



POLYTECH[®]
MARSEILLE



Aix*Marseille
université



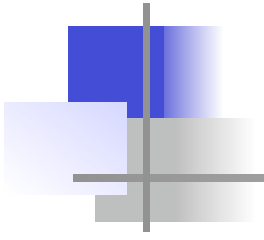
Vers la modélisation multi-physiques de procédés de soudage à l'arc

Marc MEDALE

Polytech'Marseille et IUSTI (UMR 7343 CNRS - Université Aix-Marseille)

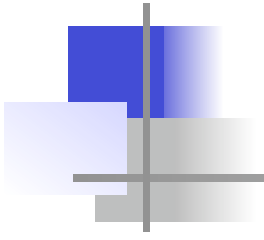
Collaborations :

- S. GOUNAND, O. ASSERIN, CEA - Saclay (DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA) ;
- P. GILLES, M. BROCHARD, X. KONG, AREVA-NP (Dir. Rech. Innov.), Paris ;



Plan de la présentation

- Etat de l'art en simulation numérique du soudage
- Trois niveaux de modélisation en thermique
 - Modèle des sources internes fictives
 - Modèle thermique centré sur l'assemblage
 - Modèle multi-physiques (cathode-arc-anode)
- Conclusions et perspectives

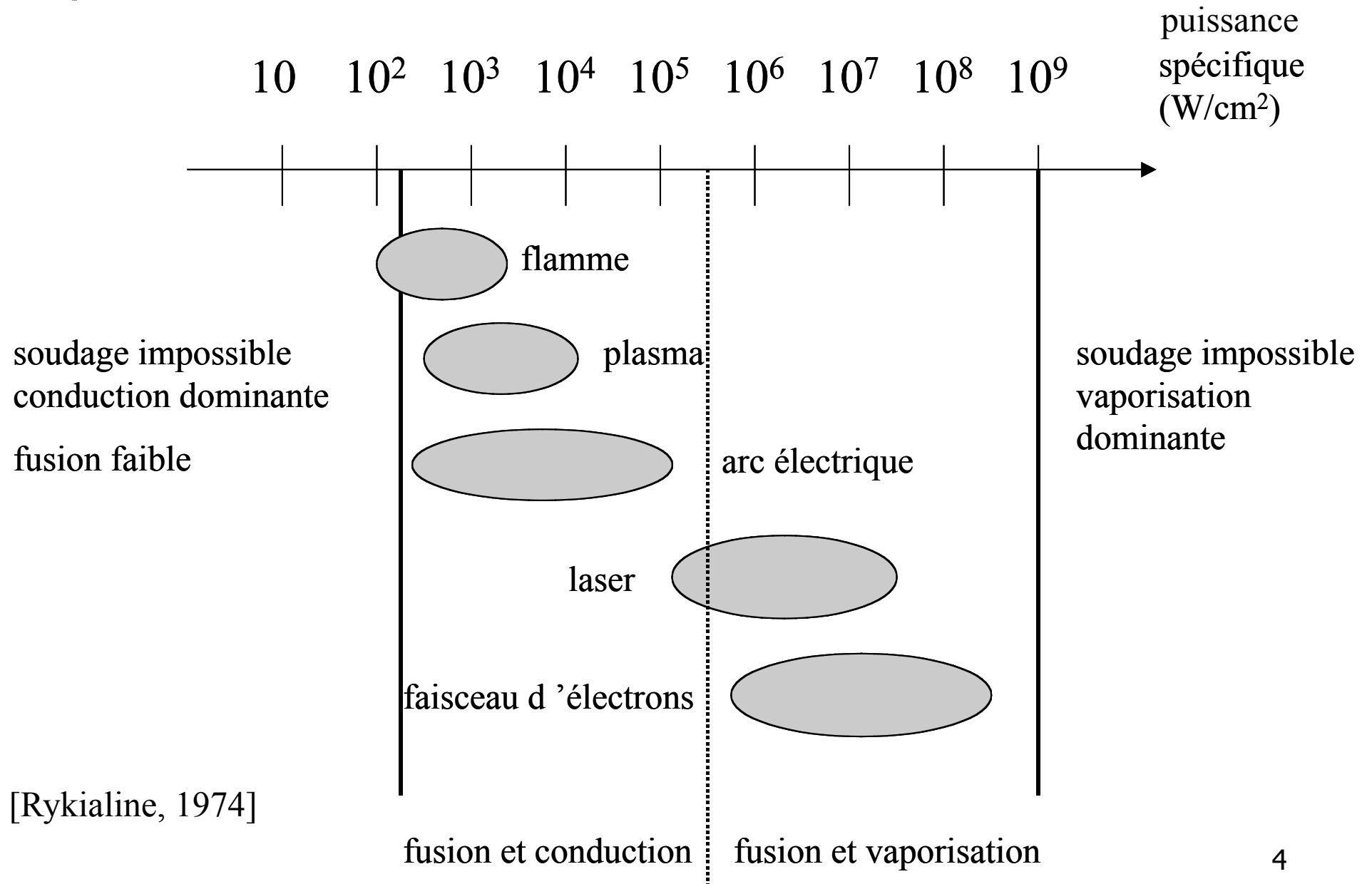


Les procédés de soudage par fusion

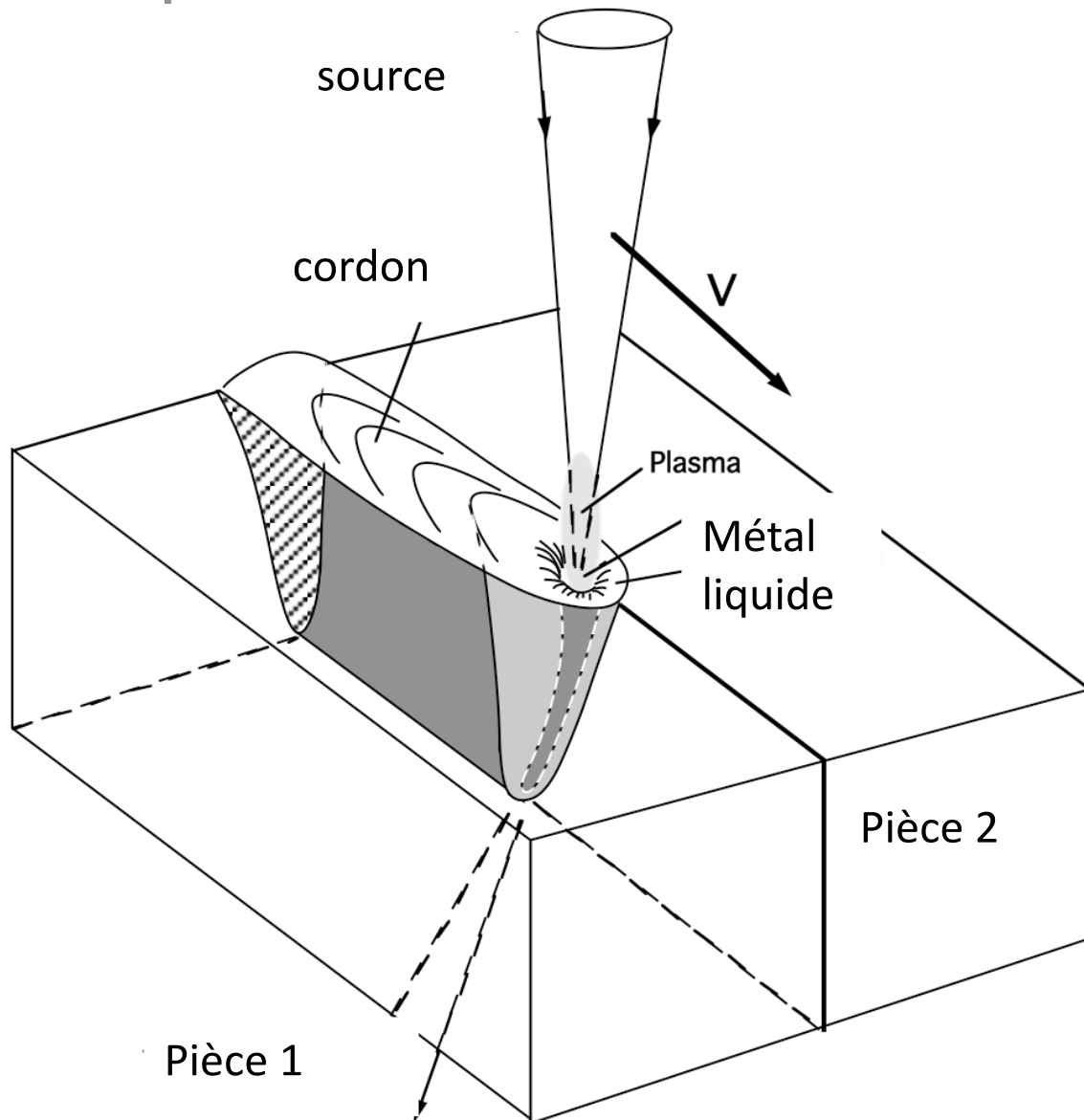
- Plusieurs procédés : arc, laser, faisceau d'électrons, etc. ;
- Procédés d'assemblage permanent, incontournables dans l'industrie ;
- Responsable de limitations et défaillances :
 - limitations dans la réalisation des pièces à assembler ;
 - affaiblissement des performances mécaniques du joint (résistance mécanique, fatigue, fissuration, etc.) ;
 - Enjeu important pour la compétitivité industrielle.

 **Nécessité d'enrichir la compréhension des procédés en vue de leur optimisation**

Caractéristiques des procédés en soudage par fusion



Aspects multi-physiques du soudage par fusion

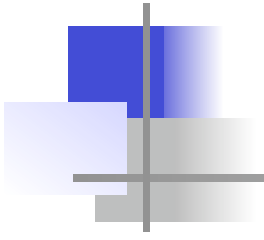


Dépôt d'énergie
Interactions source - assemblage
=> flux incident effectif

Transferts thermiques couplés
=> Carte des températures dans
tout l'assemblage

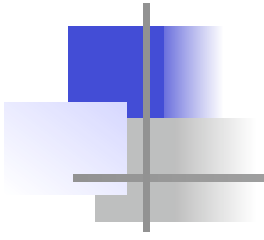
Thermo-Métallurgie
=> Composition, propriétés

Refroidissement à temp.
ambiante
=> Déformations et contraintes



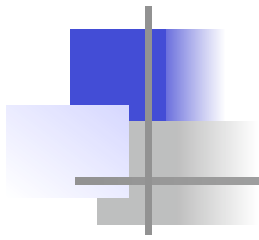
Phénomènes physiques impliqués en soudage à l'arc

- Dépôt d'énergie : interaction source - pièces à assembler
 - Nature de la source (électrode), densité d'énergie (plasma), gaz de protection, métal d'apport, matériaux (prop. thermo-physiques)
- Transferts thermiques dans l'assemblage
 - Changements de phase (solide-liquide-vapeur), convection, diffusion, rayonnement, échanges avec l'extérieur, variation de propriétés, etc.
- Refroidissement à température ambiante
 - Métallurgie, déformations thermo-mécaniques, contraintes résiduelles, endommagement, fissuration, etc.



État de l'art en simulation numérique du soudage

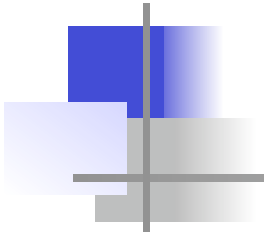
- Outils métier
 - SYSWELD (sources et transferts simplifiés, métallurgie et mécanique) ;
 - DB-LASIM (modèles simplifiés pour applications en soudage laser) ;
- Outils génériques
 - COMSOL : nombreux modèles physiques ;
 - CAST3M (CEA), Codes Aster/Saturne (EDF) : en développement ;
- Outils de recherche
 - Spécialisés sur une ou plusieurs parties du problème (interfaces ?) ;
- Aucun outil ne permet en 2012 de simuler l'intégralité d'un procédé de soudage par fusion : cela reste à faire !!!



État de l'art en simulation numérique du soudage

- **Pourquoi a-t-on besoin de modèles simplifiés pour la simulation du soudage ?**
 - Problèmes multi-physiques fortement couplés (thermique, mécanique des fluides, métallurgie, mécanique des solides) ;
 - Fortement non-linéaire et transitoire ;
 - Problèmes 3D, multi-échelles (spatiales et temporelles) ;

- Couplages faibles (itératifs)
 - Approche explicite (pas de temps critique) ;
 - Partitionnement ('segregated') ;
 - Réutilisation de codes spécialisés existants ;
 - Limités pour les fortes non-linéarités
- Couplages forts (directs)
 - Approche implicite ;
 - Approche monolytique : 1 code par problème
 - Approche partitionnée pointue :
 - Synchrones : communications en cours de résolution (MPI-2)
 - Asynchrone : Systèmes couplés algébriquement : Differential Algebraic Equations; interfaces de communication (PALM, CTL, etc).



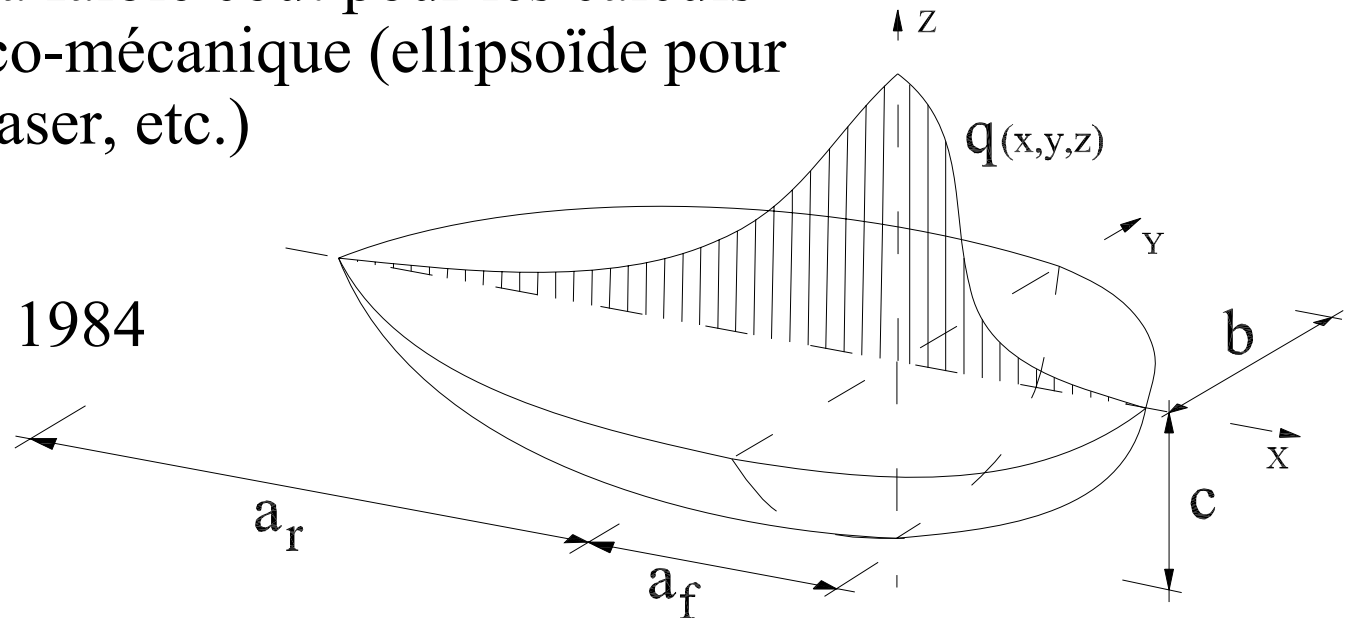
Plusieurs modèles de transferts thermiques

- Diffusion de la chaleur dans l'assemblage (sources fictives équivalentes, Goldak, etc.)
- Source donnée, calcul du chgt de phases fusion-solidification, de l'écoulement dans le métal fondu (convection naturelle, cisaillement du gaz de protection), diffusion dans le solide
- Calcul de l'arc électrique, de l'écoulement gazeux (vapeurs métalliques, gaz de protection) et du métal fondu, diffusion dans le solide

Modèle des sources fictives équivalentes

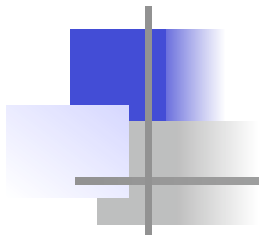
- Objectif : calculer un champ thermique équivalent dans l'assemblage à faible coût pour les calculs thermo-métallurgico-mécanique (ellipsoïde pour arc, conique pour laser, etc.)

- Modèle : Goldak, 1984



$$q_f(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3}f_f}{a_\xi b c \pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_\xi^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$$

$$q_r(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3}f_r}{a_\xi b c \pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_\xi^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$$



Modèle détaillé dans l'assemblage

- Objectif : affiner les simulations du champ de température dans l'assemblage (les échanges avec l'extérieur sont modélisés)
- Modèle : changement de phases solide-liquide, écoulement dans le métal en fusion (convection naturelle, cisaillement du gaz de protection), conduction dans le solide, échanges avec l'extérieur

Équations gouvernantes du problème

$$\rho_0 \frac{d\vec{V}}{dt} = \text{div}(\vec{\bar{\sigma}}) + \rho(T) \vec{g} + \vec{f}_v + \vec{f}^{\text{Darcy}} \quad \text{et} \quad \text{div}(\vec{V}) = 0$$

$$\vec{\bar{\sigma}} = -p \vec{1} + \mu(T) \left(\vec{\text{grad}}(\vec{V}) + \left(\vec{\text{grad}}(\vec{V}) \right)^T \right) \quad \text{Fluide Newtonien avec viscosité fonction de la température}$$

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad \text{Boussinesq}$$

$$\vec{f}^{\text{Darcy}} = \frac{\mu_0}{K} (\vec{V} - \vec{V}^s) \quad \text{Darcy avec une perméabilité fonction de la fraction volumique de liquide} \quad K = K_0 \left(\frac{f_L^3}{1 - f_L^2} \right)$$

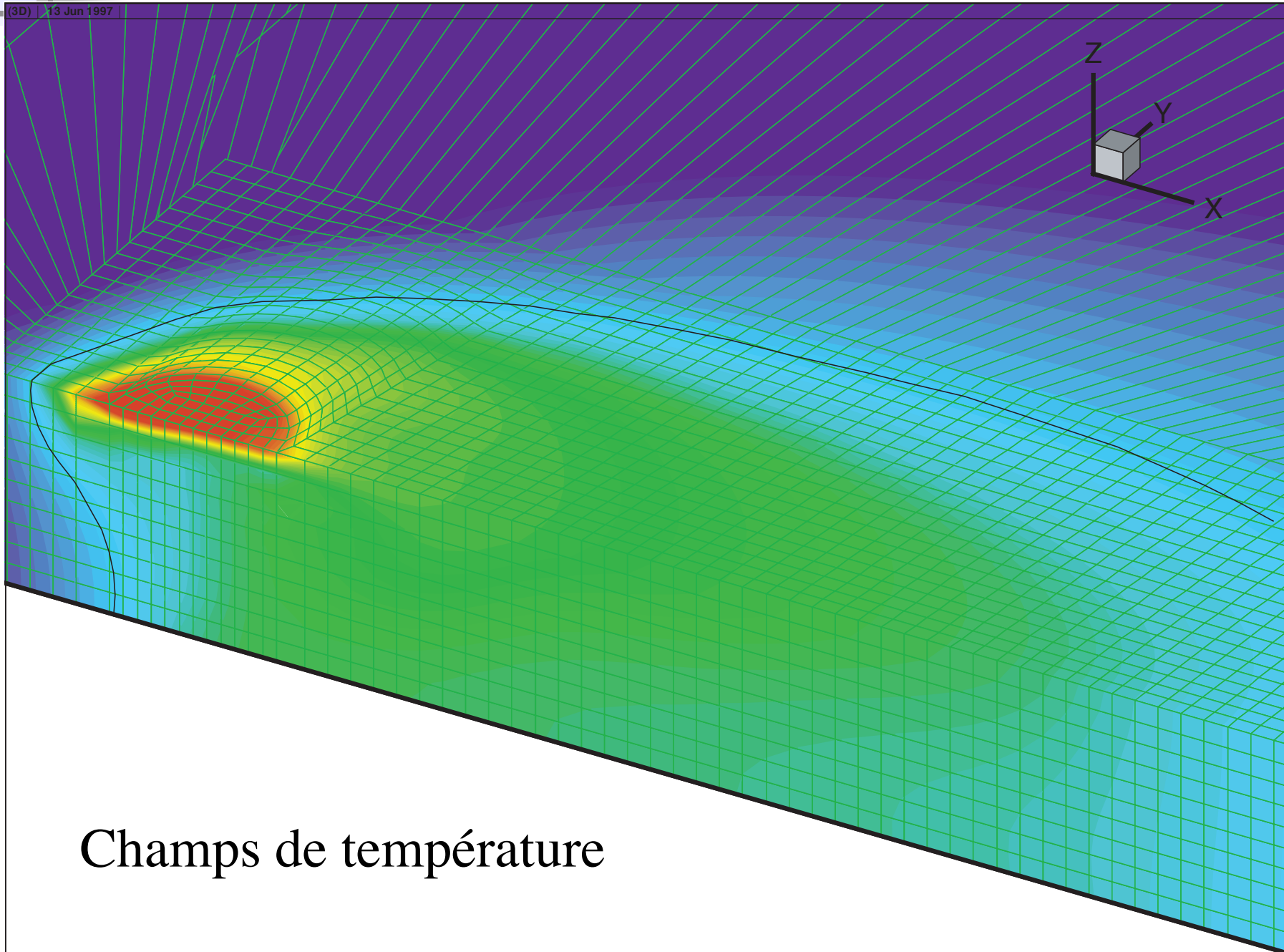
$$\vec{T} = \frac{\gamma}{R} \vec{n} + \frac{d\gamma}{dT} \vec{\text{grad}}_s(T) \quad \text{avec} \quad \vec{\text{grad}}_s(T) = \vec{\text{grad}}(T) - (\vec{n} \cdot \vec{\text{grad}}(T)) \vec{n}$$

$$\rho_0 C_p \frac{dT}{dt} = -\text{div}(\vec{q}) - \rho_0 \frac{d\Delta H}{dt} + Q$$

$$\vec{q} = -k \vec{\text{grad}}(T) \quad \text{Fourrier} \quad \Delta H = L f_L \quad \text{Enthalpie latente}$$

$$\text{Flux radiatif à la surface libre : } \vec{q} = \sigma \epsilon (T^4 - T_p^4)$$

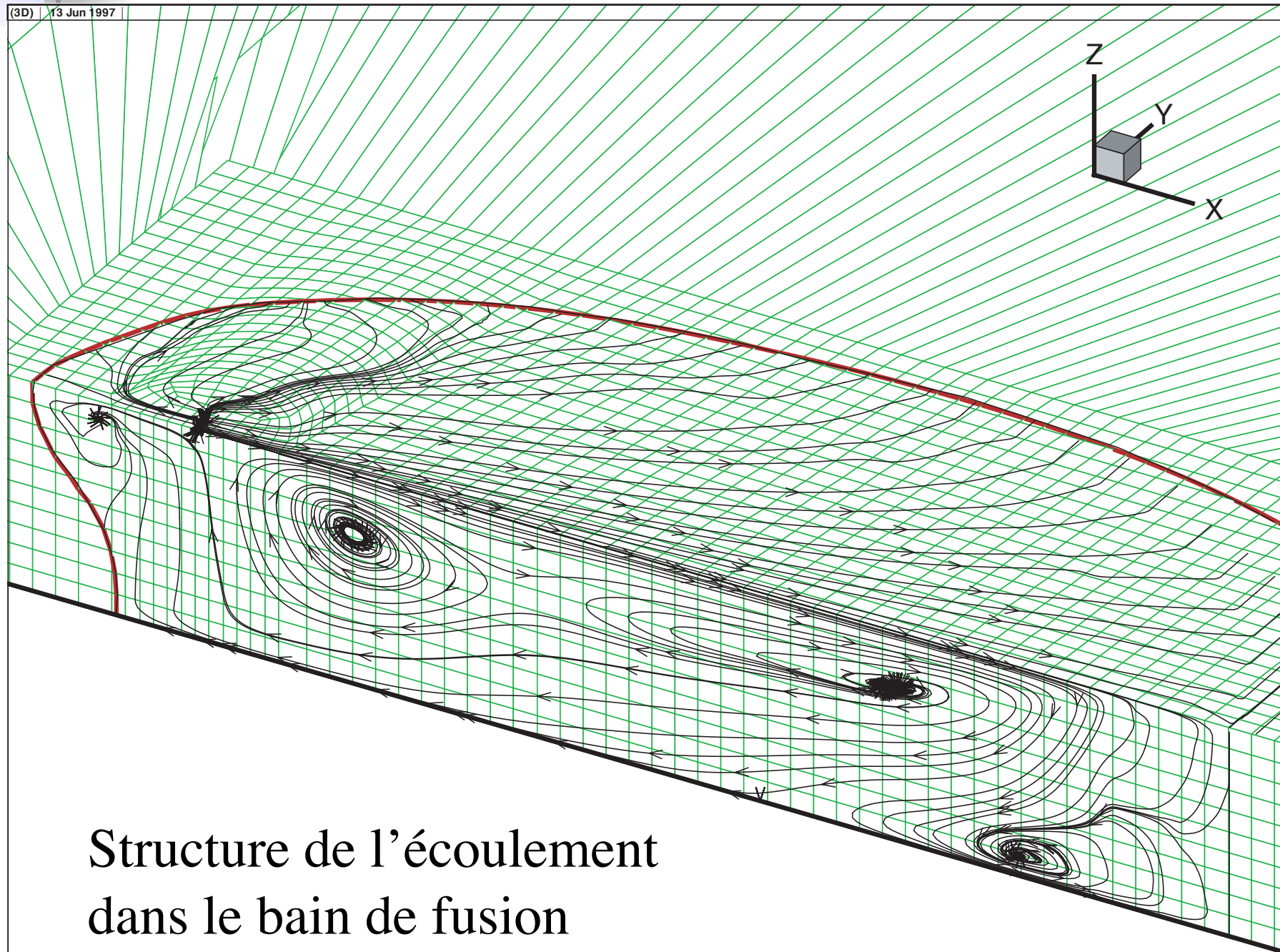
Exemple de modélisation de soudage à l'arc



Champs de température

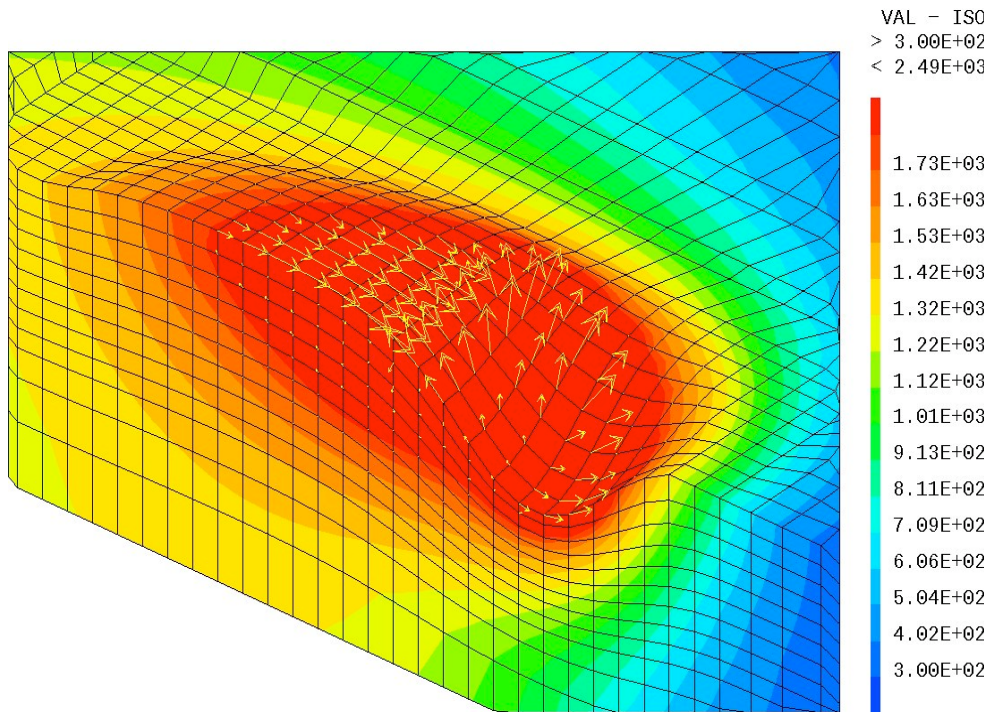
Isothermes dans le bain

Exemple de modélisation de soudage à l'arc (2)

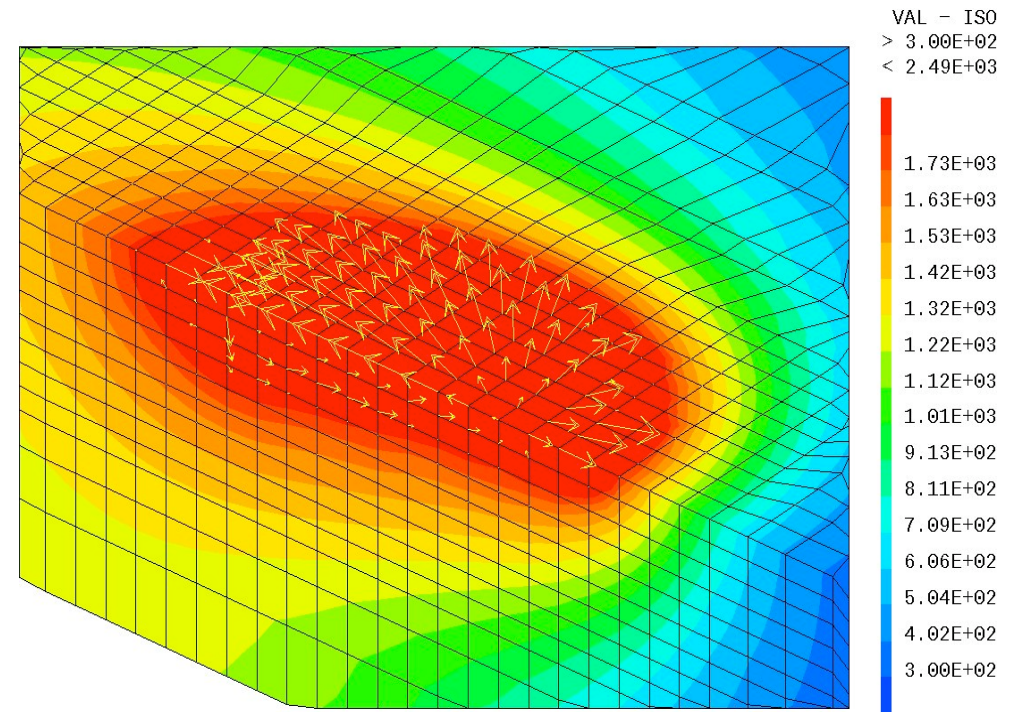


Structure de l'écoulement
dans le bain de fusion

Simulations avec ou sans surface libre : Xiaofei Kong



Modèle avec la surface libre

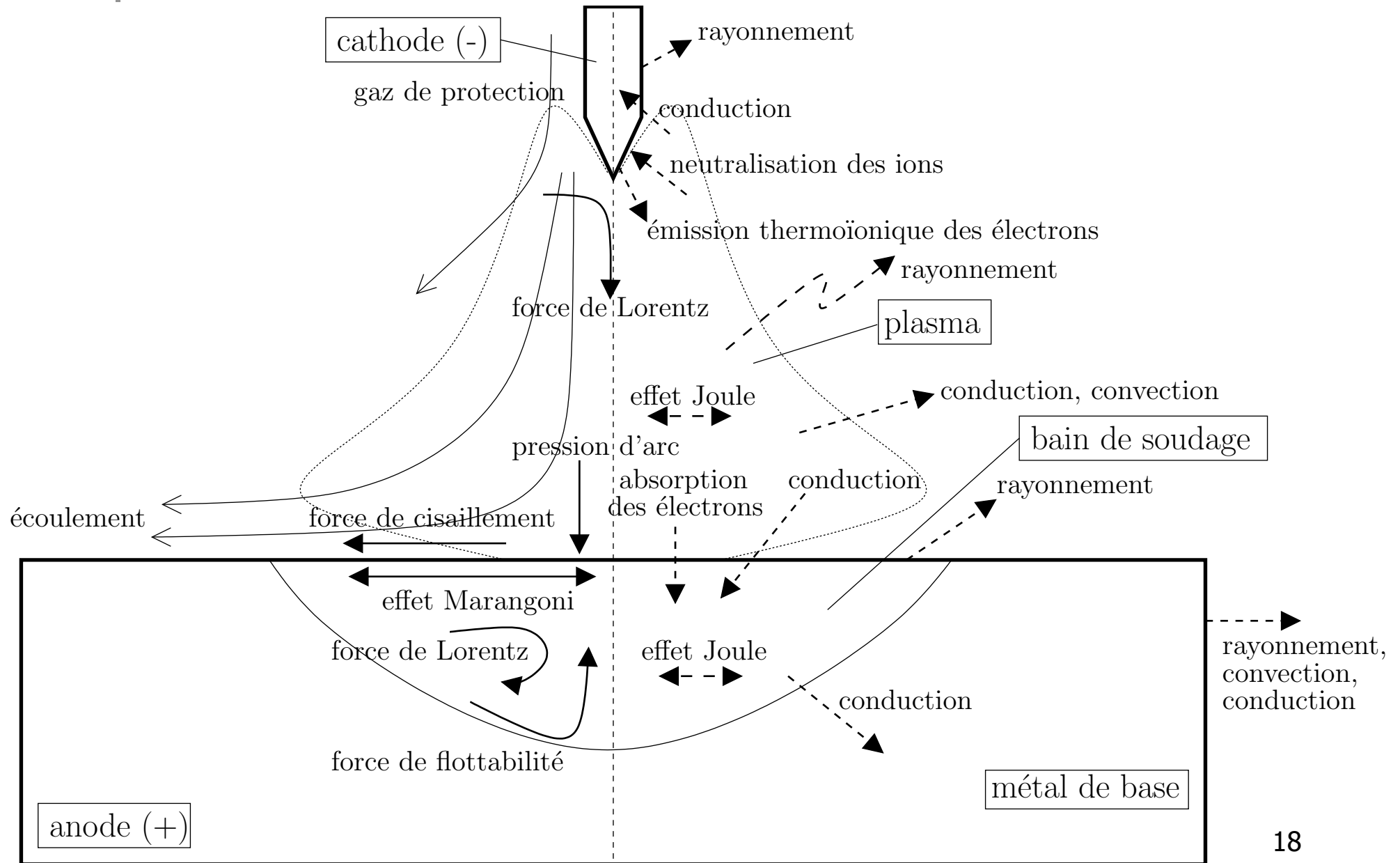


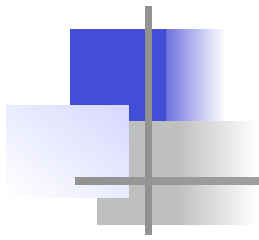
Modèle sans surface libre

Model	T_{max} (K)	u_{max} ($m.s^{-1}$)	v_{max} ($m.s^{-1}$)	w_{max} ($m.s^{-1}$)	Width (mm)	Depth (mm)	Volume (mm^3)
With free surface	2486	0.31	0.32	0.15	3.60	2.36	70.6
Without free surface	2706	0.18	0.23	0.06	3.60	1.50	51.7

- Objectifs : s'affranchir des modèles de dépôt d'énergie, d'échanges avec l'extérieur, caractériser les phénomènes physiques liés aux paramètres du procédé de soudage (puissance, vitesse de soudage, débit gaz de protection, matériaux, etc.) ;
- Modèle : calcul de l'arc, de l'écoulement du gaz de protection, changement de phases solide-liquide, écoulement dans le métal en fusion (convection naturelle), conduction dans le solide
- À destination des modèles :
 - *thermo-métallurgico-mécanique* ;
 - *réduits pour des études paramétriques.*

Modélisations multi-physiques : Michel Brochard





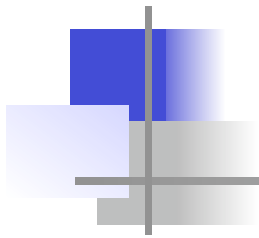
Equations gouvernant le problème dans l'arc

Equations de conservation :

$$\begin{aligned}
 \rho \nabla \cdot \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho &= 0 & \text{sur } \Omega_{plasma} \\
 \rho (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{u} + \nabla p' - \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} &= (-\sigma \nabla \phi) \times \mathbf{B} & \text{sur } \Omega_{plasma} \\
 \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= \sigma \nabla \phi \cdot \nabla \phi - 4\pi \varepsilon_n & \text{sur } \Omega_{plasma} \\
 \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) &= 0 & \text{sur } \Omega_{plasma} \\
 \nabla \times \mathbf{B} &= -\mu_0 \sigma \nabla \phi & \text{sur } \Omega_{plasma} \\
 \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \text{sur } \Omega_{plasma}
 \end{aligned}$$

Conditions aux limites :

$$\begin{array}{llll}
 \mathbf{u} = \mathbf{s}_1 & \text{ou} & (\bar{\bar{\tau}} - p' \mathcal{I}) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{s}_2 & \text{sur } \Gamma_{plasma} \\
 T = s_3 & \text{ou} & \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = s_4 & \text{sur } \Gamma_{plasma} \\
 \phi = s_5 & \text{ou} & \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = -\sigma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = s_6 & \text{sur } \Gamma_{plasma} \\
 \mathbf{B} \times \mathbf{n} = \mathbf{s}_7 & \text{ou} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = s_8 & \text{sur } \Gamma_{plasma}
 \end{array}$$



Equations gouvernant le problème dans l'anode

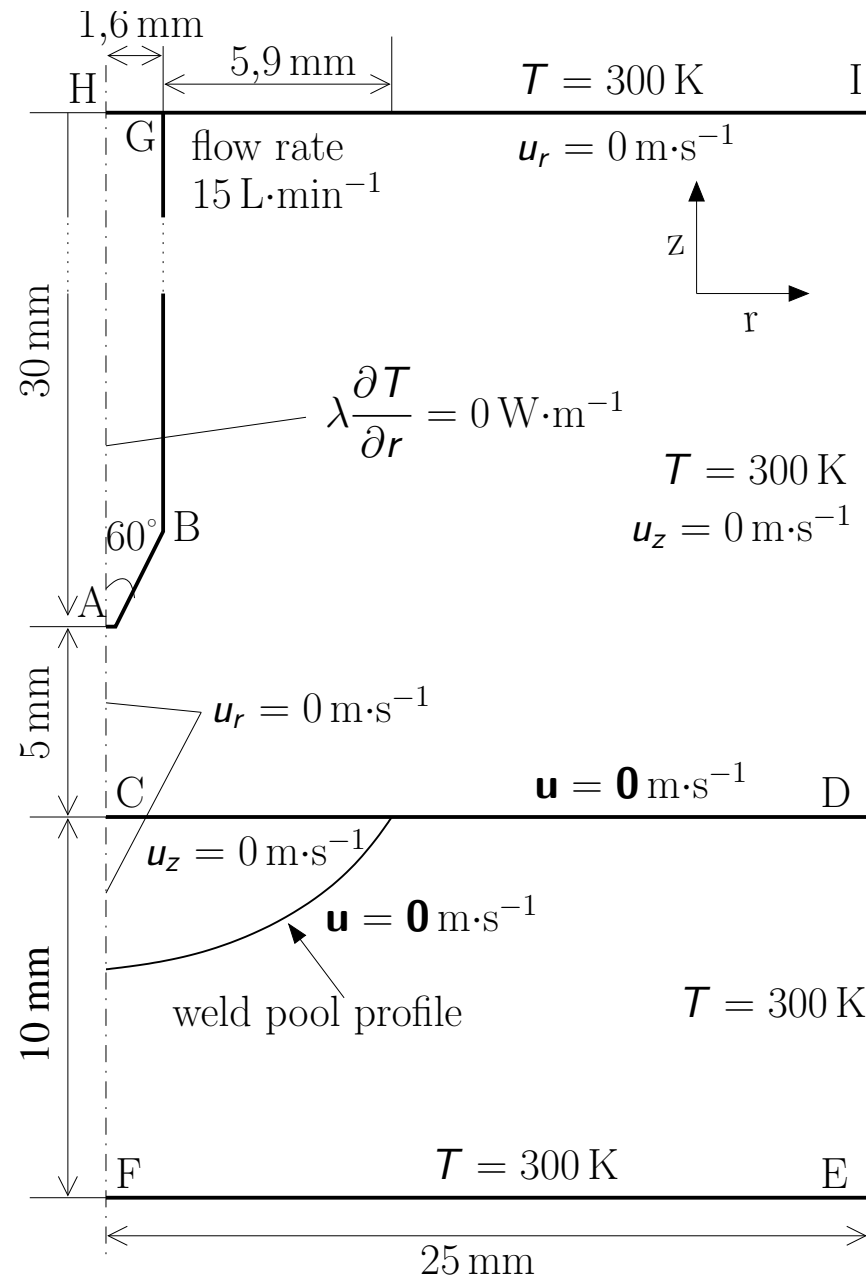
Equations de conservation :

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 && \text{sur } \Omega_{anode} \\
 \rho_{\text{réf}} (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{u} + \nabla p'' - \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}' &= (-\sigma \nabla \phi) \times \mathbf{B} - \rho \beta (T - T_{\text{réf}}) \mathbf{g} \\
 &\quad - c \frac{(1 - f_l)^2}{f_l^3 + b} \mathbf{u} && \text{sur } \Omega_{anode} \\
 \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= \sigma \nabla \phi \cdot \nabla \phi && \text{sur } \Omega_{anode} \\
 \nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) &= 0 && \text{sur } \Omega_{anode} \\
 \nabla \times \mathbf{B} &= -\mu_0 \sigma \nabla \phi && \text{sur } \Omega_{anode} \\
 \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 && \text{sur } \Omega_{anode}
 \end{aligned}$$

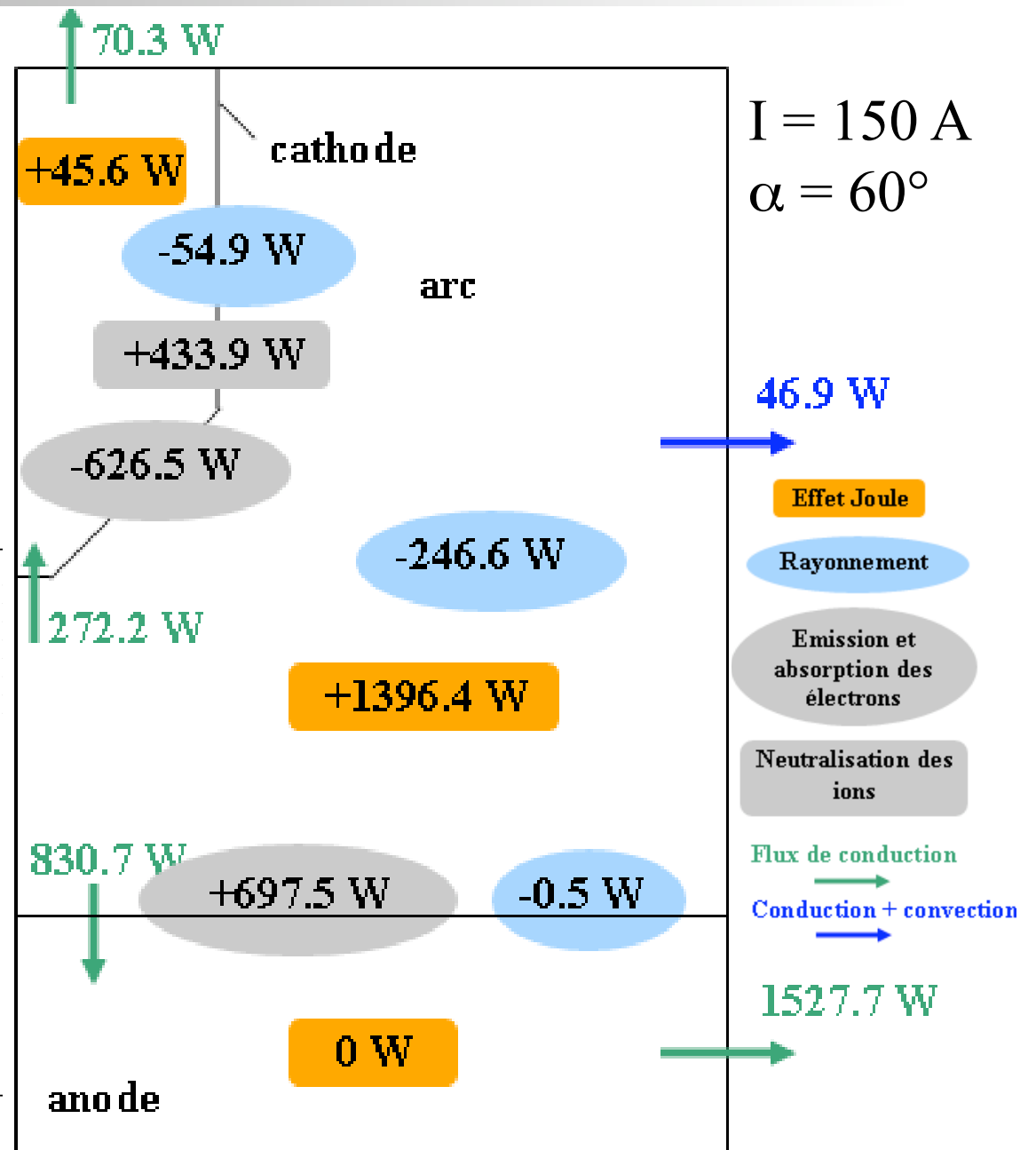
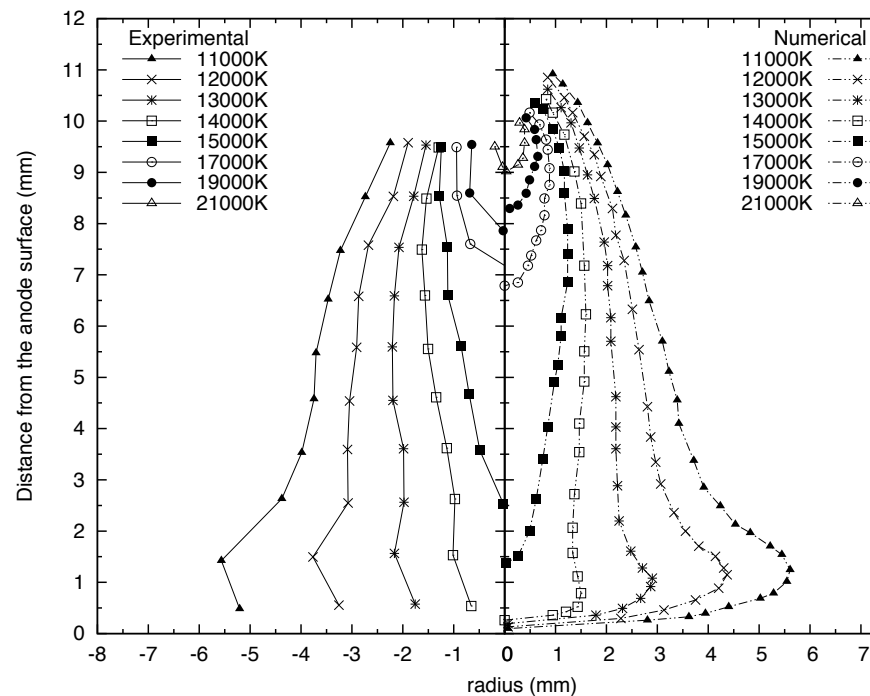
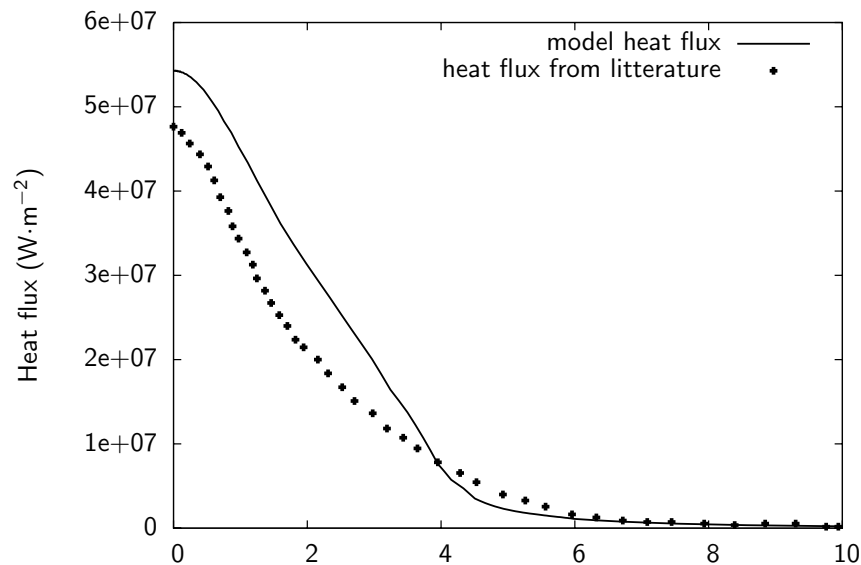
Conditions aux limites :

$$\begin{array}{llll}
 \mathbf{u} = \mathbf{s}_9 & \text{ou} & (\bar{\bar{\tau}}' - p'' \mathcal{I}) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{s}_{10} & \text{sur } \Gamma_{anode} \\
 T = s_{11} & \text{ou} & \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = s_{12} & \text{sur } \Gamma_{anode} \\
 \phi = s_{13} & \text{ou} & \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = -\sigma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} = s_{14} & \text{sur } \Gamma_{anode} \\
 \mathbf{B} \times \mathbf{n} = \mathbf{s}_{15} & \text{ou} & \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = s_{16} & \text{sur } \Gamma_{anode}
 \end{array}$$

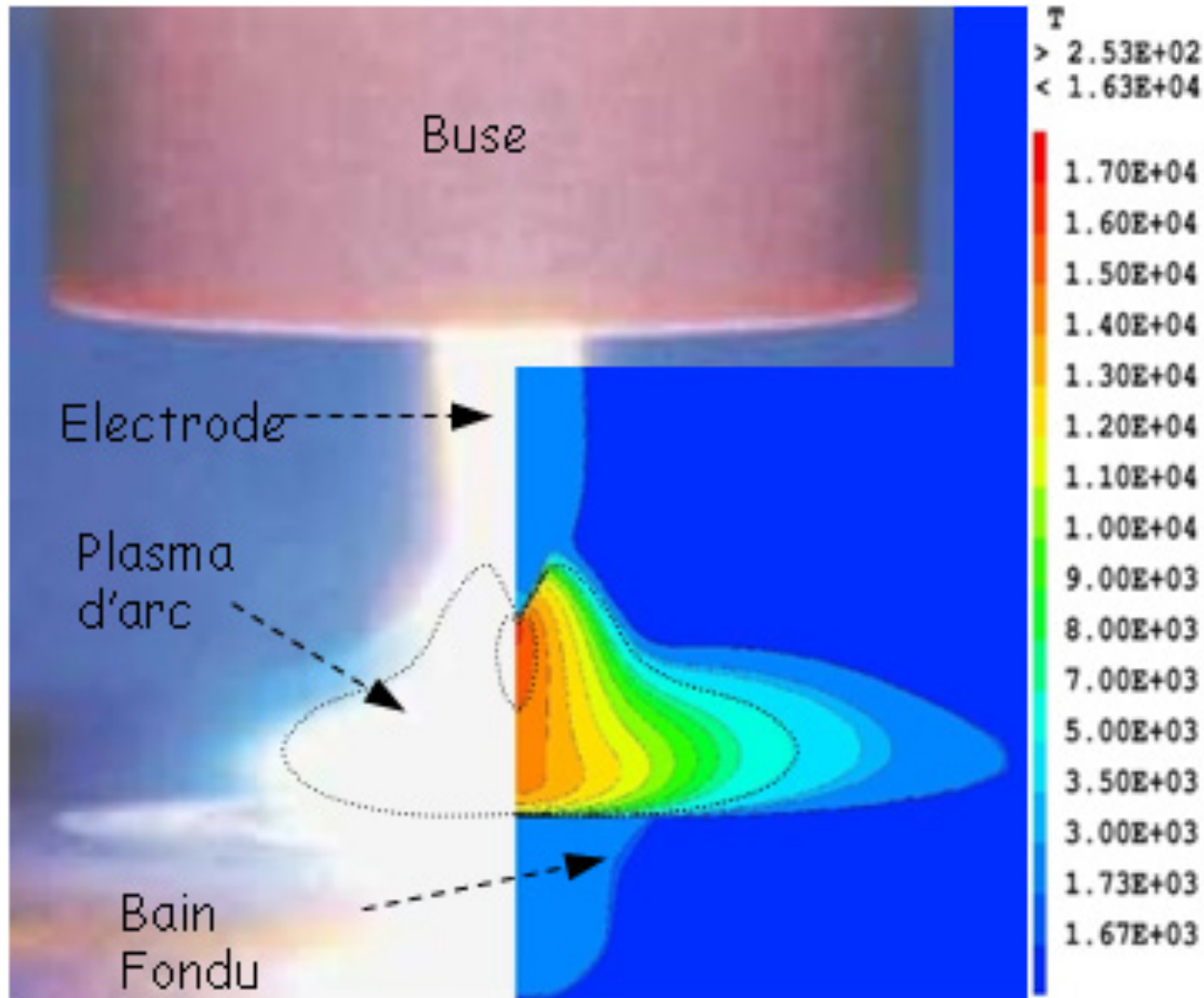
Modèle axisymétrique : domaine de calcul et CL



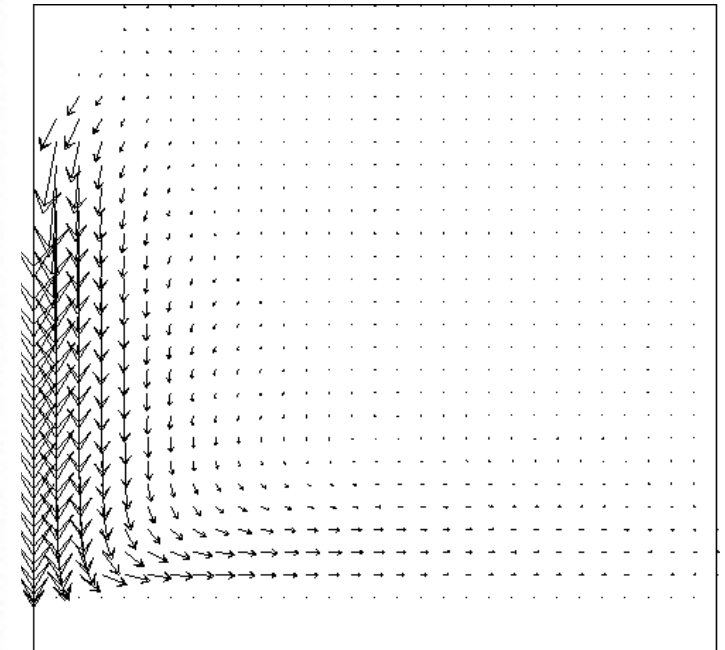
Modèle axisymétrique : comparaisons et validations



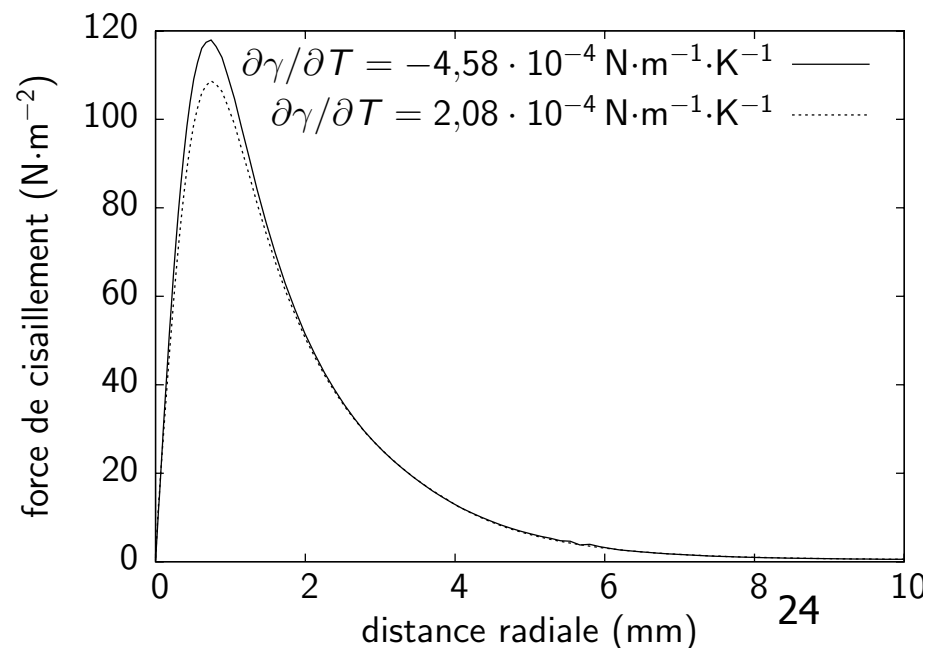
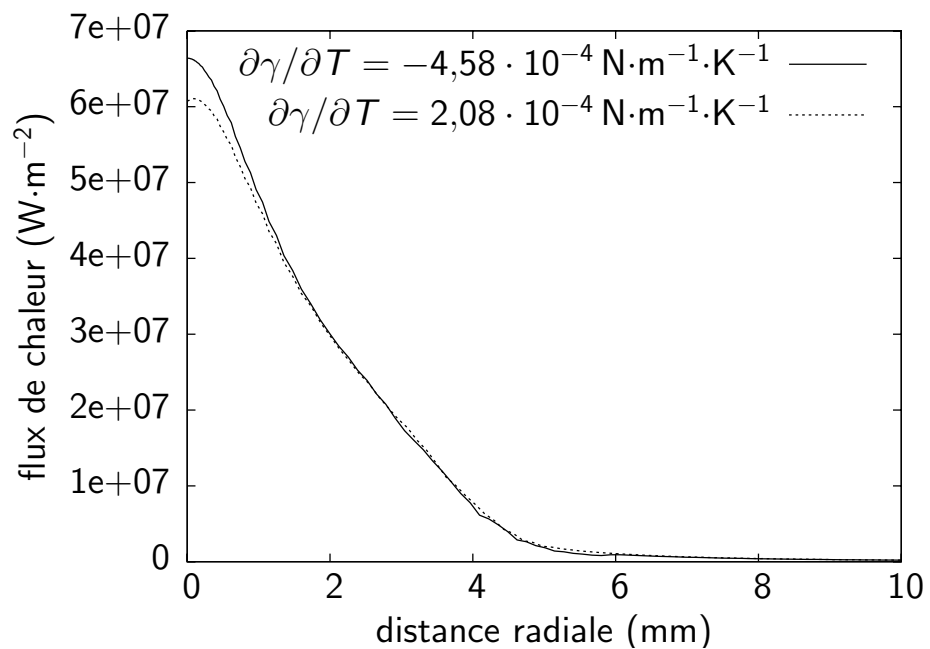
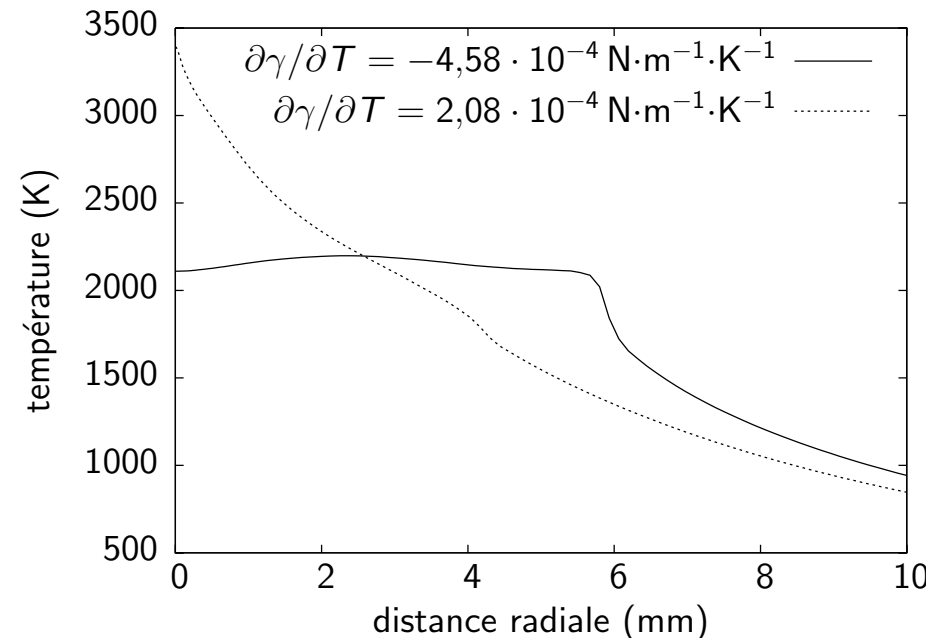
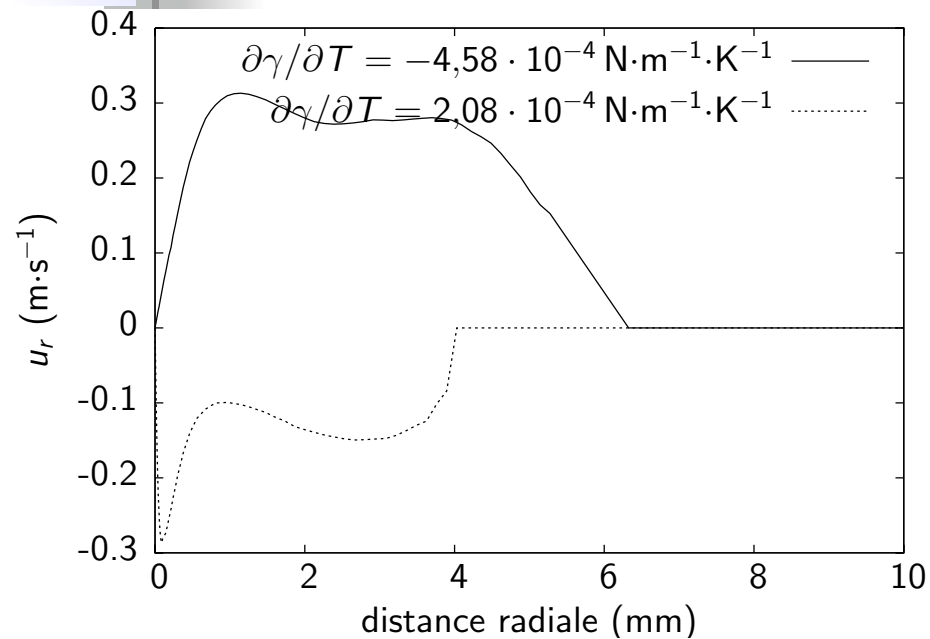
Quelques résultats avec un calcul axisymétrique

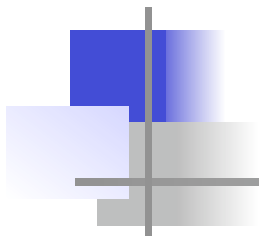


Champs de vitesses
dans l'arc



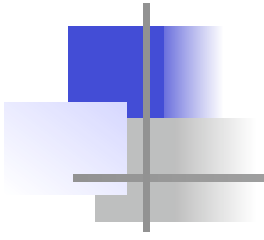
Quelques résultats avec un calcul axisymétrique





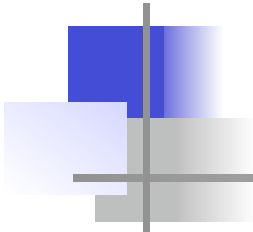
Les apports de la thermo-hydraulique pour la simulation numérique du soudage

- Compréhension des mécanismes d'interaction entre la source (cathode, arc), l'environnement (gaz de protection) et les pièces à assembler : **optimisation des procédés**
- Développement de modèles de connaissance pour la construction et la validation de modèles réduits ou de modèles de sources fictives équivalentes **produisant un champ thermique** pour les calculs de **thermo-métallurgico-mécanique**



Les limites de ces modèles

- Modèles physiques et numériques complexes ;
- Propriétés physiques difficilement accessibles : hautes températures, alliages (composition, etc.) ;
- Conditions aux limites du domaine de calcul non académiques (porte-pièce, gaz de protection, plasma, etc.) ;
- Modèles numériques coûteux (plusieurs dizaines heures de calcul pour reproduire quelques secondes du procédé, $t_{\text{cpu_multiphysique}} \approx 100 t_{\text{cpu_sources_fictives}}$).



Conclusions

- Choix pragmatique de modélisation, dilemme : résoudre
 - Avec précision un problème physique simpliste ;
 - Grossièrement un problème physique très complexe, mais plus réalistepour la compréhension et l'optimisation des procédés de soudage par fusion ;
- Validations des principales composantes des modèles numériques (phénomènes physiques impliqués) ;
- Ces modèles fournissent les champs et cinétiques thermiques pour les modèles thermo-métallurgico-mécanique ;
- Ils constituent des modèles de « connaissances » pour la réalisation d'études paramétriques avec des modèles réduits (ou simplifiés) ;
- Pour améliorer la prédictibilité de ces modèles multi-physiques :
 - Propriétés physiques variables ; écoulements turbulents ; évaporation du métal liquide pour les hautes densité de flux, etc.