

10^{ème} Colloque : MODELISATION & SIMULATION NUMERIQUE DU SOUDAGE

« 10 ans de progrès en SNS »

Avancées en modélisation de la formation du cordon de soudure et des écoulements en zone fondue

22 Mars 2012

Olivier Desmaison, Gildas Guillemot, Michel Bellet

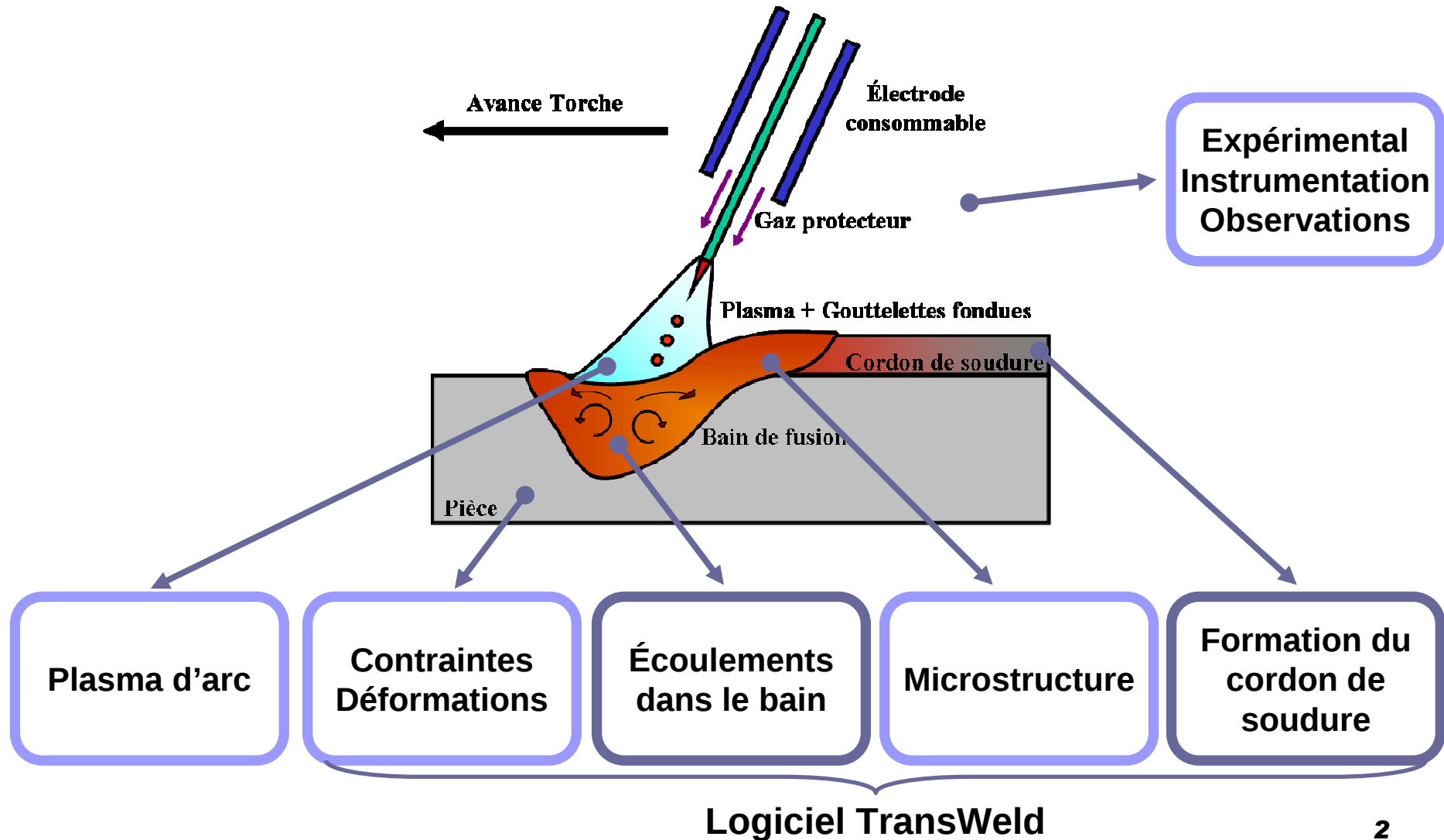
Mines ParisTech, Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF)

CNRS UMR 7635, Sophia Antipolis, France

olivier.desmaison@mines-paristech.fr

Simulation numérique du soudage

■ Axes de recherche et développement



Plan

■ *Modélisation d'un cordon de soudure*

- ☐ État de l'art
- ☐ Principe de la méthode choisie
- ☐ Approche eulérienne et Level Set
- ☐ Application au soudage MIG multi-passes

■ *Écoulements dans le bain de fusion*

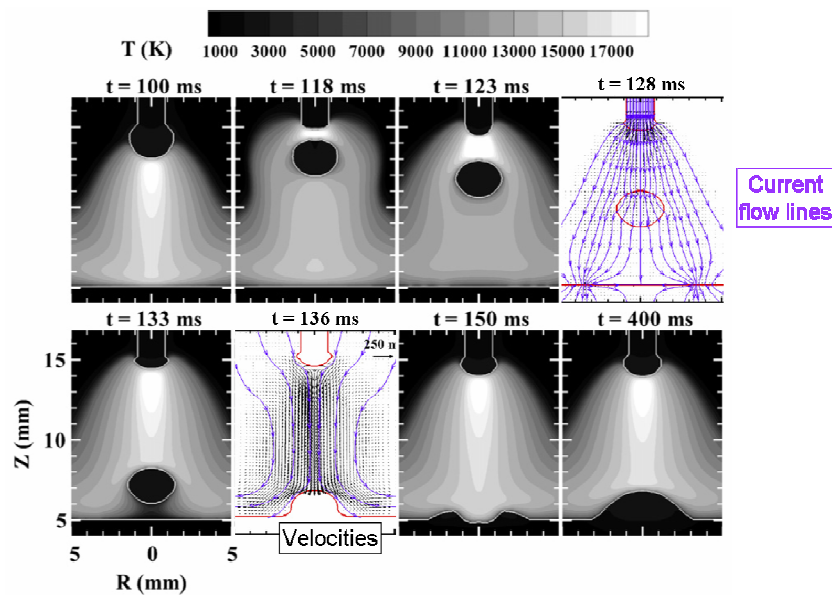
- ☐ Pourquoi ?
- ☐ Relation entre thermique et écoulements
- ☐ Forces prises en compte
- ☐ Application au soudage TIG non stationnaire

■ *Acquis & Perspectives*

Cordon de soudure – État de l'art

Modélisation d'un cordon de soudure

Formation de la goutte
et transfert dans le bain

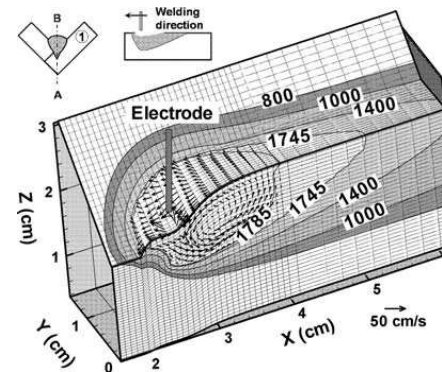


[Zhou & Tsai, Heat & Mass Transfer, 51 (2008)]

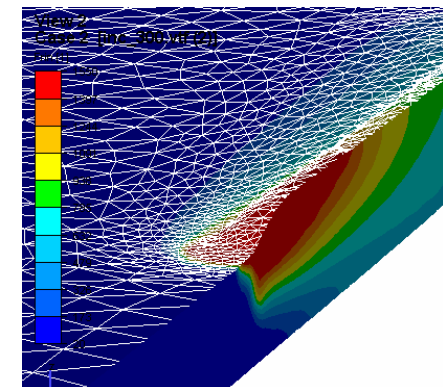
Terme subsidiaire de
source de volume

Minimisation de
l'énergie de
déformation de
surface

Résolution d'un
problème fluide
Navier Stokes
compressible



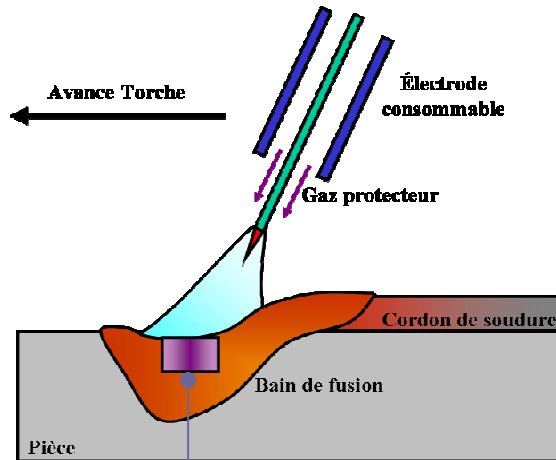
[Kumar & Debroy, Metallurgical & Material Transactions A, 38 (2007)]



[Bellet et al, MCWASP 2009]

Cordon de soudure – Principe de la méthode

Step 1 : Modèle de cavité + Terme source moyenné dans le temps, calculés à partir des paramètres de soudage



Cavité :

- Terme source de volume $\dot{\theta}$
- Terme source d'apport de chaleur $\dot{Q}$

Step 2 : Résolution de l'équation de Navier Stokes compressible

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) - \nabla \cdot \eta (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + \nabla p = \vec{F}_{Beam} \\ \nabla \cdot \vec{v} = \dot{\theta} \end{array} \right.$$

Gravité

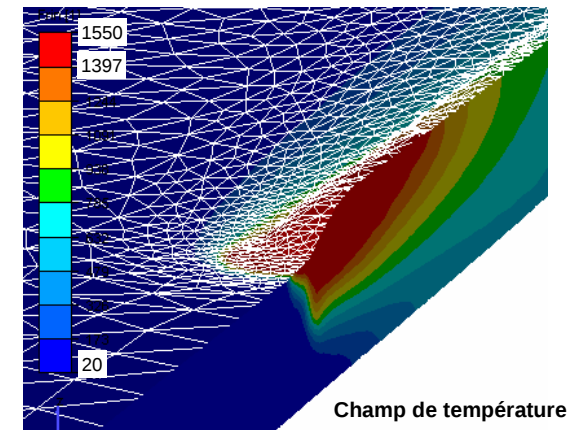
CL : Tension Surface, Pression d'arc

Step 2 bis : Résolution de l'équation de la chaleur

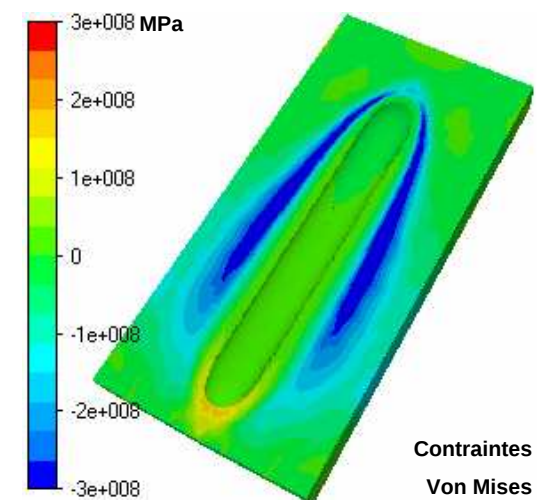
$$\rho C_{P-Eq} \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \dot{Q}$$

CL : Flux de chaleur surfacique

Step 3 : Déformation du maillage à partir du champ de vitesse $\vec{v}$ obtenu de la résolution précédente

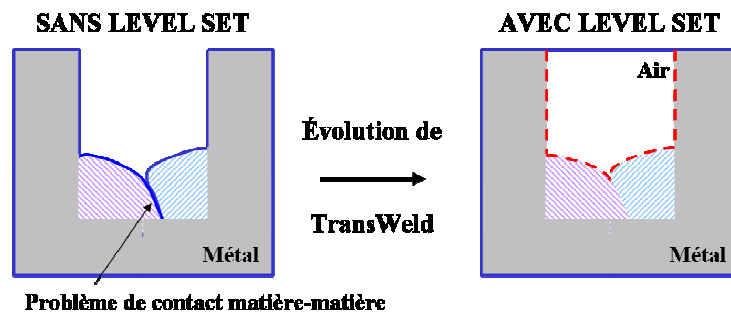


[Bellet et al, MCWASP 2009]

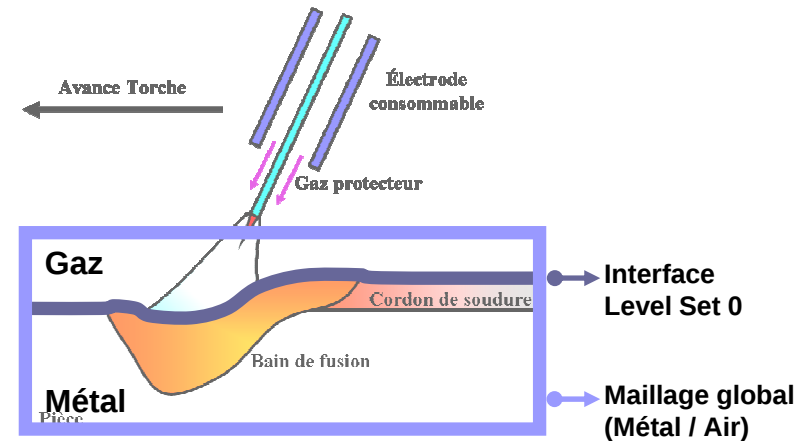


Cordon de soudure – Approche eulérienne & Level Set

Pourquoi ? Supprimer les problèmes de contact matière-matière



Comment ? → Utilisation d'une fonction distance



Résolution : Navier Stokes et Transport de la LS

$$\left\{ \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) - \nabla \cdot \eta (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) + \nabla p = \vec{F}_{Beam} \right.$$

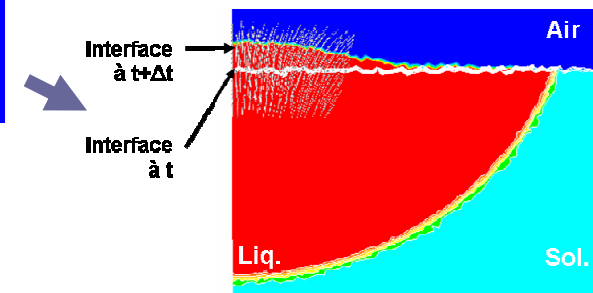
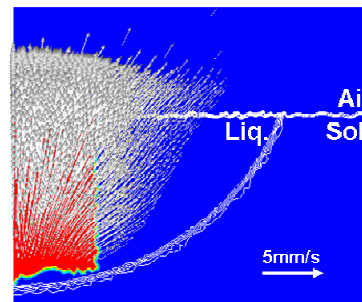
$$\nabla \cdot \vec{v} = \dot{\theta}$$

Terme source dans la conservation de la masse $\dot{\theta}$.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \phi = 0$$

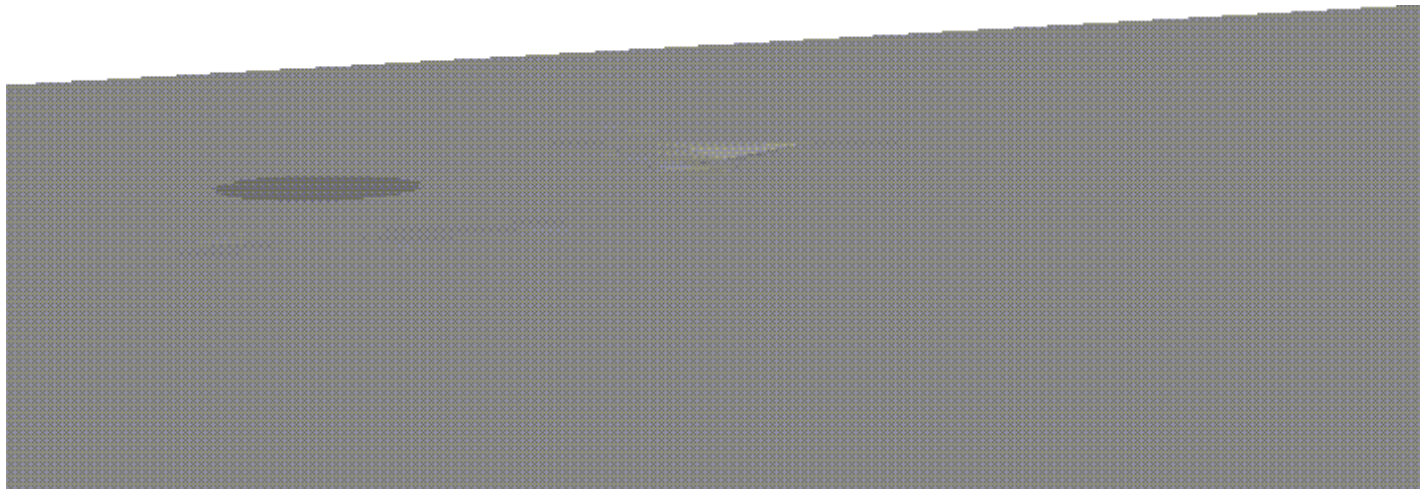
Champ de vitesse issu de la résolution de Navier Stokes

Fonction Distance
= Level Set

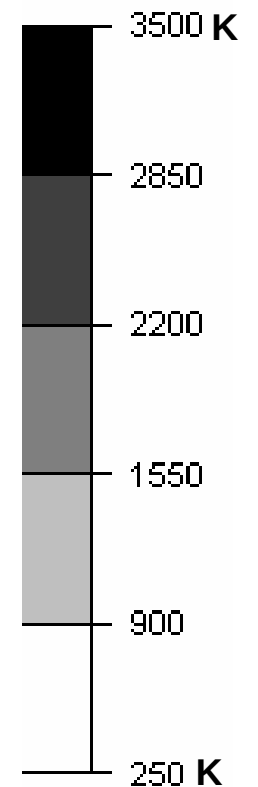
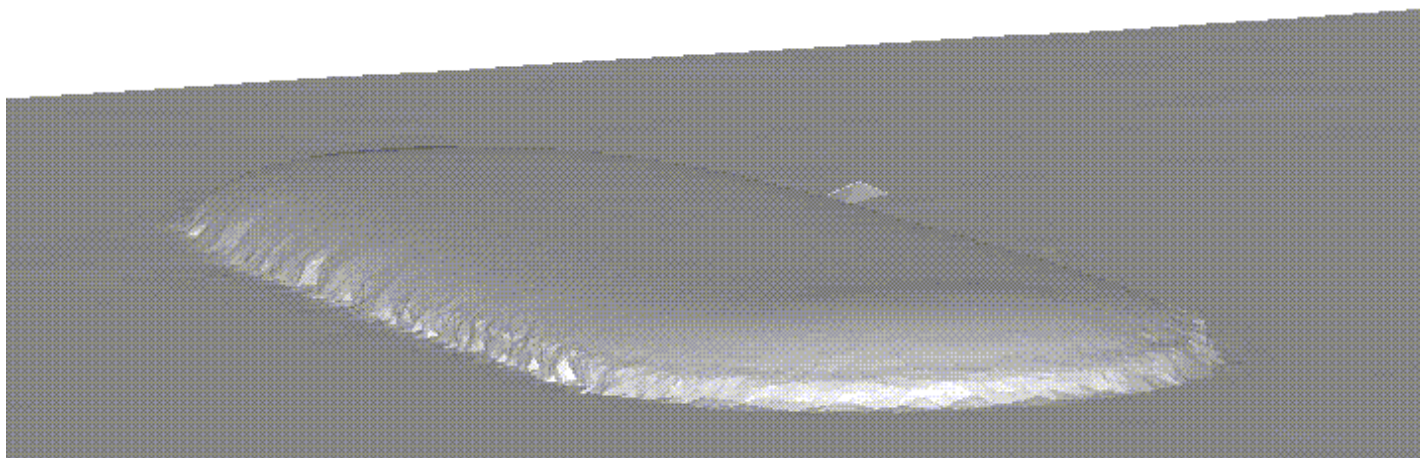


Cordon de soudure – *Application au soudage MIG multi-passes*

■ PASSE 1



■ PASSE 2



Plan

■ *Modélisation d'un cordon de soudure*

- ☐ État de l'art
- ☐ Principe de la méthode choisie
- ☐ Approche eulérienne et Level Set
- ☐ Application au soudage MIG multi-passes

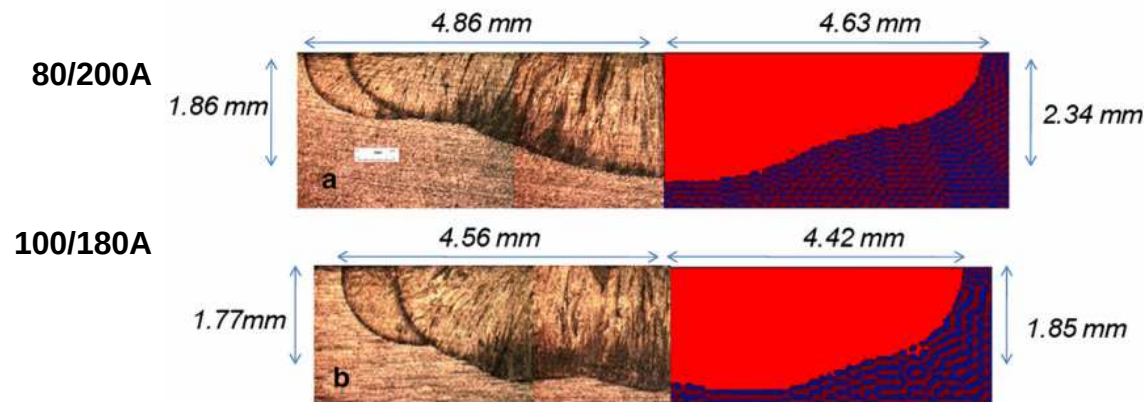
■ *Écoulements dans le bain de fusion*

- ☐ Pourquoi ?
- ☐ Relation entre thermique et écoulements
- ☐ Forces prises en compte
- ☐ Application au soudage TIG non stationnaire

■ *Acquis & Perspectives*

Écoulements dans le bain – Pourquoi ?

■ Meilleure représentation de la physique



Résultats obtenus lors de la simulation de soudage TIG sous arc pulsé

[Traidia & Roger, Heat & Mass Transfer, 54 (2011)]

■ Modèle d'apport de chaleur plus réaliste

Source surfacique gaussienne
+
Écoulements

PLUTÔT QUE

Source volumique Goldak
+
Conductivité augmentée

Écoulements dans le bain – *Relation entre température et écoulements*

Écoulements
Résolution de Navier Stokes
→ Champ de vitesse $\vec{v}$

$$\left\{ \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} \right) - \nabla \cdot \eta (\vec{\nabla} \vec{v} + \vec{\nabla} \vec{v}^T) + \vec{\nabla} p = \vec{F}_{Flows} \right.$$

$$\left. \nabla \cdot \vec{v} = 0 \right.$$

Propriétés mécaniques différentes selon le domaine (air / métal) et transition à l'interface via une loi de mélange

Forces qui provoquent les écoulements

Incompressibilité du métal liquide

Apport de chaleur
Résolution équation de l'énergie
→ Température T

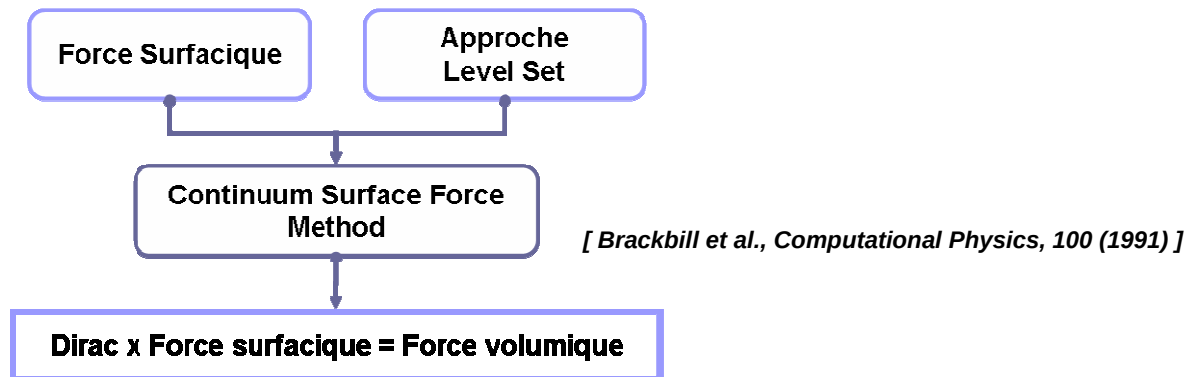
$$\rho C_{P-EQ} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \right) - \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) = f$$

Terme de convection dans l'équation de la chaleur

Écoulements dans le bain – *Forces prises en compte*

- **Flottabilité : approche de Boussinesq** $\vec{F}_B = \rho \vec{g} (1 - \beta (T - T_{ref}))$

- **Effets Marangoni** $\vec{F}_{\vec{s}}^{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}}$



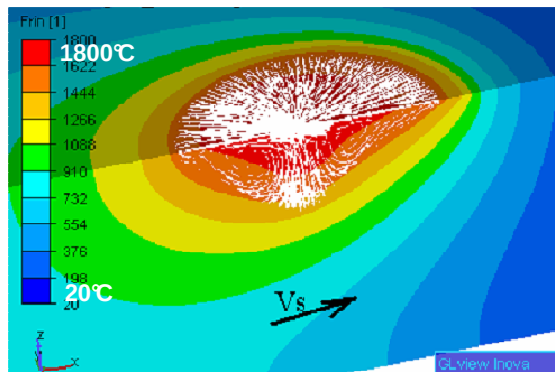
$$\vec{F}_V^{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \vec{s}} \delta(\varphi)$$

- **Forces de Lorentz : calcul analytique ou résolution électromagnétique**

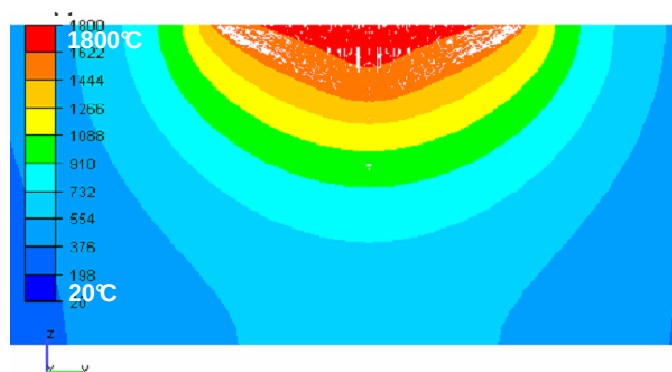
Écoulements dans le bain – *Application au soudage TIG non stationnaire*

- *Validation : Benchmark de soudage TIG stationnaire proposé par le CEA*
- *Application en soudage TIG instationnaire*

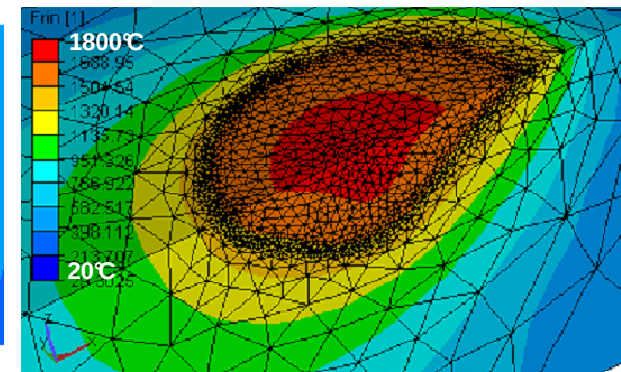
Écoulements en coupe longitudinale



Écoulements en coupe transversale



Remaillage adaptatif



[Hamide, Thèse Mines ParisTech, (2008)]

Plan

■ *Modélisation d'un cordon de soudure*

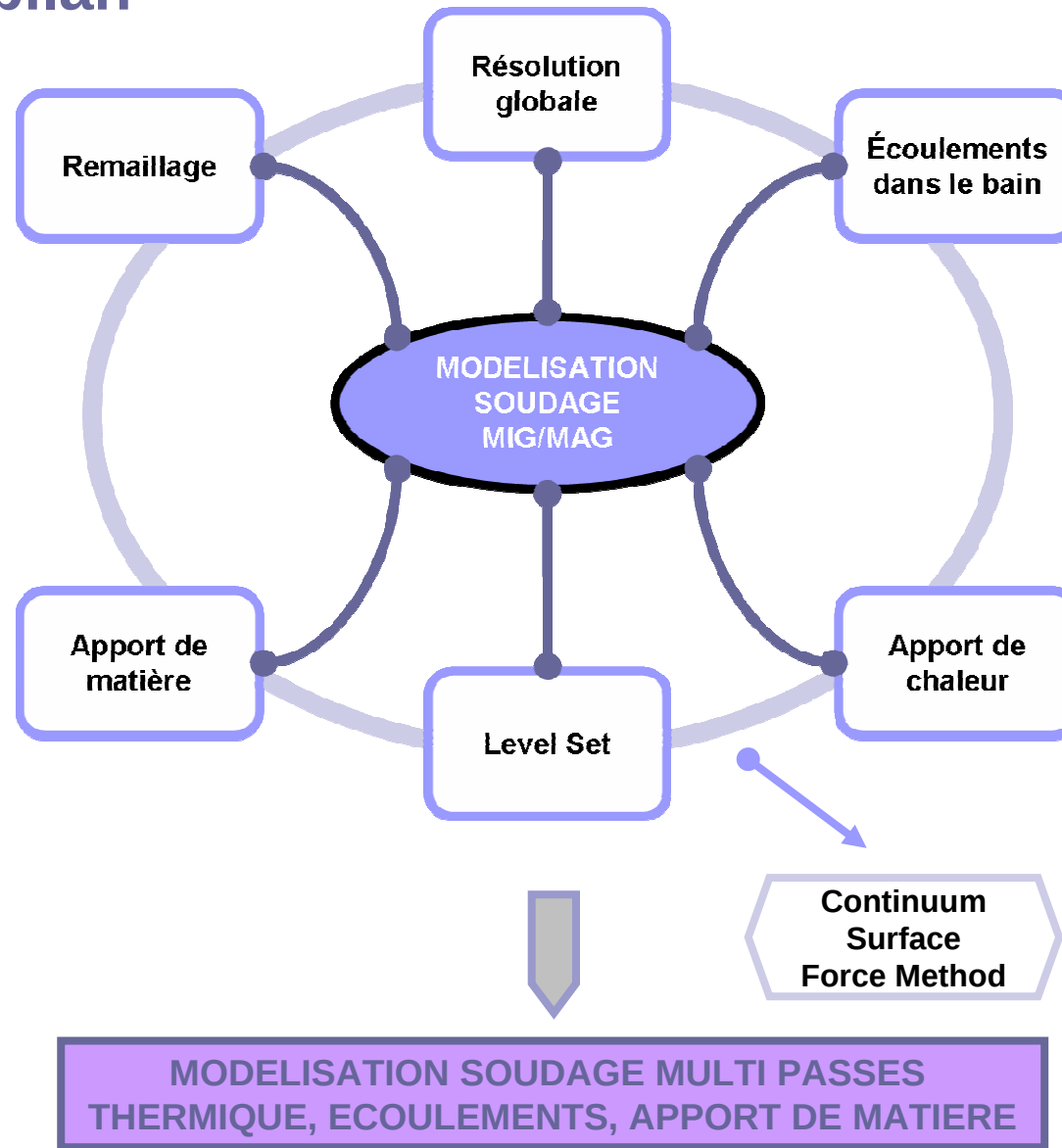
- ☐ État de l'art
- ☐ Principe de la méthode choisie
- ☐ Approche eulérienne et Level Set
- ☐ Application au soudage MIG multi-passes

■ *Écoulements dans le bain de fusion*

- ☐ Pourquoi ?
- ☐ Relation entre thermique et écoulements
- ☐ Forces prises en compte
- ☐ Application au soudage TIG non stationnaire

■ *Acquis & Perspectives*

Schéma bilan

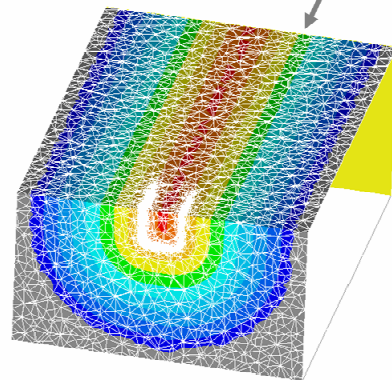
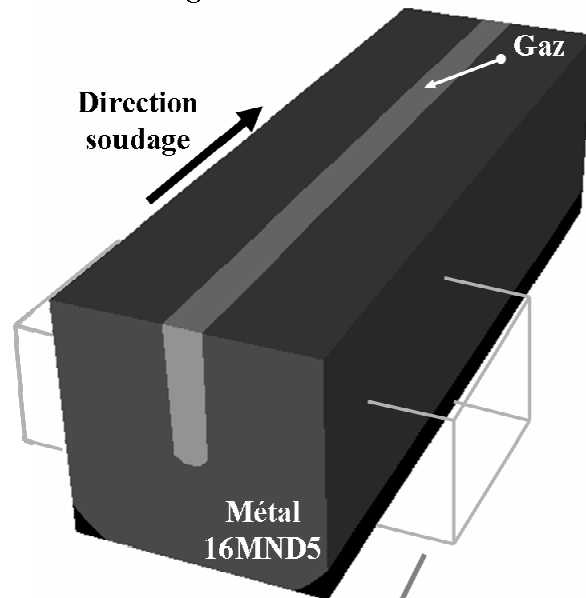


Agence Nationale de la Recherche

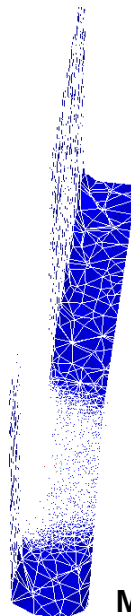


SISHYFE : Soudage multi-passes d'un chanfrein étroit

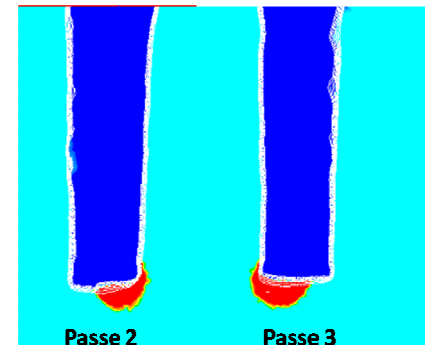
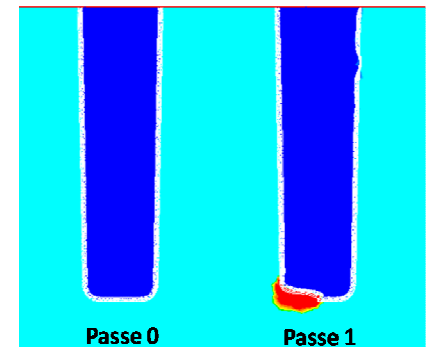
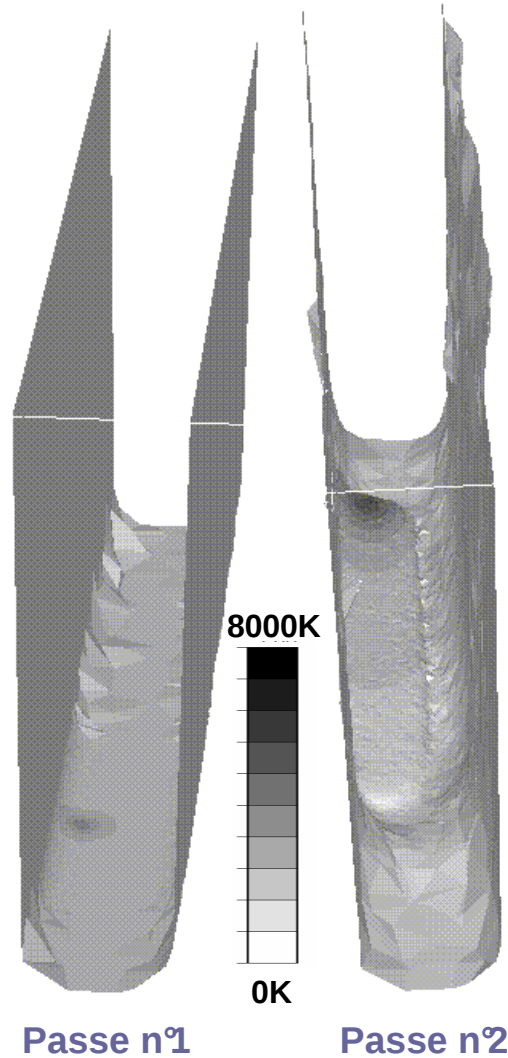
**Soudage multi-passes
configuration chanfrein étroit**



**Fonction distance
Maillage**



**Maillage et bain
de fusion**



Vues de face

Acquis & Perspectives

■ *Acquis*

- Apport de chaleur avec l'approche Level Set
- Écoulements dans le bain de fusion
 - Modélisation soudage TIG
- Apport de matière, formation d'un cordon de soudure
 - Modélisation soudage MIG multi-passes
- Instrumentation, observations (voir A.1)
 - Identification de sources de chaleur par analyse inverse
 - Validation de la modélisation multiphysique

■ *Perspectives*

- Modélisation des contraintes et déformations
 - Adaptation et développement de travaux issus de différentes thèses du Cemef
- Modélisation de la texture de grain dans le cordon (voir A.2)
 - Application de la méthode CA-FE (Ch.-A. Gandin & G. Guillemot)
- Modélisation des changements de phases à l'état solide dans le cordon et dans la ZAT (voir A.2)
 - Thèse en cours (S. Chen & G. Guillemot)
- Identification de sources de chaleur par méthodes inverses

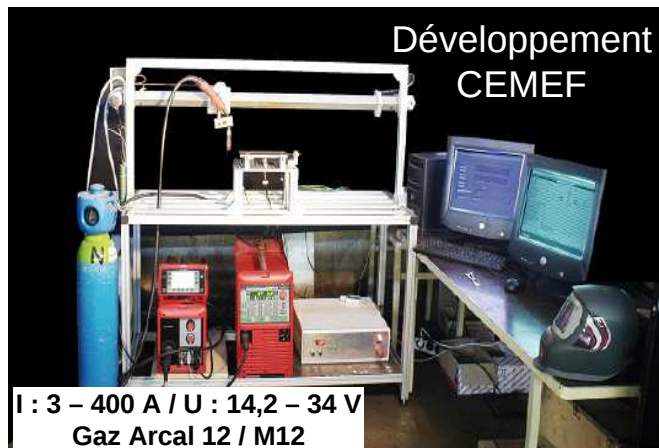


ANNEXES

**POUR QUESTIONS
OU
COMPLEMENTS D'INFORMATION**

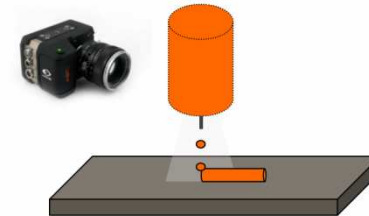
A.1 : Expérimental – Soudage MIG instrumenté

- Développement d'un banc de soudage MIG/MAG, multi instrumenté
Post-doc Ch. Pradille et G. Guillemot → Projet Carnot « Soudage »



- Observations réalisées de manière **simultanée**

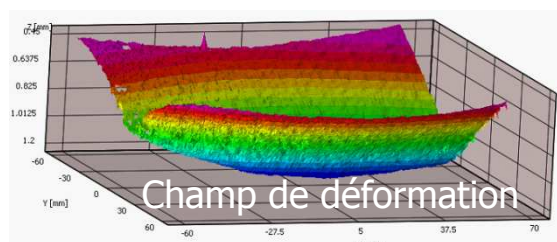
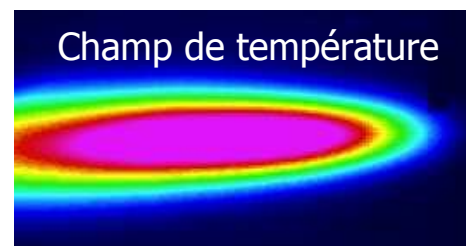
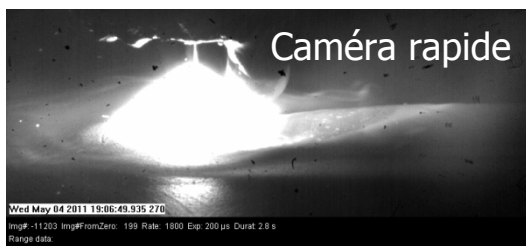
Miro



Flir Cedip



Vic 3D



OBJECTIFS

- Constitution d'une **banque de donnée** sur différents aciers pour validation des résultats numériques
- Observation des **microstructures** développées (phase formée, grossissement de grains, défauts spécifiques ...)
- Développements de méthodes inverses (MOOPI) pour la **recherche des paramètres physiques**

A.1 : Expérimental – Identification de sources de chaleur

■ Modèle numérique

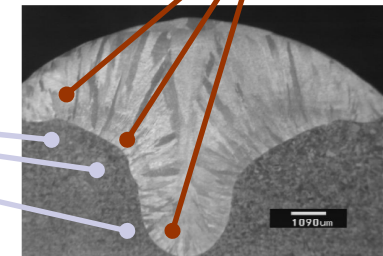
- Source de chaleur surfacique induite par l'arc $\phi(d, r) = \frac{3\dot{W}_{surf}}{\pi(d \tan \alpha)^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{(d \tan \alpha)^2}\right)$
- Conductivité liquide augmentée pour la modélisation de la turbulence $k_{eff} = \lambda_k k$

■ Analyse inverse

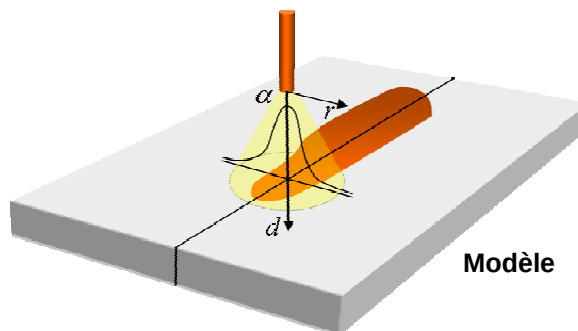
- Jeu de paramètres $\mathbf{q} = \{\eta, \eta_d, \tan \alpha, \lambda_k\}$
- Fonction objective
$$\Psi(\mathbf{q}) = \frac{\beta}{S \times I} \sum_{k=1}^S \sum_{i=1}^I (T_{k,i}^{cal}(\mathbf{q}) - T_{k,i}^{exp})^2 + (1 - \beta) \left[\frac{1}{S_{FZ}} \sum_{k=1}^{S_{FZ}} \left\langle T_L - \max_{i=1,I} T_{k,i}^{cal}(\mathbf{q}) \right\rangle^2 + \frac{1}{S_{BM}} \sum_{k=1}^{S_{BM}} \left\langle \max_{i=1,I} T_{k,i}^{cal}(\mathbf{q}) - T_S \right\rangle^2 \right]$$

[Bellet et al, MCWASP 2009]

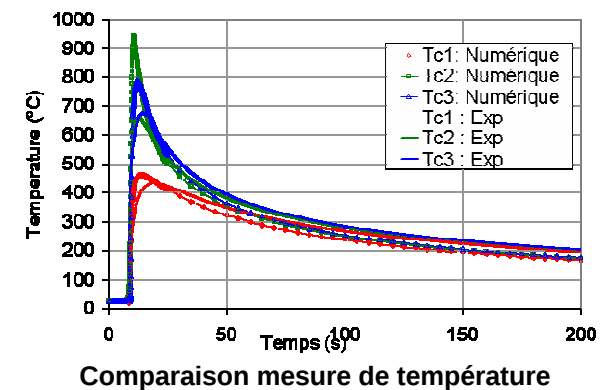
Thermocouples



□ Résultats

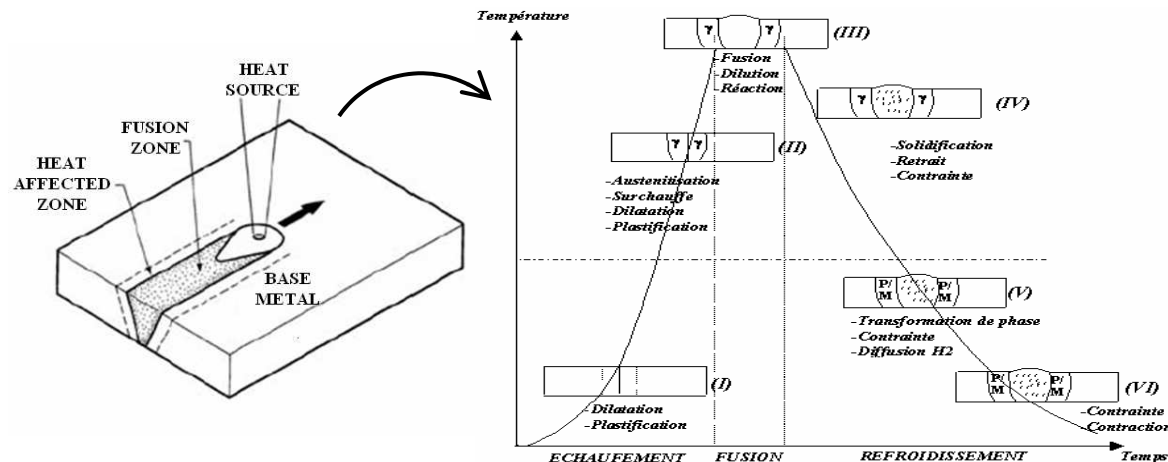


Modèle



A.2 : Microstructure – Changements de phase à l'état solide

- Travaux de thèse de S. Shen (2011-2014) (G. Guillemot, Ch.-A. Gandin)
- Objectif : calculer les taux de phase dans la ZAT et le cordon, en soudage des aciers



- Formation des phases austénitique, perlitique, bainitique, martensitique
- Intégration à CimLib, pour le couplage mécanique macroscopique

- Prochaines étapes :
 - Utilisation du logiciel Thermocalc
 - Détermination des équilibres thermodynamiques
 - Parallélisation des calculs pour le calcul des évolutions nodales (Cluster CEMEF)

