

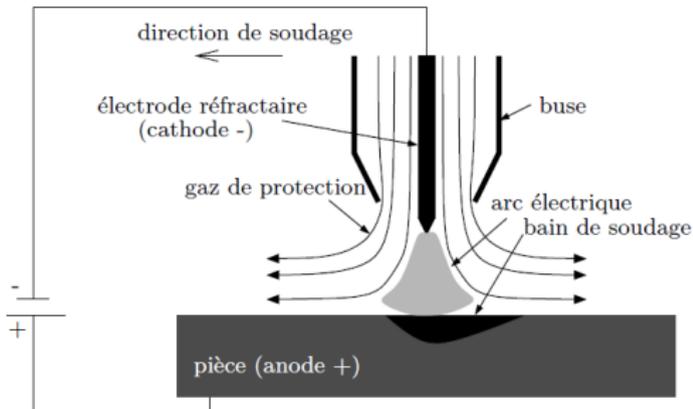
# *Déformation de la surface libre en stationnaire sous un jet de gaz*

Xiaofei KONG  
AREVA NP - CEA Saclay - ENISE

Laboratoire des Technologies d'Assemblage

25, Novembre 2010

## Le procédé à l'arc TIG (Tungsten Inert Gas)



Modélisation de l'ensemble  
cathode(électrode)-plasma-pièce(anode, bain)

## Pourquoi la Simulation Numérique de Soudage(SNS) ?

### Apports de la SNS

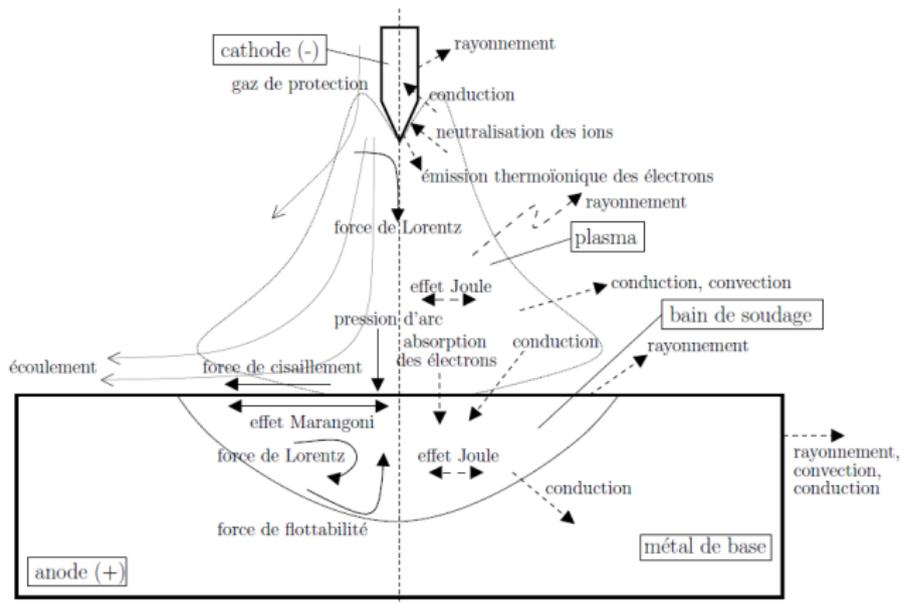
- aide à la conception de nouveaux procédés plus performants
- amélioration de la qualité des assemblages soudés : prédiction des défauts, des déformation, des contraintes résiduelles
- aide au paramétrage optimal du procédé

## Pourquoi l'approche multiphysique ?

### Avantages

- donnés d'entrée sont les paramètres opératoires du procédé
- rend compte de l'interaction entre la pièce et la procédé
- ne nécessite pas d'expériences préalables

## phénomènes physiques enjeux



# Objectif : Un modèle 3D du bain avec défilement et la déformation de la surface libre

## Pourquoi ?

- L'aspect dynamique joue un rôle important dans la qualité du soudage, par exemple le phénomène 'Humping'
- Passer à une modélisation 3D pour modéliser la configuration industrielle où l'électrode serait mobile

## Programme

- un modèle hydrodynamique stationnaire en 2D axisymétrie
- un modèle hydrodynamique en 3D avec défilement
- une application du modèle 3D au soudage avec l'apport de matière

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'equation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

# Plan

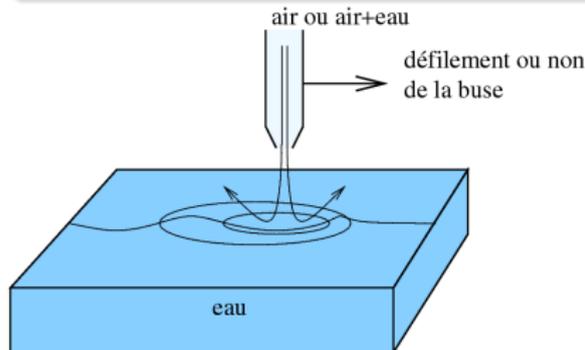
- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

## Pourquoi ?

Difficile à observer et mesurer  
l'interface de soudage



Un jet de gaz à débit constant  
sur une surface libre de l'eau

## Comment ?

- Essai similaire - un jet de gaz à l'eau
- Conservation des nombres adimensionnés

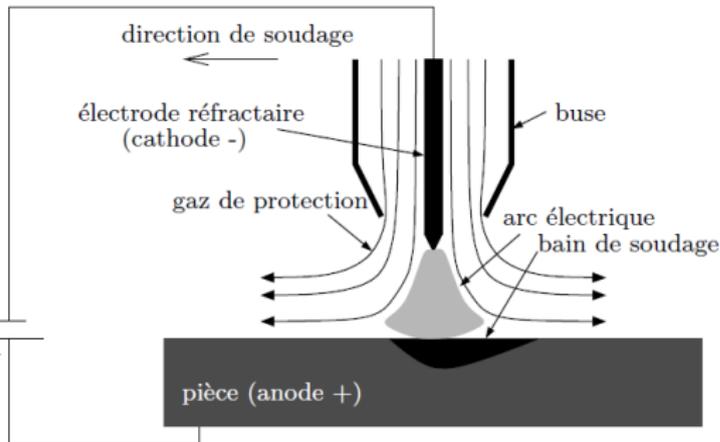
## Paramètre opératoire

- Diamètre de l'injecteur(D)
- Hauteur entre l'injecteur et la surface(H)
- Débit du gaz (Débit)

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

## Forces existantes à l'interface plasma/bain



*Forces verticales a l'interface :*

- Pression de l'arc  $P_{arc}$
- Tension de surface  $\gamma$
- Pression hydraulique  $\rho gh$

*Forces tangentielles a l'interface :*

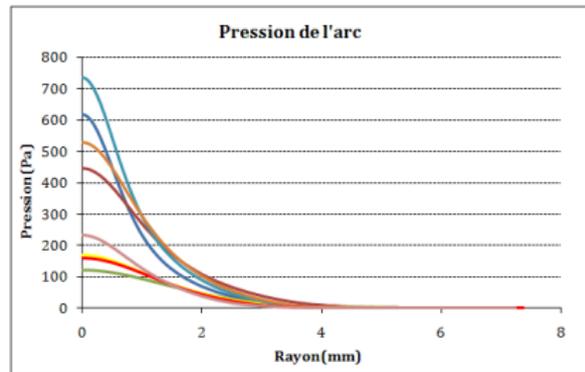
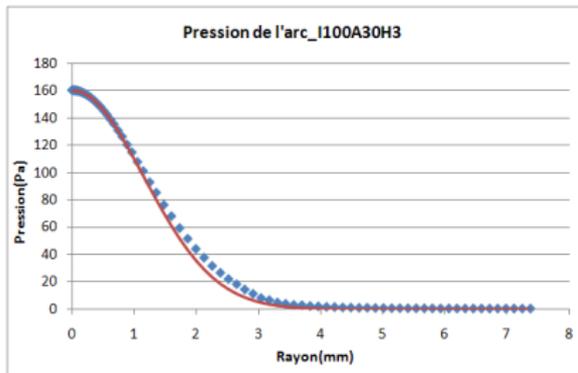
- Force cisaillement
- Force Marangoni

$$P_{arc} + \rho gh + \frac{\gamma}{R} = 0 \quad (1)$$

## La distribution et la variation de $P_{arc}$

Trois paramètres opératoires :  
 courant, la hauteur d'arc et  
 l'angle d'affûtage de l'électrode

	Courant(A)	Hauteur(mm)	Angle d'affûtage
bas	100	3	30
haut	150	5	60



La distribution de la pression  
 correspond bien la forme  
 gaussienne

$P_{arc}$  maximale : [122.6, 737.66] Pa  
 $w$  : [6.87E-4, 1.15E-3] m

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'equation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

## Nombre adimensionné

L'equation d'équilibre de l'interface plasma/bain :

$$\frac{\gamma}{R} + \rho gh + P_{M\_arc} e^{-\frac{x_1^2}{2w^2}} = 0, P_{arc} = P_{M\_arc} e^{-\frac{x_1^2}{2w^2}} \quad (2)$$

$L$  et  $P_{M\_arc}$  comme reference, donc

$$P_{M\_arc} = \rho g L \Rightarrow L = \frac{P_{M\_arc}}{\rho g} \quad (3)$$

Deux nombres adimensionnés :

$$\Pi_1 = \hat{\gamma} = \frac{\rho g \gamma}{P_{M\_arc}^2} = \frac{1}{Bond} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = \hat{w} = \frac{w}{L} = \frac{w \rho g}{P_{M\_arc}} \quad (5)$$

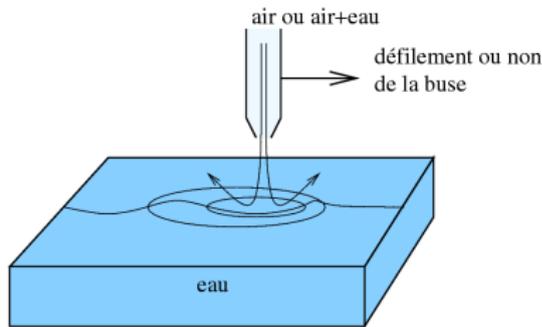
Bond représente le rapport entre la gravité et la tension de surface.  
Bond [0.11,5.28] et  $\Pi_2$  [0.05,0.82] dans le soudage TIG.

## Nombre adimensionné dans soudage

- Bond varie entre  $[0.11, 5.28]$
- $\Pi_2$  varie entre  $[0.05, 0.82]$

La vitesse sortie du injecteur :  $V_0$ , la vitesse maximale à l'interface :  $V_j$

Pour un jet laminaire :



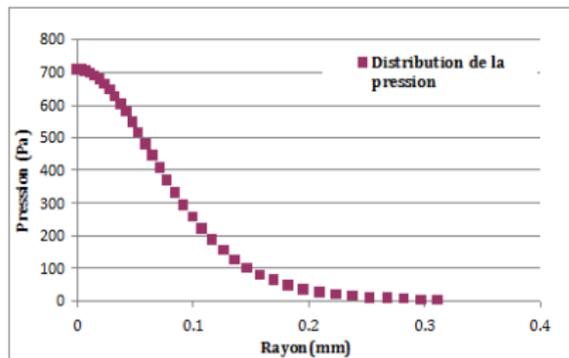
$$V_j = \frac{Re^2}{8} \frac{\nu}{H + Z_0} \frac{1}{1 + \eta^2}^2, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{Re}{8} \frac{r}{Z + Z_0} \quad (7)$$

$$Z_0 = 0.084 D Re, \quad Re = \frac{V_0 D}{\nu} \quad (8)$$

Théorème de Bernoulli :

$$P_{gaz} = 0.5\rho_G V_j^2 \quad (9)$$



D0.2mmH3mmDébit0.6l/min

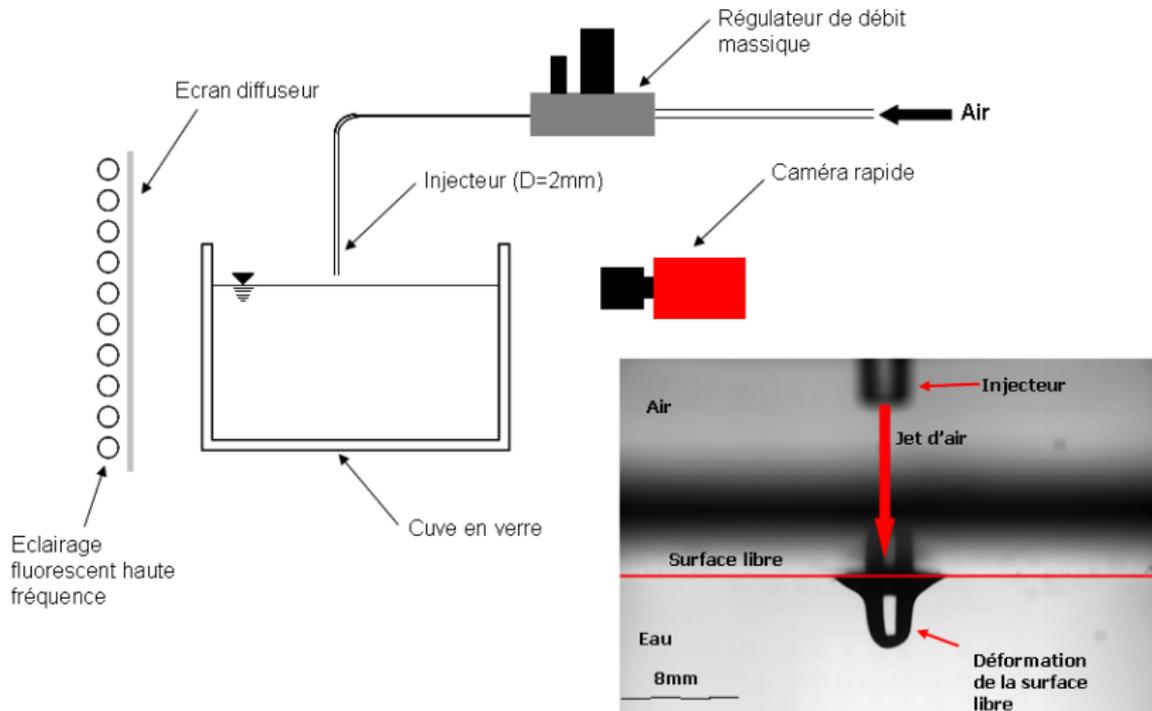
- La distribution de la pression est gaussienne
- Variation des paramètres opératoires pour conserver les nombres adimensionnés
- Bond - [0.11, 1235.5 (5.28)],  
 $\Pi_2$  - [0.001(0.05), 0.082]

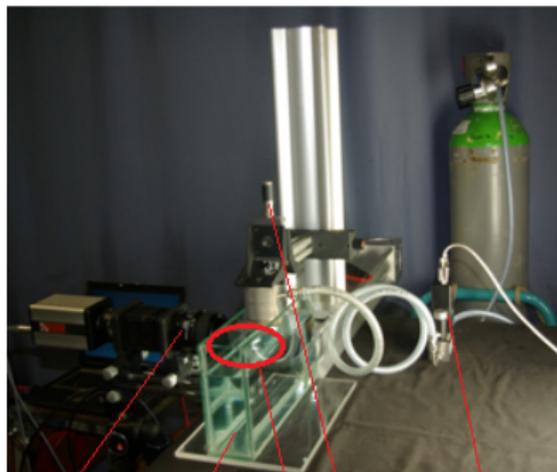
	Diamètre(mm)	Hauteur(mm)	Débit(l/min)
bas	0,2	3	0,04
haut	0,5	9	0,20

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant**
  - **Introduction de l'essai**
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion

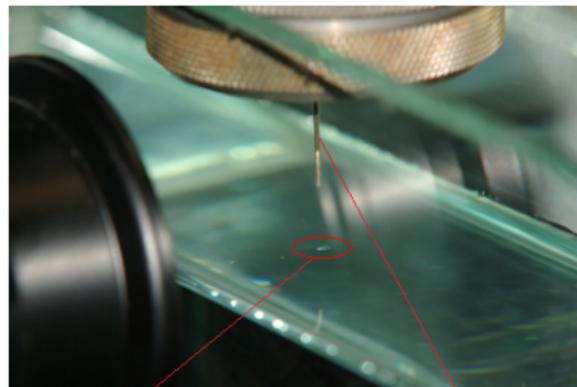
## Montage pour la visualisation par ombroscopie





Caméra    Cuve avec de l'eau    Règle    Contrôleur de débit

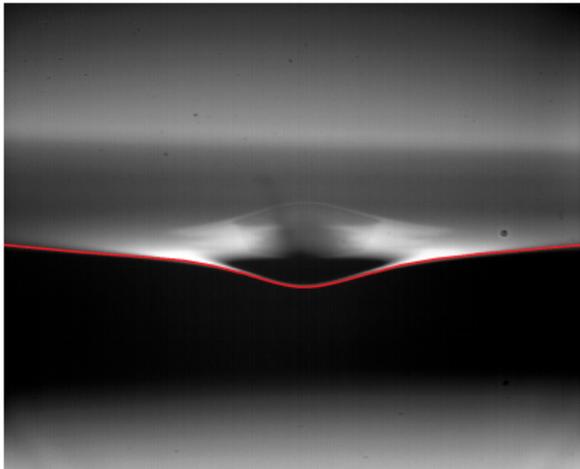
**Partie à zoomer**



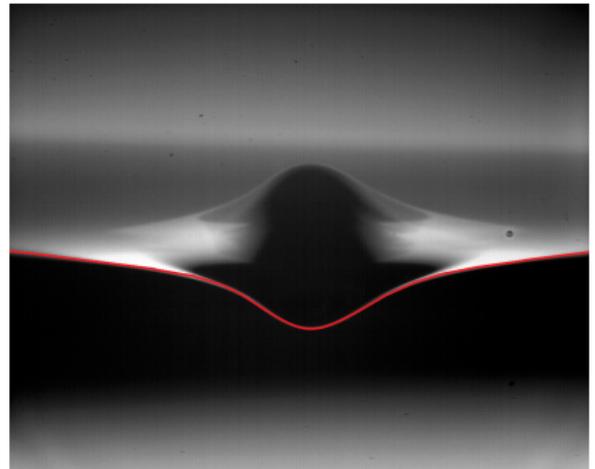
Surface déformée

Injecteur en 0.2mm

## Régimes stationnaire et instationnaire



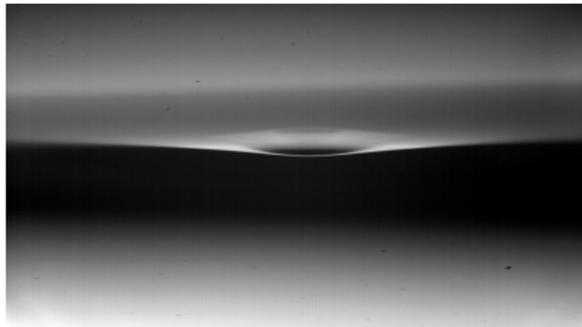
Stationnaire en  
D0.5mmH4mmDébit0.2 l/min



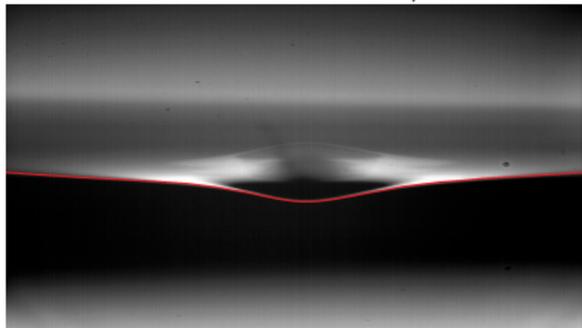
Passage de stationnaire à  
instationnaire de  
D0.2mmH4mmDébit0.065l/min à  
D0.2mmH4mmDébit0.078l/min

# Plan

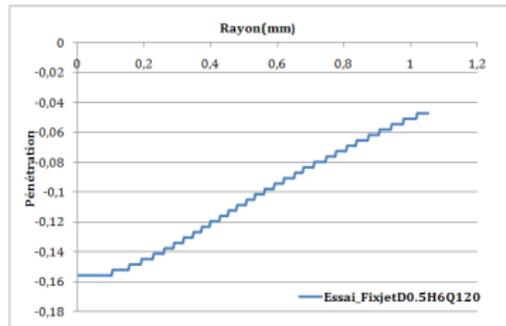
- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'équation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant**
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre**
- 4 Simulation de la surface libre de l'essai
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion



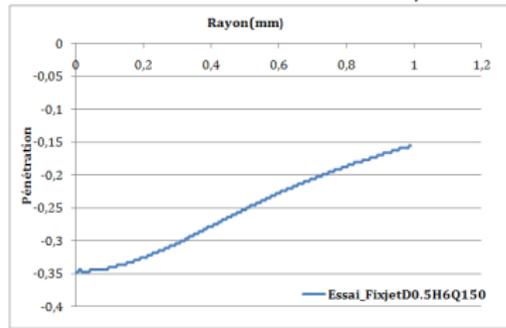
D0.5mm-H6mm-Q0.12l/min



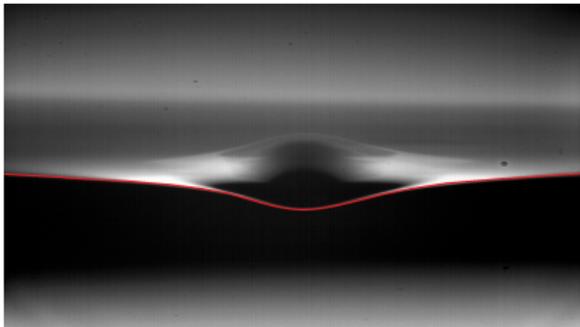
D0.5mm-H6mm-Q0.15l/min



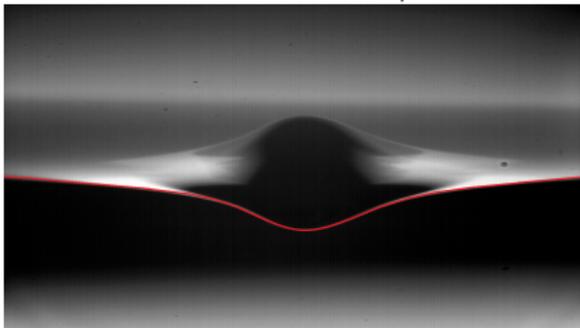
D0.5mm-H6mm-Q0.12l/min



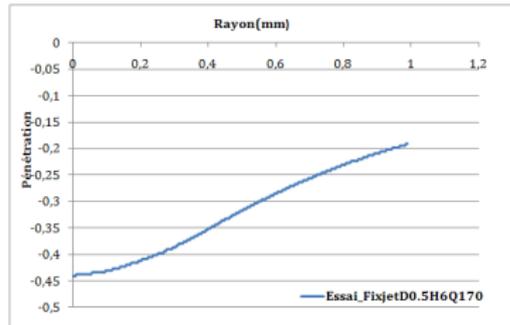
D0.5mm-H6mm-Q0.15l/min



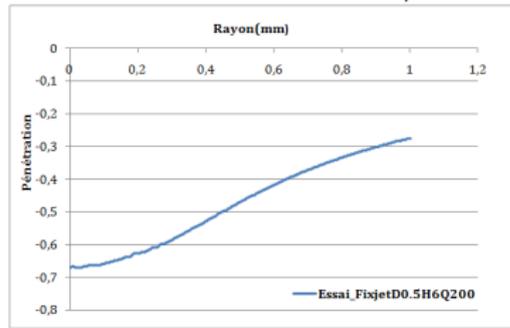
D0.5mm-H6mm-Q0.17/min



D0.5mm-H6mm-Q0.20/min



D0.5mm-H6mm-Q0.17/min



D0.5mm-H6mm-Q0.20/min

## Modèle et maillage

Equation équilibre à la surface

DE :

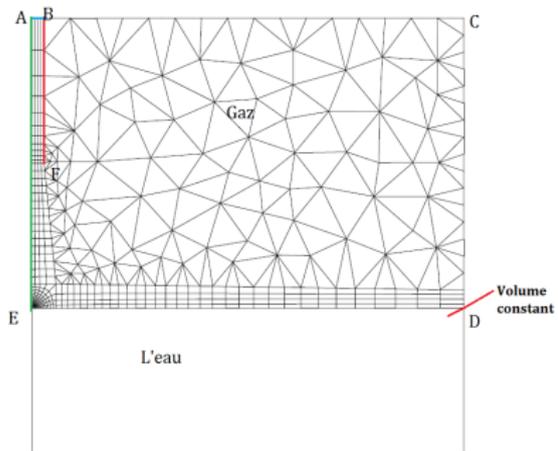
$$P_{gaz} + \rho gh + \frac{\gamma}{R} = 0 \quad (10)$$

Mode : Axisymétrie

Elément : Quadratique

### Condition limites

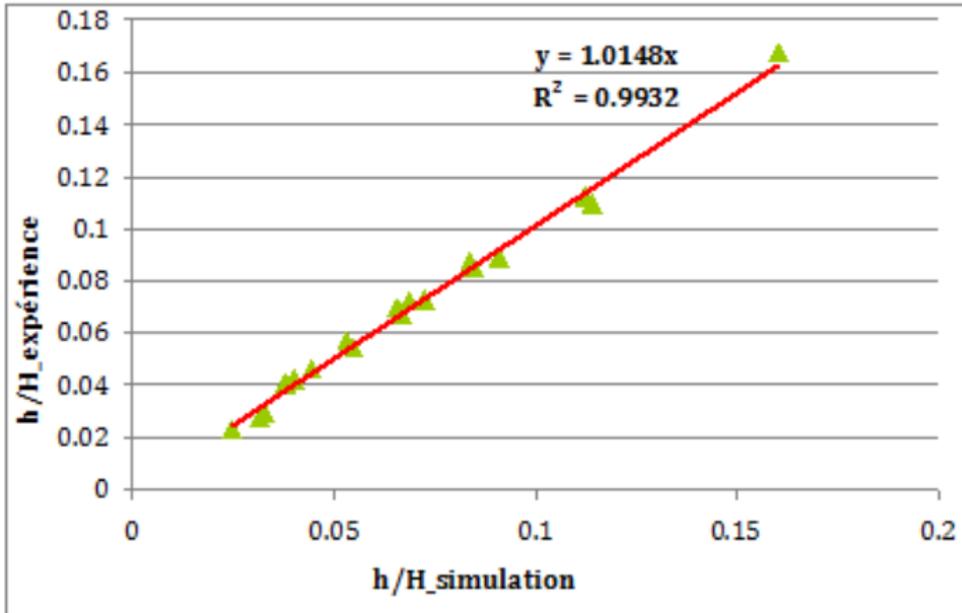
- La vitesse sortie du gaz  $V_0$  à AB
- $U_r = 0$  : AE, BF, CD
- $U_z = 0$  : BC, BF



Nombre Eléments=591

# Plan

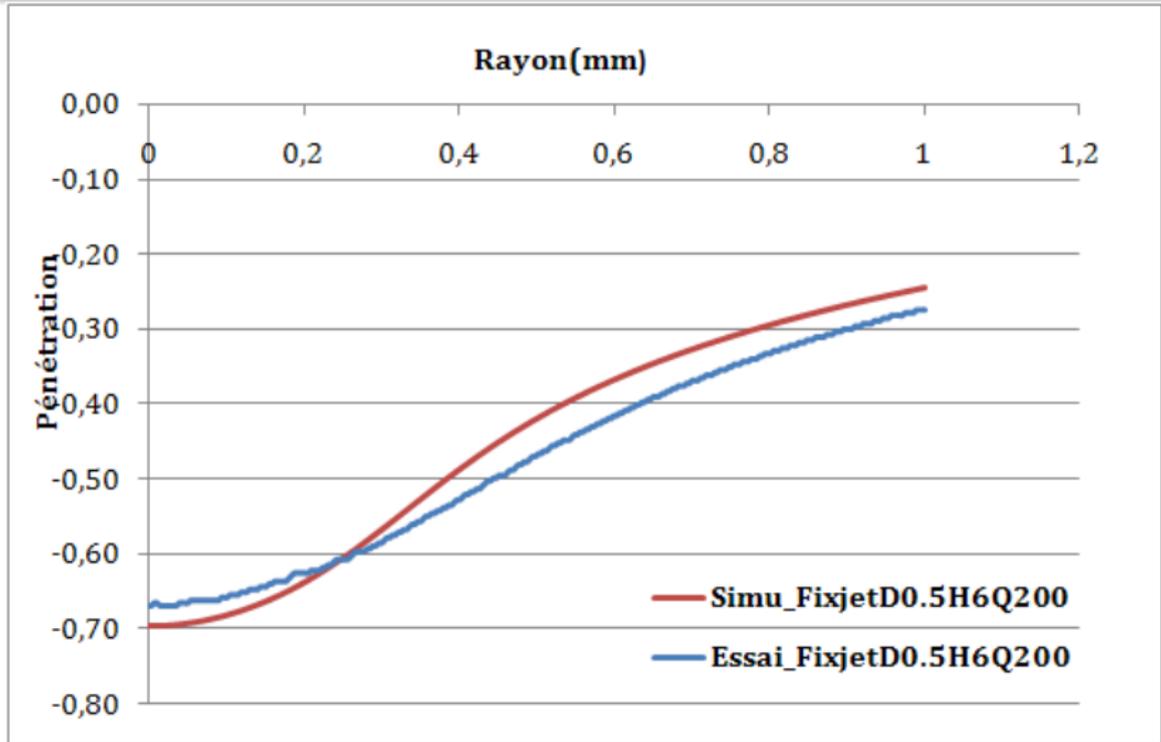
- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'equation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 **Simulation de la surface libre de l'essai**
  - **Comparaison de pénétration numérique/expérimentale**
  - Comparaison de profils numériques/expérimentaux
- 5 Conclusion



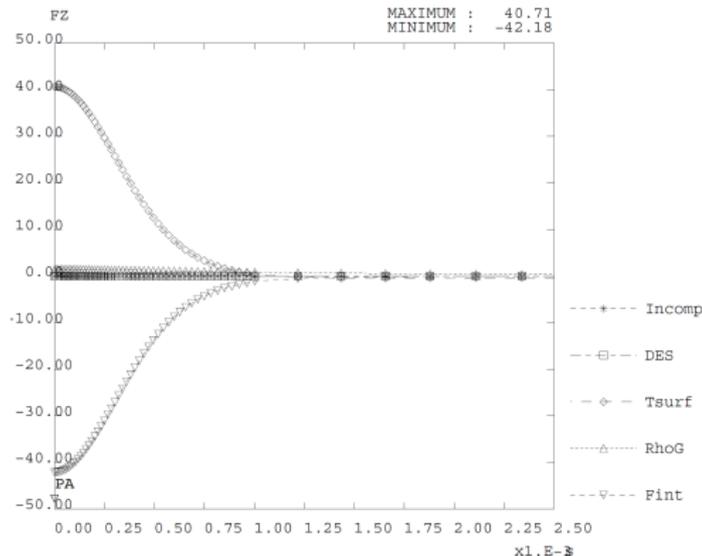
Les résultats simulés correspondent bien les résultats expérimentaux

# Plan

- 1 Condition de soudage au niveau de la surface libre
  - Pression de l'arc au soudage
  - Adimensionnement de l'equation
- 2 Design de l'essai similaire Jet de gaz à débit constant
- 3 Essais réalisés sous un jet de gaz laminaire a debit constant
  - Introduction de l'essai
  - Profil expérimental de la surface libre
- 4 **Simulation de la surface libre de l'essai**
  - Comparaison de pénétration numérique/expérimentale
  - **Comparaison de profils numériques/expérimentaux**
- 5 Conclusion



D0.5mm-H6mm-Q0.20l/min



Le Bond est 1.37 et le  $\Pi_2$  est 0.12.

La tension de la surface joue un rôle dominant, la gravité et la force incompressibilité sont négligeables.

Equation d'équilibre sans tension de surface :

$$P_{gaz} = 0.5\rho_G V_j^2, P_{gaz} + \rho gh = 0 \quad (11)$$

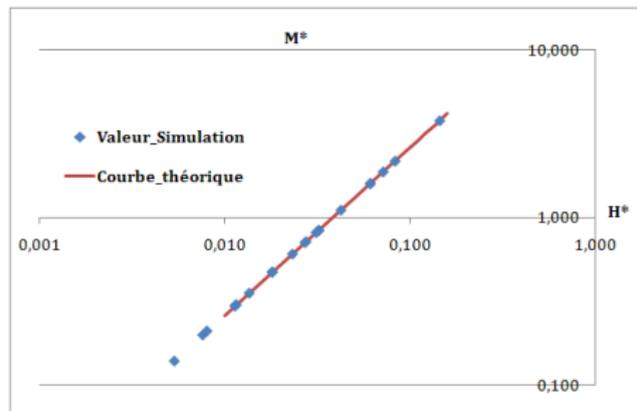
Un jet de gaz turbulent supposé à l'interface,

$$\frac{V_0}{V_j} = K_2 \frac{D}{H}, K_2 = 6.4 \quad (12)$$

On obtient :

$$\frac{M}{\rho g H^3} = \frac{h}{H} \frac{\Pi}{2K_2^2}, M = \frac{\Pi D^2 \rho_G V_j^2}{4} \quad (13)$$

$$M^* = H^* \frac{\Pi}{2K_2^2} \quad (14)$$



Les résultats simulés correspondent bien les résultats analytiques dans la littérature

# Conclusion

## Conclusion :

- Notre code est valable pour prévoir la pénétration de la surface libre en stationnaire
- La tension de la surface joue un rôle dominant, la gravité et la force incompressibilité sont négligéables

## Perspective :

- un modèle hydrodynamique en 3D avec défilement
- une application du modèle 3D au soudage avec pris en compte d'apport de matière

Merci pour votre attention