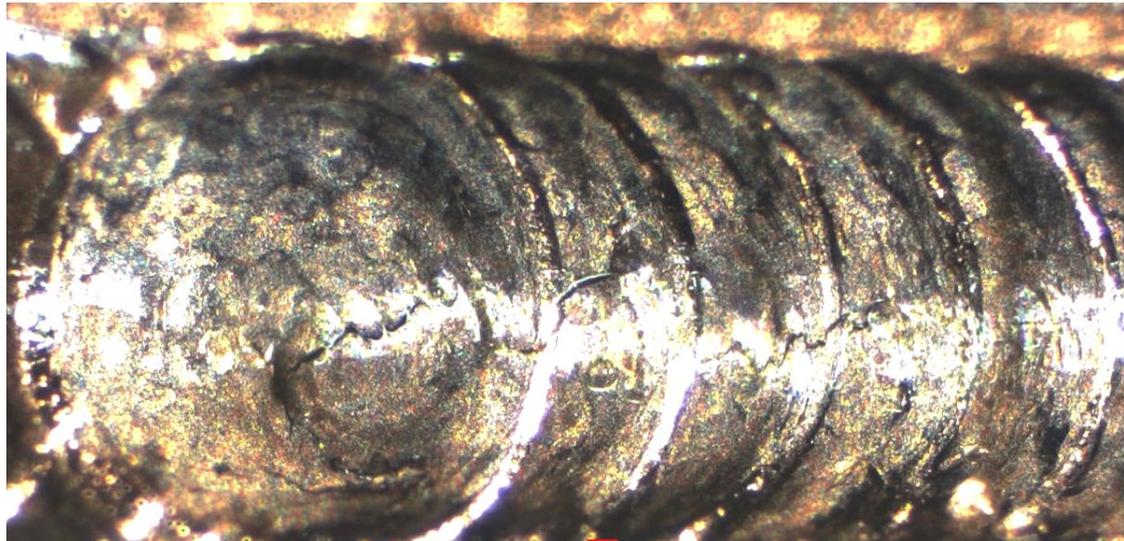




## Soudage hétérogène

Tantale – TA6V (Ti 90%, Al 6%, V4%) par laser ND : YAG impulsif  
**Détermination d'un domaine de fiabilité du procédé**



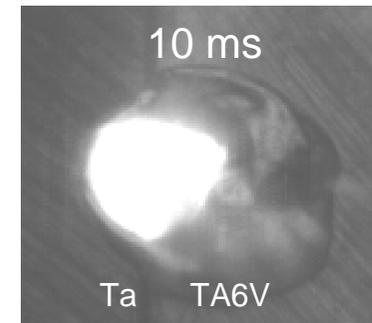
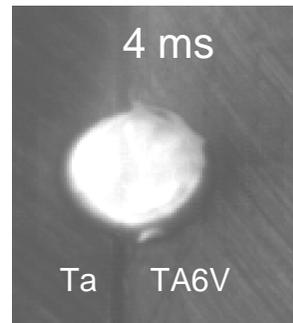
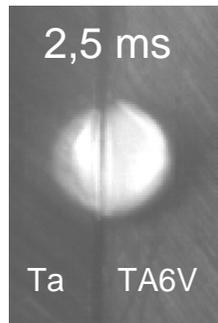
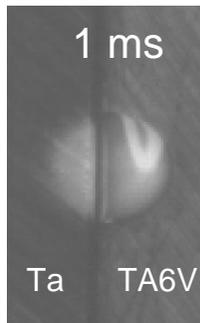
**Charline TOUVREY<sup>1</sup>, Dominique GREVEY<sup>2</sup>, Dominique Daloz<sup>3</sup>, Anne MALICROT<sup>12</sup>, Thomas PARIS<sup>1</sup>**

*1Laboratoire Soudage, CEA Valduc, 21120, Is sur Tille, France.*

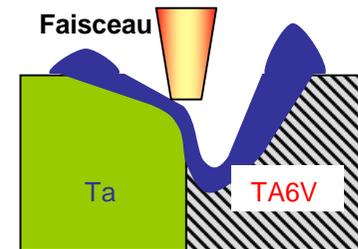
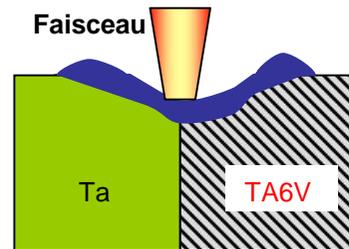
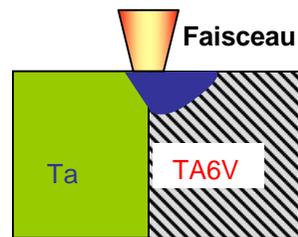
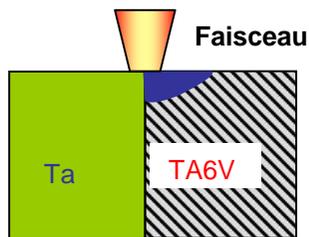
*2ICB, UMR CNRS-Université de Bourgogne 5209*

*3Institut Jean Lamour, UMR CNRS 7198*

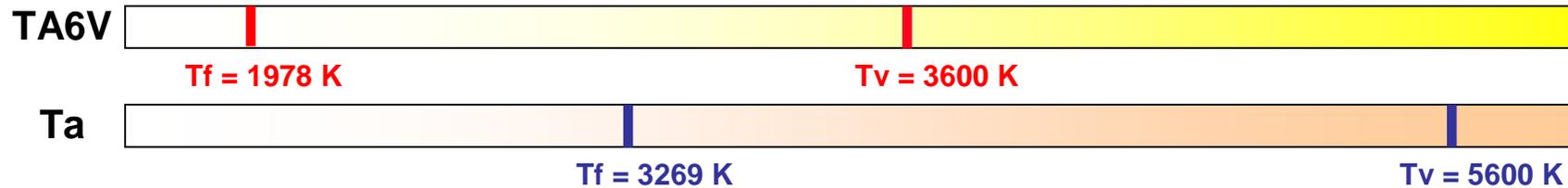
# La problématique d'assemblage 1/2



(\*)

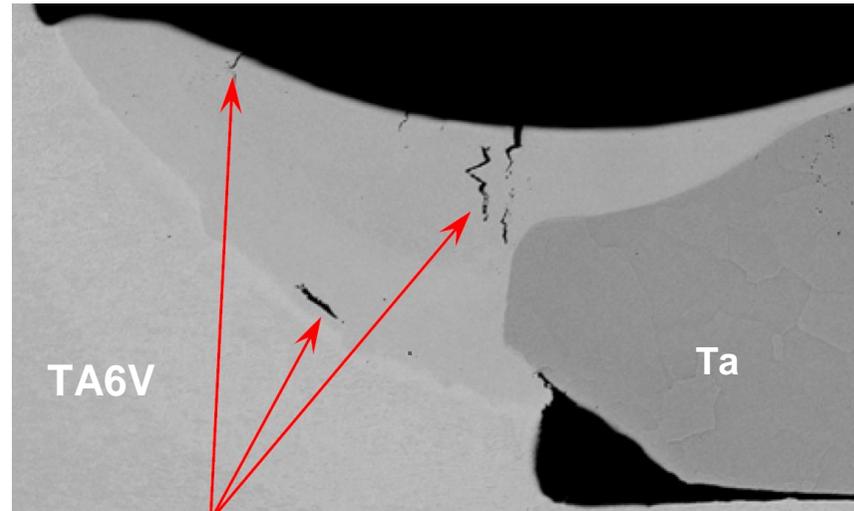


$\rho = 16705 \text{ kg.m}^{-3}$        $\rho = 4430 \text{ kg.m}^{-3}$   
 $\lambda = 60 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$        $\lambda = 19 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$   
 $C_p = 140 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$        $C_p = 750 \text{ J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}$



(\*) Films réalisé au GIP GERAILP

## La problématique d'assemblage 2/2



Mélange potentiellement sujet à la fissuration

Problématique : parvenir à réaliser un assemblage fiable mécaniquement

## Axes d'étude



Plusieurs axes d'études :

- I. L'étude des mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique en relation avec les paramètres du procédé ;
- II. L'étude des composés formés à l'échelle microstructurale ;
- III. L'étude des mécanismes de fissuration.  
→ Mise en place d'une démarche numérique pour appréhender le processus de solidification

# Le procédé : deux configurations de soudage



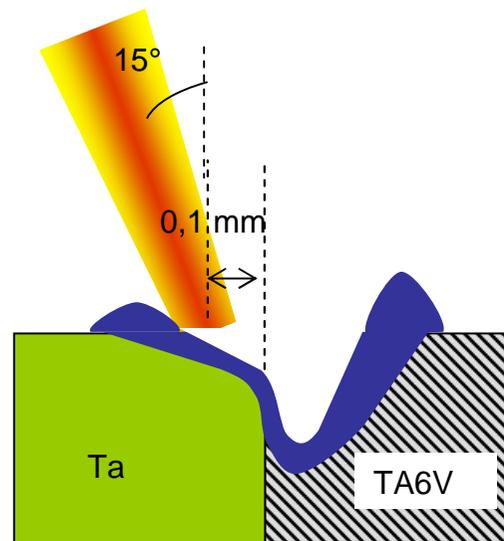
Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration

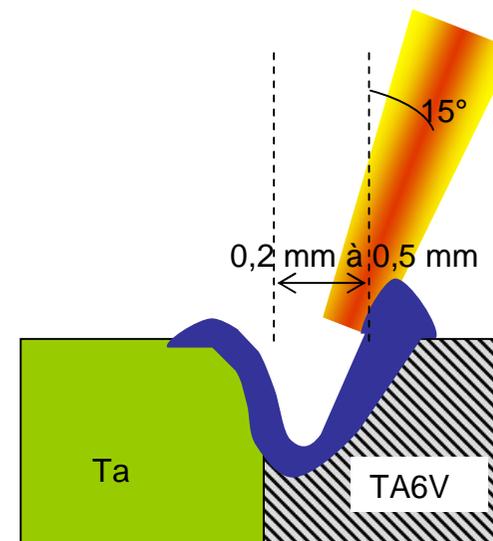
Solution historique :

Décalage du faisceau sur le tantale, matériau présentant le plus haut point de fusion



Solution récente :

Exploration d'un domaine de soudage plus vaste (besoin d'augmenter la pénétration) : décalage du faisceau sur le TA6V.



# Type de zone fondue lorsque le faisceau est décalé sur le tantale



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration

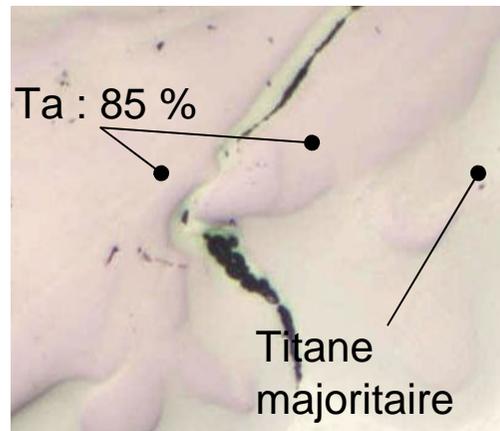
## Faible pénétration :

Fusion franche des deux matériaux

Forte hétérogénéité chimique : amas à plus de 85% de tantale

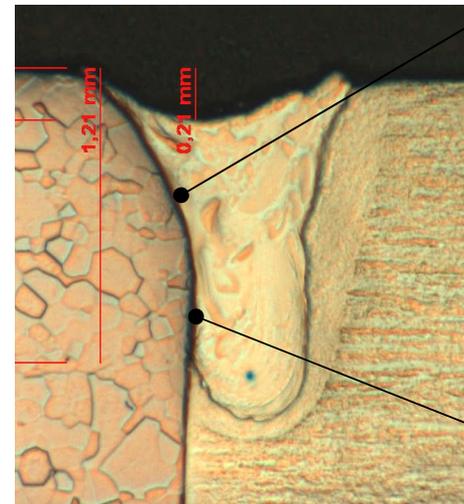


## Risque de fissuration



## Forte pénétration :

2 zones



Absence de fissure

# Type de zone fondue lorsque le faisceau est décalé sur le TA6V



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

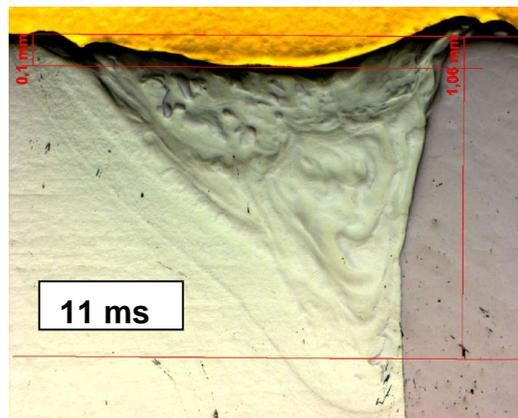
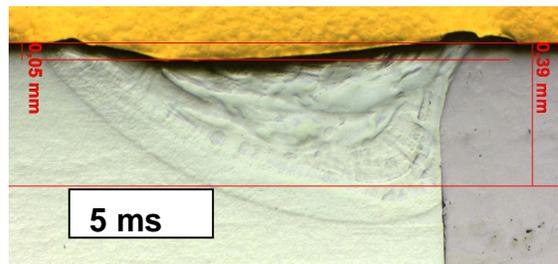
Étude des mécanismes de fissuration

## Décalage sur TA6V < 0,5 mm

2 parties : fusion des 2 matériaux (partie haute) + diffusion (partie basse) quelle que soit la pénétration

Brassage des composés;

Absence de fissures.



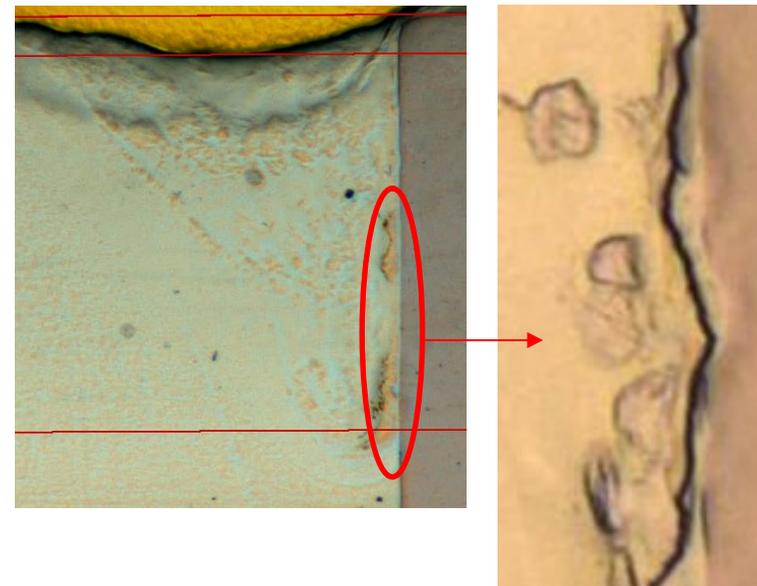
Absence de fissure

## Décalage sur TA6V > 0,5 mm

Liaison issue de la diffusion TA6V liquide → tantale

Le long de l'interface de diffusion

- Blocs de tantale ;
- Fissuration.





Effet néfaste des **amas de tantale** :  
**Étude microstructurale** de la zone fondue afin d'appréhender les  
mécanismes de formation des zones à fort taux de tantale

# Types de microstructures, quelles que soient les conditions de soudage



*Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique*

*Étude des microstructures formées*

*Étude des mécanismes de fissuration*

- Une matrice cellulaire dendritique
- Des îlots de tantale

Mécanismes de formation ? Caractéristiques ?

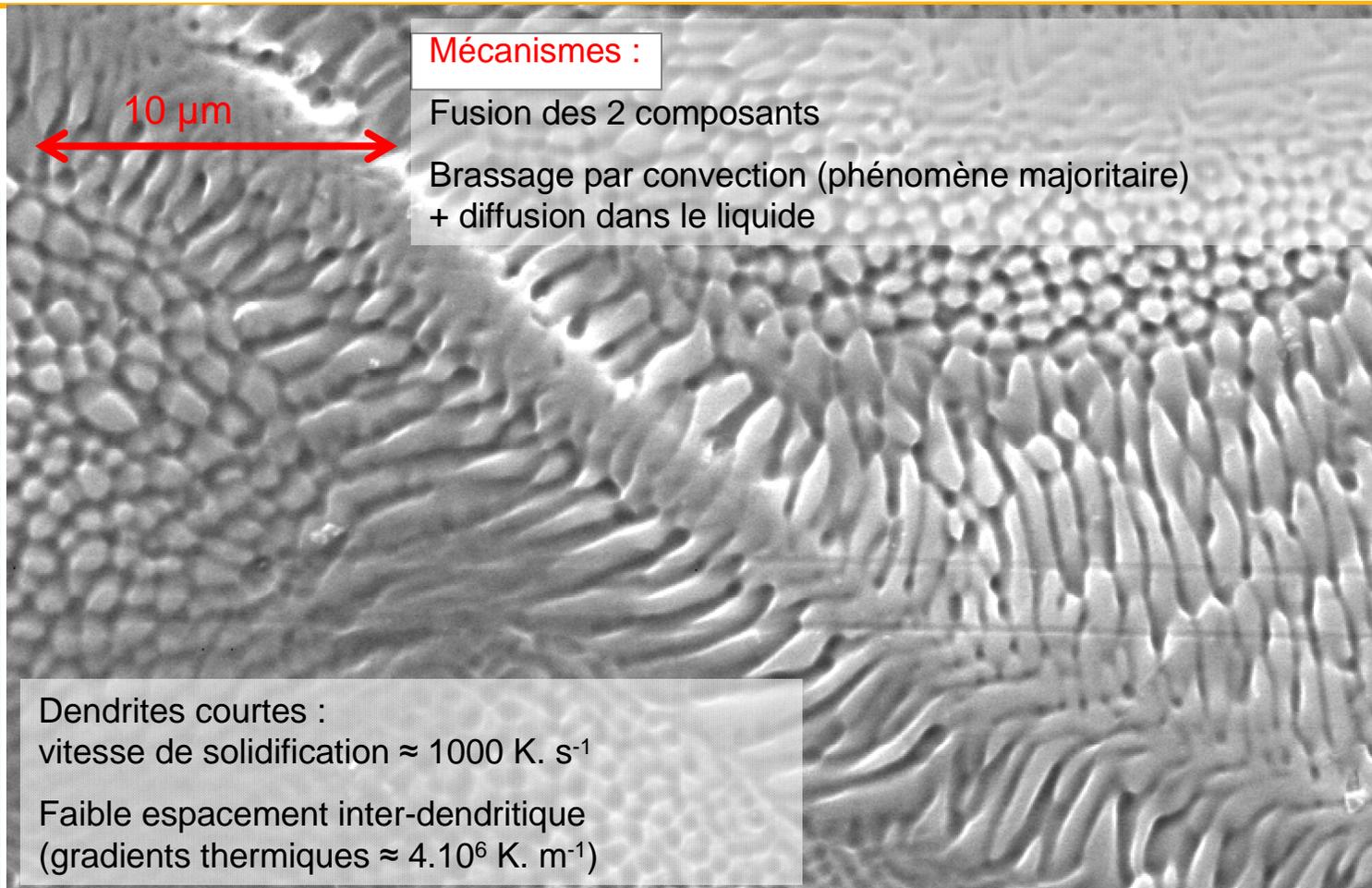
# La matrice cellulaire dendritique



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration



Lorsque le tantale est fondu par l'irradiation du faisceau sur la quasi-totalité de la liaison : zones riches en tantale (85 à 90% de Ta), de taille importante (0,2 X 0,2 mm).

*(configuration décalée sur le tantale, faible pénétration).*

# Les îlots de tantale 1/2



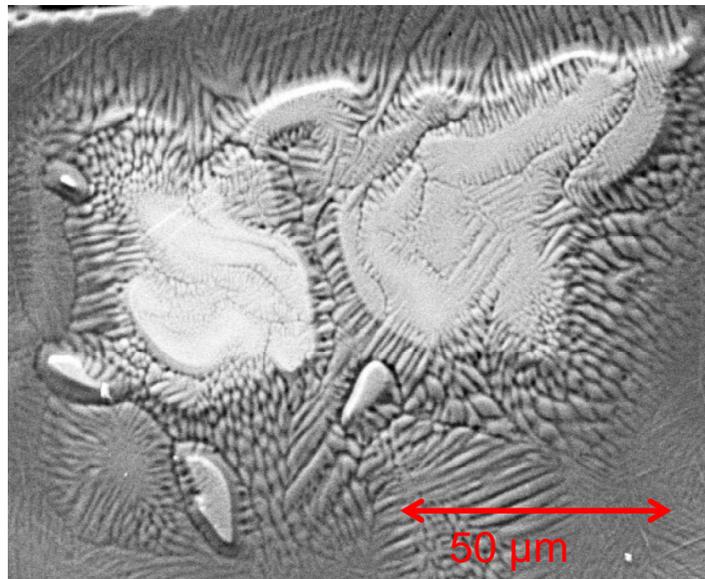
Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

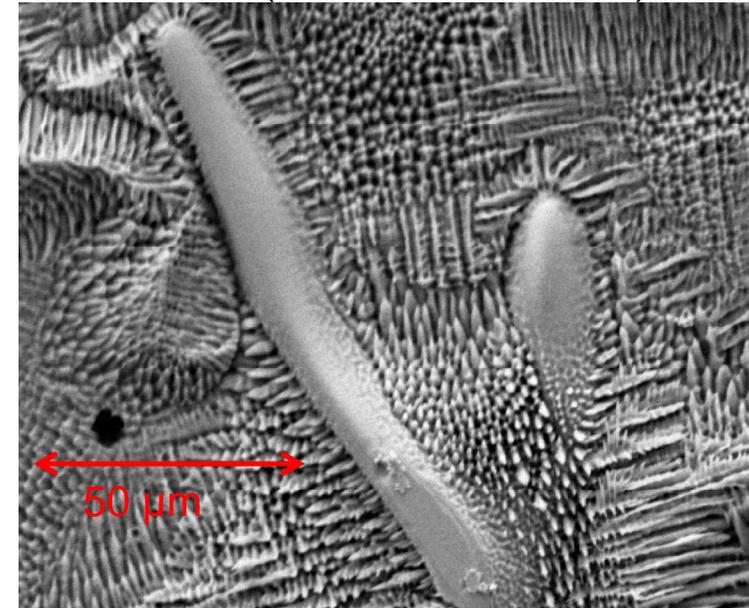
Étude des mécanismes de fissuration

Dimensions : de l'ordre de la taille de grain

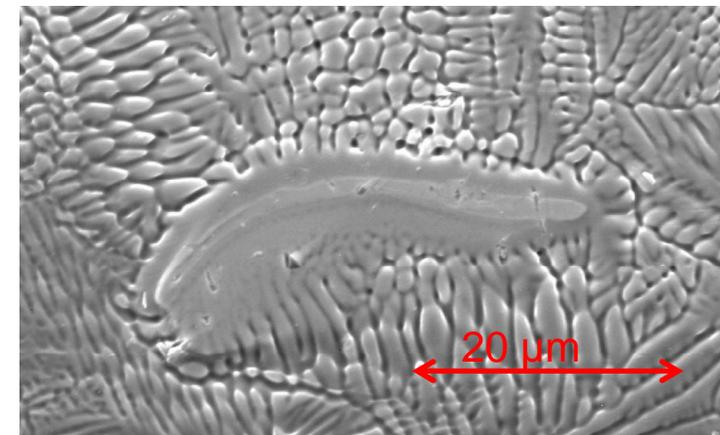
Fondu (structure solidification au centre)



Non fondu (100% Ta au centre)



Partiellement fondu



# Les îlots de tantale 2/2

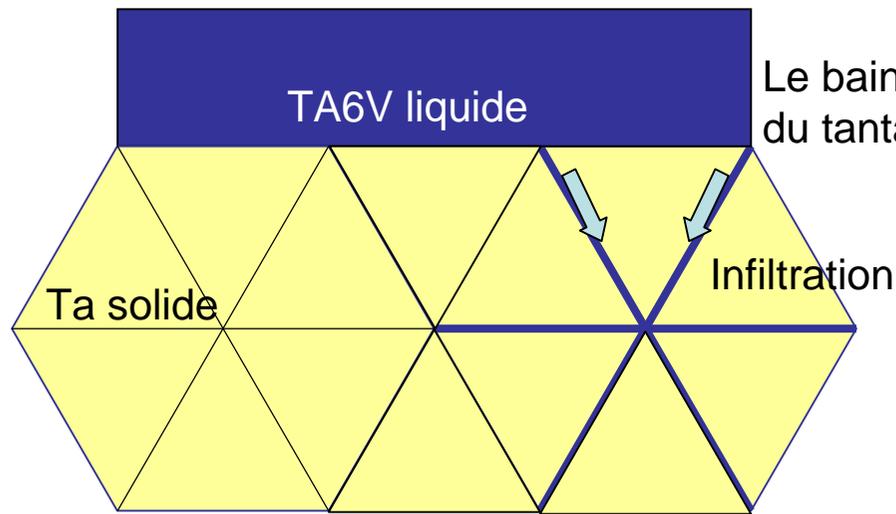
## Mécanismes de formation



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

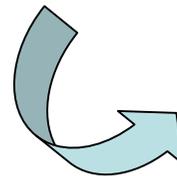
Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration



Le bain liquide diffuse aux joints de grain du tantale solide

Fragmentation



# Fissuration en bord d'îlots de tantale



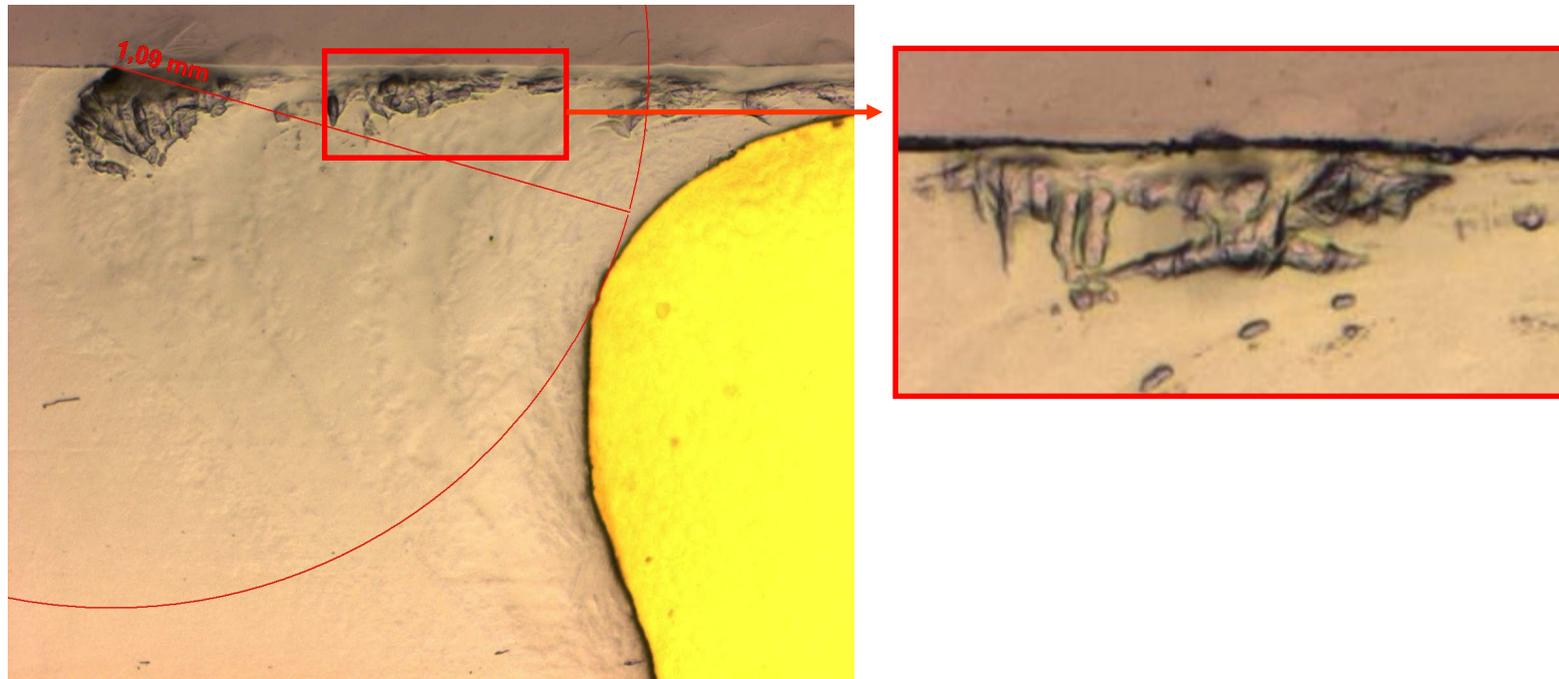
Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration

En fonction des conditions opératoires :

- Soit transport des îlots dans le bain de soudage,
- Soit accumulation de ce type de particules (cas de liaisons « par diffusion » uniquement).





Lien entre la présence d'amas de tantale et le processus de fissuration ?

# Mécanismes physiques de fissuration



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

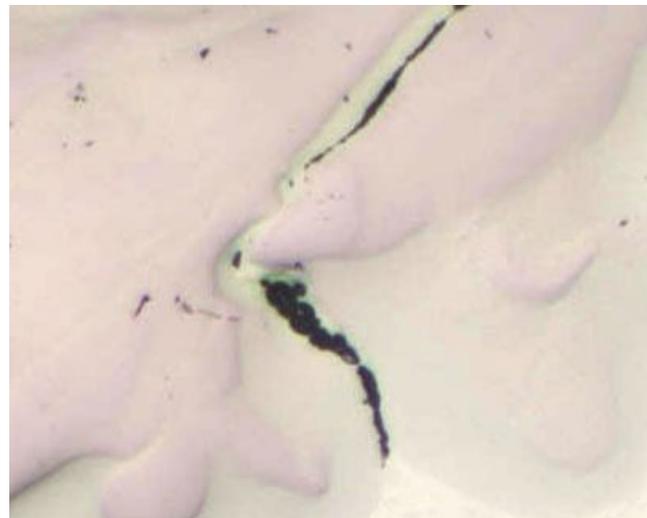
Étude des mécanismes de fissuration

Amas riches en tantale :

- Soit **restés solides** (îlots constitués de 100% de Ta) ;
- Soit portés à l'état liquide (matrice cellulaire dendritique à plus de 85% de Ta) : **zones qui se solidifient en premier.**

**Hypothèse** : le film liquide riche en titane piégé entre les blocs de tantale est rompu au moment de sa solidification et de son retrait.

→ mécanisme de type fissuration à chaud



# Démarche numérique pour appréhender le processus de solidification



*Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique*

*Étude des microstructures formées*

*Étude des mécanismes de fissuration*

- Patch de composition en tantale et titane sur un maillage initial,
- Caractérisation des propriétés des matériaux en fonction de la teneur locale en élément et de la température,
- Cinétique de refroidissement (calcul thermique),
- Implémentation de critères de formation des manques de matière (fissures à chaud),
- Contraintes locales, prédiction de la fissuration à chaud (calcul mécanique).

*Thèse début sept 2010*

# Modélisation du refroidissement : une première approche numérique

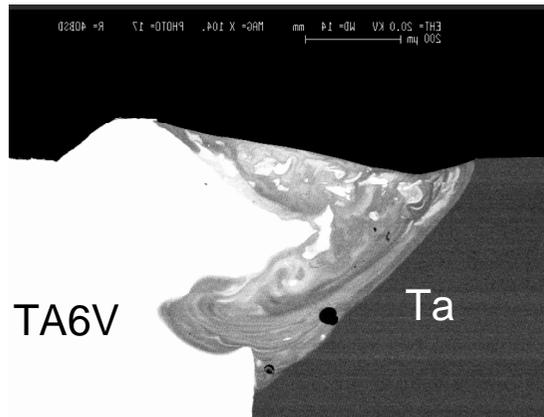


Étude menée par l'ICB (Alexandre Mathieu)

*Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique*

*Étude des microstructures formées*

*Étude des mécanismes de fissuration*



**Problématique : Endommagement d'une zone fondue présentant une inclusion de TA6V ?**

**Étape :**

- État thermique initial ;
- Calcul thermique (refroidissement) ;
- Calcul thermomécanique (élasto-plastique en couplage fort).

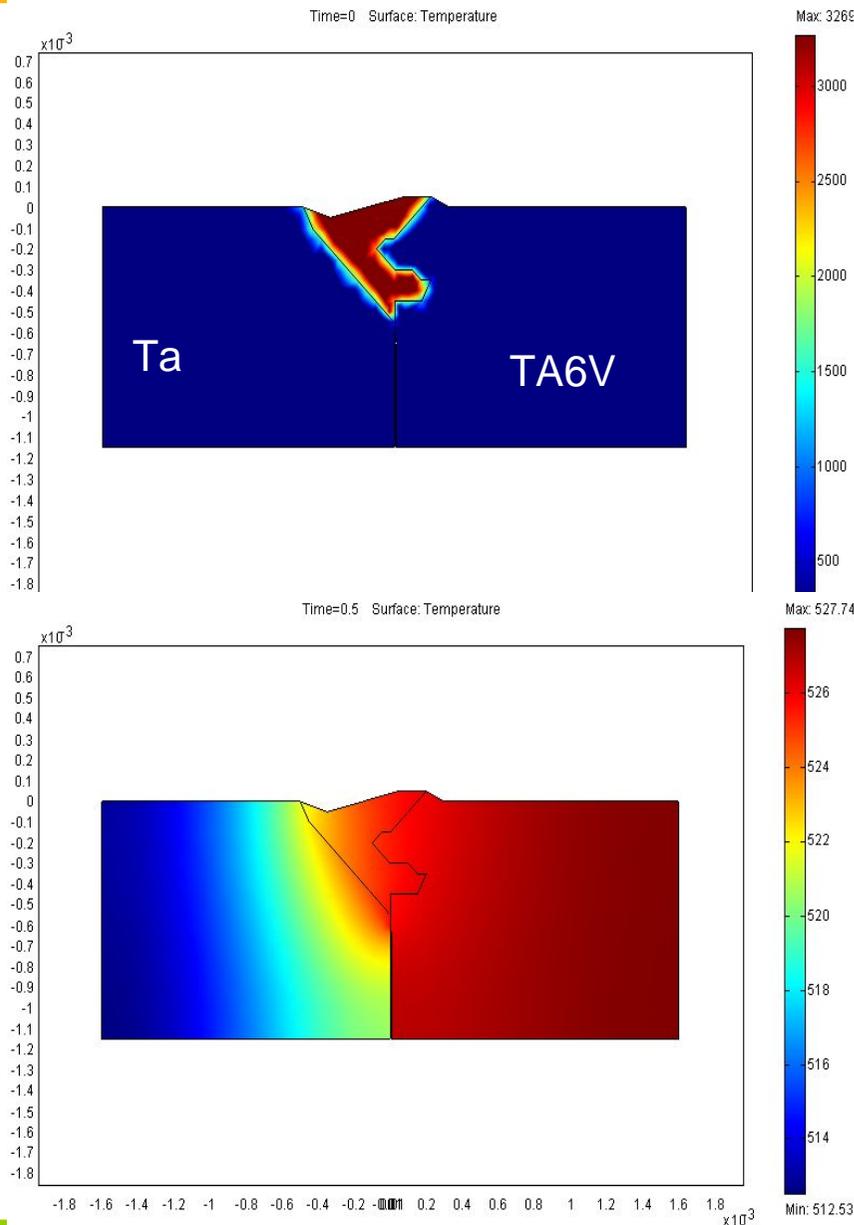
# Modélisation du refroidissement : résultats



Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration



Thermique initiale : température du bain à 3200 K → lissage

Caractéristiques matériaux dépendant de la température

Refroidissement

# Modélisation du refroidissement : résultats



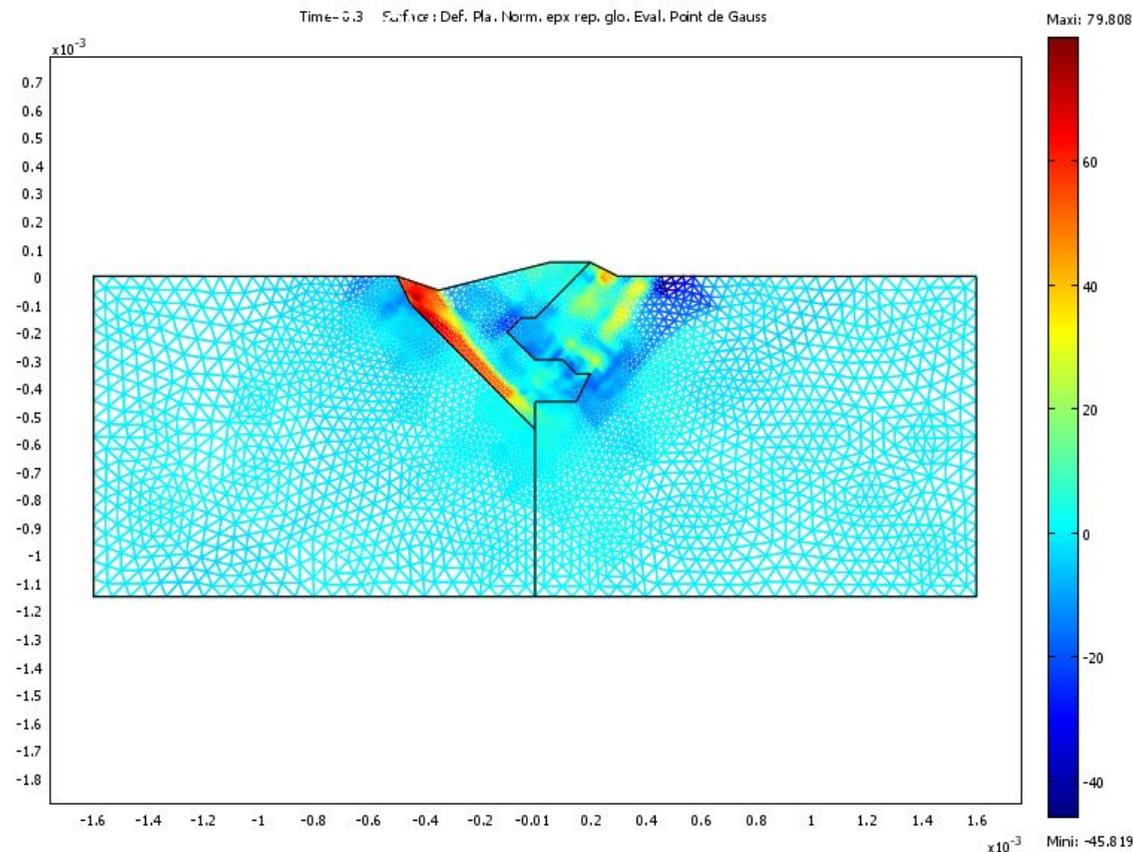
Mécanismes de formation des zones fondues à l'échelle macroscopique

Étude des microstructures formées

Étude des mécanismes de fissuration

Conditions aux limites mécaniques : bridage vertical des deux plaques  
Caractéristiques mécaniques « du matériau » constituant la soudure : loi des mélanges

→ Déformation plastique



## Conclusions



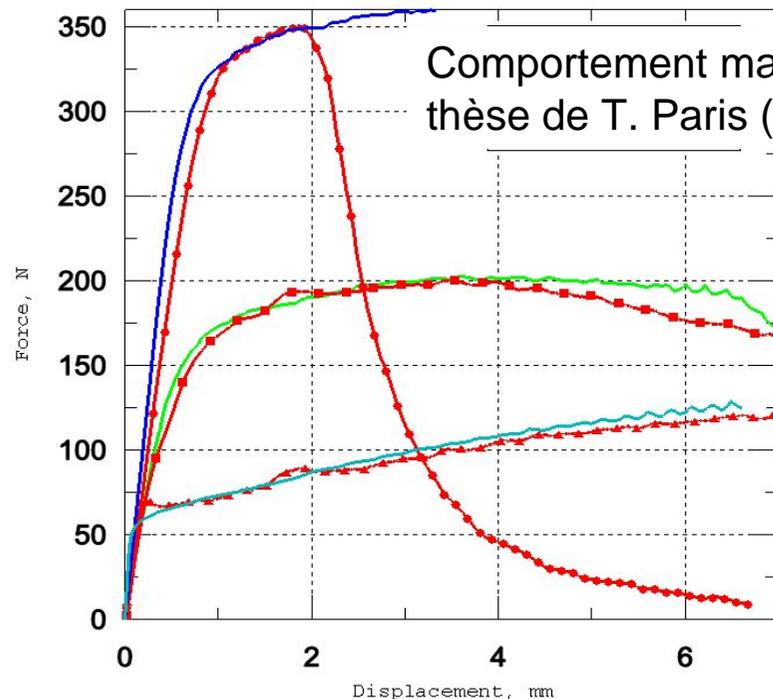
- Le processus de fissuration est lié à :
  - ✓ l'hétérogénéité chimique,
  - ✓ différences de propriétés thermo-physiques des deux matériaux, (piégeage et rupture de films de solutions solides entre des amas de tantale).
- Compréhension de ces mécanismes
  - ➔ on agit sur les paramètres opératoires pour garantir la fiabilité du procédé.

## Conclusions



La prédiction des mécanismes de fissuration nécessite une approche locale.

L'endommagement local sera à terme intégré dans un étude mécanique globale.



Comportement macro-homogène de la Z.F. :

- Chute marquée du module d'élasticité
- Viscosité moyenne
- Écrouissage du TA6V

Cette thèse se poursuit par l'étude de l'influence des défauts sur la tenue en fatigue de ces liaisons.