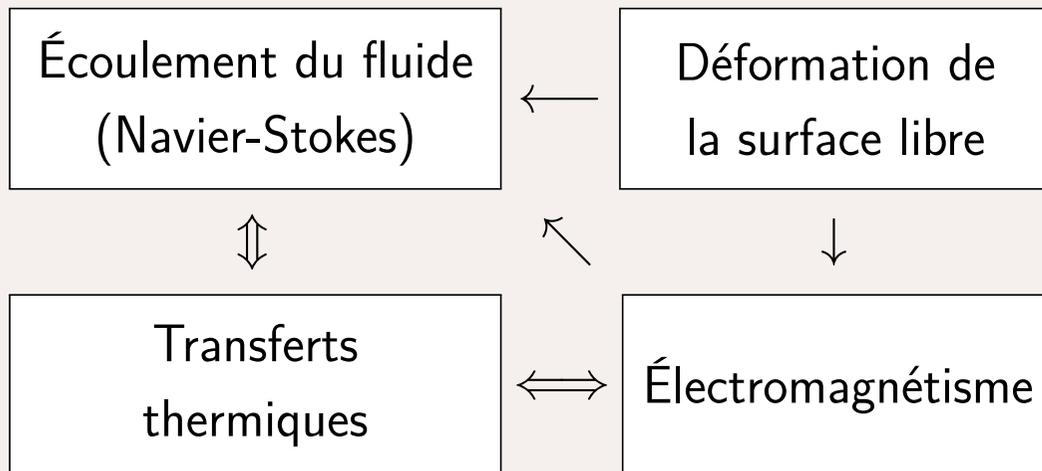


Nombreux phénomènes physiques



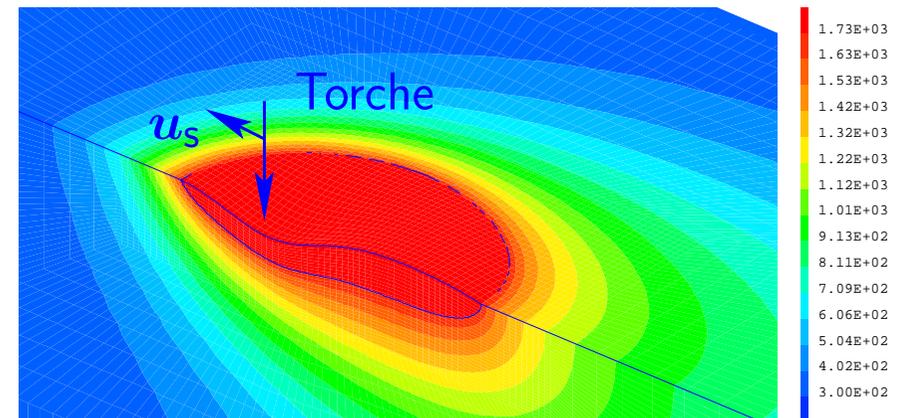
Approche & Objectifs

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

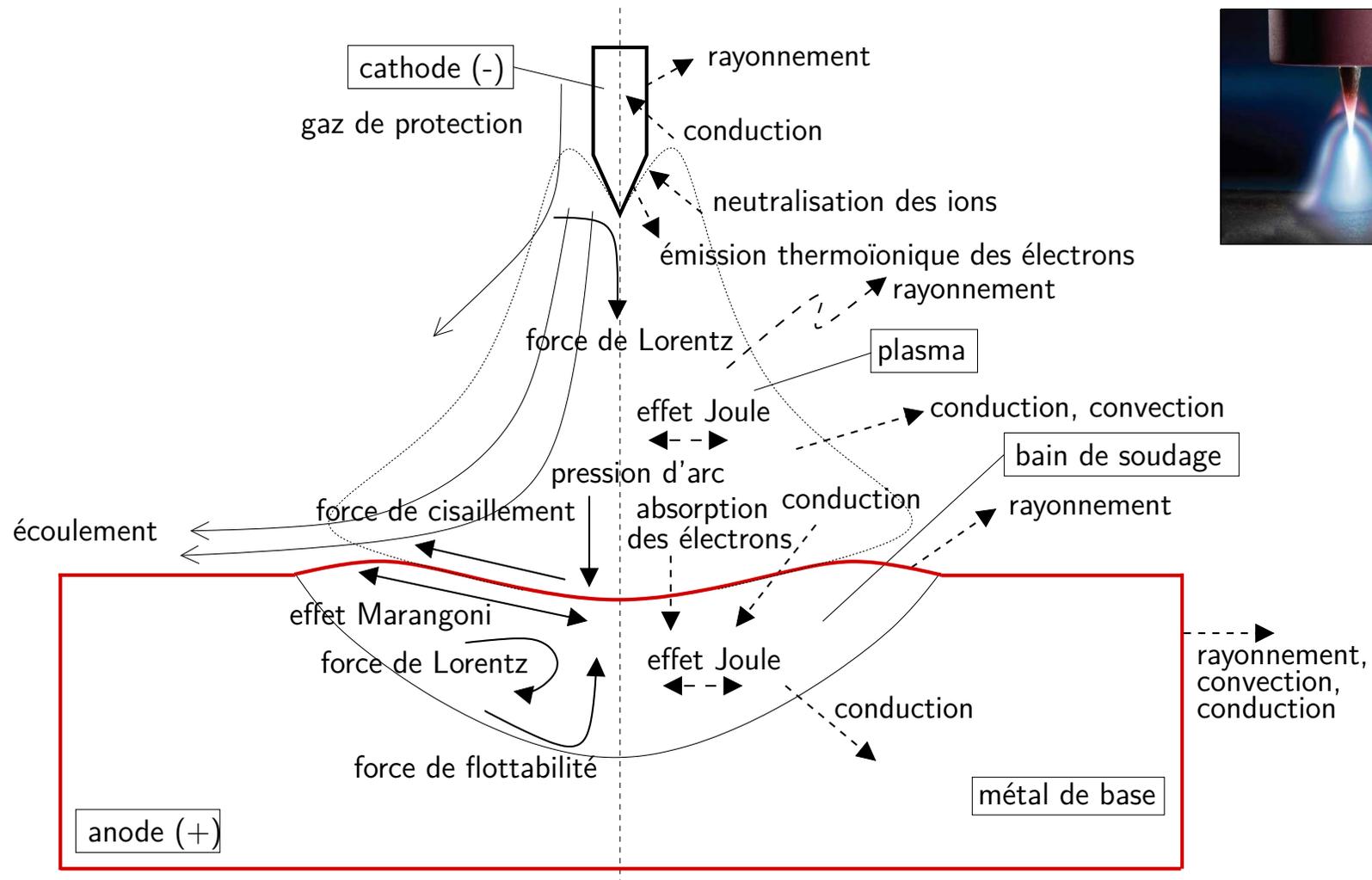
2 Comparaison à l'expérience

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 :

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

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

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

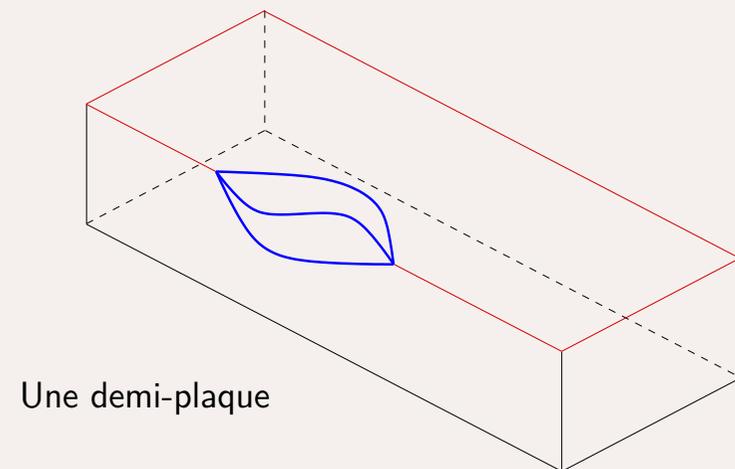
- Électromagnétisme :

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

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

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

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



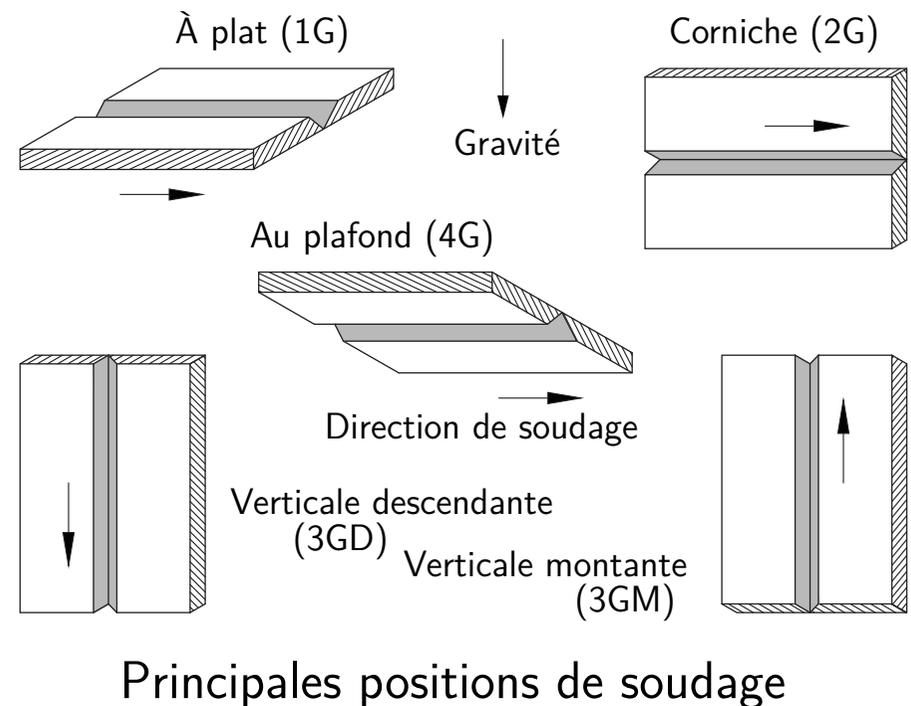
Modèle : Équation de la surface déformée (IV)

- 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 α_1 et α_2

Position	1G	2G	3GD	3GM	4G
α_1	0°	90°	90°	-90°	180°
α_2	0°	90°	0°	0°	0°



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

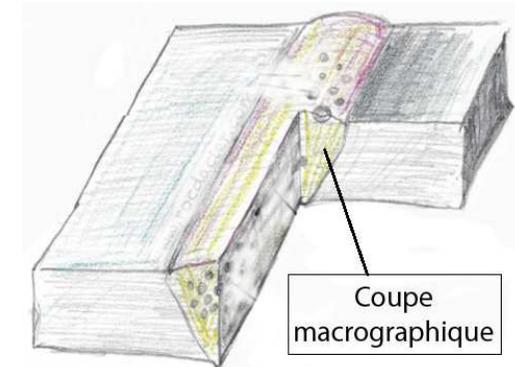
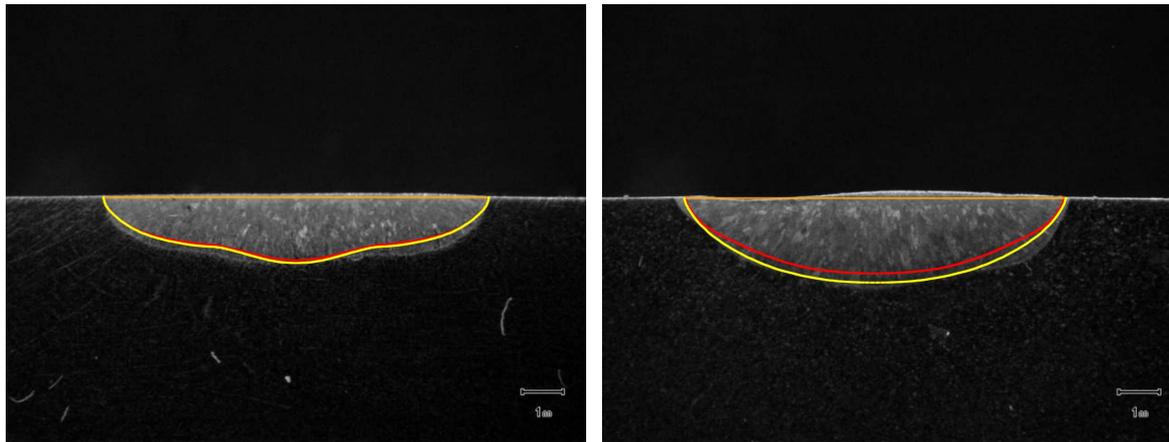
2 Comparaison à l'expérience

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

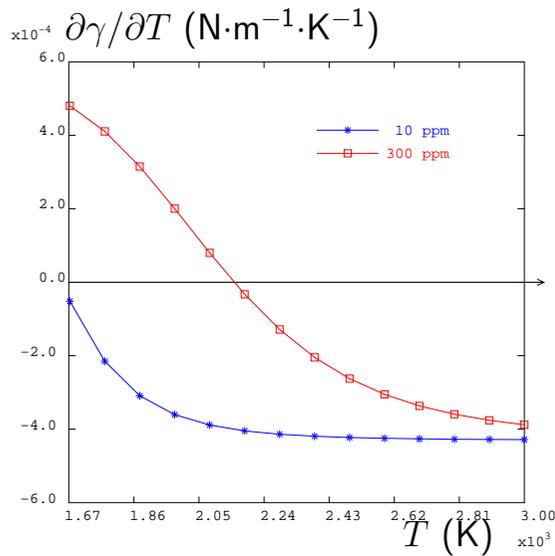
2 Comparaison à l'expérience

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)



Courants mouillants

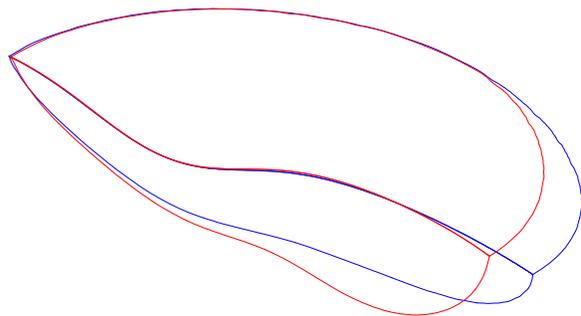
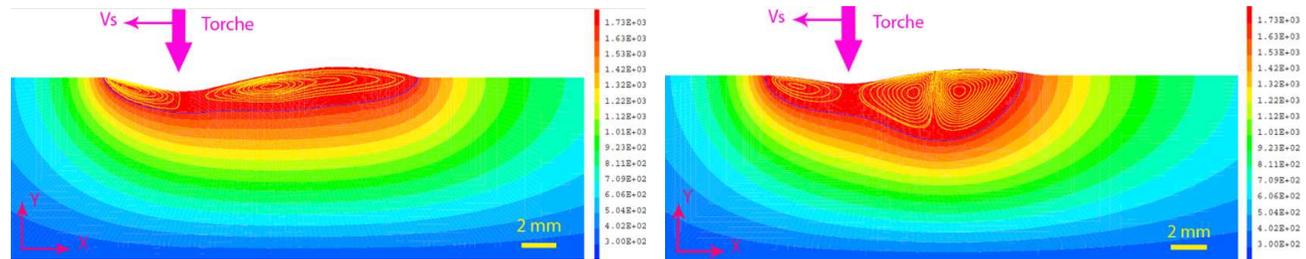
Courants pénétrants

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

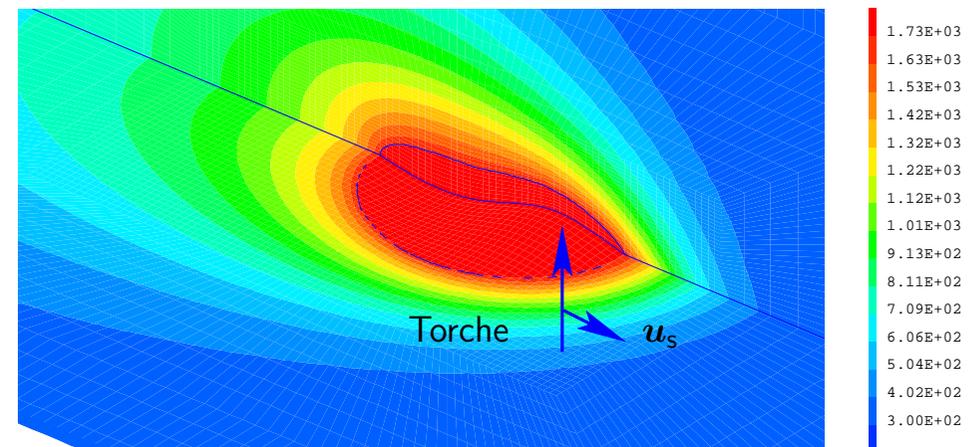
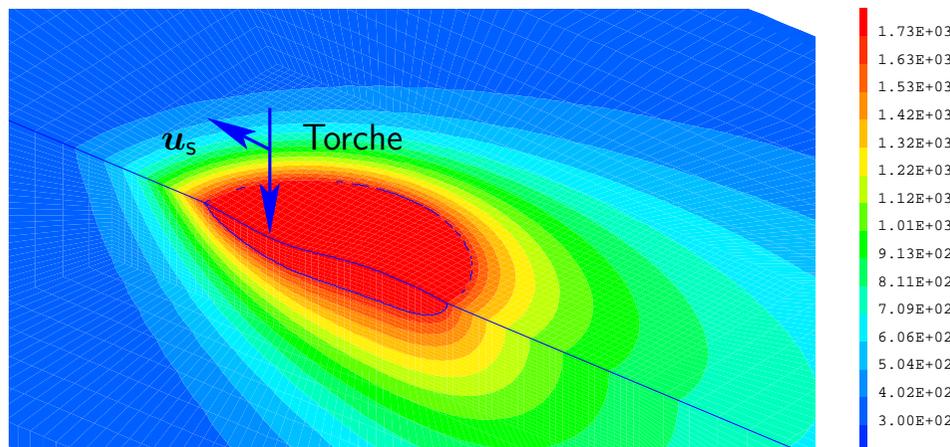
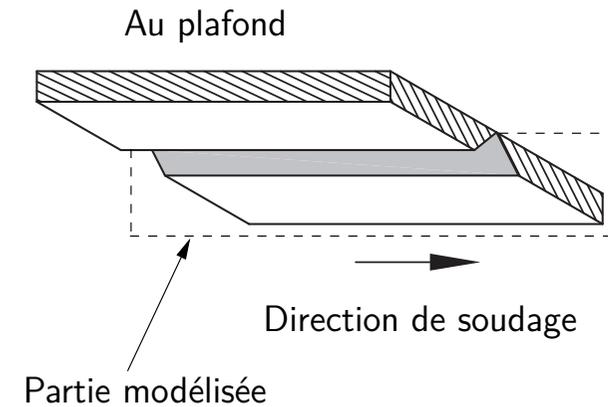
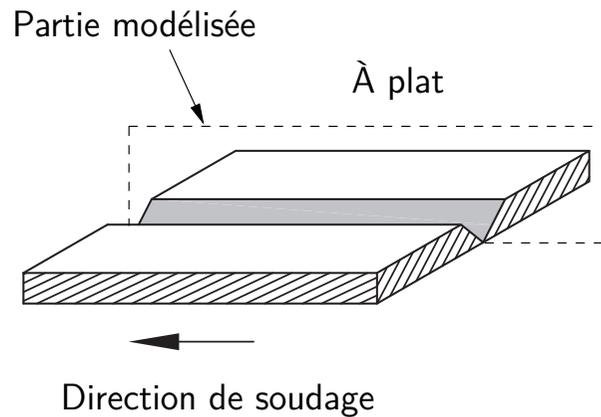
Résultats : Bilan des puissances mécaniques (II)

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)

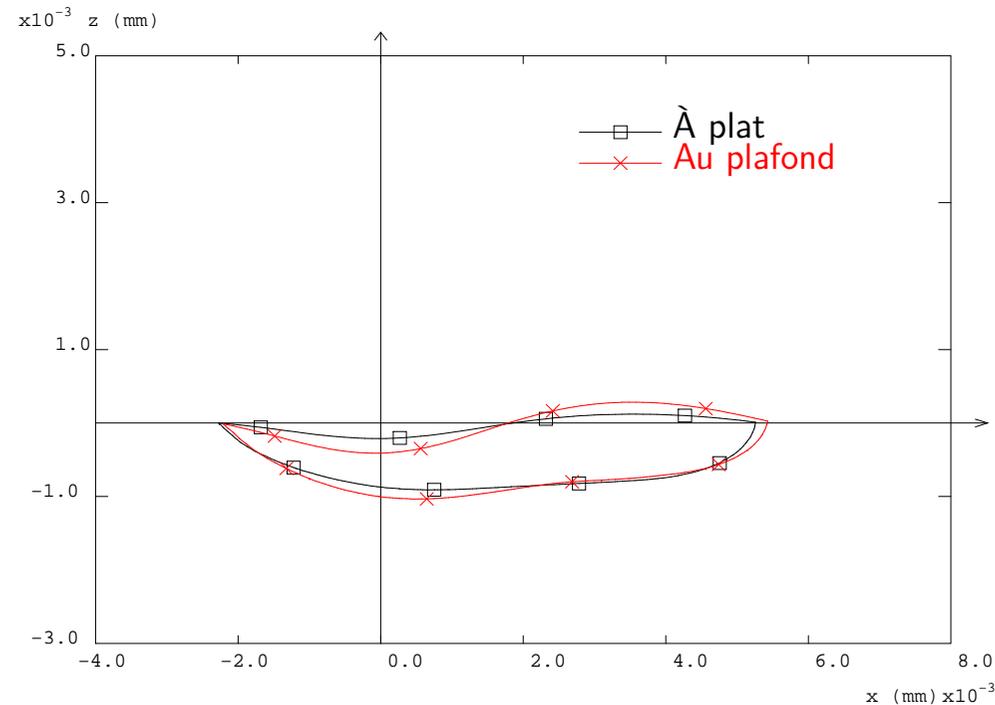
Description des puissances	Bas soufre (10 ppm)	Haut soufre (300 ppm)
Source de chaleur	612,00	612,00
$\int_{\partial\Omega_{\text{Sur}}} \frac{UI\eta}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right) d\partial\Omega_{\text{Sur}}$		
Pertes par diffusion	-441,95	-440,07
$\int_{\partial\Omega_{T=T_0}}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

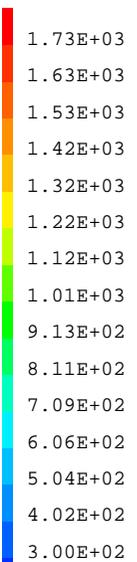
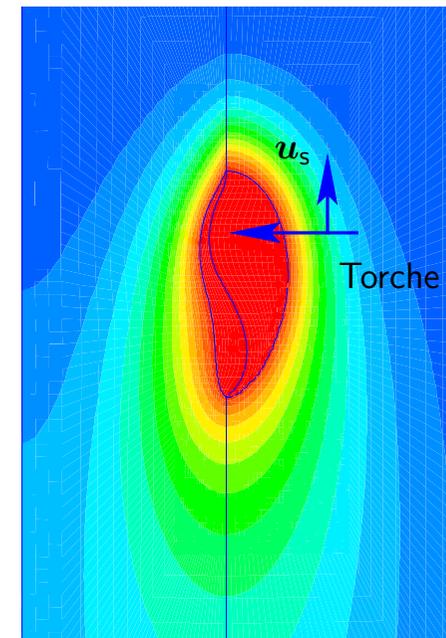
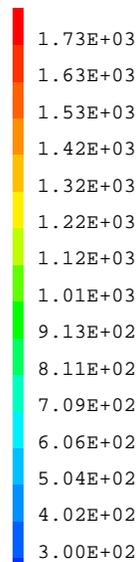
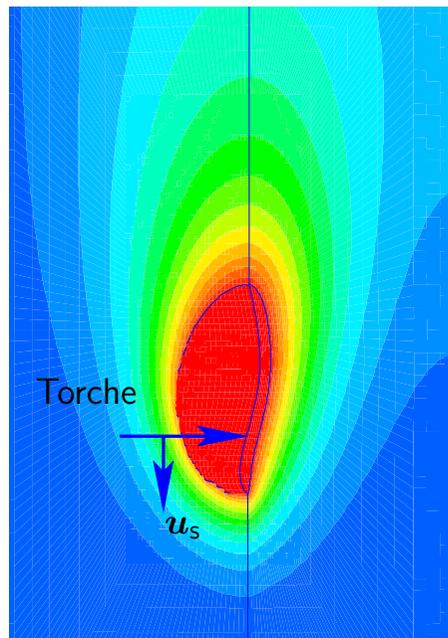
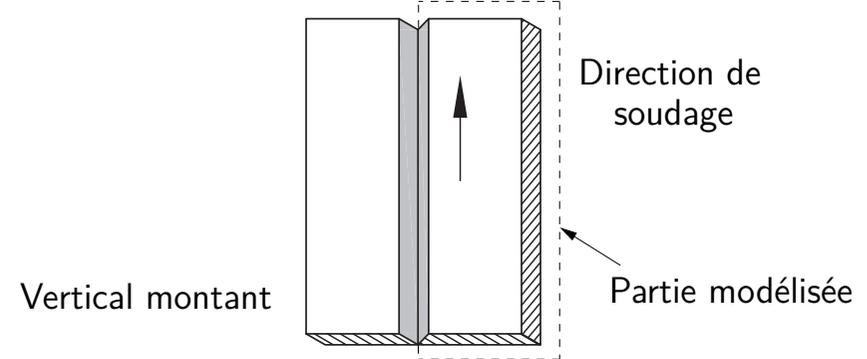
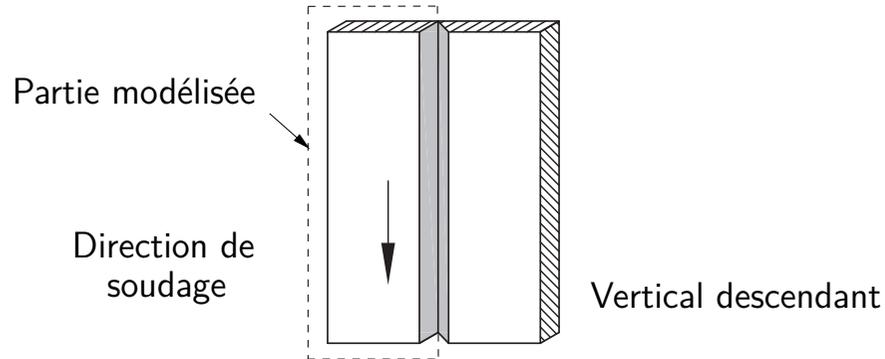
Résultats : Positions de soudage – 1G & 4G (V)



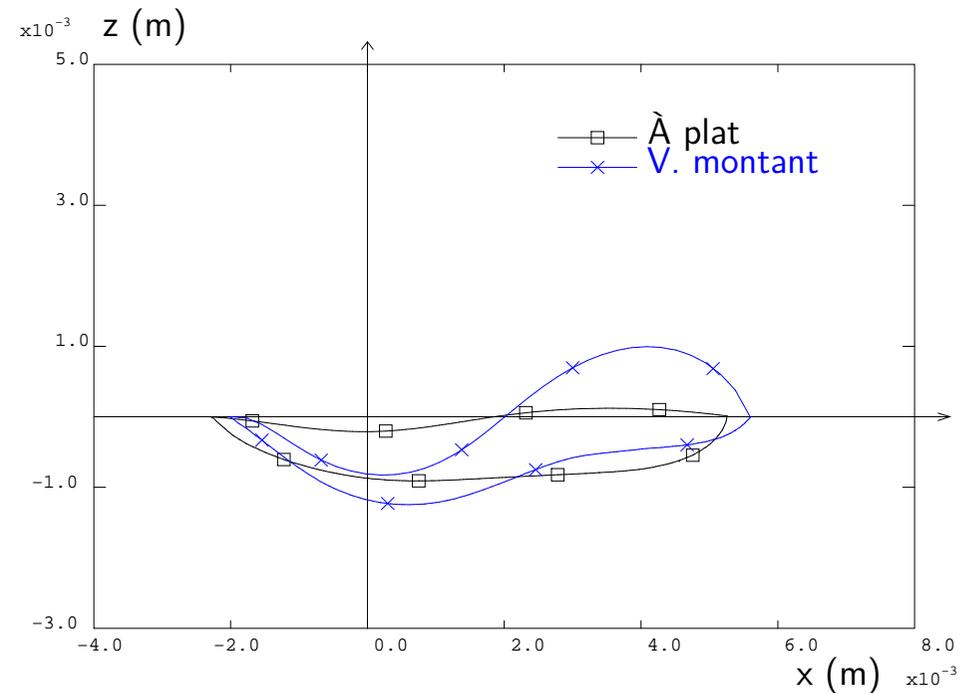
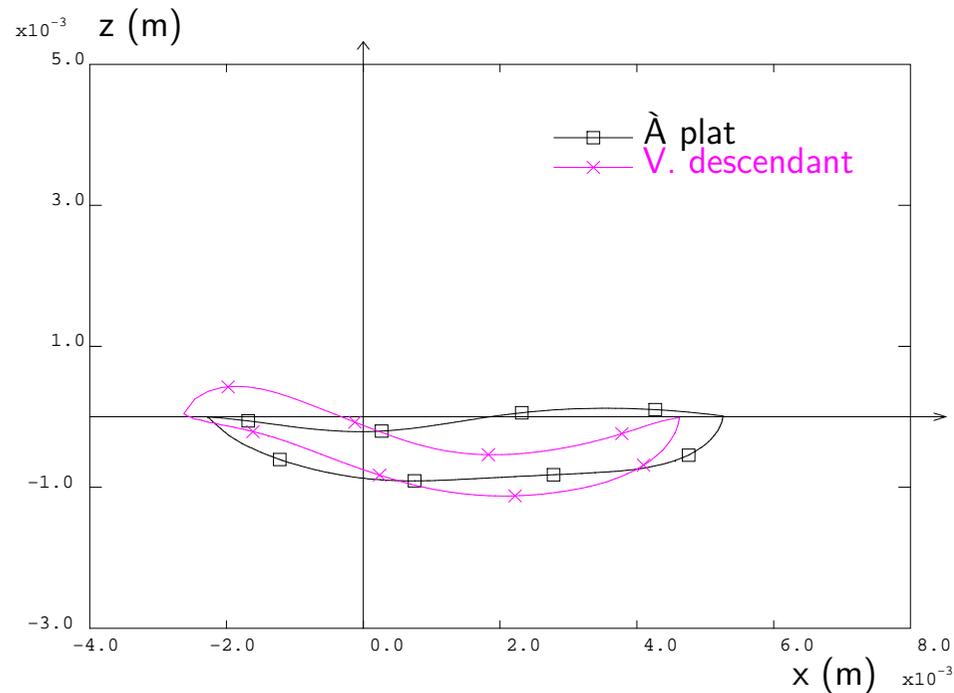
Comparaison de la forme du bain entre les positions à plat et au plafond

→ 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)

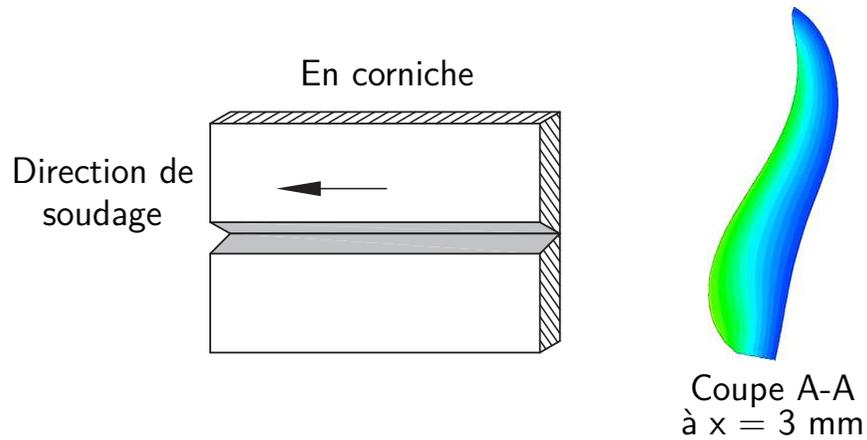


→ 3GD : une déformation convexe de la surface libre sous la source

→ 3GM : la pénétration est maximale

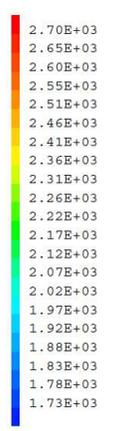
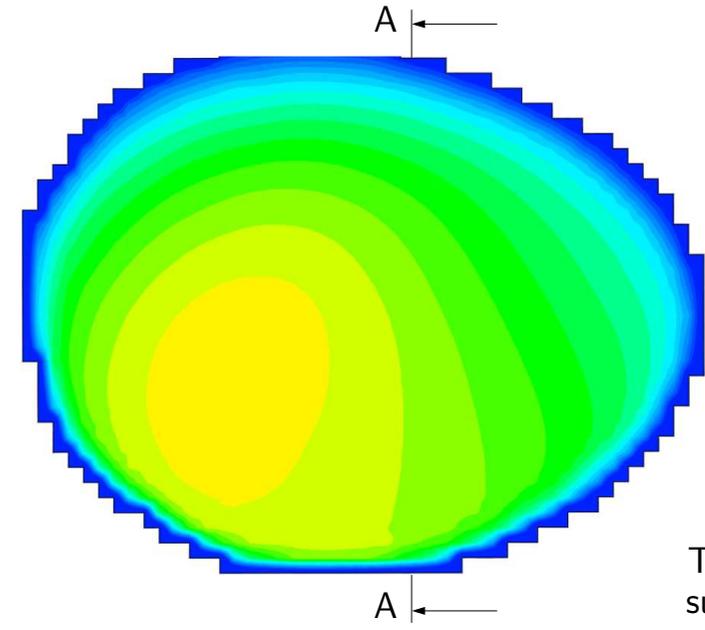
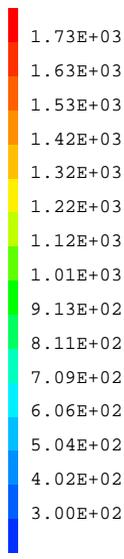
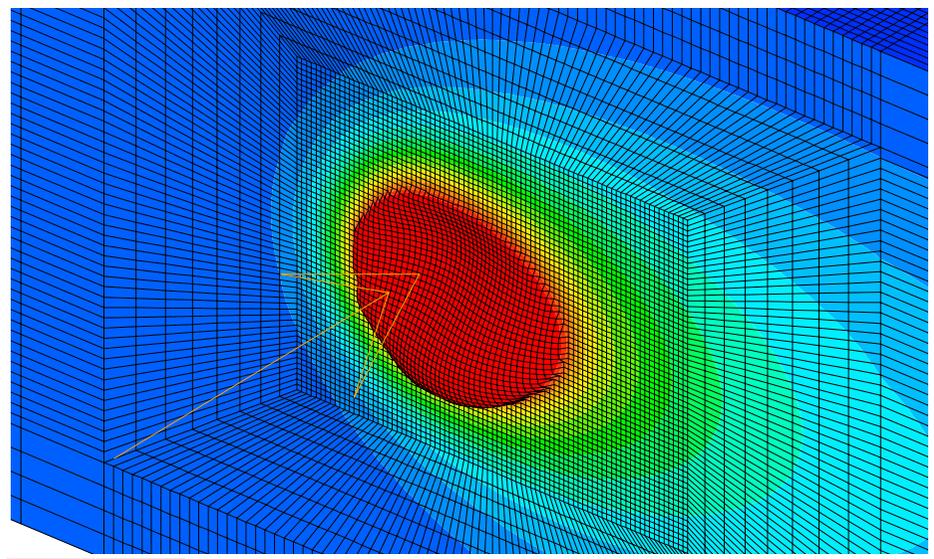
(tendance similaire au cours du soudage MAG [Kumar, 2007])

Résultats : Positions de soudage – 2G (VIII)



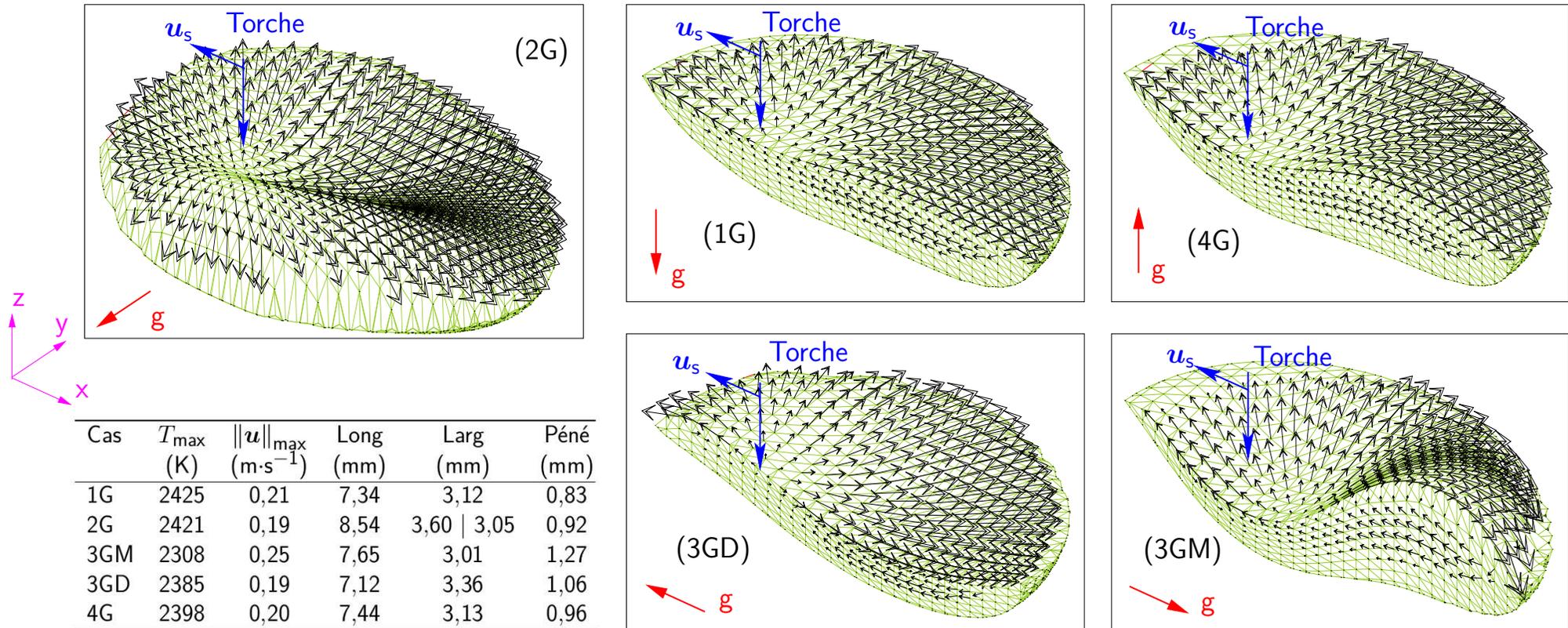
→ on utilise un domaine modélisant toute la plaque

→ 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.