



POLYTECH[®]
MARSEILLE



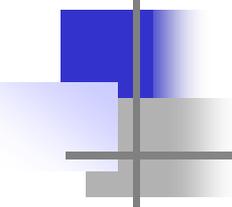
Vers la modélisation multi-physiques de procédés de soudage à l'arc

Marc MEDALE

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

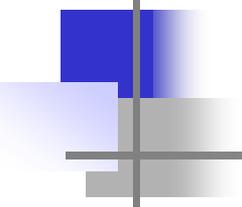
Collaborations :

- S. GOUNAND, O. ASSERIN, CEA – Saclay ;
- D. BOREL, J. DELMAS, EDF R&D – Chatou.



Plan de la présentation

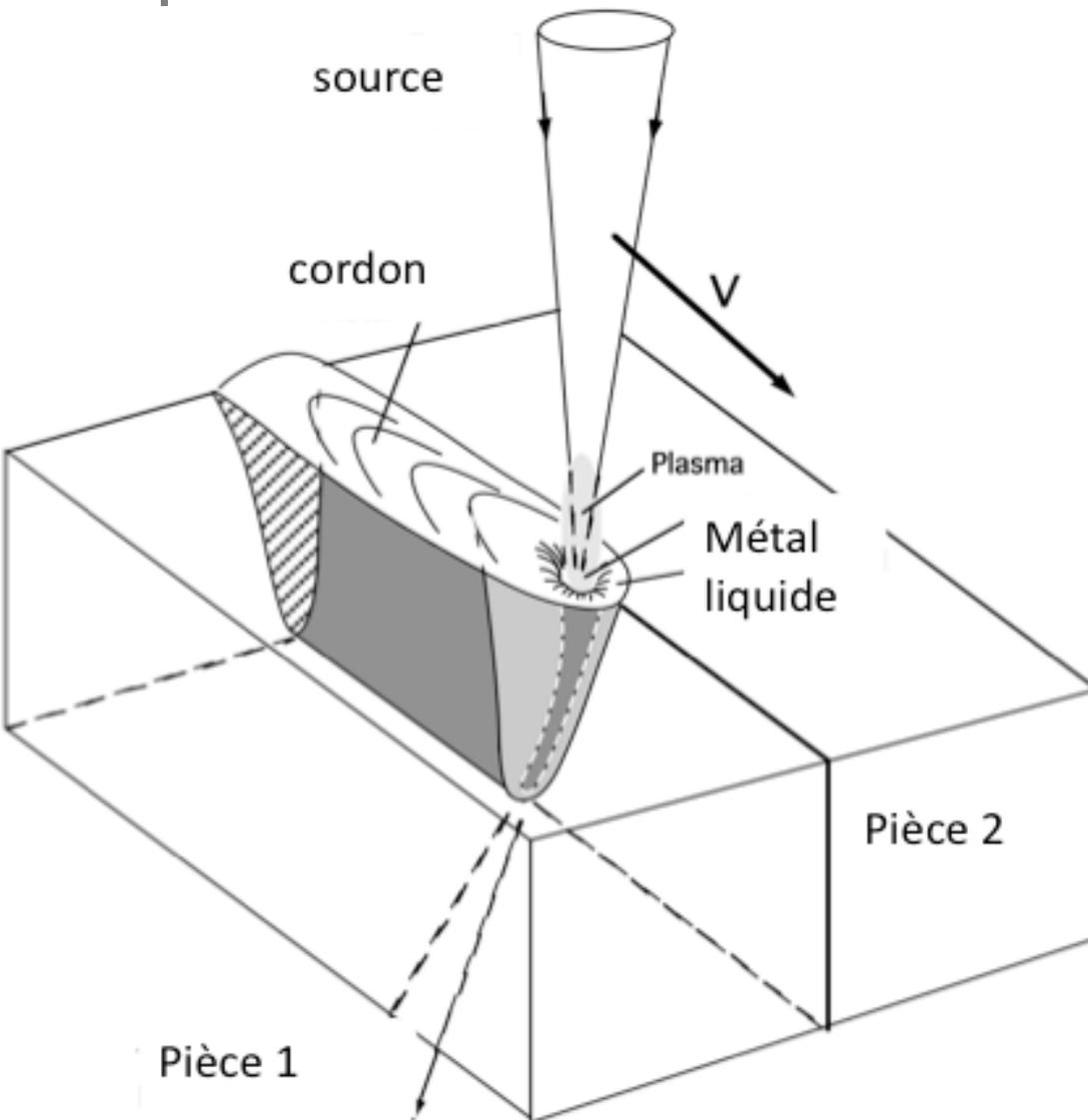
- Intérêts, enjeux et limites des modélisations et simulations multi-physiques en soudage par fusion
- Etat de l'art en simulation numérique du soudage
- Trois niveaux de modélisation en thermique
 - Modèles de sources internes fictives
 - Modèles thermo-hydrauliques centrés sur l'assemblage
 - Modèles multi-physiques (cathode-arc-anode)
- Conclusions et perspectives



Un peu d'histoire en couplages multi-physiques

- Effet Seebeck (1821) : effet thermo-électrique
 - Une différence de température imposée à 2 solides de matériaux différents produit une différence de potentiel ($qq \mu\text{V/K}$)
- Effet Peltier (1834) : effet électrique-thermique
 - Un courant électrique circulant dans 2 solides de matériaux différents produit une différence de température
- Thermo-élasticité (1837) : thermo-mécanique
 - Superposition linéaire des effets mécanique et thermique
- Effet Joule (1860) : effet électrique-thermique
 - Un courant électrique circulant dans un solide produit une élévation de température

Aspects multi-physiques du soudage par fusion



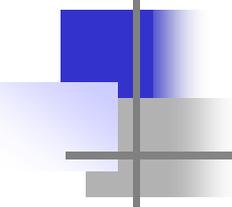
Dépôt d'énergie
Interactions source - assemblage
=> flux incident effectif

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

Thermo-Métallurgie
=> Composition, propriétés

Refroidissement à temp.
ambiante
=> Déformations et contraintes

- Anticiper et prédire correctement le comportement de systèmes complexes représente des challenges scientifiques et technologiques importants
- Développer des outils de recherche de plus en plus prédictifs, à un coût abordable (en rapport à leur complexité), qui puisse à terme servir à la construction de modèles réduits (industrialisables)



État de l'art en simulation numérique du soudage

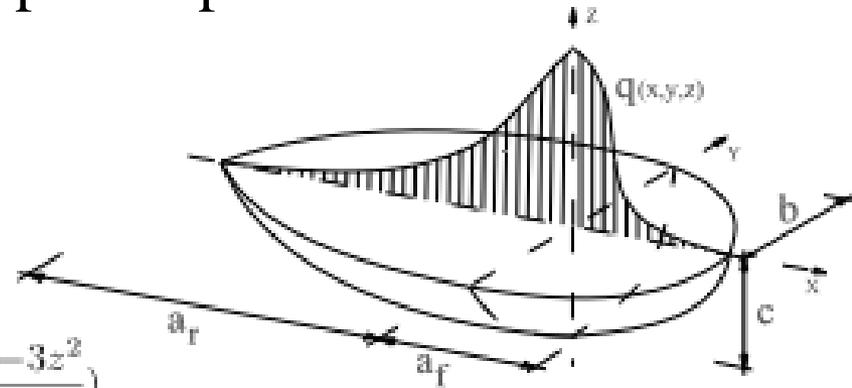
- Outils métier
 - SYSWELD (sources et transferts simplifiés, métallurgie et mécanique) ;
 - DB-LASIM (modèles simplifiés pour applications en soudage laser) ;
- Outils génériques
 - COMSOL : nombreux modèles physiques ;
 - CAST3M (CEA), Codes Aster/Saturne (EDF) : en développement ;
- Outils de recherche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

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 :

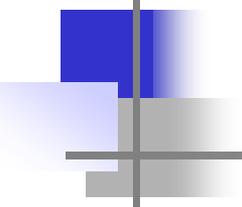
$$q_f(x, y, z) = Q_0 \frac{6\sqrt{3}f_f}{a_\xi b c \pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_\xi^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right) \exp\left(-\frac{3z^2}{c^2}\right)$$

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



Goldak et al., A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metallurgical Transactions B, 1984, pp. 299-305.

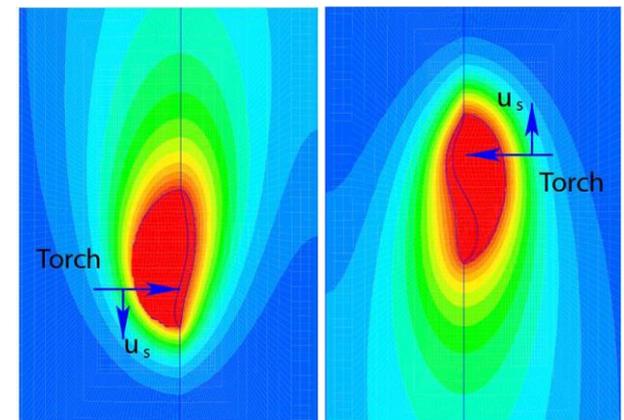
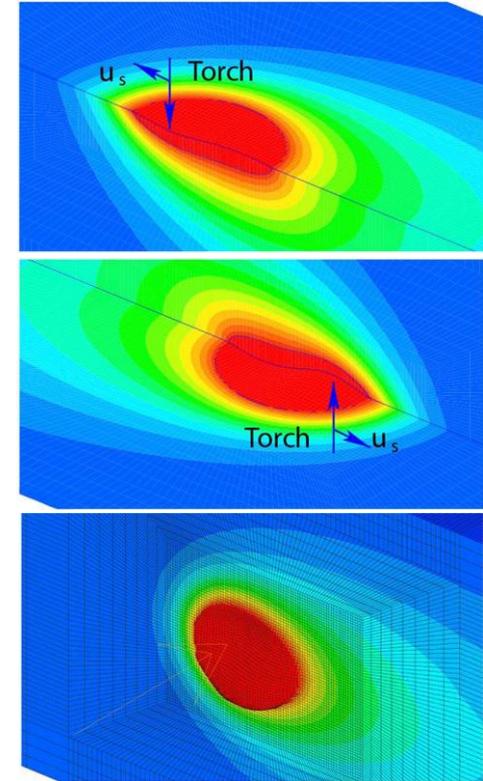
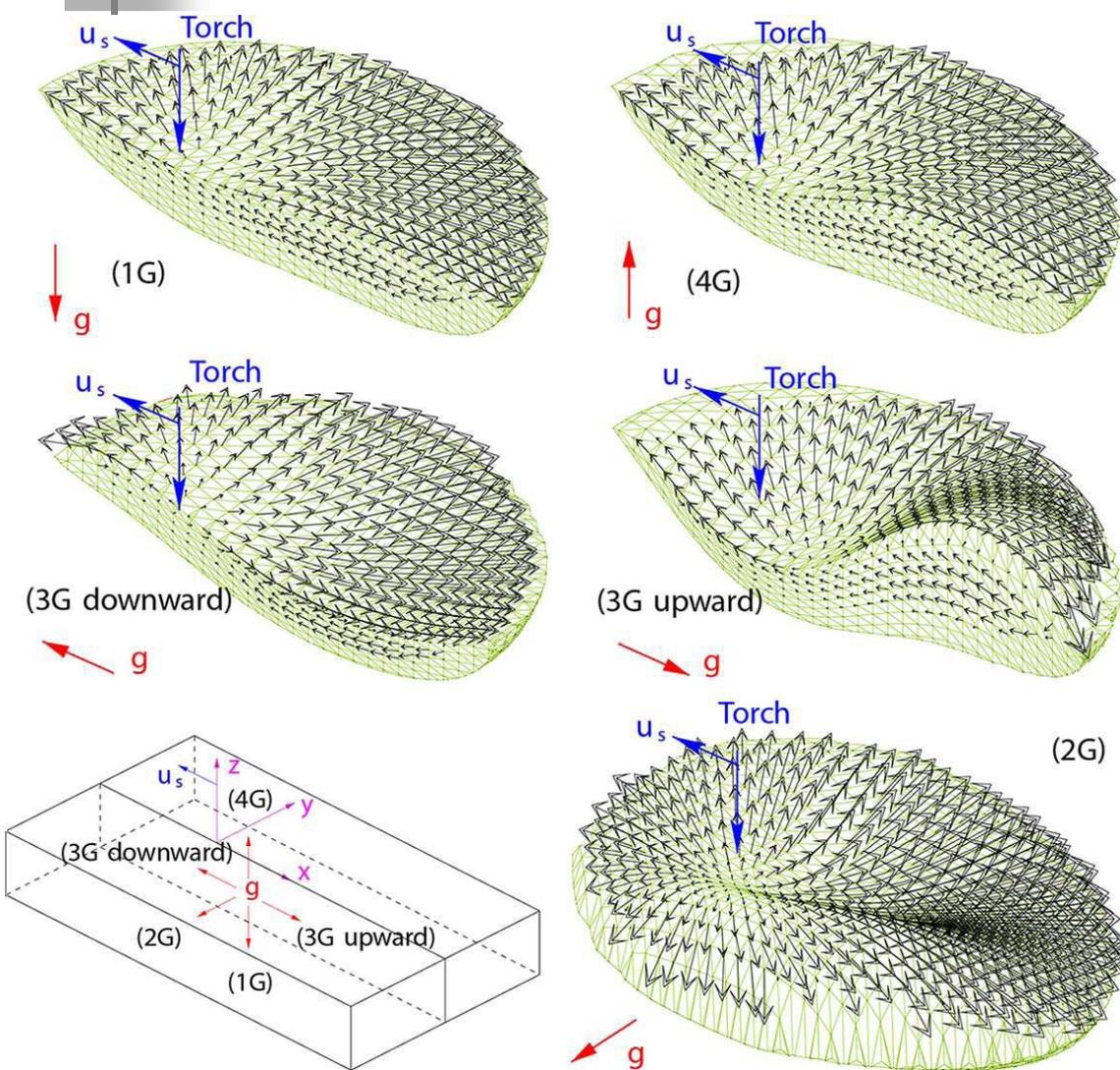
Aissani et al., Three-dimensional simulation of 304L steel TIG welding process: Contribution of the thermal flux, Applied Thermal Engineering, 2015, Vol. 89, pp. 822-832.



Modèle détaillé dans l'anode (assemblage)

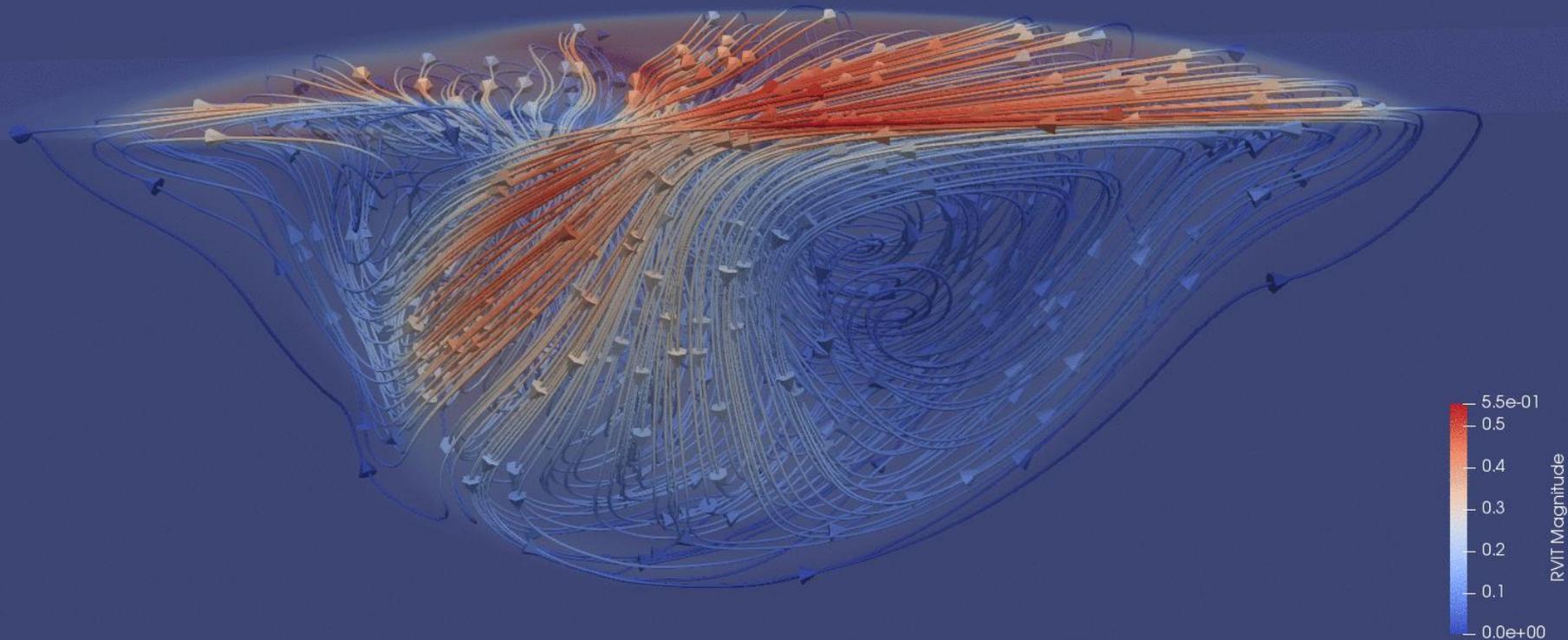
- Objectif : affiner les simulations du champ de température dans l'assemblage (les échanges avec l'extérieur sont modélisés)
- Modèle : on se donne la distribution spatiale du dépôt d'énergie, on calcule : changement de phases solide-liquide, écoulement dans le métal en fusion (convection naturelle, cisaillement du gaz de protection, forces de Lorentz, etc.), conduction dans le solide, échanges avec l'extérieur, etc.

Influence de la position de soudage

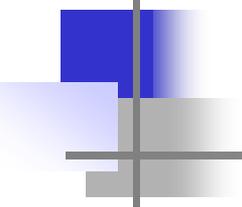


Nguyen et al., Sensitivity to welding positions and parameters in GTA welding with a 3D multiphysics numerical model, NHT A, 2017, Vol. 71, pp. 233–249.

Écoulement dans le bain fondu (thermo-hydraulique)



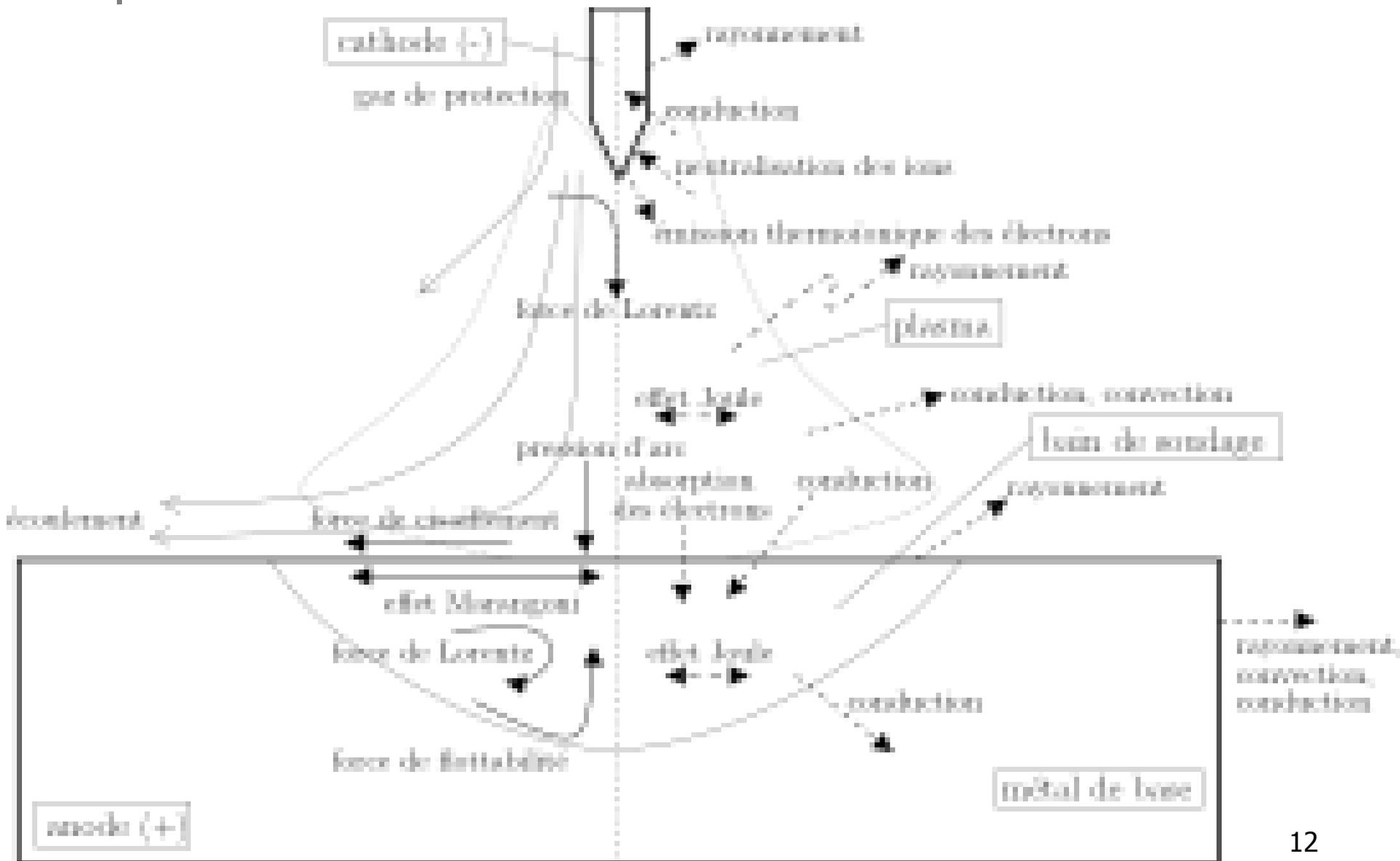
Source : M-C Nguyen, S. Gounand et O. Asserin, CEA Saclay.



Modélisations multi-physiques

- 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.*

Modélisation multi-physique soudage à l'arc



Equations gouvernant le problème dans l'arc

Equations de conservation :

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

Conditions aux limites :

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

Equations gouvernant le problème dans l'anode

Equations de conservation :

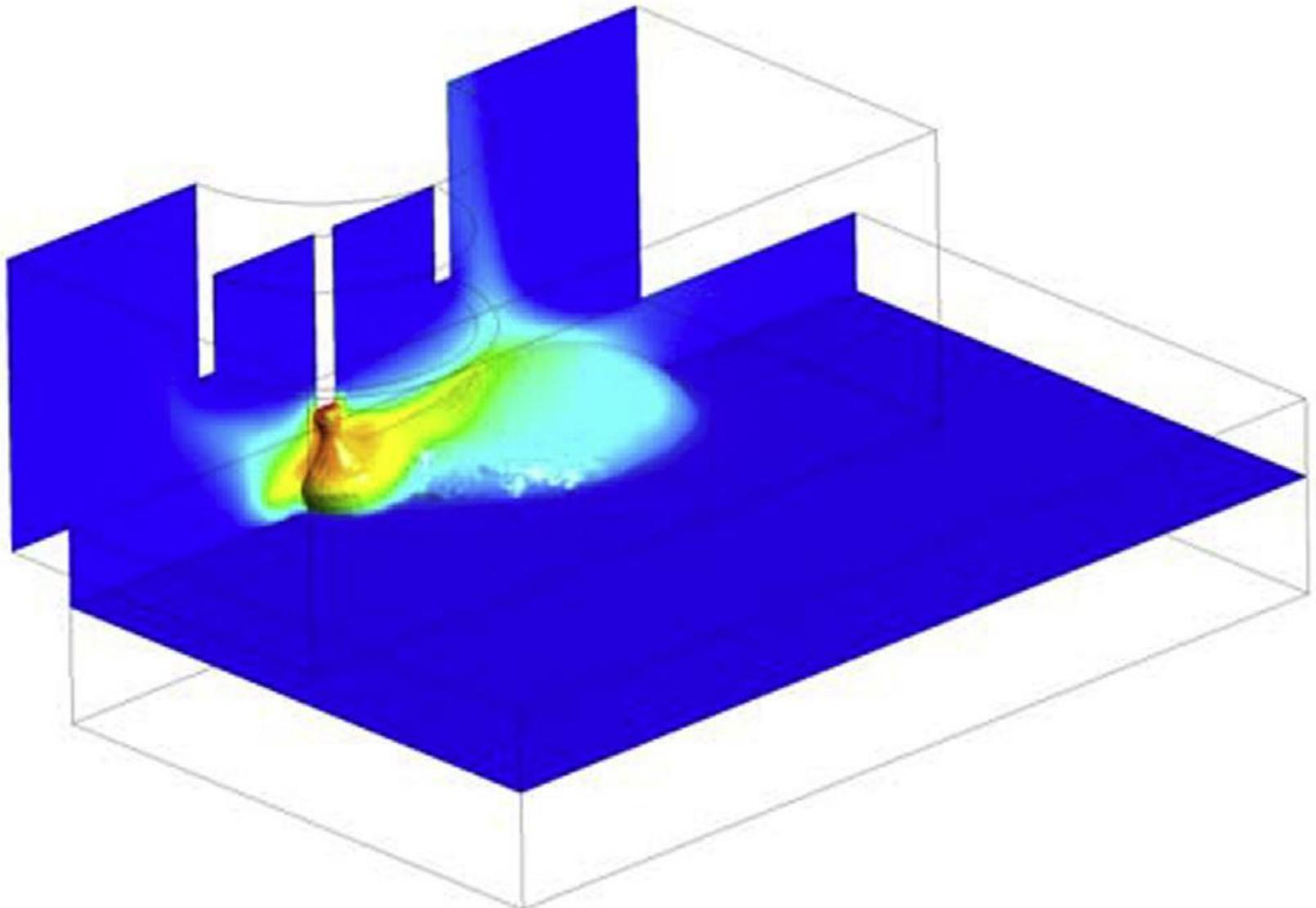
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 && \text{sur } \Omega_{\text{anode}} \\ \rho_{\text{ref}} (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{u} + \nabla p'' - \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}' &= (-\sigma \nabla \phi) \times \mathbf{B} - \rho \beta (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{g} \\ &\quad - c \frac{(1 -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

Conditions aux limites :

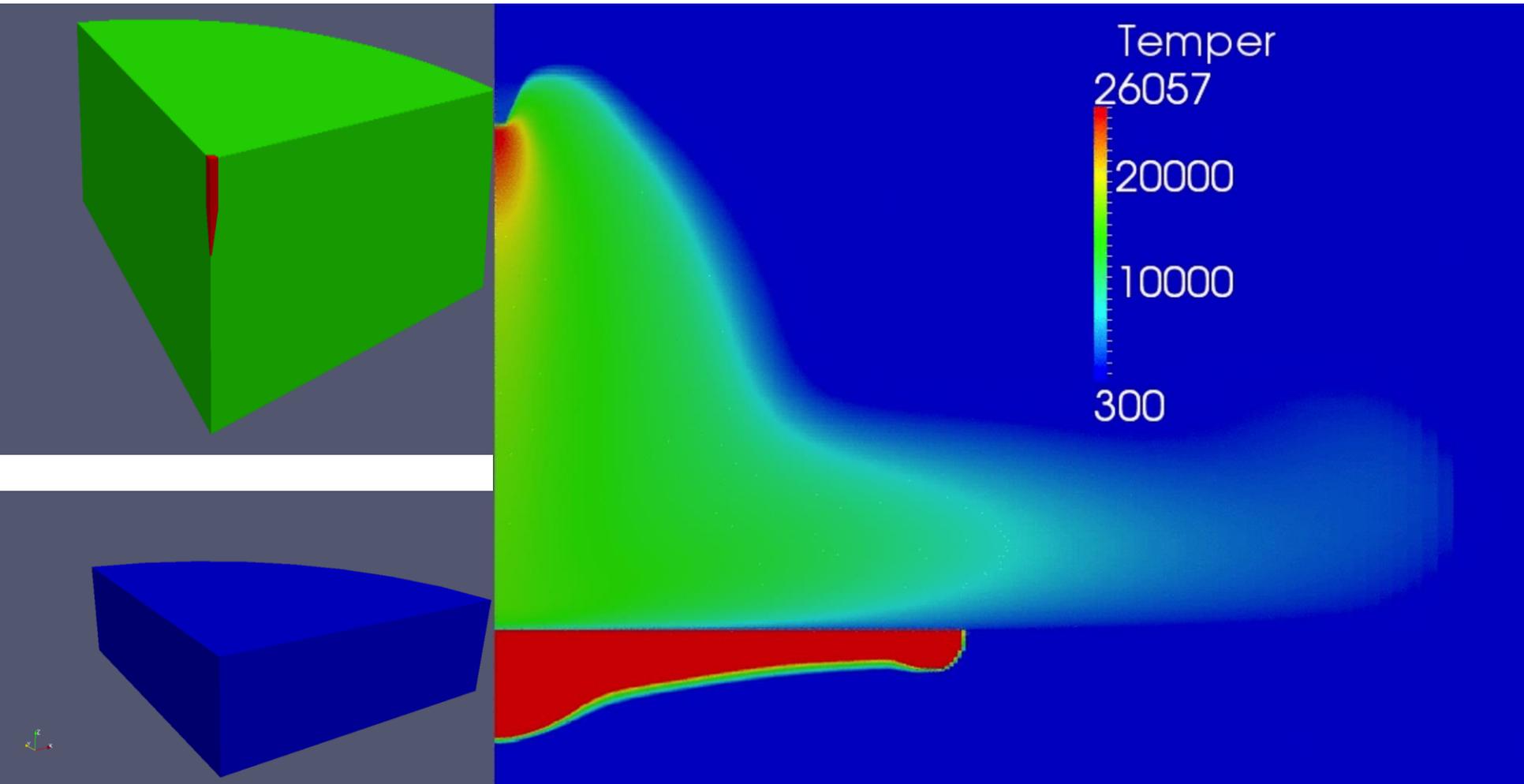
$$\begin{array}{lll} \mathbf{u} = \mathbf{s}_9 & \text{ou} & (\bar{\boldsymbol{\tau}}' - p'' \mathbf{I}) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{s}_{10} & \text{sur } \Gamma_{\text{anode}} \\ T = s_{11} & \text{ou} & \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = s_{12} & \text{sur } \Gamma_{\text{anode}} \\ \phi = s_{13} & \text{ou}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

- One way – Two way coupling
- 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).

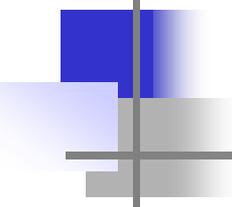
Modélisation multi-physique soudage à l'arc



Modélisation multi-physique soudage à l'arc

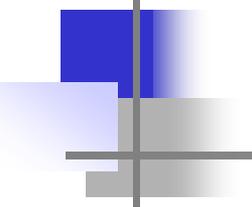


Source : D. Borel, X. Yau, EDF R&D, Chatou



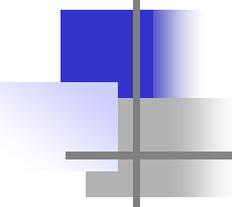
Les apports de la thermo-hydraulique pour la simulation numérique du soudage

- 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 et perspectives

- Choix pragmatique de modélisation, dilemme : résoudre
 - Avec précision un problème physique simpliste ;
 - Grossièrement un problème physique très complexe, mais plus réaliste pour la compréhension et l'optimisation de produits, systèmes ou procédés de fabrication ;
- Validations des principales composantes des modèles numériques (phénomènes physiques impliqués) ;
- 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 :
 - fortes non-linéarités, multi-échelles, lois de comportement, nouveaux paradigmes algorithmiques d'accélération, implémentation, etc.