

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG (Tungsten Inert Gas)

Michel Brochard

Club Cast3M 2006



Sommaire

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction
 - Le soudage TIG
 - Pourquoi modéliser le soudage?
2. Phénomènes physiques
3. Modèle général
 - Équations
 - Modèle électromagnétique
 - Termes sources volumiques
 - Conditions aux limites
4. Première étape : modèle bain
 - Méthode numérique
 - Traitement de l'électromagnétisme
 - Résultats
5. Conclusion



Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
 - Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

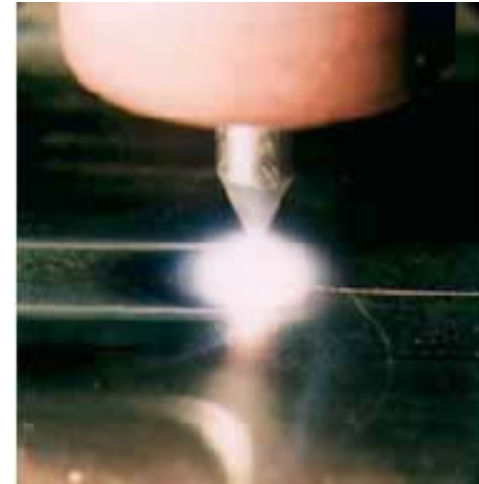
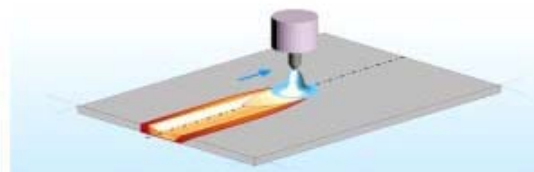
4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

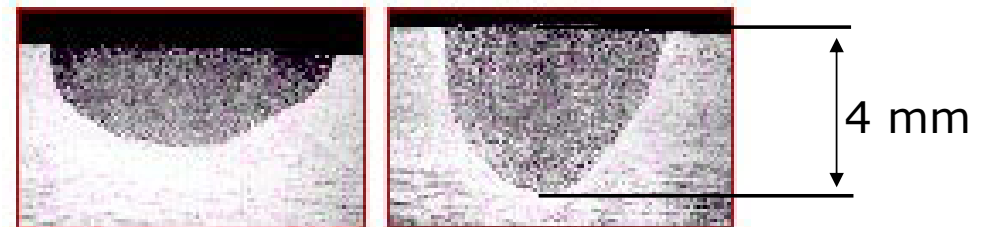
5. Conclusion

6. Références

- Le procédé



- Exemples de bain de soudage pour l'acier





Introduction: Pourquoi modéliser le soudage?

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

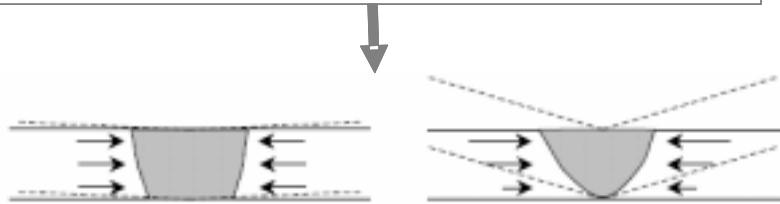
4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

Détermination de la géométrie du bain



Meilleure maîtrise du procédé:

- Prédiction des défauts
- Définition accrue de la soudabilité
- Meilleur réglage

Amélioration de l'étude mécanique:

- Contraintes résiduelles
- Déformations



Phénomènes physiques

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

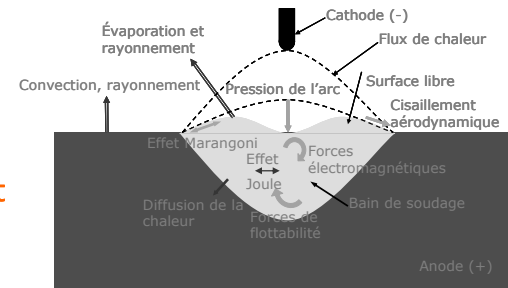
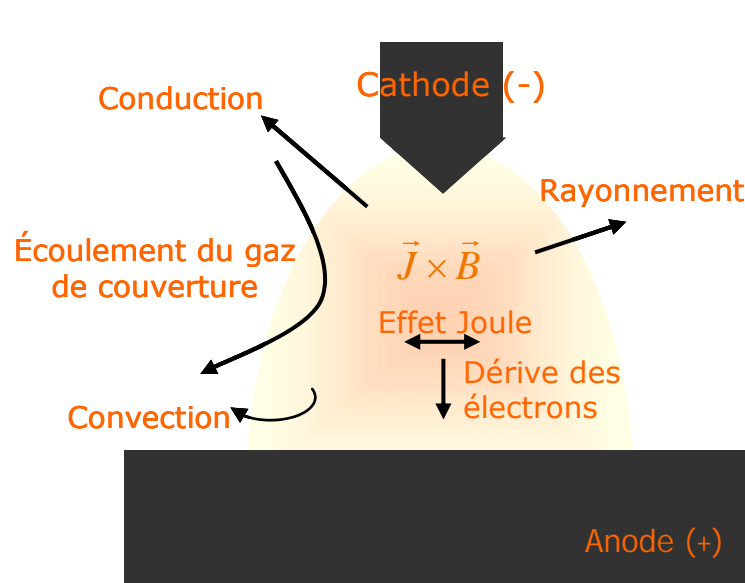
- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références





Phénomènes physiques

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

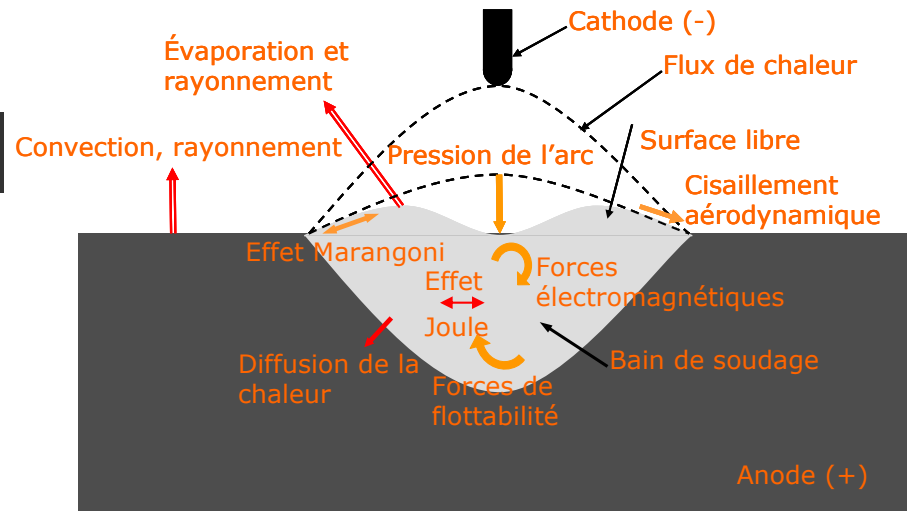
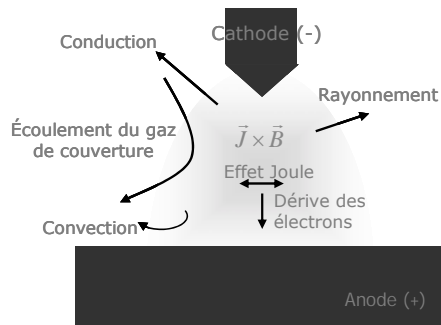
- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références





Modèle général

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

• Principales hypothèses généralement utilisées

- Le plasma est un fluide à pression atmosphérique
- Équilibre thermodynamique Local (Même température pour chacune des espèces)
- Utilisation d'un coefficient d'émission nette
- Cathode et anode non déformables

• Les équations générales de conservation

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = \nabla \cdot \vec{\sigma} + \vec{F}_{source} \\ \frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = -\nabla \cdot \vec{q} + \frac{dp}{dt} + \vec{\tau} : \nabla \vec{u} + \rho T \frac{dC_p}{dt} S \end{array} \right.$$

• Les lois de comportement

$$\vec{\sigma} = -P \vec{I} + \vec{\tau} = -P \vec{I} + \mu \left[(\nabla \otimes \vec{u}) + (\nabla \otimes \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{I} \right]$$

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T$$

• Loi d'état: $\rho = \frac{P.M}{R.T}$



Modèle électromagnétique

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

- Équations de Maxwell simplifiées et lois de comportement:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = \vec{0} \Rightarrow \vec{E} = -\nabla \phi \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \cdot (\mu_0 \vec{H}) = 0 \Rightarrow \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \\ \nabla \cdot \vec{J} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \\ \vec{J} = \sigma \vec{E} \end{cases}$$

Modèle électrocinétique

+

Modèle magnétostatique

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \phi = \phi_{imp} & \text{sur } \Gamma_1 \\ -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{J}_{imp} \cdot \vec{n} & \text{sur } \Gamma_2 \end{cases} \quad \begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_{imp} & \text{sur } \Omega \\ \nabla \cdot (\mu_0 \vec{H}) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \vec{n} \cdot (\mu \vec{H}) = 0 & \text{sur } \Gamma_1 \\ \vec{n} \times \vec{H} = \vec{0} & \text{sur } \Gamma_2 \end{cases}$$



Termes sources volumiques

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

Dans l'arc:

• Forces volumiques:

$$\vec{F}_{source} = \vec{F}_{Lorentz} + \vec{F}_{gravité} = \vec{J} \times \vec{B} + \rho \cdot \vec{g}$$

• Apport énergétique

$$S = S_{Joule} - S_{rayonnement} + S_{electrique}$$

$$= \frac{\|\vec{J}\|^2}{\sigma} - 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_N + \frac{5}{2} \cdot \frac{k_B}{e} \cdot (\vec{J} \cdot \vec{\nabla} T)$$

Dans le bain:

Modèle de Boussinesq:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\nabla \vec{u}) \vec{u} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} + \vec{F}_{source} \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T = -\nabla \cdot \vec{q} + S \end{array} \right.$$

- Forces volumiques:

$$\vec{F}_{source} = \vec{F}_{Lorentz} + \vec{F}_{flot} = \vec{J} \times \vec{B} - \rho_{ref} \cdot \beta \cdot (T - T_{ref}) \cdot \vec{g}$$

- Apport énergétique

$$S = S_{Joule} \approx 0$$



Conditions aux limites: exemple modèle bain

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

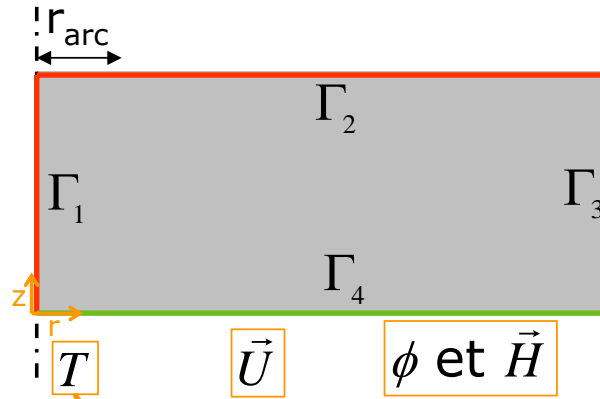
- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références



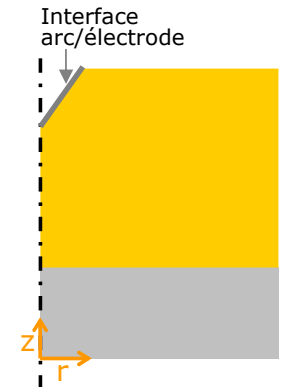
$$\Gamma_1 : \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$\Gamma_2 : -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = Q_{plasma} - Q_{rayonnement} - Q_{convection}$$

$$= \frac{\eta U I}{2 \cdot \pi \cdot r_{arc}^2} \left(-\frac{r^2}{2 \cdot r_0^2} \right) - \varepsilon (T^4 - T_0^4) - h(T - T_0)$$

$$\Gamma_3 : \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$\Gamma_4 : T = -\frac{400}{3} r + 800$$



- Domaine arc
- Domaine pièce
- Dirichlet
- Neumann



Conditions aux limites: exemple modèle bain

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

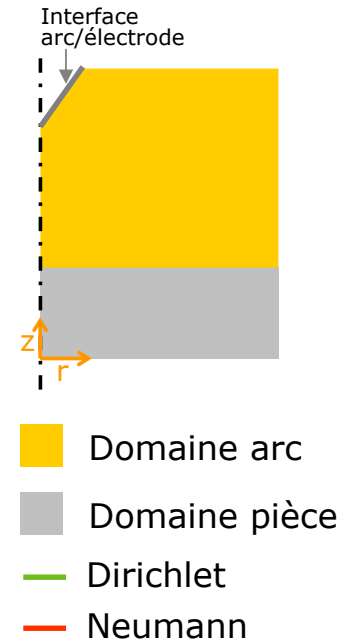
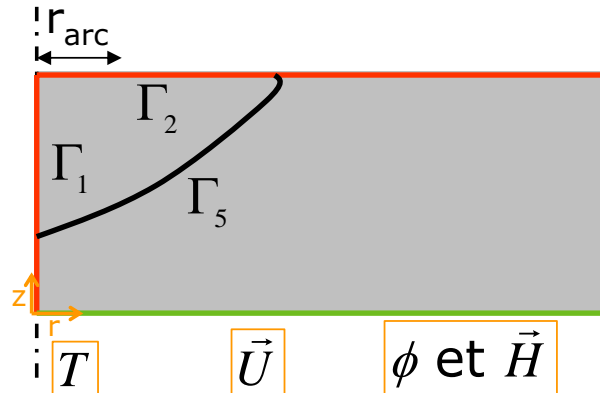
- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références



$$\Gamma_1 : u_r = 0$$

$$\Gamma_2 : \vec{n} \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{n}) = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial n} + \gamma \cdot R$$

$$\vec{\tau} \cdot (\vec{\sigma} \cdot \vec{n}) = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

$$\Gamma_5 : \vec{u} = \vec{0}$$



Conditions aux limites: exemple modèle bain

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

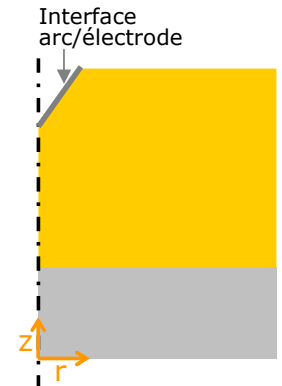
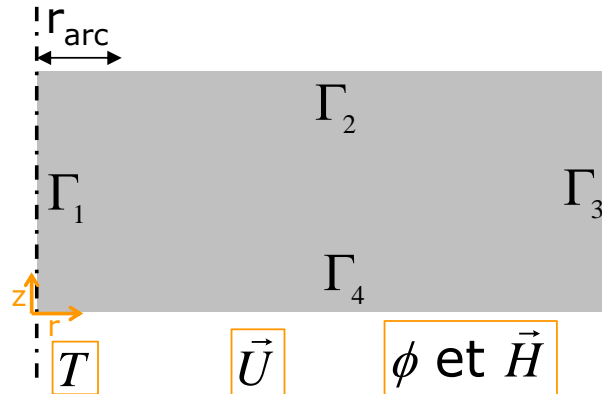
- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références



Domaine arc
 Domaine pièce

<p>Pour ϕ :</p> $\Gamma_1 : \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$ $\Gamma_2 : -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{3I}{\pi \cdot r_{arc}^2} \exp\left(-3\left(\frac{r}{r_{arc}}\right)^2\right)$ $\Gamma_3 : \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$ $\Gamma_4 : \phi = 12$	<p>Pour \vec{H} :</p> $\Gamma_1 : \vec{n} \times \vec{H} = 0$ $\Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 : \vec{n} \cdot (\mu \vec{H}) = 0$
---	---

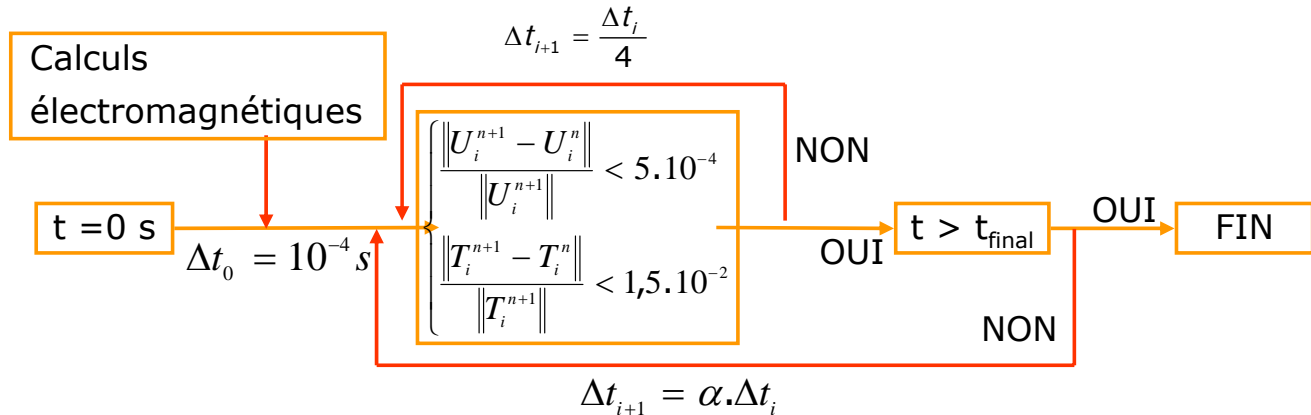


Modèle bain: méthode numérique

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction
 - Le soudage TIG
 - Pourquoi modéliser le soudage?
2. Phénomènes physiques
3. Modèle général
 - Équations
 - Modèle électromagnétique
 - Termes sources volumiques
 - Conditions aux limites
4. Première étape : modèle bain
 - Méthode numérique
 - Traitement de l'électromagnétisme
 - Résultats
5. Conclusion
6. Références



- **Hypothèses:**
 - Laminaire
 - Approximation de Boussinesq
 - Surface libre indéformable
 - Caractéristiques thermophysiques constantes par phase
- **Méthodes:**
 - Éléments Q2 (T, Φ, **U** et **H**) et Q1 (P) dans la partie fluide
 - Euler implicite d'ordre 1



Traitement de l'électromagnétisme

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

- **Modèle électrocinétique:**

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \phi = \phi_{imp} & \text{sur } \Gamma_1 \\ -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = \vec{J}_{imp} \cdot \vec{n} & \text{sur } \Gamma_2 \end{cases}$$

- Formulation de Galerkin:

$$\int_{\Omega} [(\sigma \nabla \phi) \cdot (\nabla \phi^*)] d\Omega = \int_{\partial\Omega} [\phi^* (\sigma \nabla \phi) \cdot \vec{n}] dS$$

- **Modèle magnétostatique:**

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_{imp} & \text{sur } \Omega \\ \nabla \cdot (\mu_0 \vec{H}) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \vec{n} \cdot (\mu \vec{H}) = 0 & \text{sur } \Gamma_1 \text{ (face conductrice)} \\ \vec{n} \times \vec{H} = \vec{0} & \text{sur } \Gamma_2 \text{ (symétrie)} \end{cases} \quad \text{avec: } \begin{cases} \nabla \cdot \vec{J}_{imp} = 0 & \text{sur } \Omega \\ \int_{\Gamma} \vec{n} \cdot \vec{J}_{imp} ds = 0 & \text{sur } \Gamma \end{cases}$$

- Formulation LSFEM (Least Square Finite Element Method):

$$\int_{\Omega} [(\nabla \times \vec{H})(\nabla \times \vec{H}^*)] d\Omega + \int_{\Omega} [(\nabla \cdot \mu_0 \vec{H})(\nabla \cdot \mu_0 \vec{H}^*)] d\Omega = \int_{\Omega} [\vec{J}_{imp} \cdot (\nabla \times \vec{H}^*)] d\Omega$$



Cas test magnétostatique

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

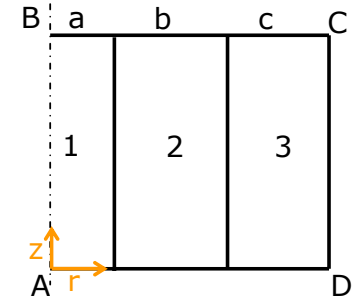
4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

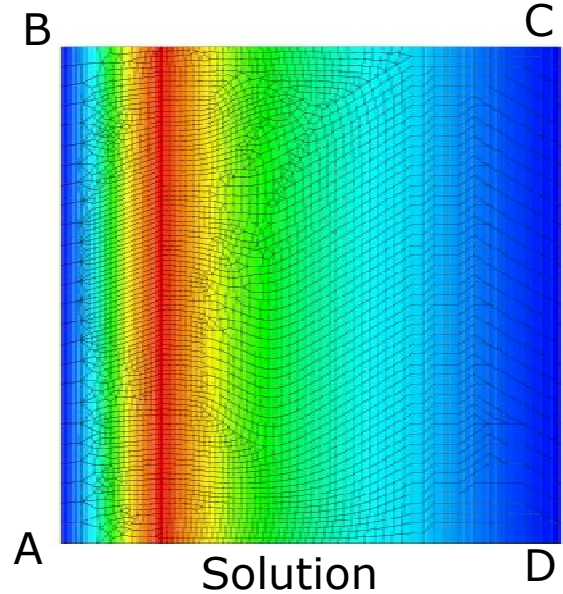
6. Références

$$\begin{cases} \vec{J}_1 = \frac{I}{\pi \cdot a^2} \vec{z} \\ \vec{J}_2 = \vec{0} \\ \vec{J}_3 = \frac{I}{\pi \cdot (c^2 - b^2)} \vec{z} \end{cases} \quad \text{donne la solution analytique:} \quad \begin{cases} \vec{H}_1 = \frac{I \cdot r}{2\pi \cdot a^2} \vec{\theta} \\ \vec{H}_2 = \frac{I}{2\pi \cdot r} \vec{\theta} \\ \vec{H}_3 = \frac{I}{2\pi \cdot r} \left[1 - \left(\frac{r^2 - b^2}{c^2 - b^2} \right) \right] \vec{\theta} \end{cases}$$



- Utilisation de Cast3m : opérateurs NLIN + KRES
- Méthode du gradient conjugué
- 4088 éléments Q2
- Temps de calcul: 2s (2 Go RAM, CPU 3.4 GHz)
- ordre de convergence: 3
- Erreur relative ici:

$$\frac{\|\vec{H}_{ref} - \vec{H}_{sol}\|}{\|\vec{H}_{ref}\|} = 7.10^{-7}$$





Résultats

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

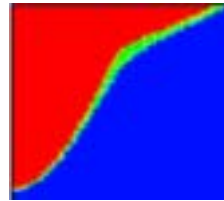
5. Conclusion

6. Références

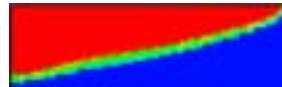
- Puissance effective: 900 W
- Courant : 100 A, Tension: 12 V, rendement: 75%

• Résultats:

1. $\frac{\partial \gamma}{\partial T} = 10^{-4} \text{ N.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

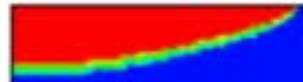


2. $\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -10^{-4} \text{ N.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

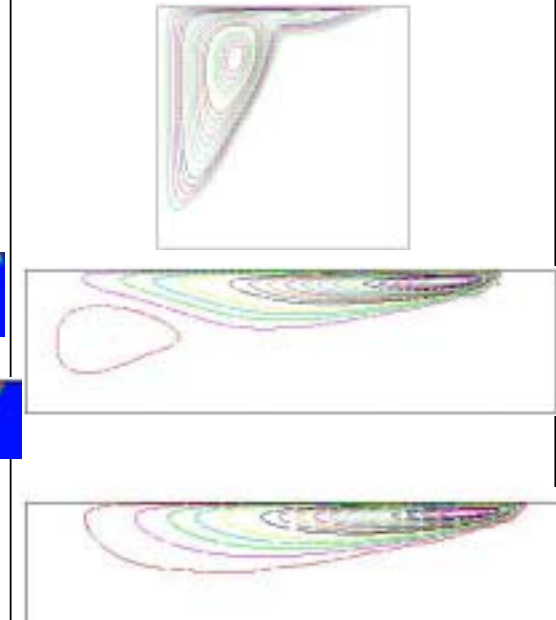


3. Sans électromagnétisme

+ $\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -10^{-4} \text{ N.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



Fonctions de courant, t=7s





Conclusion

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

- Formulation LSFEM rapide et efficace pour un modèle magnétostatique
- La forme du bain dépend fortement de la chimie du métal
- Effets électromagnétiques non négligeables sur la forme du bain

Perspectives :

- Modéliser le domaine arc est nécessaire pour :
 - Définir les conditions aux limites aux bain plus adaptées
 - Modéliser un plus grand nombre de géométrie de pièce



Références

Modélisation du bain de soudage pour le procédé TIG

Par Michel Brochard

1. Introduction

- Le soudage TIG
- Pourquoi modéliser le soudage?

2. Phénomènes physiques

3. Modèle général

- Équations
- Modèle électromagnétique
- Termes sources volumiques
- Conditions aux limites

4. Première étape : modèle bain

- Méthode numérique
- Traitement de l'électromagnétisme
- Résultats

5. Conclusion

6. Références

- Guermond, J.L.; Ern, A.; **Éléments finis: théorie, applications, mise en œuvre**
Livre, Springer, 2001
- Jiang, B.; **The Least Square Finite Element Method**
Livre, Springer, 1998
- Vacquié, S.; **L'arc électrique**
Livre, CNRS Éditions, 2000
- Gonzalez, J.; **A numerical modelling of an electrical arc and its interaction with the anode: Part I: The two-dimensional model**
Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37, 883-897
- Tanaka, M.; **Numerical study of gas tungsten arc plasma with anode melting**
Vacuum, 2004, 73, 381-389