



**AREVA**

l'avenir pour énergie



## **Analyse expérimentale du comportement dynamique des zones liquides en soudage à l'arc : mesures de température du bain de fusion**

R. Monier (AREVA-LMGC), F. Soulié (LMGC), J. Chapuis  
(AREVA), P. Gilles (AREVA) et C. Bordreuil (LMGC)

Paris le 13/02/2014



# Sommaire



- ▶ **Contexte**
- ▶ **Le comportement dynamique**
- ▶ **Contraintes**
- ▶ **Etat de l'art**
- ▶ **Essais préliminaires**



## ► Domaines d'activités du centre technique Saint Marcel

### ◆ Soudage

- Mise au point de procédures de soudage
- Réalisation de maquettes instrumentées
- Conception et industrialisation d'équipements de soudage

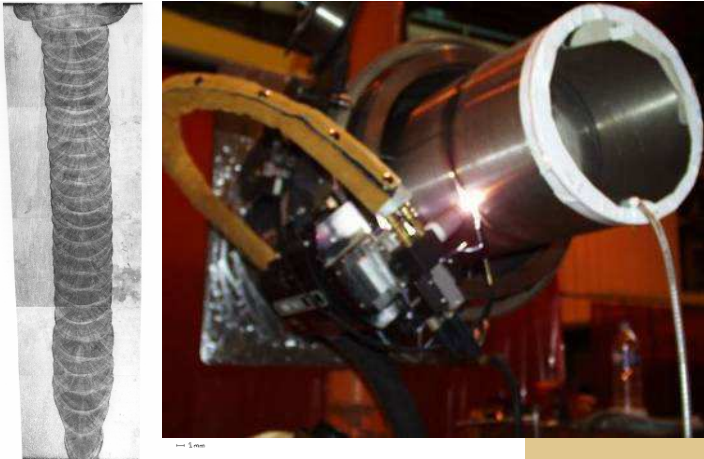
### ◆ Technologies connexes

- Simulation numérique du soudage
- Vision du soudage
- Développement de solutions de contrôle en temps réel

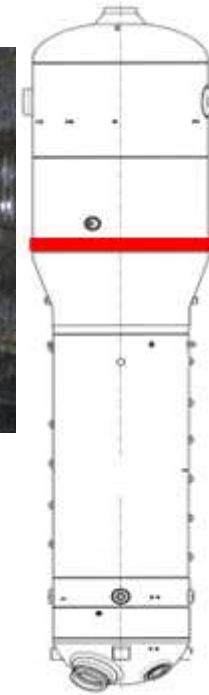
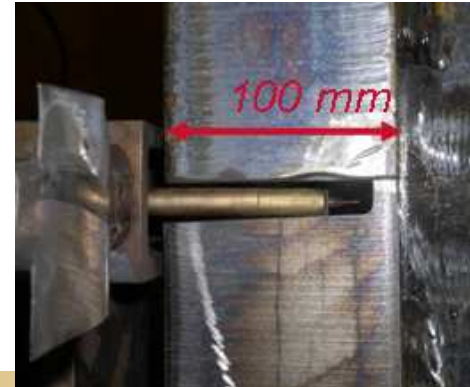
### ◆ Métallurgie

- Assistance technique
- Expertises métallurgiques
- Caractérisation mécanique

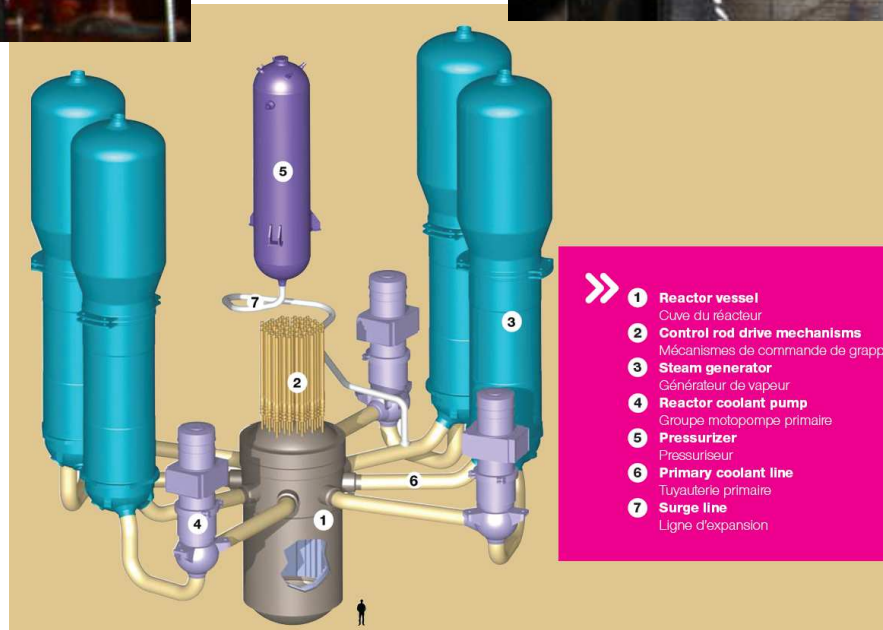
# Applications de Soudage



**Soudure bout-à-bout de tuyauteries épaisses (circuit primaire)**

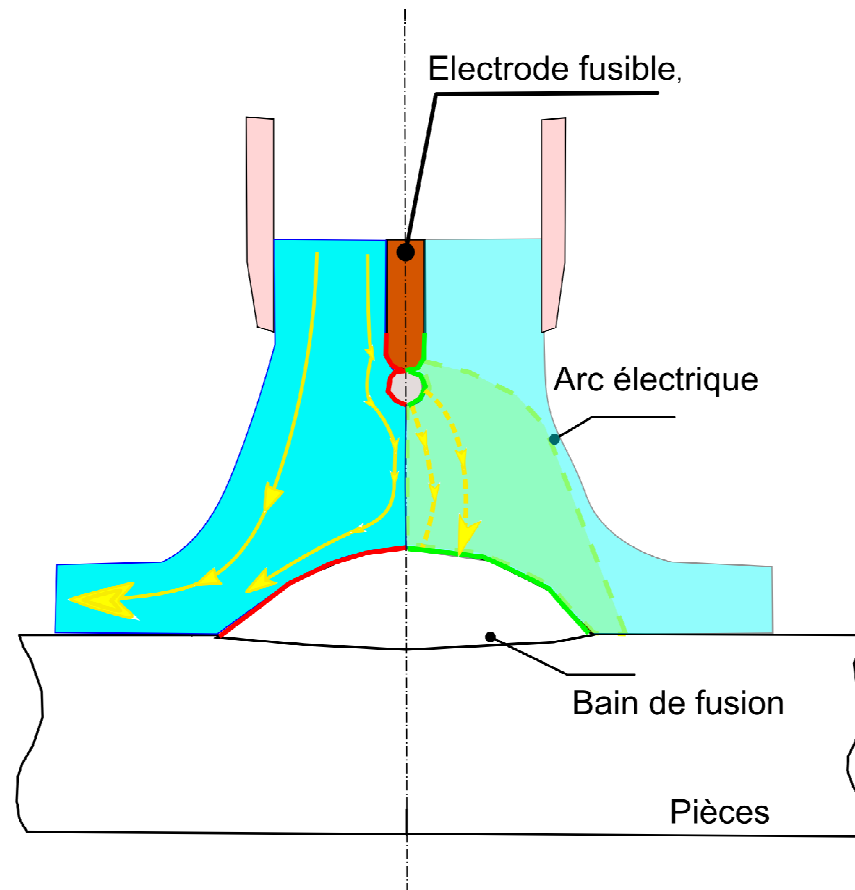


**Raboutage de viroles des composants primaires**





## ► Le soudage : Un procédé multiphysique



# Les zones liquides en soudage

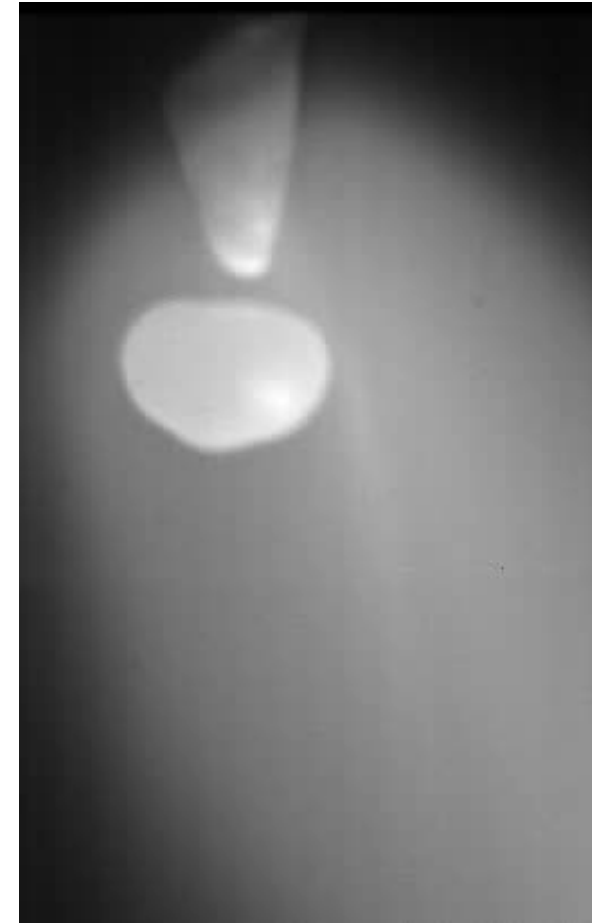


# Le comportement dynamique



- ▶ Stabilité de la veine liquide: *Allum, JOPD 1985, Lancaster 1987*

$$\omega^2 = x \frac{I_1(x)}{I_2(x)} \left[ (x^2 - 1) \frac{\gamma}{\rho R^3} - \frac{\mu_0 I^2}{2\rho\pi R^4} \right]$$





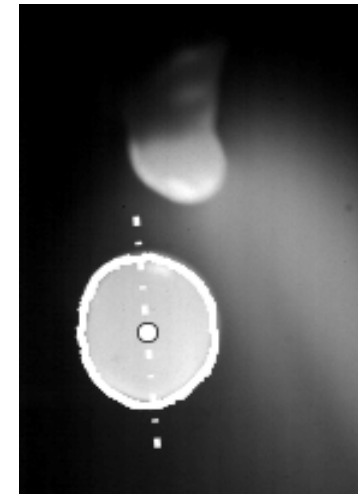


## ► Les propriétés thermophysiques

### ◆ Tension superficielle

- Mesure sur la goutte en vol libre
  - Surface extérieure
  - Centre de masse
  - Axe principal
  - Volume
  - Rayleigh 1896 :

$$\gamma = \frac{3 \pi \rho V_{\text{droplet}}}{8 \tau^2}$$

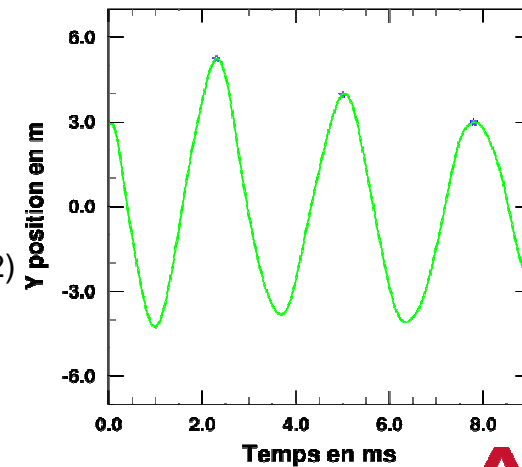
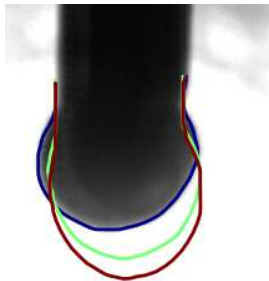


### ◆ Viscosité dynamique

- Mesure sur la goutte pendante
  - Détermination du coefficient d'amortissement  $\Gamma$
- L'amortissement s'exprime en fonction de la viscosité (Lamb 1932)

$$y = Ae^{-\Gamma t} f(\omega t)$$

$$\Gamma = \frac{20\pi\eta R_0}{3\rho V_{\text{drop}}}$$





## ▶ Estimation du champ de température

- ◆ Stabilité des zones liquides
- ◆ Etude des propriétés thermophysiques
- ◆ Utilisation pour la corrélation en simulation numérique
- ◆ Dialogue expérimentation/modélisation thermohydraulique

## ▶ Objectifs industriels

- ◆ Faisabilité de l'estimation de températures pour le comportement des zones liquides
- ◆ Faisabilité du contrôle en temps réel
- ◆ Solutions en configurations industrielles



## ▶ Contraintes liées à l'arc

- ◆ **Enorme gradient de températures**
  - Température du plasma de l'ordre de 20000K parcouru par environ 300A
- ◆ **Rayonnement du plasma à des longueurs d'ondes multiples**
  - Filtrage de certaines longueur d'ondes nécessaires
- ◆ **Variation des longueurs d'ondes du plasma**
  - En fonction du gaz, des matériaux soudés, et des métaux d'apport

## ▶ Contraintes liées aux procédés

- ◆ **Phénomènes physiques ayant un temps caractéristique très court**
  - Nécessité de développer des algorithmes performants (temps de calcul de l'ordre de la milliseconde)
- ◆ **Températures du bain de fusion, mais également température du métal en cours de transfert**
  - Ordre de grandeur: Jusqu'à 3300 K pour la goutte de métal en vol libre et 2500 K en proche surface du bain de fusion
- ◆ **Accès limité par la présence de la torche de soudage**



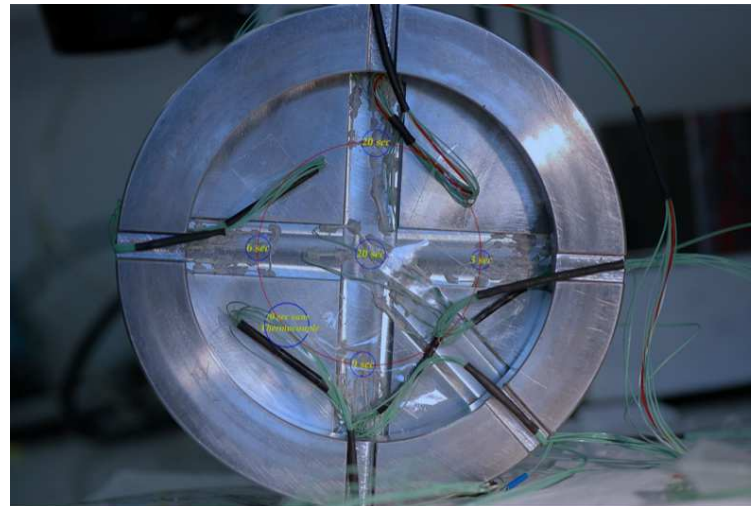
## ► Etude antérieure entre AREVA NP et différents laboratoires

### ◆ Laboratoires participants

- DIPI (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne)
- LIMATB (Université de Bretagne Sud)
- LMGC (Université de Montpellier 2)

### ◆ Mesure de température par pyromètre durant le temps de refroidissement

### ◆ Mesure de température au voisinage du bain par thermocouples qui permettent d'obtenir la température du bain par méthode inverse





## ▶ Vision en soudage

### ◆ Acquisition d'images

- HDR
- Caméra proche infrarouge
- Caméra + illumination laser

### ◆ Traitement d'image

- erCv (E. Romero 2013)

## ▶ Mesure de température des zones liquides

### ◆ Pyrométrie 2D à bande spectrale

- P. Peyre 2013

### ◆ Pyromètres à deux longueurs d'ondes

- M. Tanaka 2009
- K. Yamazaki 2010

### ◆ Mesure par sondes

- T. Von Weissenfluh 1985
- Utilisation de sondes dans le bain de fusion



## ► Principe de mesure (pyromètre à deux longueurs d'ondes)

### ◆ Ratio d'intensités de rayonnement (basé sur la loi de Planck)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \frac{1 - \exp\left(\frac{K}{\lambda_2 T}\right)}{1 - \exp\left(\frac{K}{\lambda_1 T}\right)}$$

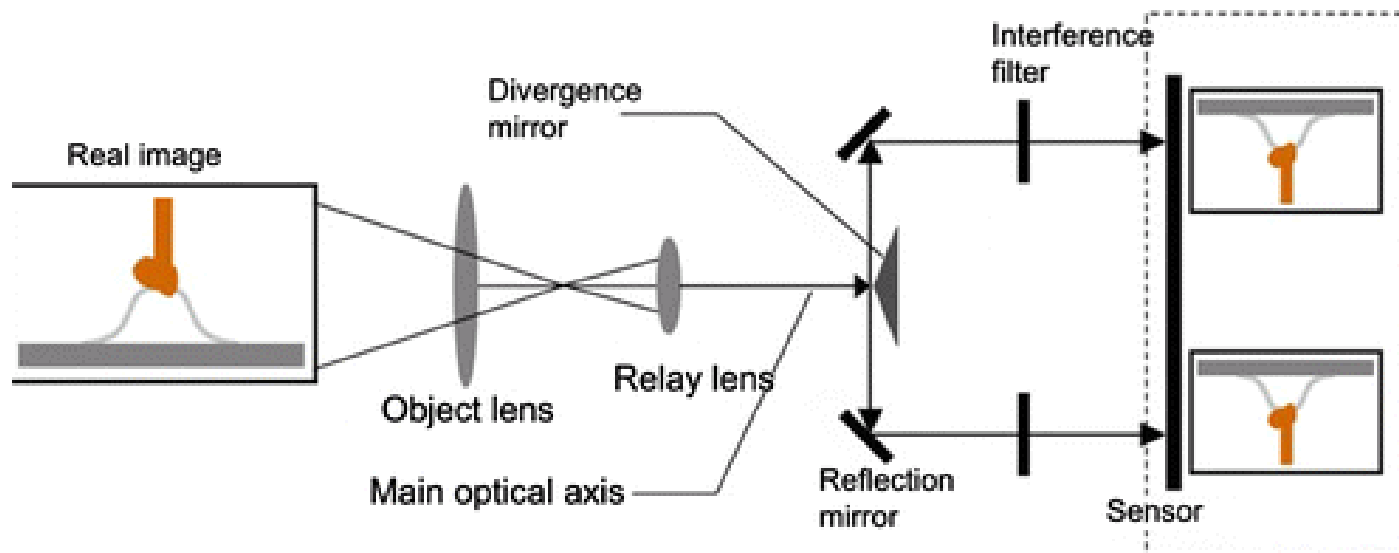
- I l'intensité du rayonnement pour une longueur d'onde donnée ( $\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$ )
  - $\varepsilon$  l'émissivité
  - $\lambda$  la longueur d'onde (m)
  - T la température (K)
  - C un coefficient lié aux caractéristiques du capteur (m.K)
- ◆ En supposant l'émissivité constante sur la plage de longueur d'onde, on peut obtenir:

$$T = \frac{C(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{1}{\ln(I_1 \lambda_1^5 / I_2 \lambda_2^5)}$$



## ► Dispositif de mesure:

- ◆ Caméra rapide Phantom IR300
- ◆ Objectif à dédoublement de chemin optique
- ◆ Filtres de deux longueurs d'ondes différentes



*Illustration du dispositif de mesure (Tanaka 2009)*

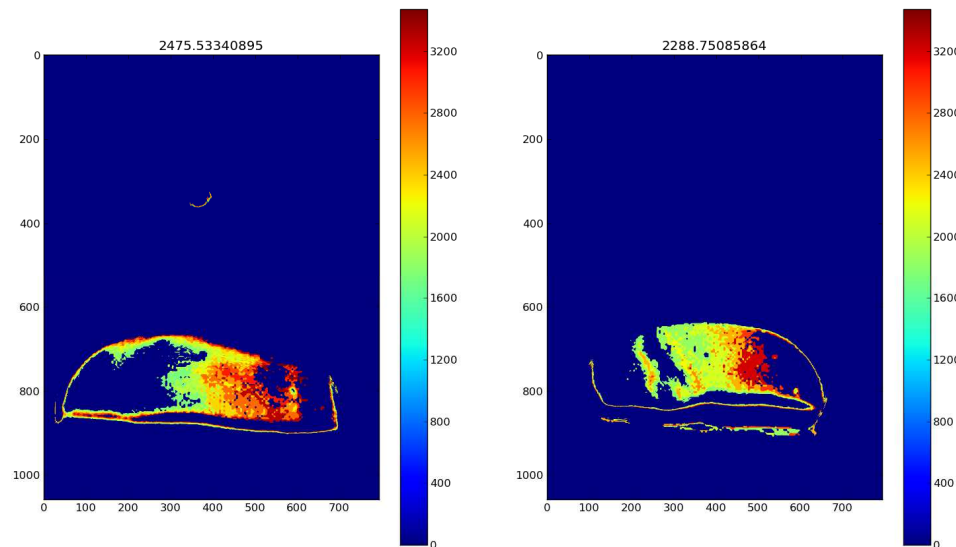
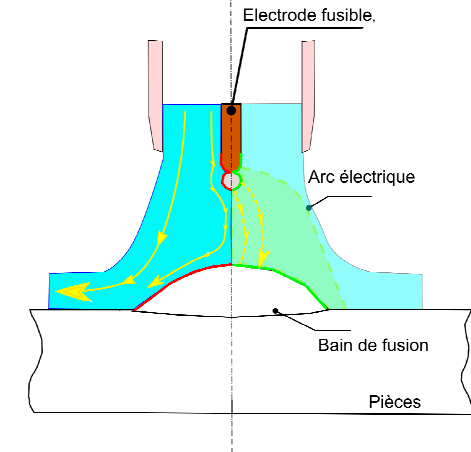
## ► Essais en soudage MAG

### ◆ 2 vitesses fil/énergies différentes

- 5,7 m/min
- 9,9 m/min

### ◆ 2 moments différents

- A l'extinction de l'arc
- Pendant un temps froid



Températures en K pour l'essai à 9.9 m/min (à gauche) et 5.7 m/min (à droite)

Températures moyennes : 2476 K à 9.9 m/min et 2289 K à 5.7 m/min





## ► Conclusion

- ◆ **Nécessité de la connaissance des propriétés thermophysiques**
- ◆ **Résultats en pyrométrie bichromatique encourageants (Mesure in-situ possible)**

## ► Perspectives

- ◆ **Etude d'autres méthodes de mesure de champ de températures**
  - Pyroréfectométrie
  - Pyrométrie multispectrale
  - Pyrométrie 2D à bande spectrale
- ◆ **Développement de moyens de calibration sur des scènes mobiles**
- ◆ **Faire dialoguer les paramètres procédés et la température**
- ◆ **Faire dialoguer les propriétés physiques et la température**
- ◆ **Développer des outils de contrôle procédé**



**Merci de votre attention**