

Congrès Français de Mécanique 2022
31/08/2022



Modélisation magnéto-thermo-hydrodynamique du soudage TIG : couplage 3D unifié du plasma d'arc et du bain de soudage

FROM RESEARCH TO INDUSTRY

Présentateur	Stéphane GOUNAND	Ingénieur de recherche	Laboratoires des technologies d'assemblage
Collaborateurs	Christopher NAHED Marc MEDALE Pierre VERPEAUX Clément BERTHINIER	Ingénieur de recherche Enseignant-Chercheur Co-créateur de Cast3M Ingénieur de recherche	Laboratoire de la modélisation et simulation des structures Laboratoire IUSTI, CNRS-Aix Marseille Université Laboratoire de la modélisation et simulation des structures Laboratoire de simulation de procédé et systèmes

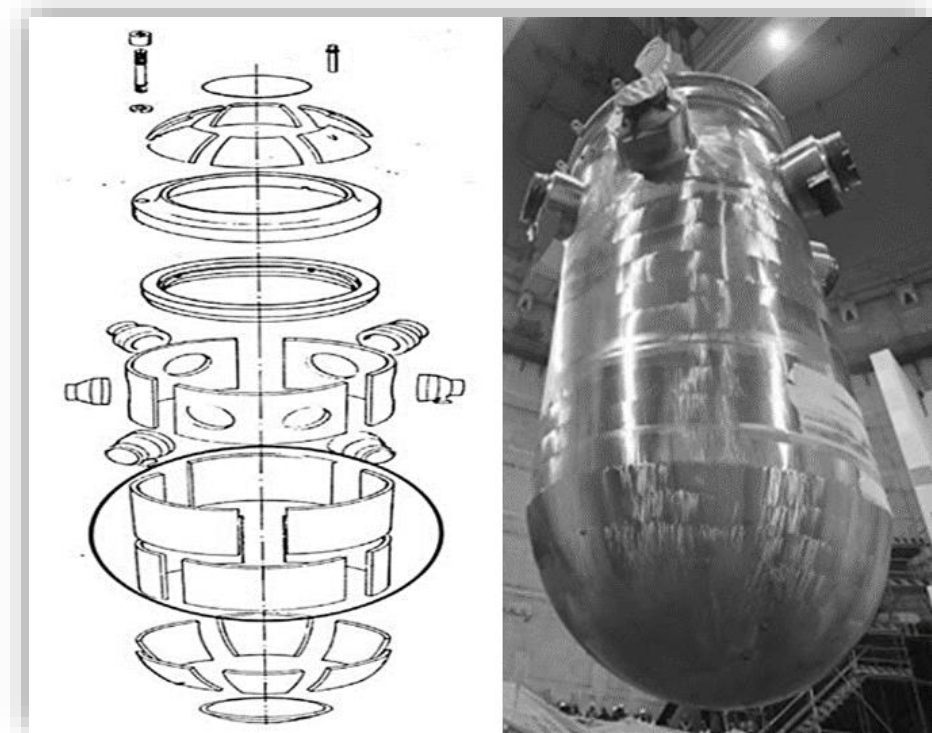
CONTEXTE

Fabrication de réacteurs nucléaires pour l'industrie

Fabrication de la cuve

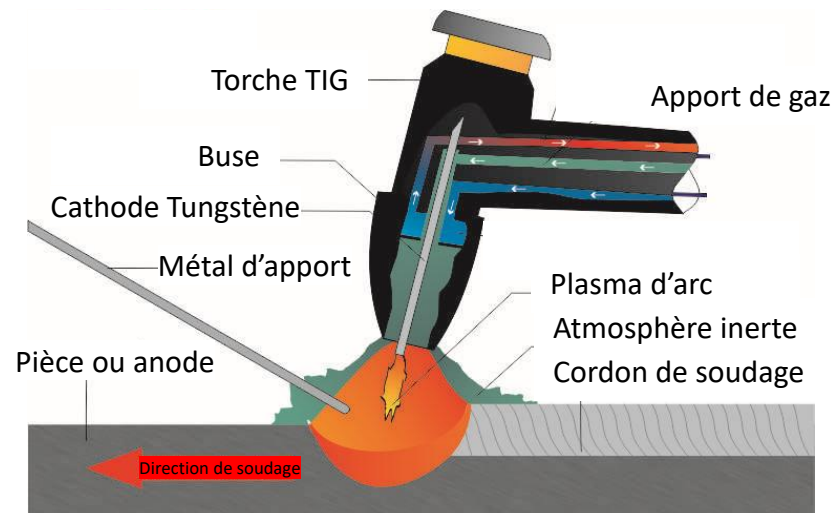
- Réalisation des composants
- Assemblages des composants

→ Le choix des méthodes d'assemblage est essentiel



Source: IAEA Nuclear Energy Series

Soudage Tungsten Inert Gas (TIG)

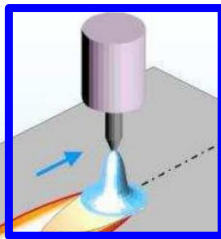


Avantages principaux

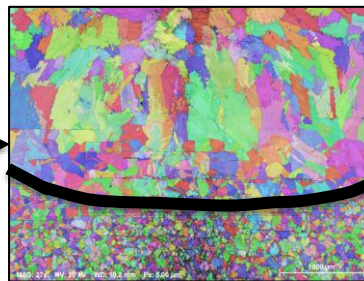
- ✓ Soudures de bonne qualité
- ✓ Technique de soudage de haute précision
- ✓ Procédé stable et contrôlable
- ✓ Bon rapport qualité/prix

Phénomènes majeurs pertinents au soudage

Génération,
transfert de chaleur,
fusion et solidification

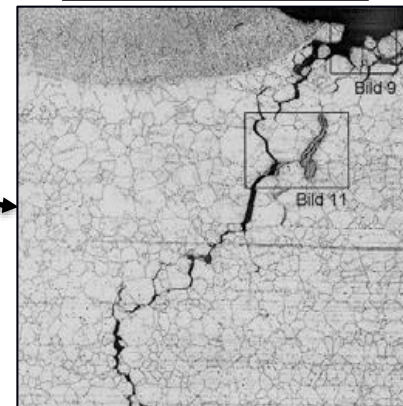


Changement de phase



Travaux de thèse : Baptiste Py

Endommagement
thermomécanique



TNO Science and Industry

La modélisation du soudage TIG
sollicite plusieurs approches

Nous sommes intéressés aujourd'hui par la modélisation du procédé

Déformation mécanique

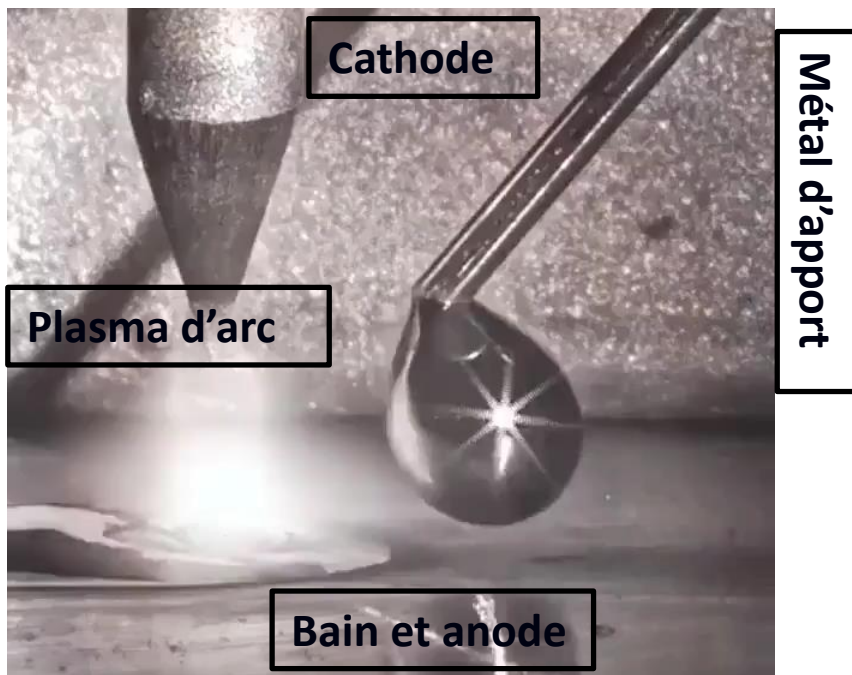
[Andreas Lundbäck thesis]

Angular deformation

Bending deformation

EWM group

Phénomènes physiques influençant la thermique du procédé TIG



[Cavitar Ltd]

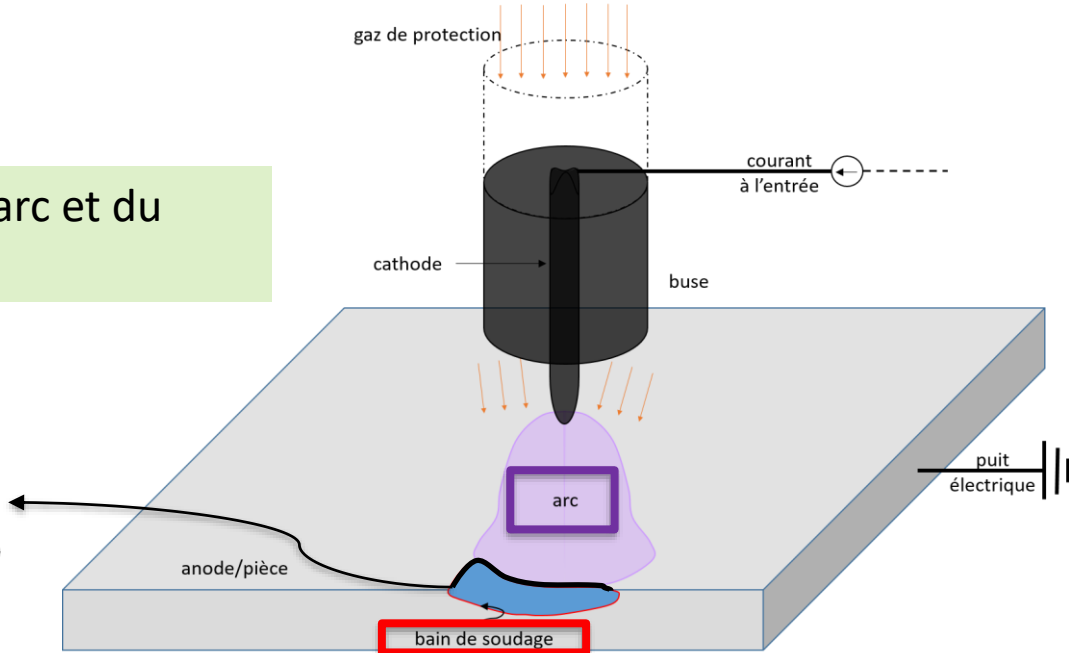
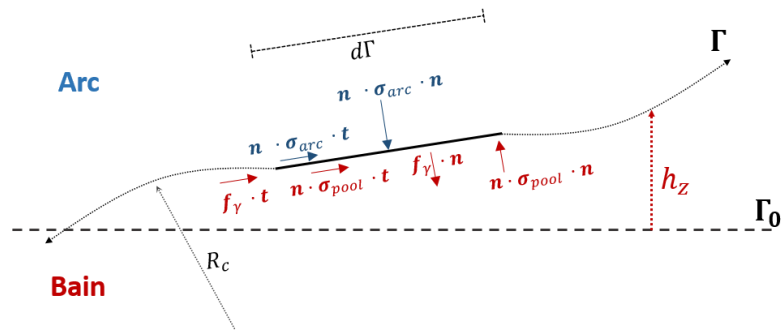
- Phénomènes électrothermiques
- Phénomènes magnétohydrodynamiques
- Interactions multi-fluides
- Transferts de chaleur conjugués
- Changement de phase

Modélisation magnéto-thermo-hydrodynamique

Couplage de l'arc et du bain

Complexité du couplage repose sur

- L'interaction thermo-hydraulique de l'arc et du bain (interface)



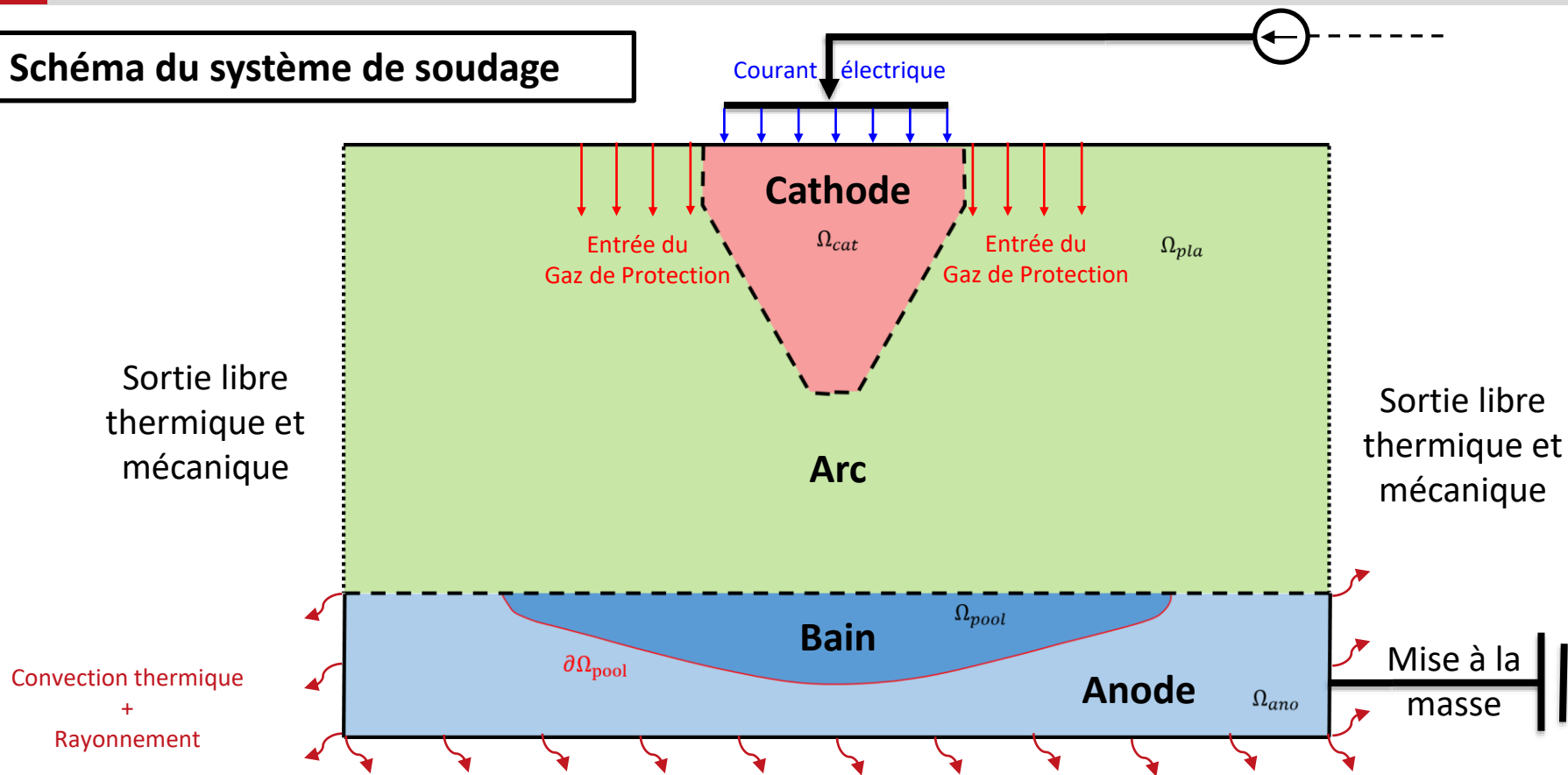
- Les effets de transferts de chaleur (transport > diffusion)
- Les effets de changement de phase (chaleur latente)

$$Pe \sim 100$$

$$Ste \approx 1$$

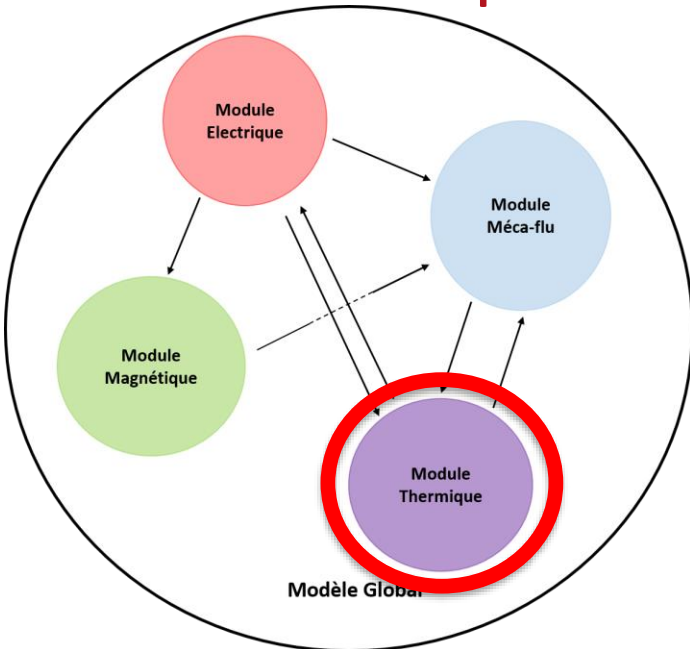
La méthodologie de modélisation

Schéma du système de soudage



Généralités : techniques de couplage multiphysique [Patricot2016, Felippa2001, Causin2005]

Algorithmes de couplage



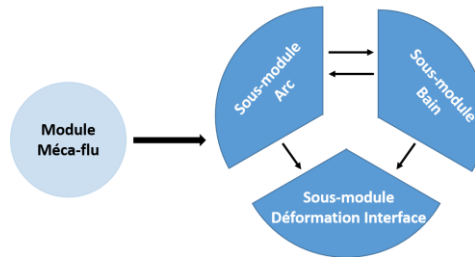
Méthodes de couplage

- ➔ Gauss-Seidel
- ➔ Newton-Raphson

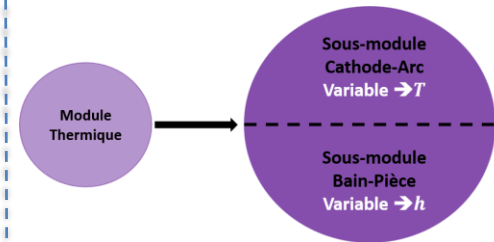
➔ Partitionné par module/physique

$$\begin{cases} \left[\frac{\partial R_\phi}{\partial \phi} \right]^{k-1} \{\delta \phi\}^k = - \{R_\phi(\phi^{k-1}, T^{k-1}, B^{k-1}, \mathbf{u}^{k-1})\} \\ \left[\frac{\partial R_T}{\partial T} \right]^{k-1} \{\delta T\}^k = - \{R_T(\phi^k, T^{k-1}, B^{k-1}, \mathbf{u}^{k-1})\} \\ \left[\frac{\partial R_B}{\partial B} \right]^{k-1} \{\delta B\}^k = - \{R_B(\phi^k, T^k, B^{k-1}, \mathbf{u}^{k-1})\} \\ \left[\frac{\partial R_u}{\partial \mathbf{u}} \right]^{k-1} \{\delta \mathbf{u}\}^k = - \{R_u(\phi^k, T^k, B^k, \mathbf{u}^{k-1})\} \end{cases}$$

➔ Partitionné par domaine



➔ *Mixed variable* monolithique



Les équations thermohydrauliques

Equations des écoulements, arc-plasma et bain de soudage

Arc-plasma

Conservation de masse :
dilatable, régime bas-Mach

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = -\frac{d \ln(\rho)}{dT} \nabla T \cdot \mathbf{u}$$

Conservation de quantité de mouvement :
écoulement laminaire

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla P +$$

$$\nabla \cdot \mu \left(\nabla \mathbf{u} + \nabla^t \mathbf{u} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right) + \mathbf{f}_{Lor}$$

Bain de soudage

Conservation de masse :
incompressible

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

Conservation de quantité de mouvement :
écoulement laminaire

$$\rho \mathbf{v} \cdot (\nabla \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu^* (\nabla \mathbf{v} + \nabla^t \mathbf{v}) + \mathbf{f}_{Lor} + \mathbf{f}_{Bou}$$

$$\mathbf{f}_{Bou} = -\beta \rho_{ref} \mathbf{g} (T - T_{ref})$$

$$\mu^* = \mu f_L + \mu_{damp} (1 - f_L)$$

$$f_L = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases}$$

Sans apport de matière et en négligeant l'évaporation

Interface fluide arc-pièce

Conditions mécaniques

Conditions cinématiques

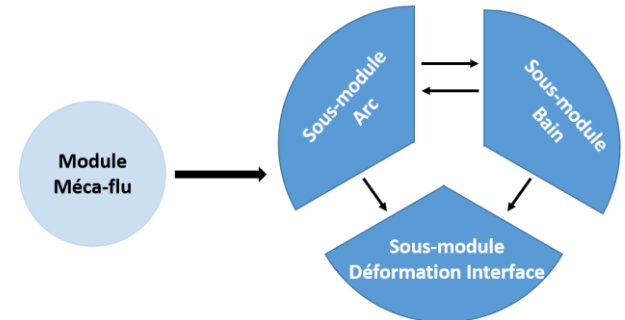
$$(\rho_{arc} \mathbf{u} - \rho_{pool} \mathbf{v})_{\Gamma} \cdot \mathbf{n} = 0$$

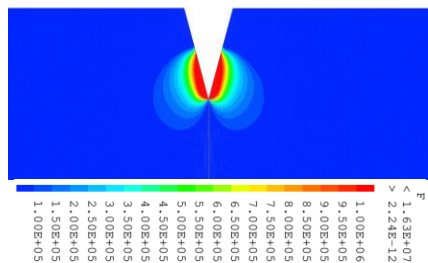
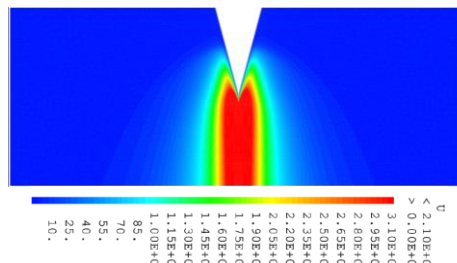
$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{t}$$

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$$

Condition dynamique

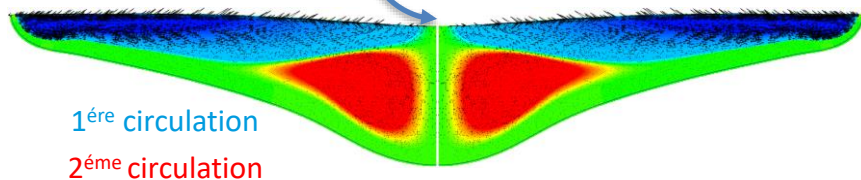
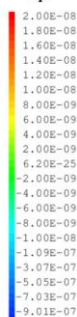
$$0 = (\rho_{arc} - \rho_{pool}) g h_z \cdot \mathbf{n} + (\boldsymbol{\sigma}_{arc} - \boldsymbol{\sigma}_{pool}) \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_s T + (\gamma \nabla_s \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$



Lorentz Force
[N/m³]Norme des Vitesses
[m/s]

Les champs de vitesses nous servent comme champs de transport pour la thermique

Force de Marangoni, pression d'arc, cisaillement d'arc

 Ψ 

1. Champs de vitesses:
 - a) Dans l'arc-plasma
 - b) Dans le bain fondu
2. Déformation de l'interface fluide

Equations thermiques, arc-plasma et bain/pièce fondu**Équations volumiques**Arc :

advection, conduction, émission

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \lambda \nabla T + s_{\text{Joule}} - s_{\text{Ray,pl}}$$

Pièce et bain de soudage :

advection, conduction

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla h = \nabla \cdot \left(\lambda \nabla \left(\frac{h}{c_p} \right) \right) + s_{\text{Joule}}$$

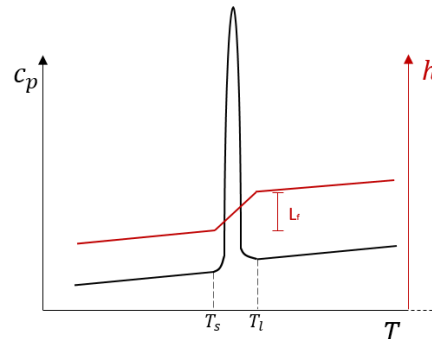
$$\mathbf{v} = \begin{cases} \mathbf{V}_{\text{defil}} & T < T_{\text{solidus}} \\ \mathbf{v}_{\text{bain}} & T > T_{\text{solidus}} \end{cases}$$

Interface thermique arc-pièceContinuité de la température

$$? \quad T_{\Gamma_{\text{arc}}} = \left[\int_{h_{\text{ref}}}^h \frac{1}{c_p(T)} dh \right]_{\Gamma_{\text{ano}}} + T_{\text{ref}} \quad ?$$

Equilibre thermique

$$0 = (\mathbf{q}_{\text{arc}} - \mathbf{q}_{\text{ano}}) \cdot \mathbf{n} + j_{\text{API}} W_{\text{ano}} - \epsilon \sigma_B (T - T_{\infty})^4$$



**Rappel : $Ste \approx 1$
Utilisation de l'enthalpie**

Continuité de la température

$$T_{\Gamma_{arc}} = \left[\int_{h_{ref}}^h \frac{1}{c_p(T)} dh \right]_{\Gamma_{ano}} + T_{ref}$$

Linéarisé et formulé algébriquement

$$\delta T_i^k - \frac{\delta h_j^k}{(c_p)_j^{k-1}} = O\left((\delta T_j)^2\right) \approx 0$$

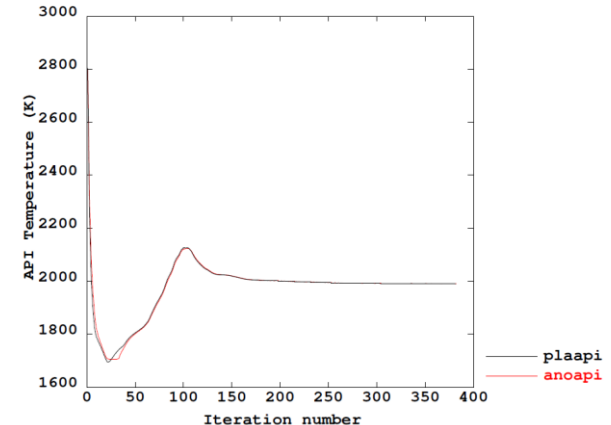
$$\begin{bmatrix} T_{TT} & 0 & 1_i \\ 0 & T_{hh} & -1_j \\ 1_i & -1_j / (c_p)_j & 0 \end{bmatrix}^{k-1} \begin{bmatrix} \delta T \\ \delta h \\ \lambda_{i,j} \end{bmatrix}^k = - \begin{bmatrix} R_T \\ R_h \\ 0 \end{bmatrix}^{k-1}$$

Multiplicateurs de Lagrange pondérés

$$\lambda_{i,j}^k = \int_{\Gamma_i} [(\kappa \nabla T) \cdot \mathbf{n}]^k d\Gamma_i - \int_{\Gamma_j} \left[\left(\kappa \nabla \left(\frac{h}{c_p} \right) \right) \cdot \mathbf{n} \right]^k d\Gamma_j \quad \forall i = j$$

Caractéristiques

- 1) Stable [Giles1997]
- 2) Faible continuité thermique
- 3) Fort équilibre thermique

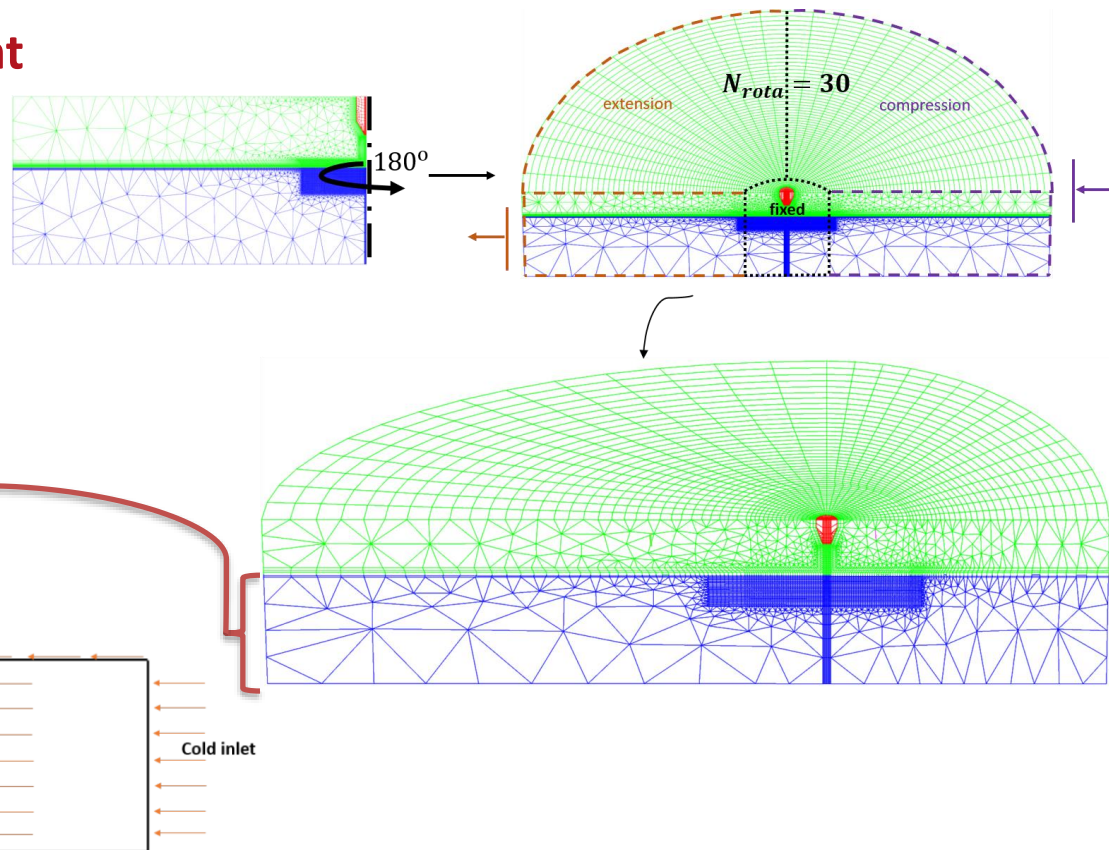


Résultats : simulation d'une expérience de soudage

Modèle 3D couplé avec défilement

Modèle de défilement

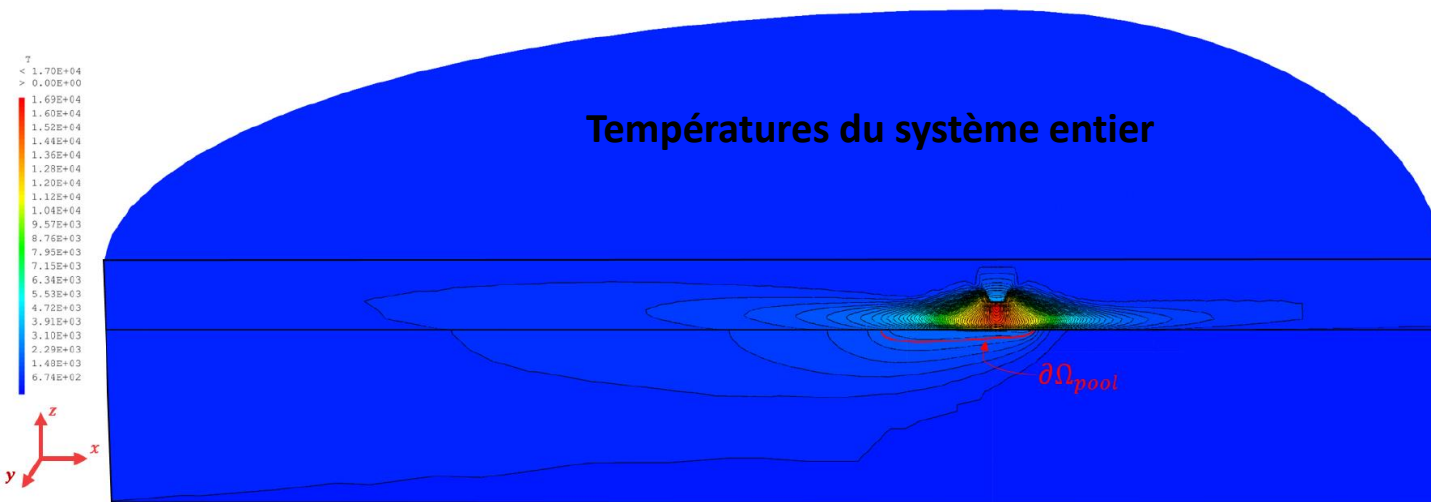
- 1) Générant un maillage adapté
- 2) Vitesse de défilement de la pièce
- 3) Une torche/cathode fixe
- 4) Conditions aux limites adaptées



Modèle 3D couplé avec défilement

Simulation d'une configuration issue d'une expérience

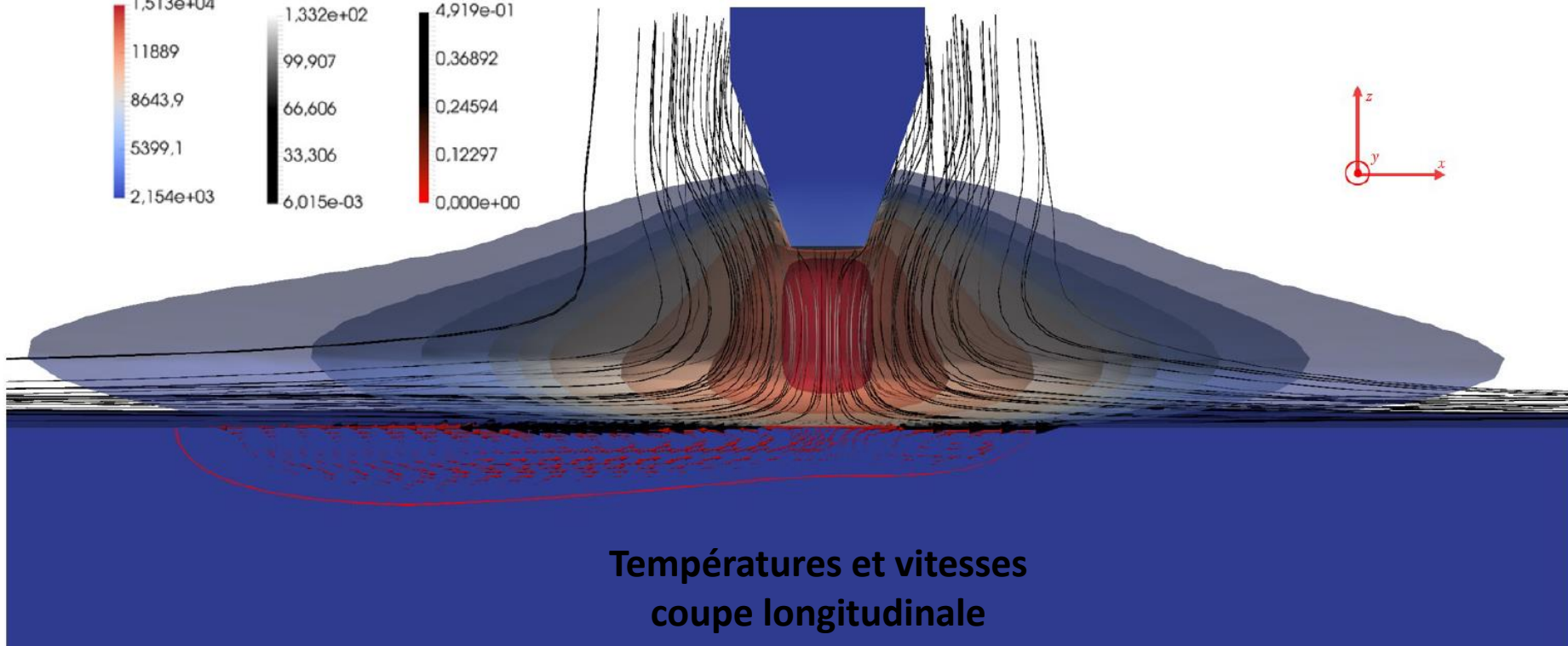
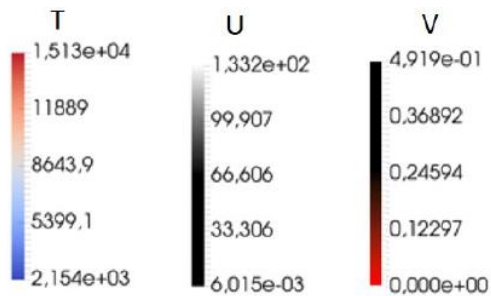
- 1) Un cas de la thèse de Koudadje en 2013 préparée à EDF [Koudadje2013]
- 2) 200 A de courant ; 3 mm hauteur d'arc ; vitesse de défilement 30 cm/min



Observations :

- Continuité thermique
- Algorithmes convergés
- Asymétrie en raison du défilement

Modèle 3D couplé avec défilement



Modèle 3D couplé avec défilement

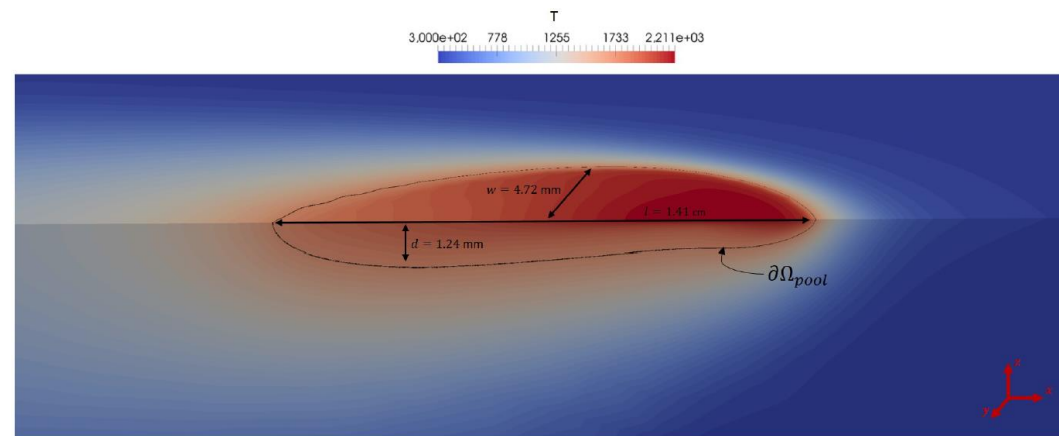
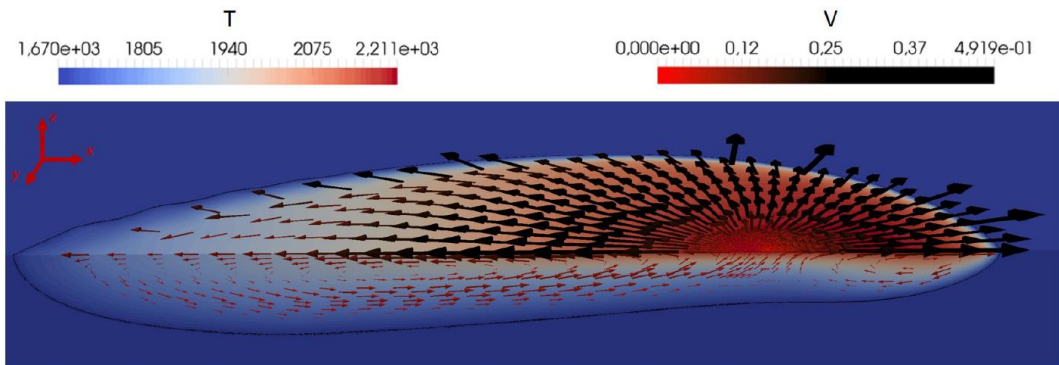
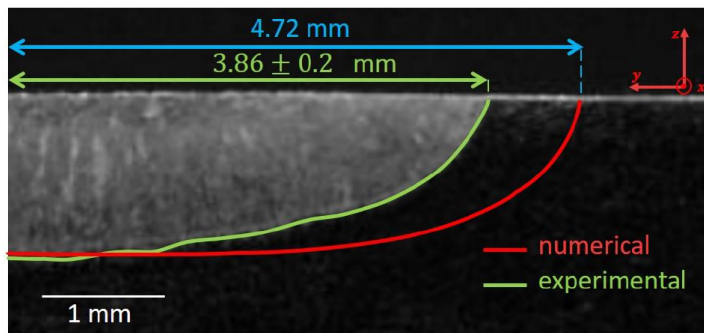
Une validation préliminaire

- 1) Bons ordres de grandeurs
- 2) Pénétration bien estimée
- 3) Surestimation de la largeur

Écarts

Flux thermique transmis semble surestimé

- ➔ Pertes thermiques sous-estimées
- ➔ Rendement électrique surestimé



La thèse de Christopher Nahed a donc servi à :

La mise en place, pour le CEA, d'un 1^{er} modèle robuste du procédé de soudage TIG entièrement couplé en 3D.

L'approche monolithique en variables mixtes est :

1. Adaptée à la capture des divers effets thermiques ;
2. Fort équilibre thermique tout en imposant une continuité thermique à convergence (numériquement stable) ;
3. Une nouvelle méthode de couplage qui utilise des contraintes asymétriques imposées par des multiplicateurs de Lagrange (voir aussi « Utilisation de relations non associées en mécanique des structures » Verpeaux, Millard, Berthinier, CSMA 2022).

- [Brochard2009] Michel Brochard. *Modèle couple cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, Université de Provence (Aix-Marseille I), janvier 2009.
- [Kong2012] Xiao-Fei Kong. *Modélisation 3D d'écoulements avec surface libre pour le soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, Ecole nationale d'ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE), decembre 2012.
- [Nguyen2016] Minh-Chien Nguyen. *Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG*. PhD thesis, Université d'Aix-Marseille I, novembre 2015.
- [Gounand2019] Stéphane Gounand. Modèles multiphysiques arc-bain en soudage à l'arc TIG. Note Technique DM2S/-SEMT/LTA NT/2019–65339/A, CEA, september 2019.
- [Dohrmann2004] Clark R Dohrmann and Pavel B Bochev. A stabilized finite element method for the stokes problem based on polynomial pressure projections. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*,46(2):183–201, 2004.
- [Hughes1987] Thomas JR Hughes. Recent progress in the development and understanding of SUPG methods with special reference to the compressible Euler and Navier-Stokes equations. *International journal for numerical methods in fluids*, 7(11):1261–1275, 1987.
- [Kuzmin2015] Dmitri Kuzmin and Jari Hämäläinen. Finite element methods for computational fluid dynamics: a practical guide. *SIAM Rev*, 57(4):642, 2015.
- [Jiang1998] Bo-nan Jiang. *The least-squares finite element method: theory and applications in computational fluid dynamics and electromagnetics*. Springer Science & Business Media, 1998.
- [Patricot2016] Cyril Patricot. *Couplages multi-physiques : évaluation des impacts méthodologiques lors de simulations de couplages neutronique/thermique/mécanique*. PhD thesis, Université Paris Saclay, March 2016.
- [Felippa2001] Carlos A Felippa, Kwang-Chun Park, and Charbel Farhat. Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(24-25):3247–3270, 2001. pages 13
- [Giles1997] Michael B Giles. Stability analysis of numerical interface conditions in fluid–structure thermal analysis. *International journal for numerical methods in fluids*, 5(4):421–436, 1997.
- [Causin2005] Paola Causin, Jean-Frédéric Gerbeau, and Fabio Nobile. Added-mass effect in the design of partitioned algorithms for fluid–structure problems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 194(42-44):4506–4527, 2005.
- [Cuvelier1990] C. Cuvelier and Ruben Manuel Sylvester Maria Schulkes. Some numerical methods for the computation of capillary free boundaries governed by the Navier–Stokes equations. *Siam Review*, 32(3):355–423, 1990.
- [Huang2006] Weizhang Huang. Mathematical principles of anisotropic mesh adaptation. *Commun. Comput. Phys*, 1(2):276–310, 2006.
- [Goodarzi1997] Massoud Goodarzi, Roland Choo, and James M Toguri. The effect of the cathode tip angle on the GTAW arc and weld pool: I. mathematical model of the arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(19):2744, 1997.
- [Koudadje2013] Koffi Koudadje. *Etude expérimentale et modélisation numérique du bain de fusion en soudage TIG d'aciers*. PhD thesis, Aix-Marseille, 2013.

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) features the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A thin green horizontal line is positioned directly beneath the letters.

FROM RESEARCH TO INDUSTRY

Merci pour votre attention !