





Modélisation multiphysique plasma-bain en soudage TIG : application à l'essai PVR

Simon MORVILLE

PTCMPT-F

[Centre Technique – France](#)

www.areva.com

*14^{ème} colloque Modélisation et Simulation Numérique du Soudage
17/03/2016 – Maison de la Mécanique, Paris La Défense*

REACTEURS & SERVICES



AREVA
l'avenir pour énergie



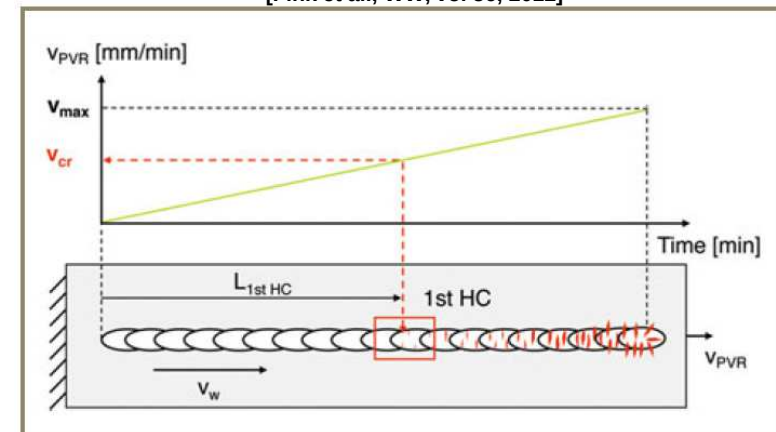
- ▶ **Contexte**
- ▶ **Modèle multiphysique**
- ▶ **Application : configuration PVR**
- ▶ **Conclusions & Perspectives**

Contexte Essai PVR

► Programmierter-Verformungs-Riß Versuch (Essai PVR)

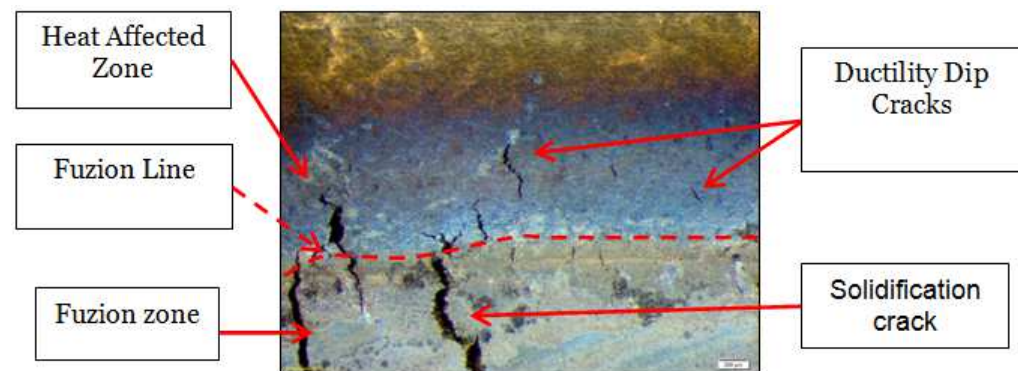
- ◆ Essai de fissuration à chaud
- ◆ Réalisation simultanée d'une ligne de fusion et d'une sollicitation en traction
 - Ligne de fusion à énergie constante
 - Vitesse de déplacement de traverse à accélération constante (balayage d'une plage de vitesse de déformation importante avec une seule éprouvette)

[Fink et al., WW, vol 56, 2012]



- ◆ Observations discriminantes entre DDC et fissures de ségrégation (liquation + solidification) pour quantification des critères :

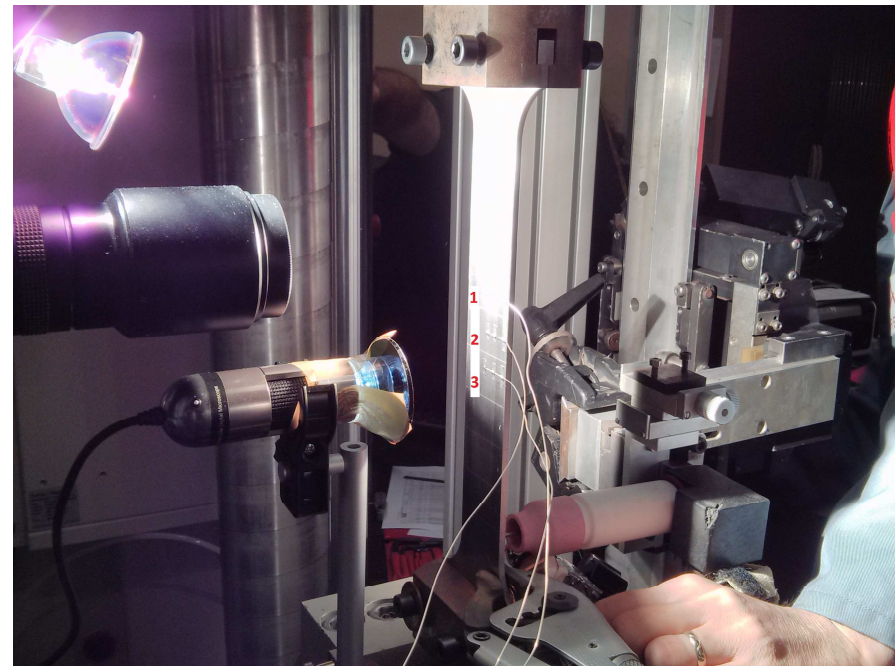
- Distance et/ou vitesse de traverse critiques d'apparition de la première fissure
- Densité de fissure sur une zone définie





► Programmierter-Verformungs-Riß Versuch (Essai PVR)

- ◆ Procédé TIG maîtrisé et stable
- ◆ Facilement instrumentable
 - Paramètres essai : U , I , V_s , F
 - Mesures température (TC, pyro)
 - Vision arc et bain
 - Mesure déformations (mouchetis)
 - Macrographies
- ◆ Ligne de fusion sans apport de matière
- ◆ Faible intensité

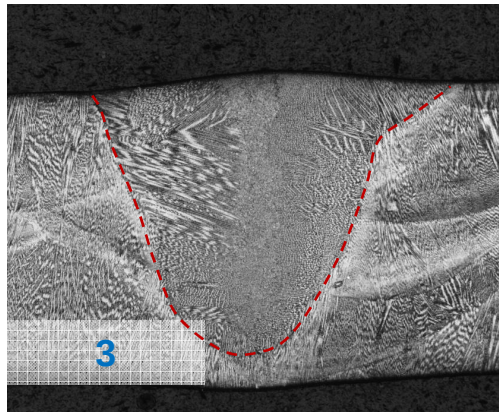


Dispositif expérimental particulièrement adapté à la validation des modèles numériques

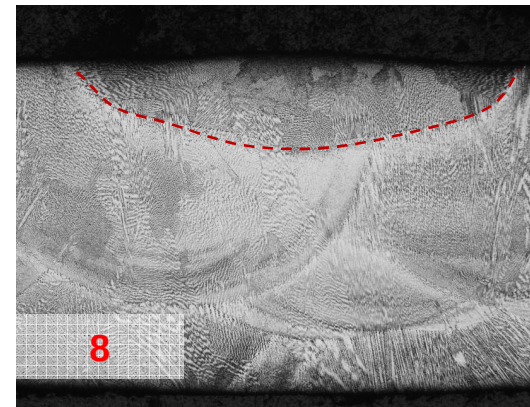
Contexte Problématique



- ▶ Zone fondue = f (Procédé, Matériau)
- ▶ Nécessité de discriminer l'effet Matériau
 - ◆ Expliquer la différence des zones fondues obtenues à paramètres identiques



1 mm



1 mm

Alliage base
nickel 152

#	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Nb	N ₂	O ₂	Fe
3	0,036	0,0058	0,011	0,55	3,95	53,84	29,17	0,006	0,007	0,109	1,83	0,022	0,087	10,04
8	0,029	0,007	0,006	0,489	3,42	53,58	31,07	0,1	0,009	0,105	1,77	0,023	0,082	8,57



► Contexte

► **Modèle multiphysique**

► Application : configuration PVR

► Conclusions & Perspectives

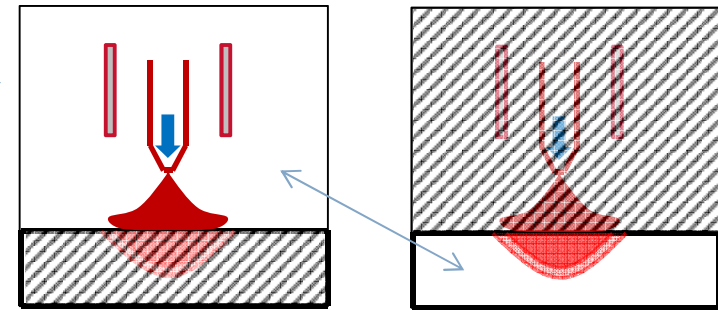
Modèle multiphysique

Quoi ? Comment ? Pourquoi ?



► Le procédé

- ◆ Modèle unifié : réaliste, polyvalent, lourd
- ◆ Source de chaleur équivalente : le plus simple, demande une identification/calage de paramètres



► La physique

- ◆ Magnétohydrodynamique (MHD) : effet Joule, forces de Lorentz
- ◆ Gaz : plasma ETL, interfaces simplifiées, écoulement compressible, fluide newtonien, régime laminaire
- ◆ Métal liquide : écoulement incompressible, fluide newtonien, régime laminaire, surface libre déformable
- ◆ Métal solide : rigidité infinie
- ◆ Hypothèses : régime établi (repère mobile), plan de symétrie dans l'axe de soudage

► Le matériau

- ◆ Principales propriétés requises : $\lambda_{th}(T)$ $\sigma_{elec}(T)$ $\rho(T)$ $H(T)$ $\gamma(T)$ $\mu(T)$
- ◆ Phase solide : ~ OK ; Phase liquide : ???
- ◆ Sources : caractérisation, littérature, logiciels dédiés, ou arbitraire (REX, extrapolation)



► Contexte

► Modèle multiphysique

► **Application : configuration PVR**

◆ **Modélisation du plasma d'arc : 100% Argon**

◆ Modélisation du bain fondu

► Conclusions & Perspectives

Application Configuration PVR

Alliage base
nickel 690

100% Argon

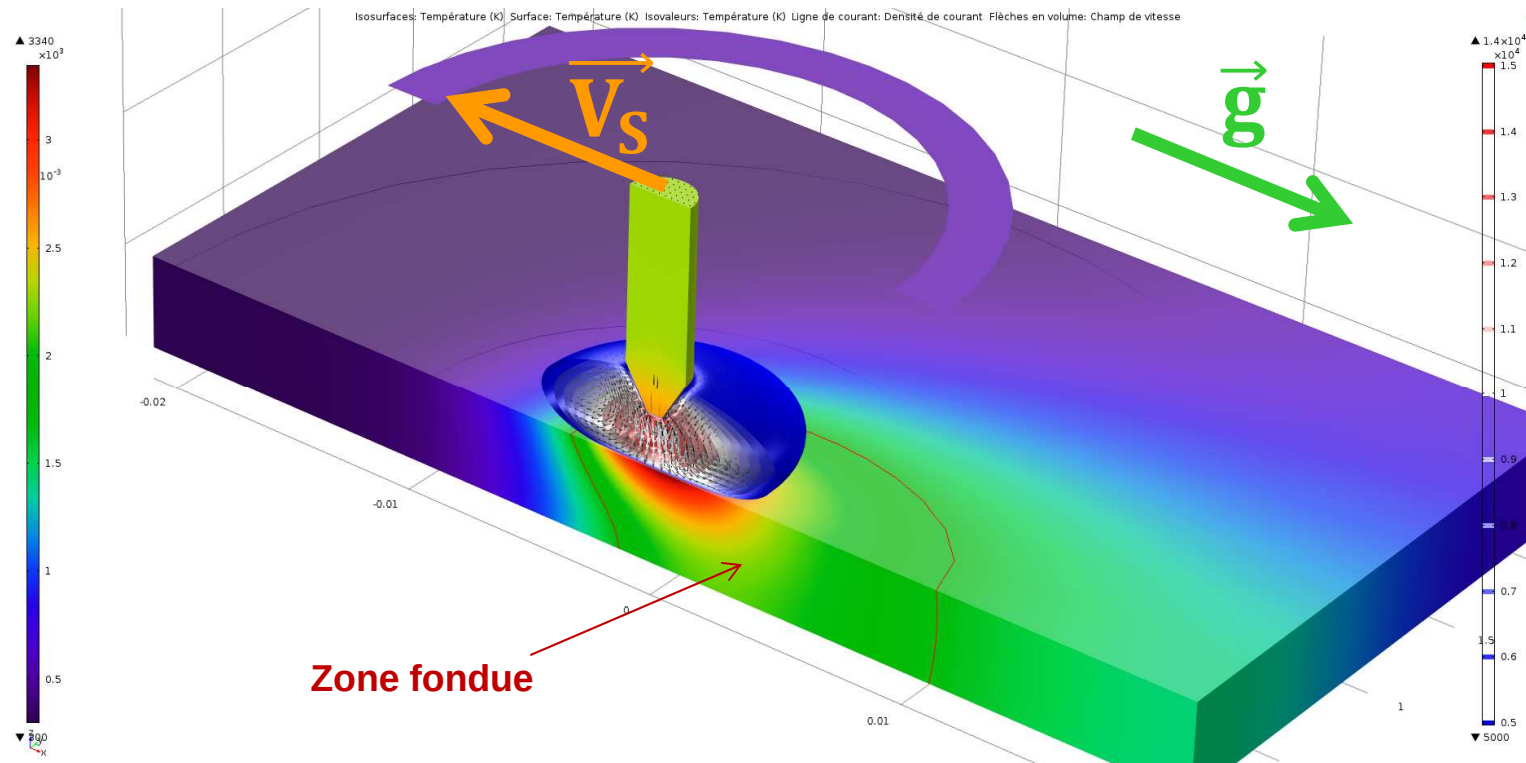
► Modélisation du plasma d'arc

◆ $I_{\text{elec}} = 72 \text{ A}$, $V_S = 12 \text{ cm.min}^{-1}$

◆ 100% Ar , 16 L.min⁻¹

◆ Électrode W-Ce , $\Phi 2.4$, 50° , $h = 2 \text{ mm}$

◆ Éprouvette 230*40*5 mm³



Tension élec. : 8 V
(mesurée : 4,2 V)

T_{max} plasma : 14 040 K

U_{max} : 31 m.s⁻¹

T_{max} anode : 3340 K

REACTEURS ET SERVICES

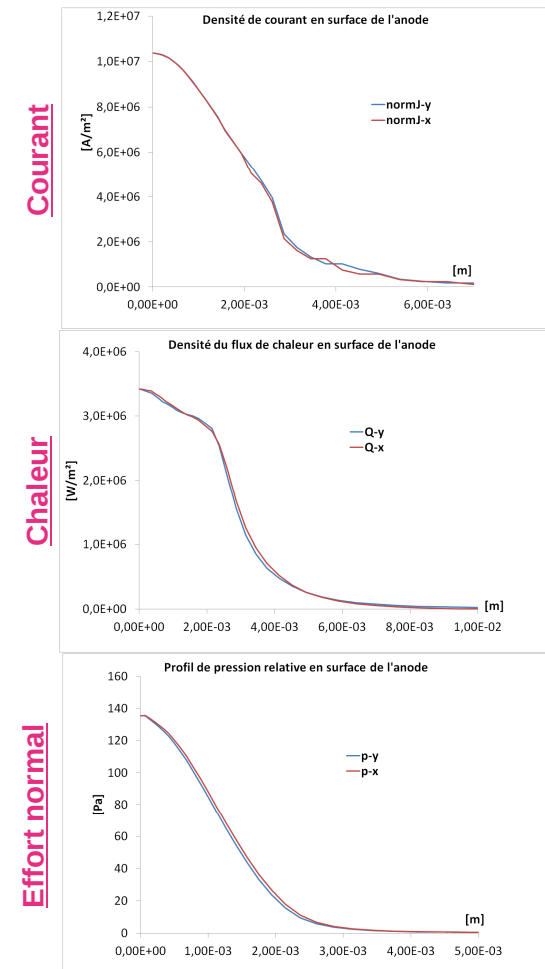
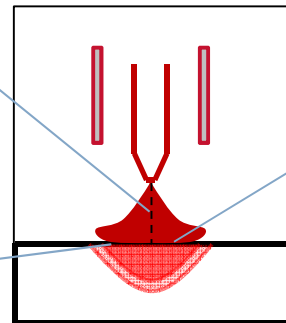
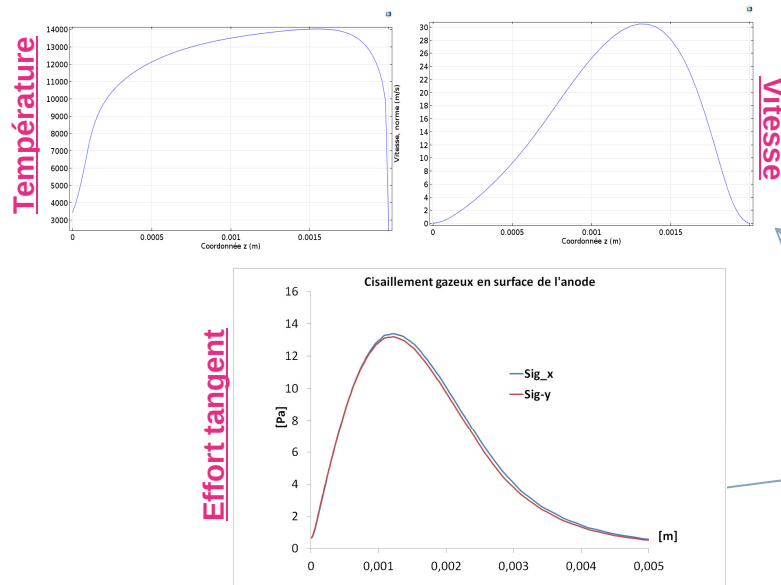
DIFFUSION LIMITEE AREVA

Application Configuration PVR



► Modélisation du plasma d'arc

◆ Quelques grandeurs caractéristiques



Distributions symétriques, pas toujours gaussiennes

(+) Données d'entrée pour le modèle de bain (chaînage)

(-) Modèle physique insuffisant ou non valide

REACTEURS ET SERVICES

DIFFUSION LIMITEE AREVA



► Contexte

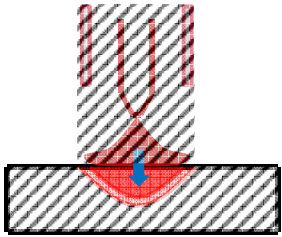
► Modèle multiphysique

► **Application : configuration PVR**

◆ Modélisation du plasma d'arc

◆ **Modélisation du bain fondu : alliage base nickel 152**

► Conclusions & Perspectives



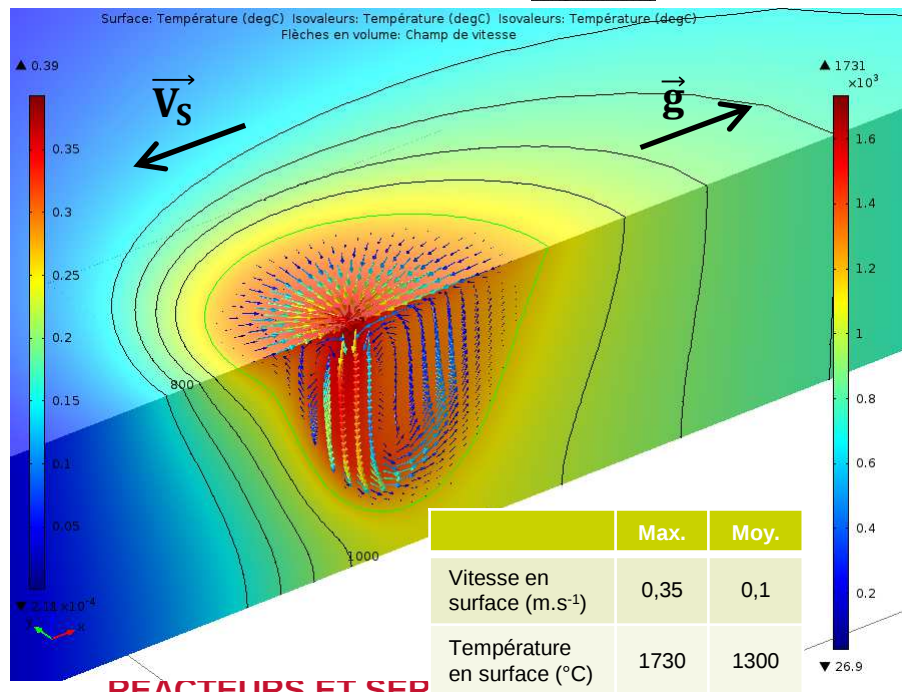
Application Configuration PVR

Alliage base
nickel 152

► Modélisation du bain de fusion

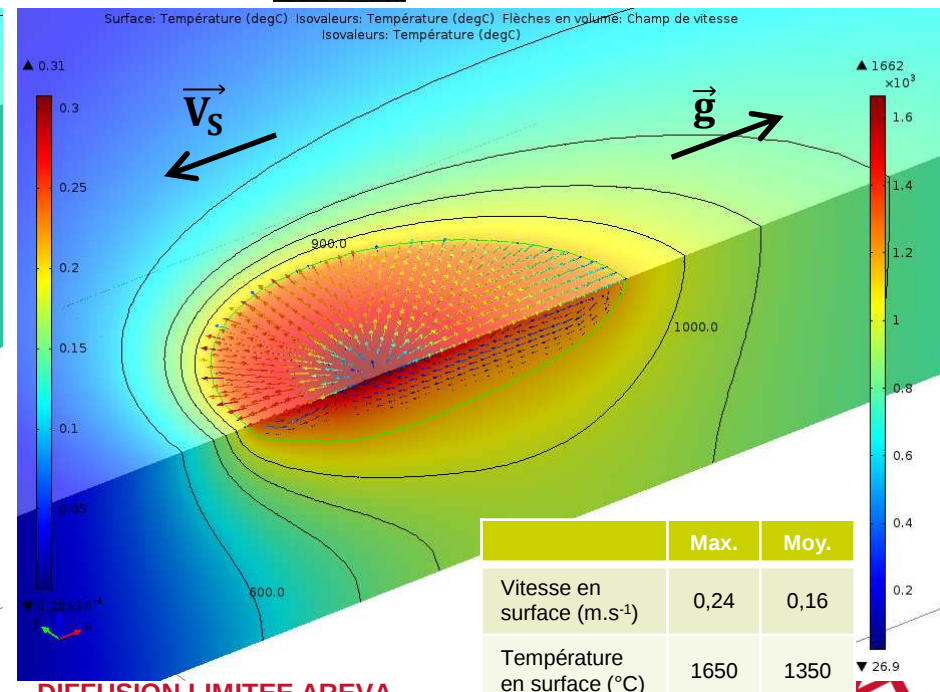
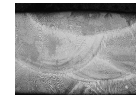
- ◆ $V_s = 12 \text{ cm.min}^{-1}$, position verticale montante 3GU
- ◆ Source de chaleur identique entre 3 et 8

$dy/dT(3) > 0$

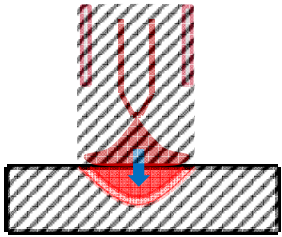


REACTEURS ET SERVICES

$dy/dT(8) < 0$



DIFFUSION LIMITEE AREVA



Application Configuration PVR

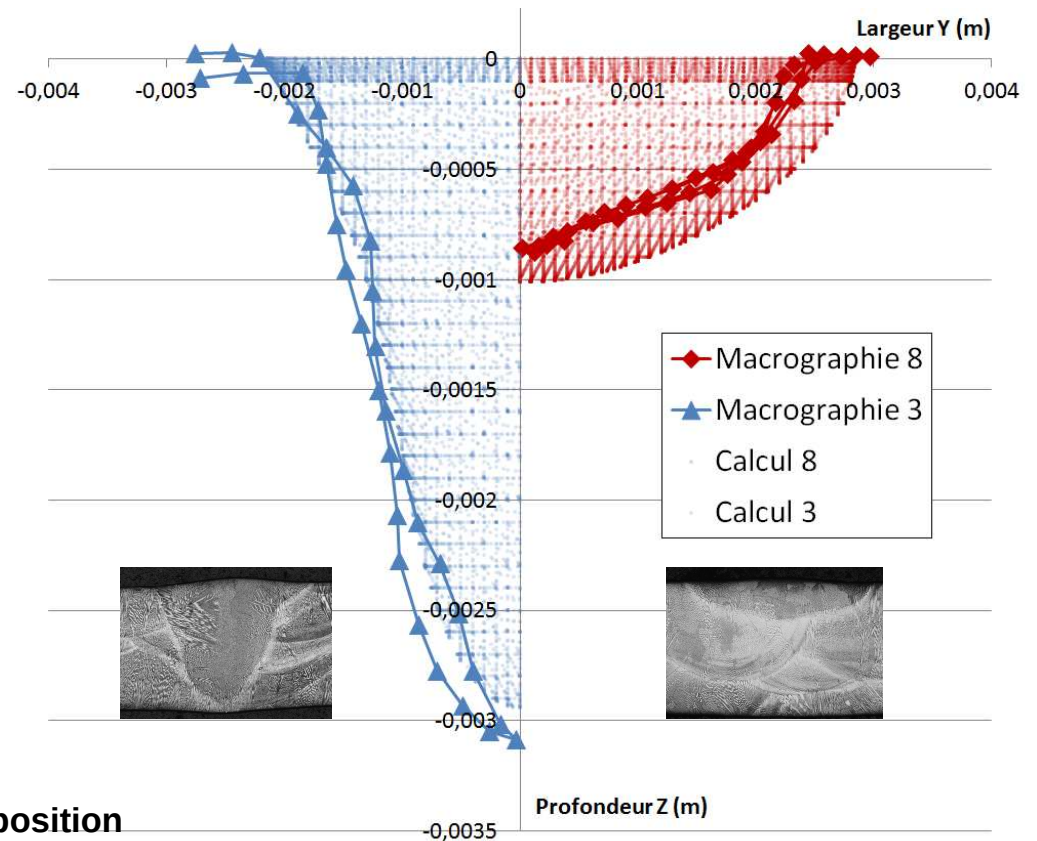
Alliage base
nickel 152

► Modélisation du bain de fusion – comparaison exp/num

◆ Zones fondues

Exp / Num	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Pénétration (mm)
3	- / 4,7	3,9 / 4,2	3,1 / 2,9
8	- / 6,3	4,7 / 5,2	0,8 / 1,0

Num	Surface liquide (mm ²)	Volume fondu (mm ³)
3	8	9,2
8	14	9



- Modèle en accord avec l'expérience
- Effet Marangoni confirmé
- ...mais pas encore de lien entre la composition chimique et la tension superficielle

REACTEURS ET SERVICES

DIFFUSION LIMITEE AREVA



► Contexte

► Modèle multiphysique

► **Application : configuration PVR**

◆ Modélisation du plasma d'arc

◆ **Modélisation du bain fondu : alliage base nickel 690**

► Conclusions & Perspectives

Application Configuration PVR

► Modélisation du bain de fusion – comparaison exp/num

- ◆ $V_s = 12 \text{ cm.min}^{-1}$, 3GU
- ◆ Source chaleur inchangée
- ◆ $dy/dT < 0$

	Max.	Moy.
Vitesse en surface (m.s^{-1})	0,34	0,2
Température en surface ($^{\circ}\text{C}$)	1860	1650

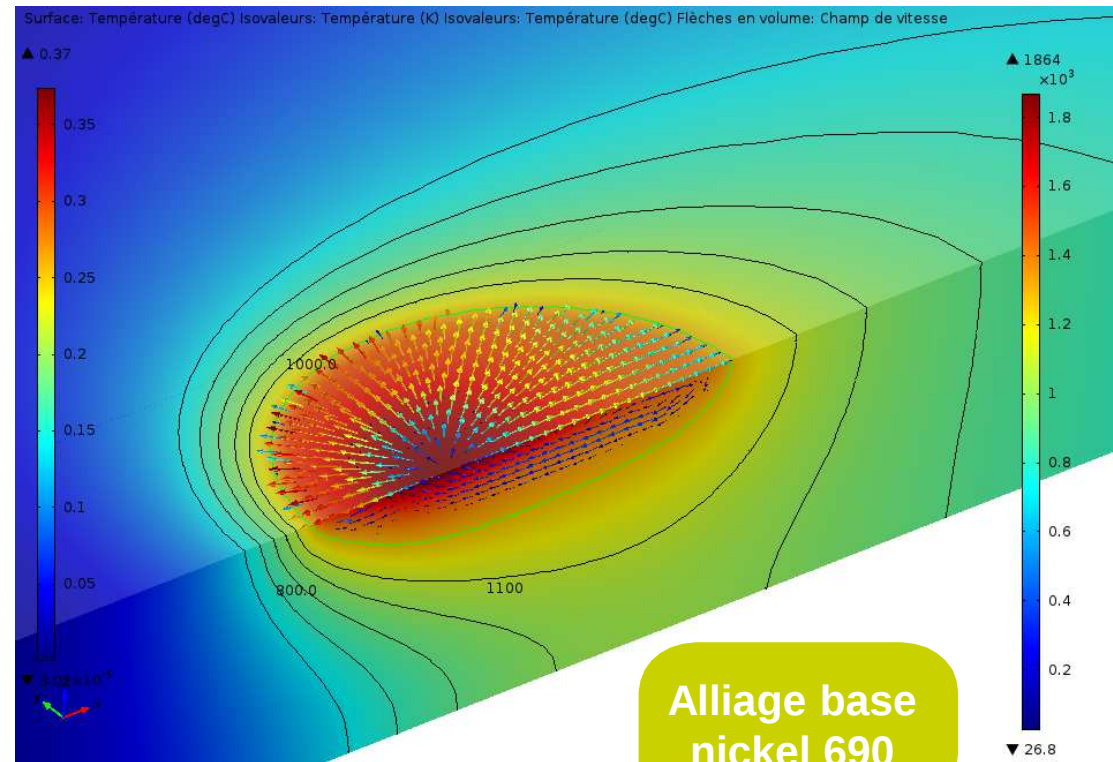
Infos complémentaires

maillage régulier : $100 \mu\text{m}$

$(u,p) : P2/P1 ; (T) : Q2$ ~140 Go RAM

~ $3,5 \times 10^6$ ddl 20 h

données JMatPro®



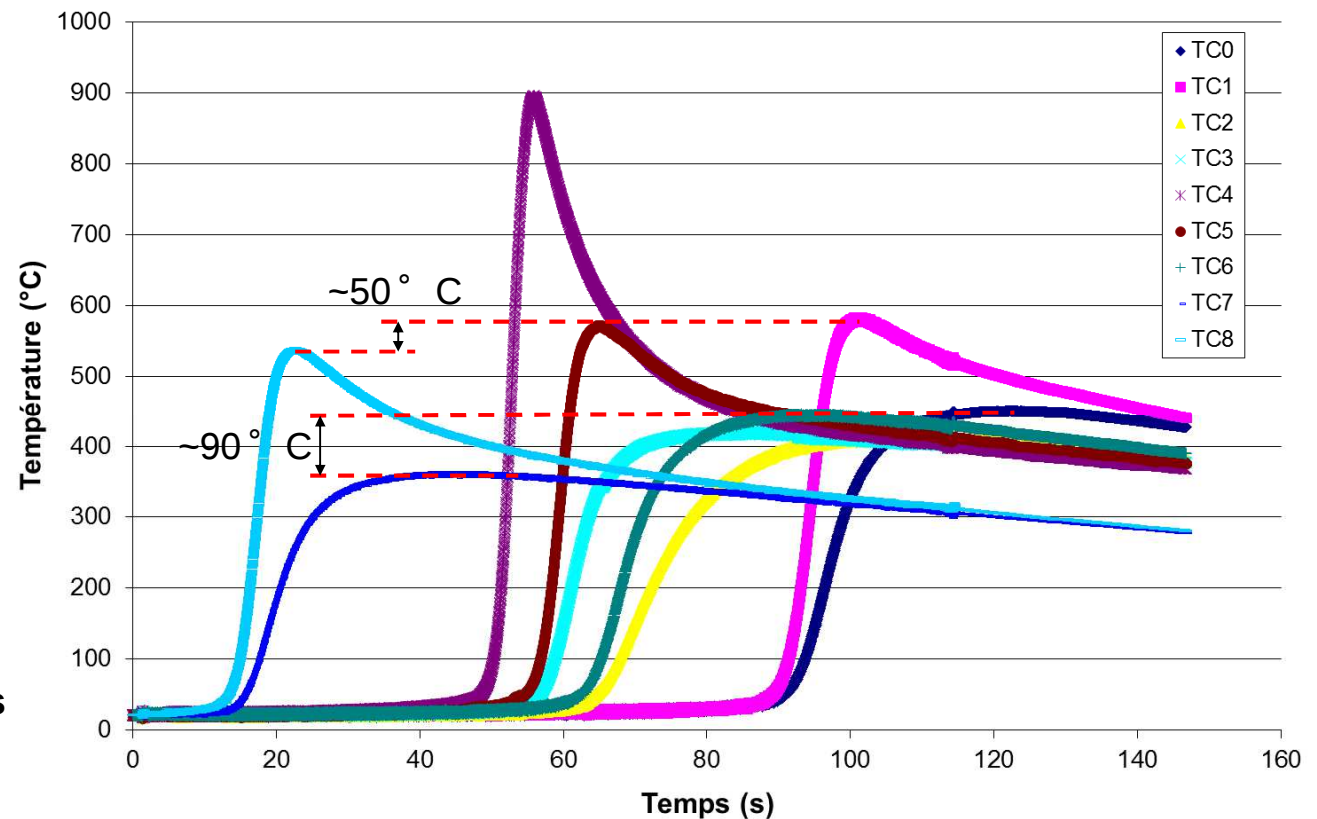
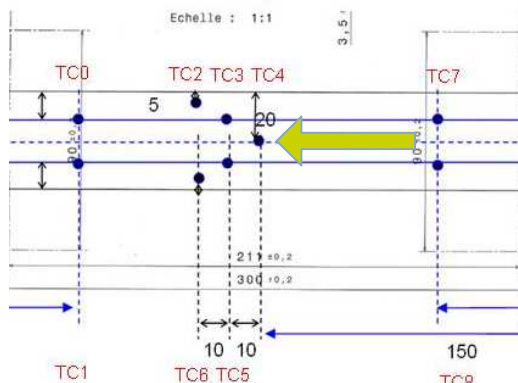
Alliage base
nickel 690

Application Configuration PVR

Alliage base
nickel 690

► Modélisation du bain de fusion – données exp

◆ Thermocouples face envers



◆ Températures non stabilisées

- Champ thermique non établi ?
- Écoulement gaz chaud ?

◆ Dissymétrie des températures

→ recalage des TC numériques

REACTEURS ET SERVICES

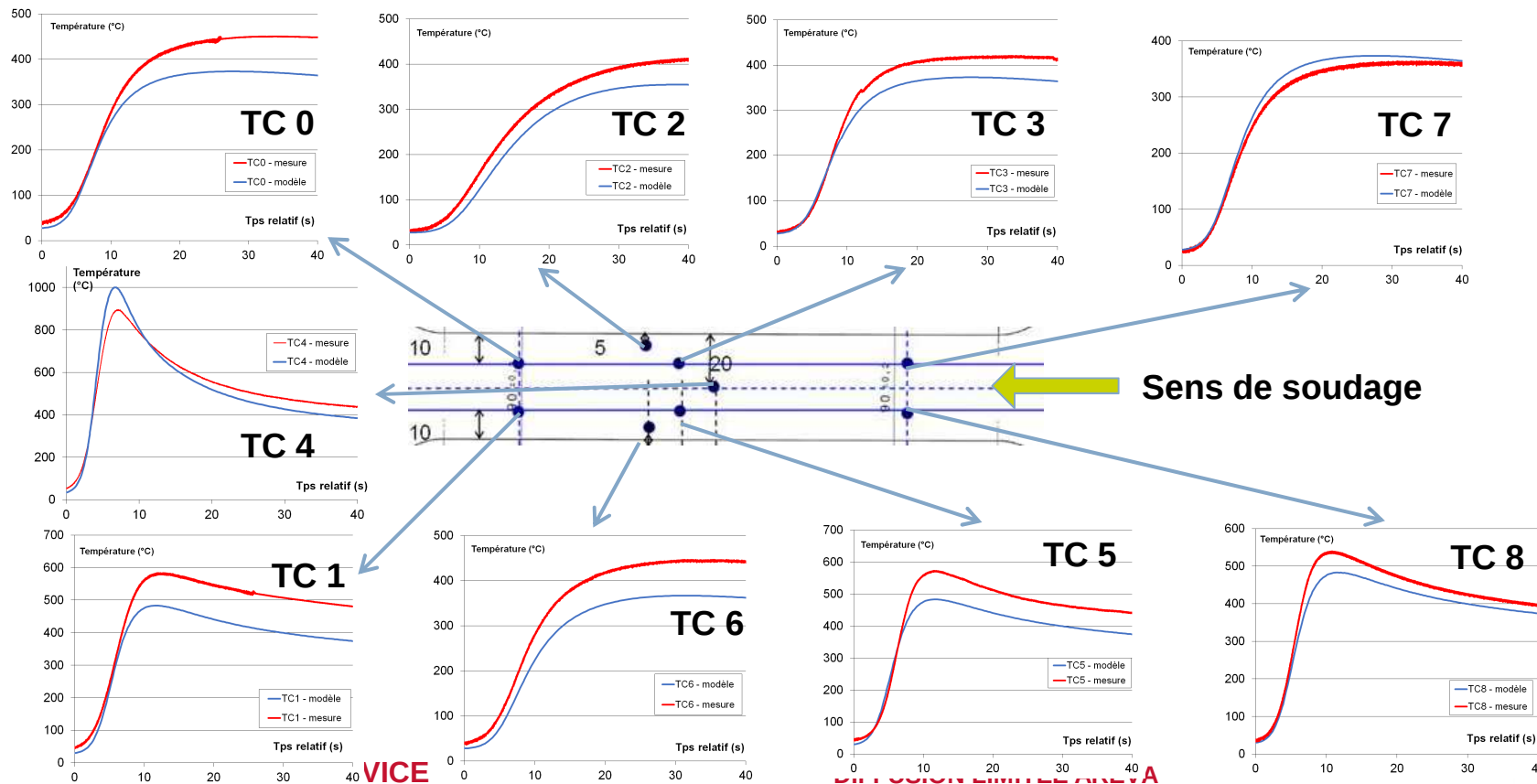
DIFFUSION LIMITEE AREVA

Application Configuration PVR

Alliage base
nickel 690

► Modélisation du bain de fusion – comparaison **exp/num**

◆ Thermocouple face envers



Application Configuration PVR

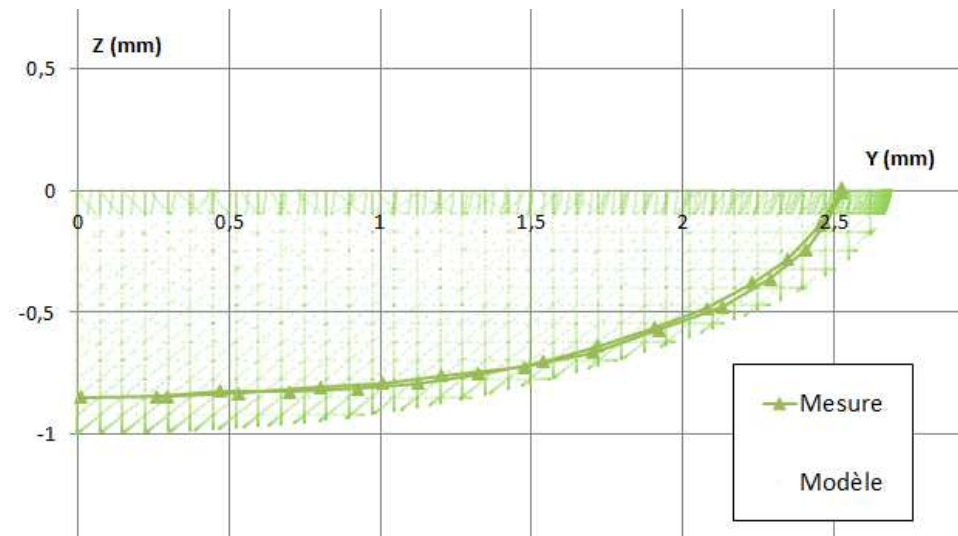
Alliage base
nickel 690

► Modélisation du bain de fusion – comparaison exp/num

◆ Zone fondue

	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Pénétration (mm)
Exp / Num	- / 5,9	5,1 / 5,4	0,8 / 1

	Surface liquide (mm ²)	Volume fondu (mm ³)
Num	12,5	7,7



- Modèle en accord avec l'expérience
- Bonne 1^{ère} approximation des propriétés thermophysiques calculées
- ...mais encore insuffisant pour la tension superficielle

REACTEURS ET SERVICES

DIFFUSION LIMITEE AREVA



► Contexte

► Modèle multiphysique

► Application : configuration PVR

◆ Modélisation du plasma d'arc

◆ Modélisation du bain fondu : base nickel 690

► **Conclusions & Perspectives**

Conclusions & Perspectives



► Modèle d'arc

◆ Fort potentiel de l'approche globale / unifiée

- Paramètres d'entrée = paramètres opératoires (plus de source équivalente!)
- Chaînage vers le modèle d'écoulement en zone fondue

◆ Développements nécessaires pour plus de prédictibilité

- P1
 - Vapeurs métalliques → Fe
 - Convection dans l'anode (ou équivalent) → 316L
- P2
 - Modèles de gaines → diffusion ambipolaire
 - Déformation de l'anode → ALE

} *en cours*

Développements
sur modèle 2D-axi

► Plus de données expérimentales (littérature, exp)

- ◆ Caractérisation des flux thermiques, électriques et de la pression en surface de l'anode
- ◆ Températures dans l'anode et le plasma

► Propriétés gaz de soudage

- ◆ Caractérisation « délicate » → modèles statistiques indispensables

REACTEURS ET SERVICES

DIFFUSION LIMITEE AREVA

Conclusions & Perspectives



► Modèle du bain fondu

◆ Ligne de fusion idéale pour la validation du modèle actuel

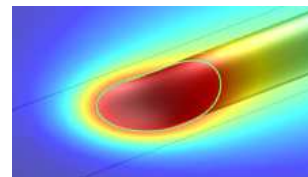
- Procédure d'essai robuste
- Validation des modèles numériques

◆ Contribution de l'approche multiphysique

- Distinction possible “effets procédé – effets matériaux”
 - Diffusion des espèces → maîtrise des effets de dilution sur la chimie locale
 - Propriétés de solidification → propriétés mécaniques, FàC,...
- } *en cours*

◆ Modèle physique bientôt représentatif du procédé TIG

- Déformation surface libre
 - Apport matière
 - Cisaillement gazeux
- } *intégrés*
- } *absent*



► Essais dédiés et Caractérisations

- ◆ Instrumentation plus complète : TC, vision, macro, analyses chimiques EDS
- ◆ Matériaux connus et “simples” : 304L, 316L
- ◆ Besoins : propriétés des métaux aux hautes températures



Merci de votre attention

Centre Technique - France

AREVA NP

CS 40001 – SAINT MARCEL

71328 CHALON SUR SAONE CEDEX – France

Tel +33 (0)3 85 90 30 44

www.areva.com