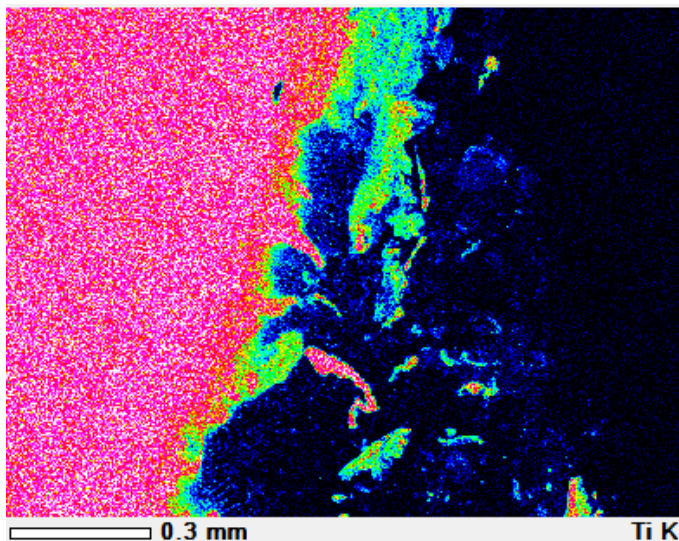
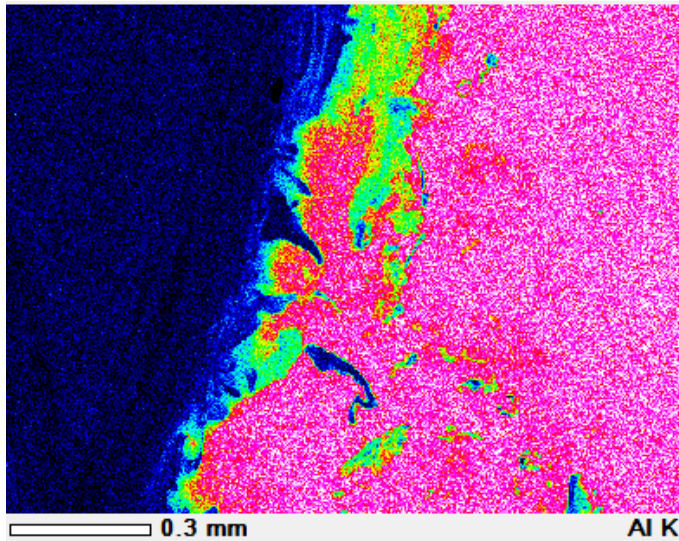




Compréhension et maîtrise des jonctions hétérogènes titane-aluminium réalisés par faisceau laser

Projet ATTILA ICB-PIMM
projet ressourcement Carnot

Iryna TOMASHCHUK,
Pierre SALLAMAND, Henri ANDRZEJEWSKI,
Alexandre MATHIEU, Eugen CICALA

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, équipe
Laser et Traitements des Matériaux, UMR 6303 CNRS
Université de Bourgogne

- ❑ Introduction de la problématique
- ❑ Etude de l'assemblage bord à bord TA6V/A5754 par laser Nd:YAG
 - ❑ Etude expérimentale
 - ❑ Etude numérique
- ❑ Conclusions



❑ Les éléments dominants :

A 5754 : **93 % at Al**, 6 % at Mg, <1% at Si

TA6V : **90 % at Ti**, 6 % at Al, 4 % at V

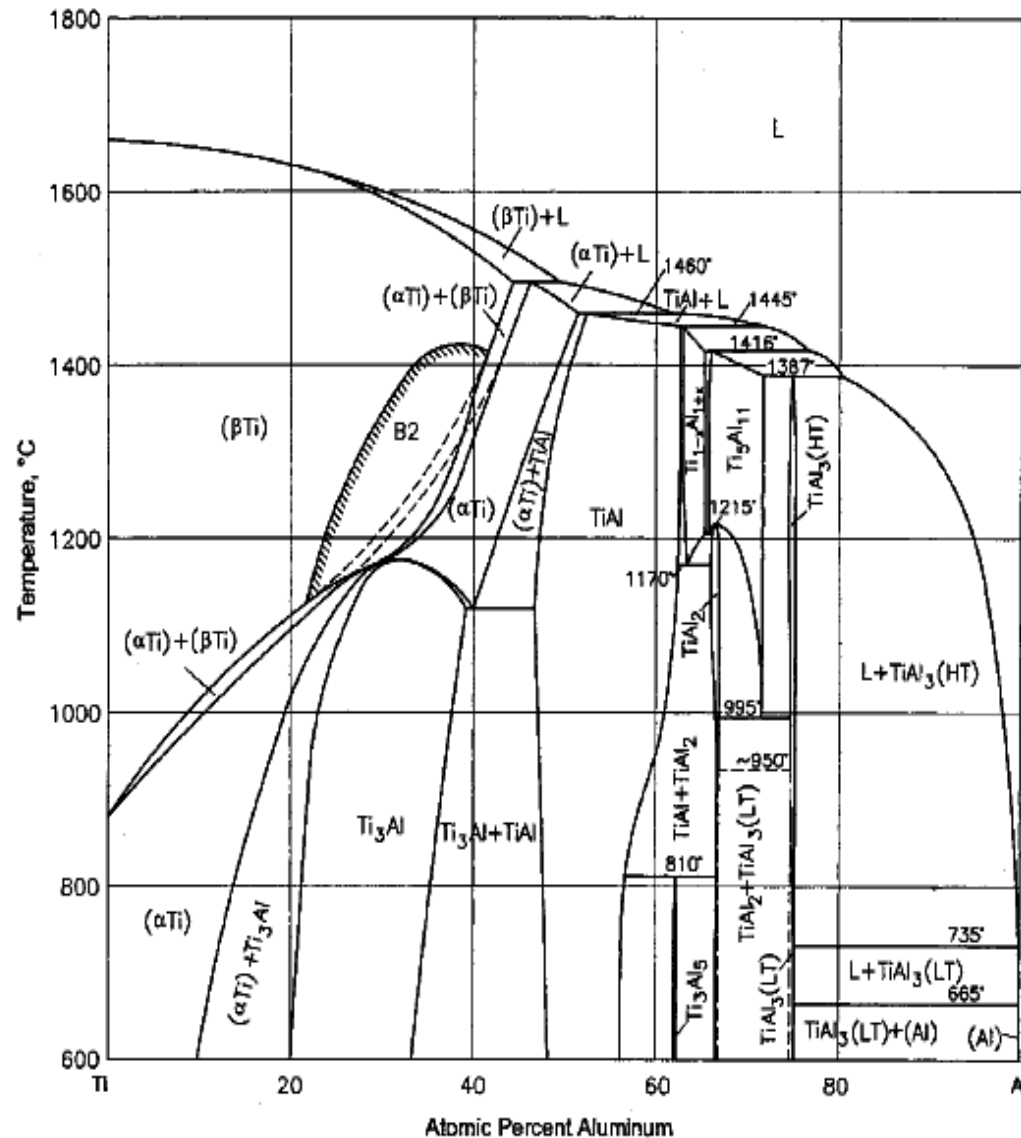
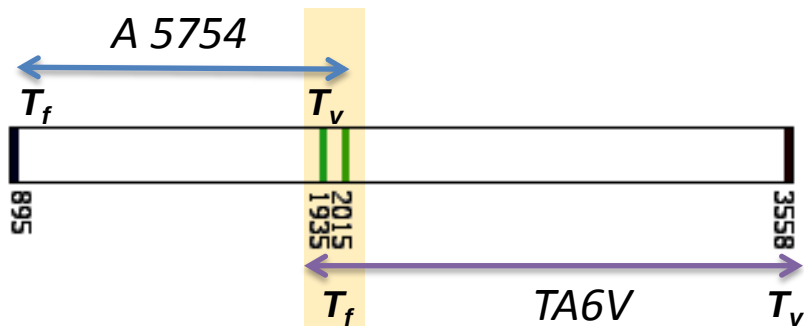
❑ Solubilité réduite dans le système Al/Ti

❑ Formation des nombreuses phases intermétalliques

▪ Al_3Ti est très fragile

❑ Grande différence des températures d'ébullition et de fusion

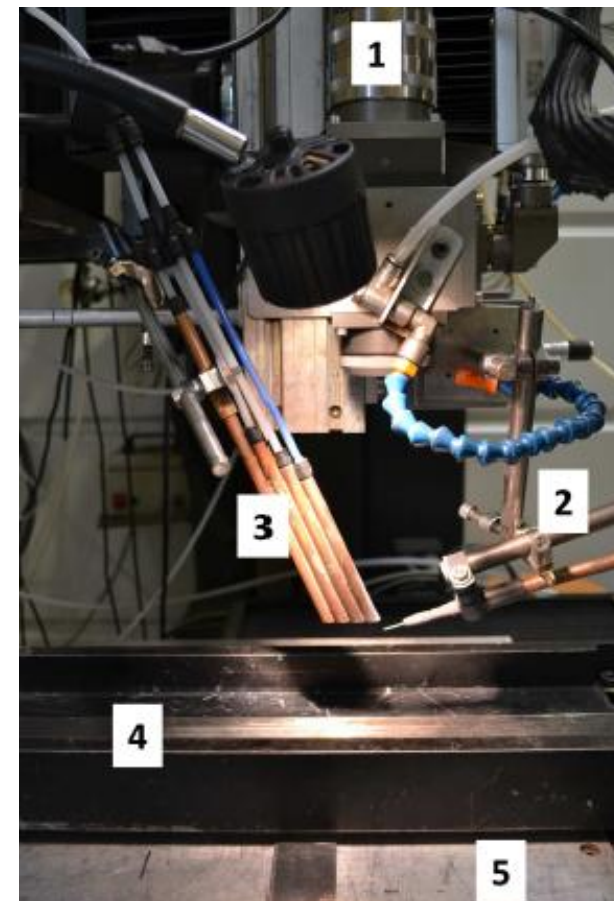
▪ Une petite plage de coexistence des phases liquides :



- ❑ Laser Yb:YAG de 6 kW, $\varnothing_{\text{tache}} = 0,6 \text{ mm}$
- ❑ Tôles de 2 mm, assemblés bord à bord
- ❑ Protection gazeuse renforcée

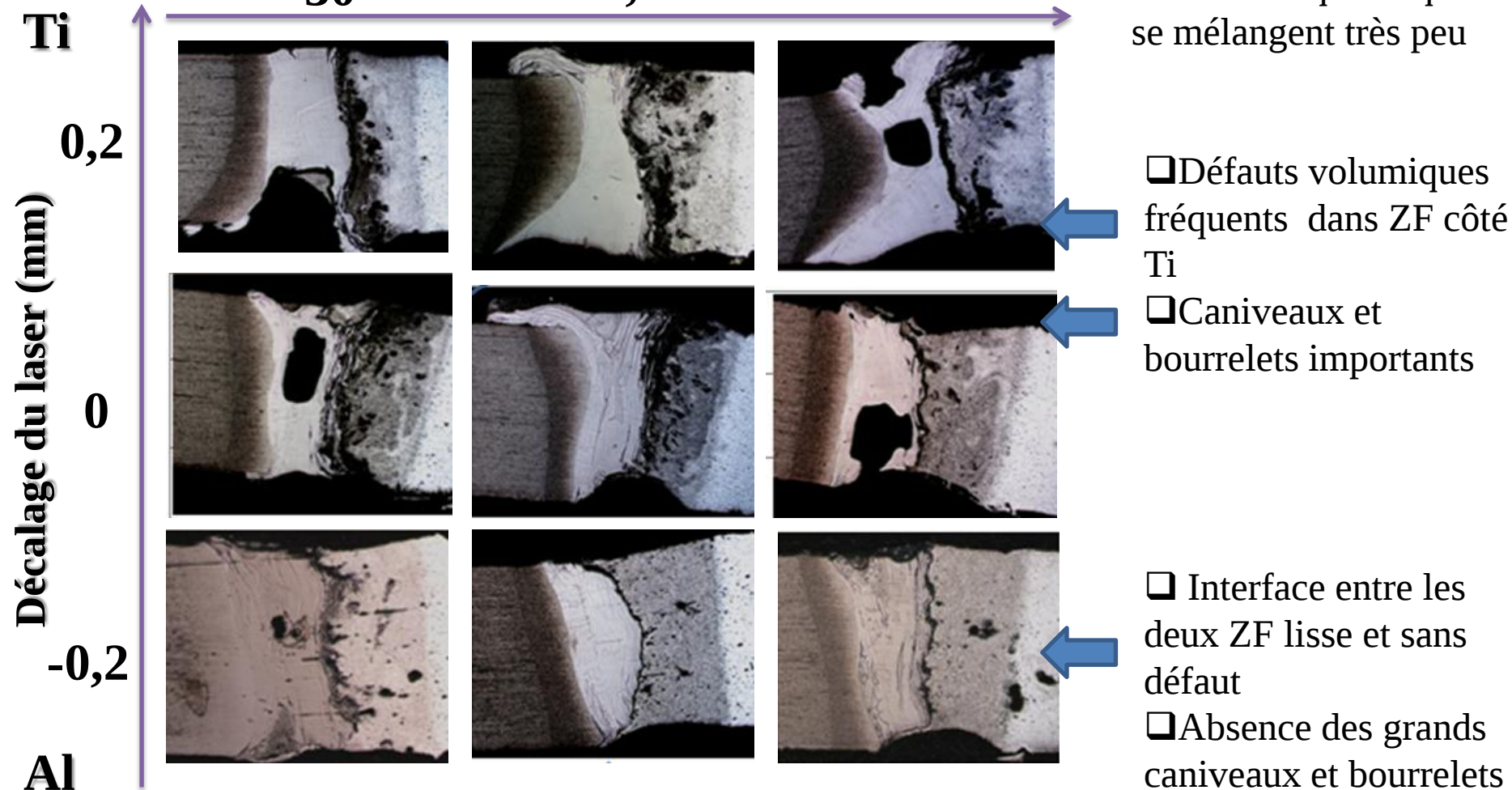
$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$

		→		
		30	37,5	45
Décalage du laser (mm)	Ti	6 kW 12 m/min	6 kW 6,4 m/min	5 kW 6,6 m/min
	0	6 kW 12 m/min	5 kW 8 m/min	4 kW 5,3 m/min
	Al	6 kW 12 m/min	6 kW 9,6 m/min	5 kW 6,6 m/min





$$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$$

30**37,5****45**



$$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$$

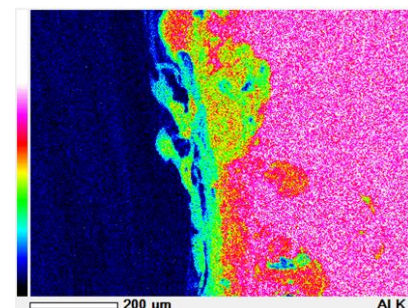
30

37,5

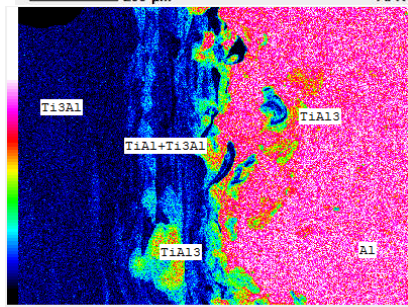
45

Ti
0.2
0
-0.2
Al

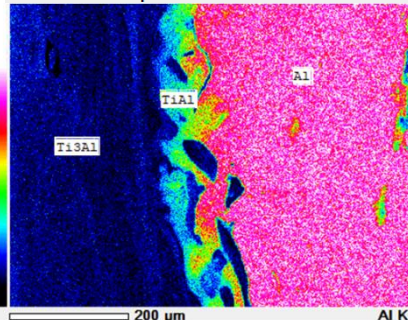
Décalage du laser (mm)



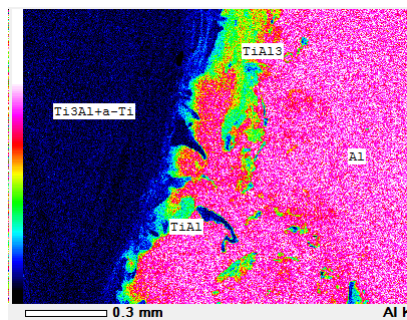
Al K



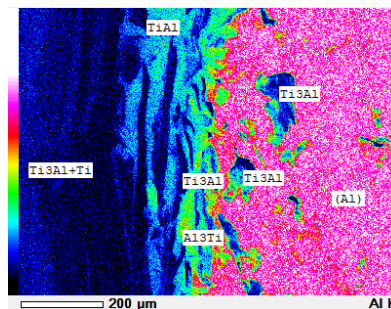
Al K



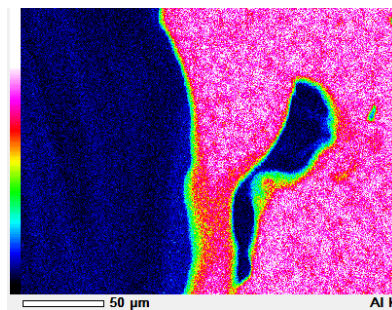
Al K



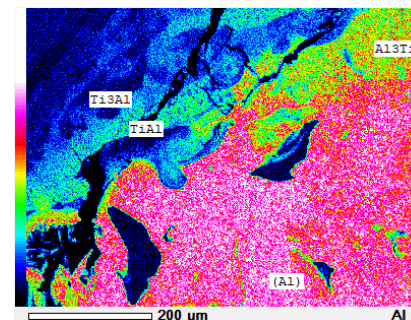
Al K



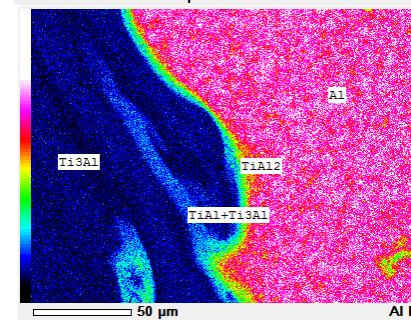
Al K



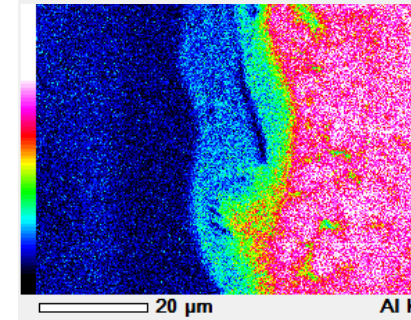
Al K



Al K



Al K



Al K

$$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$$

Décalage du laser (mm)	$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$		
	30	37,5	45
Ti			
0.2	6 kW 12 m/min	6 kW 6,4 m/min	5 kW 6,6 m/min
0	6 kW 12 m/min	5 kW 8 m/min	4 kW 5,3 m/min
-0.2	6 kW 12 m/min	6 kW 9,6 m/min	5 kW 6,6 m/min
Al			

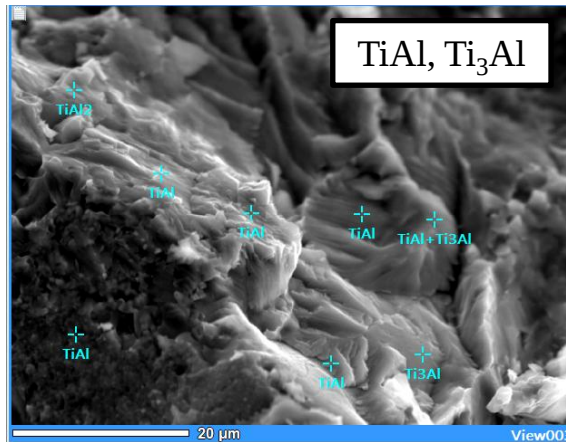
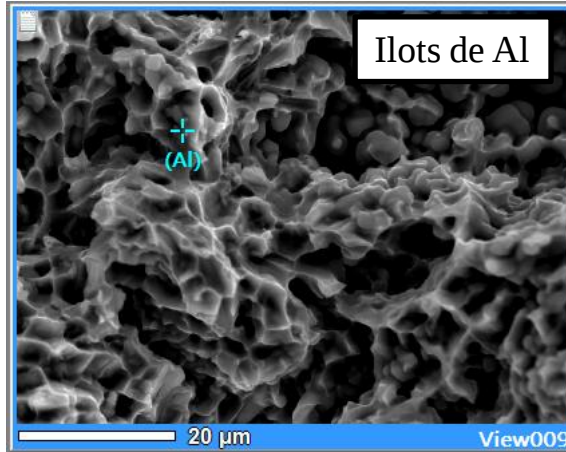
❑ Test de traction : rupture au niveau de l'interface Al/Ti

- ❑ Interface lisse : OK pour la résistance mécanique
- ❑ Interface fissurée (Al_3Ti) : détérioration de la stabilité
- ❑ Interface malaxée : valeurs intermédiaires
- ❑ Fractographie?

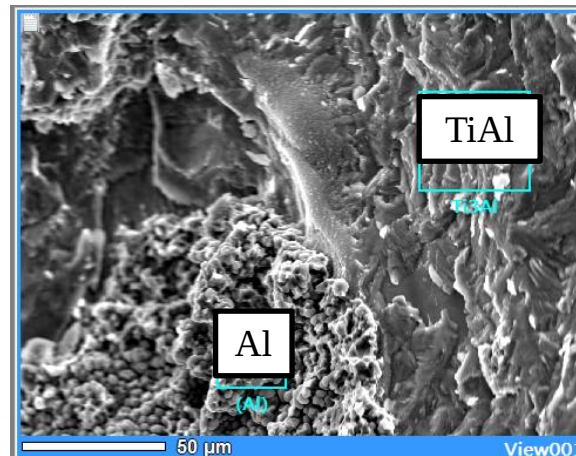
Décalage du laser (mm)	$E_{\text{linéique}} = P/V_s \text{ (kJ)}$		
	30	37,5	45
Ti			
0.2	167 N/mm	159 N/mm	120 N/mm
0	178 N/mm	166 N/mm	219 N/mm
-0.2	155 N/mm	204 N/mm	203 N/mm
Al			



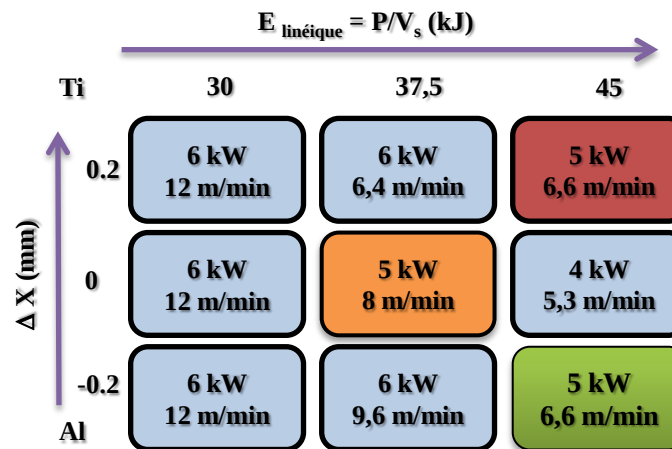
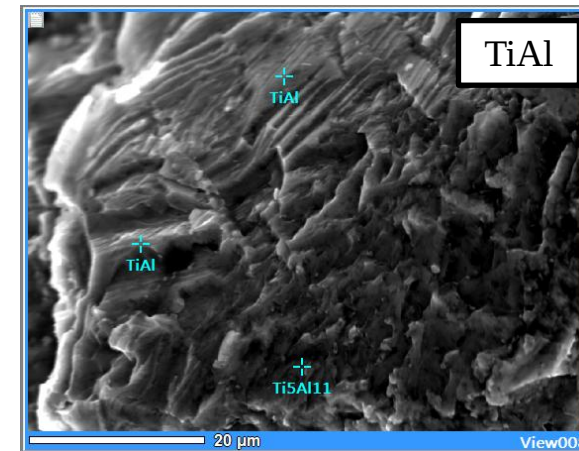
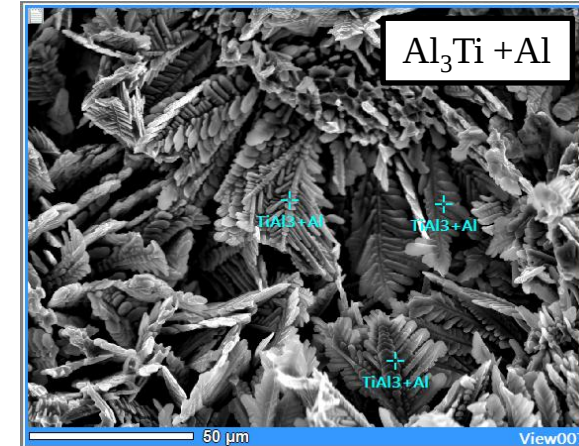
Interface lisse



Interface malaxée



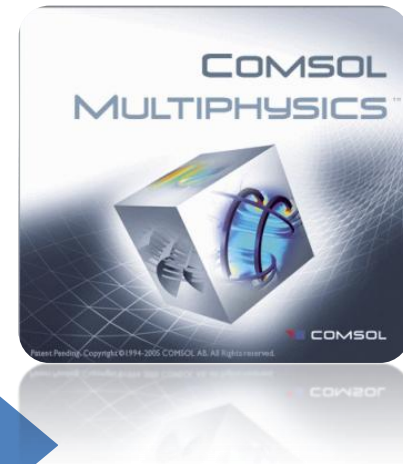
Interface fissurée



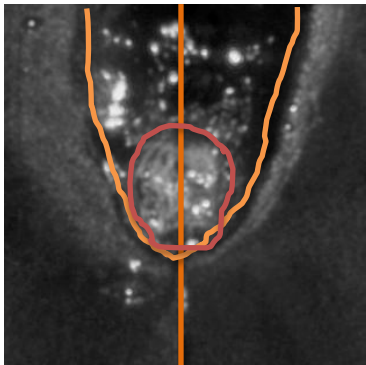
Comprendre l'influence des paramètres opératoires sur le développement de la zone fondue

Modélisation thermo-hydraulique 3D incluant la description du capillaire (ALE?)

Modélisation multiphysique 2D des coupes horizontales à la base du capillaire cylindrique

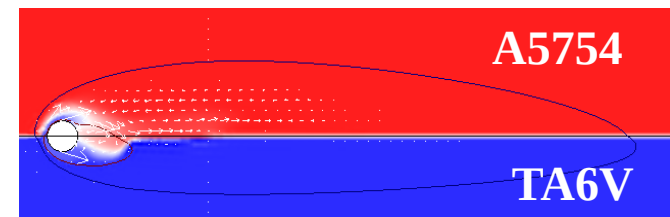


- ☐ Calcul lourd
- ☐ Demande des études préliminaires du comportement de la zone liquide et du capillaire (en cours)



Camera CCD
Faisceau laser centré de 4 kW,
5,3 m/min

- ☐ Calcul rapide permettant avoir la première idée sur le façon dont les matériaux se mélangent et d'estimer l'influence de l'histoire thermique sur la morphologie des interfaces Al/Ti



Thermique et convection en forme quasi-stationnaire



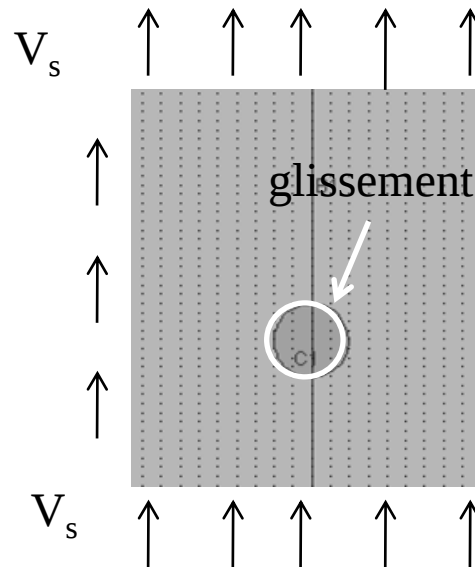
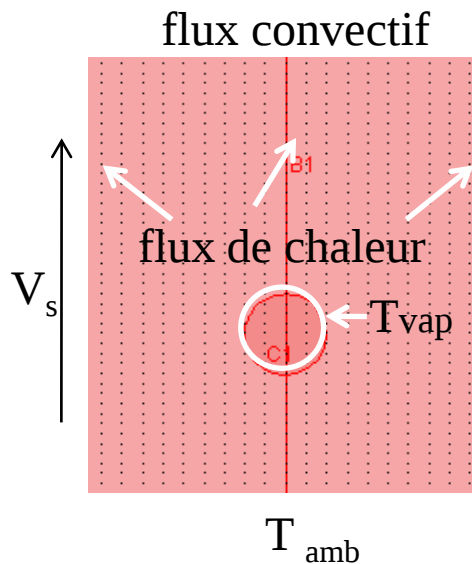
Durée de vie des zones liquides



Calcul du mélange macroscopique



Calcul de la diffusion à l'interface entre Ti solidifié et Al liquide



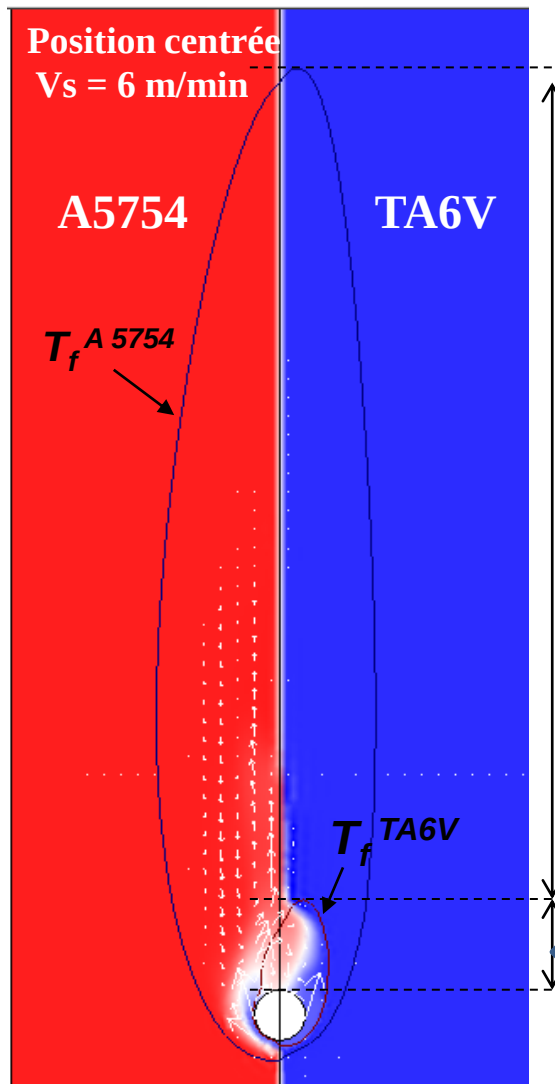
$$\rho \cdot c_p \cdot \vec{U} \cdot \vec{\nabla} T + \vec{\nabla}(-k \cdot \vec{\nabla} T) = 0$$

$$\rho \cdot (\vec{U} \cdot \vec{\nabla} T) \cdot \vec{U} = \vec{\nabla}(-P + \eta \cdot (\vec{\nabla} \vec{U} + (\vec{\nabla} \vec{U})^T))$$

$$\vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{U}) = 0.$$

$$\frac{\partial c_{Al}}{\partial t} + \nabla(-D_{Al(Ti)} \cdot \nabla c_{Al}) = -\vec{U}_r \cdot \nabla c_{Al}$$

$$\vec{U}_r = \begin{cases} u \\ v - V_s \end{cases} \quad D_{Al(Ti)} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right)$$



- ☐ Al liquide domine dans la zone fondue
- ☐ Mélange très limitée entre Al et Ti liquides

Existence du
Al liquide:
diffusion du Al dans
Ti continue.

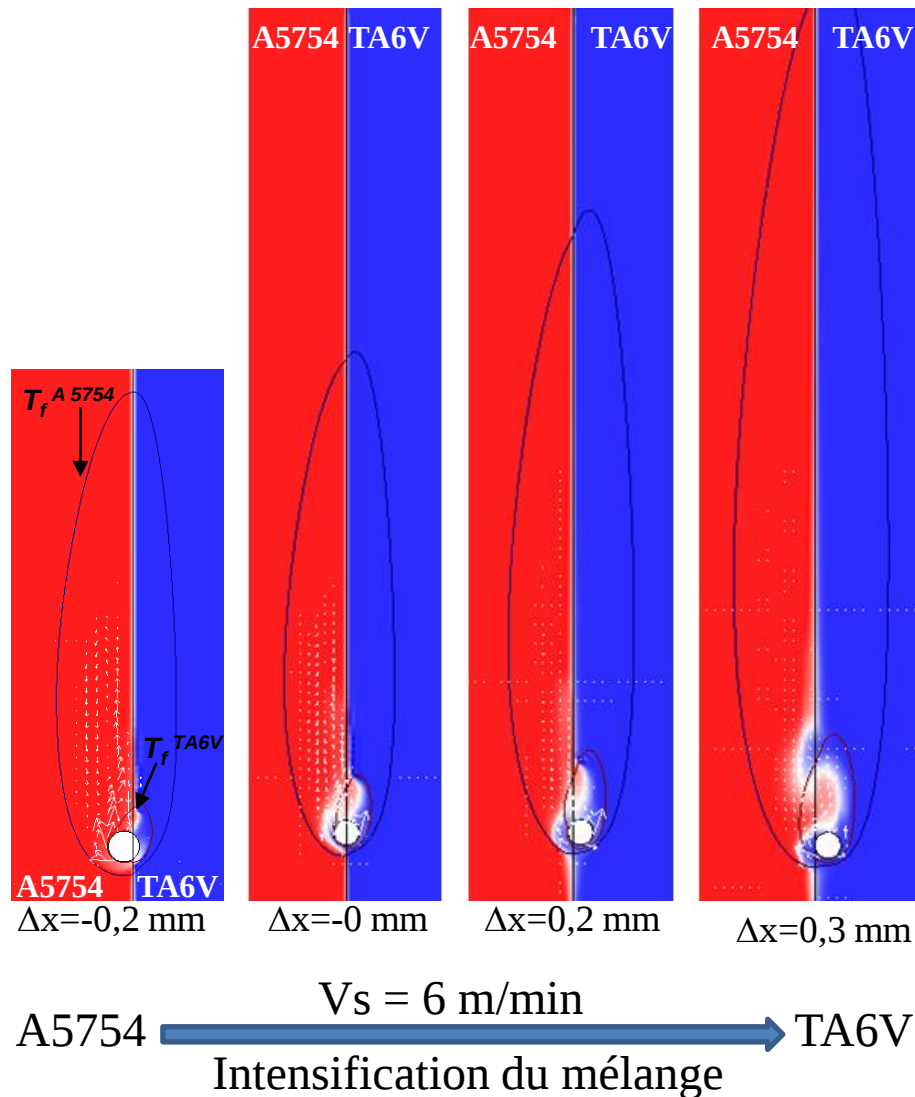
Durée de la diffusion du Al dans
TA6V solide

$$t_{vie}^{A5754} = \frac{L_{A5754}}{V_s}$$

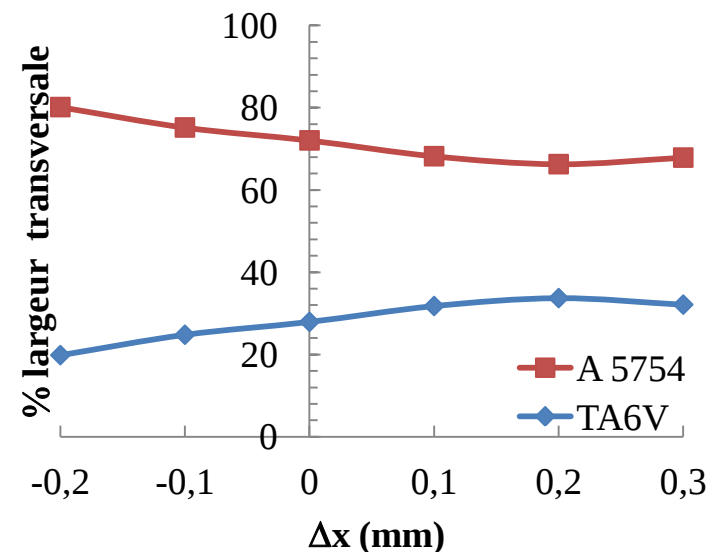
Coexistence du
Ti et Al liquides:
développement du
mélange très bref.

Durée de la formation du mélange

$$t_{vie}^{TA6V_l} = \frac{L_{TA6V_l}}{V_s}$$

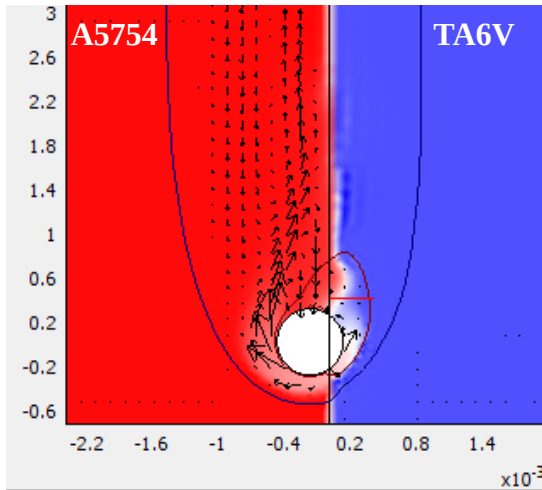


- ❑ Décalage vers TA6V allonge la zone fondue, donc augmente sa durée de vie et perturbe l'interface entre des ZF
- ❑ Décalage vers A 5754 réduit la zone fondue et diminue la durée de coexistence des deux zones liquides.
- ❑ Largeurs observées sont en cohérence avec des largeurs mesurées à $h/2$ de la soudure.



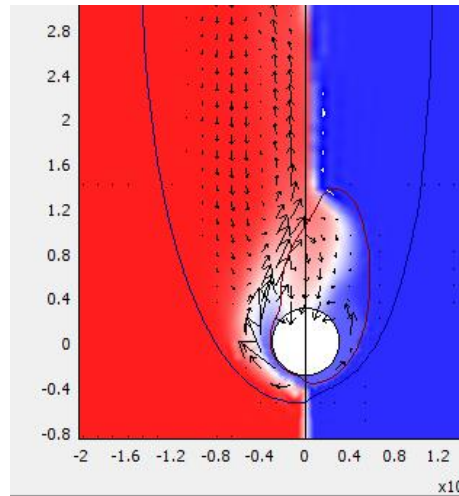


□ 0,2 mm sur A5754



Glissement du flux riche en Al le long du TA6V solidifié

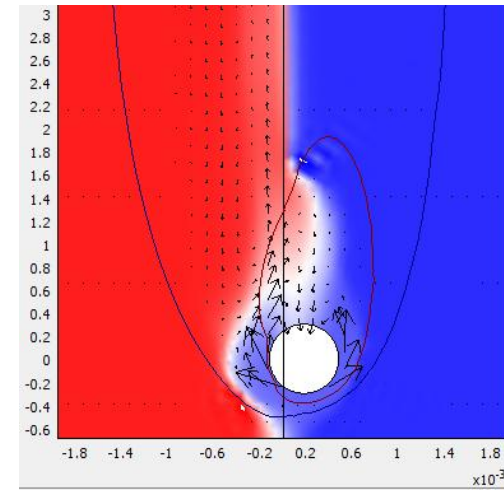
□ centré



Le malaxage entre deux flux : riche en Ti et riche en Al

□ 0,2 mm sur TA6V

$V_s = 6$ m/min



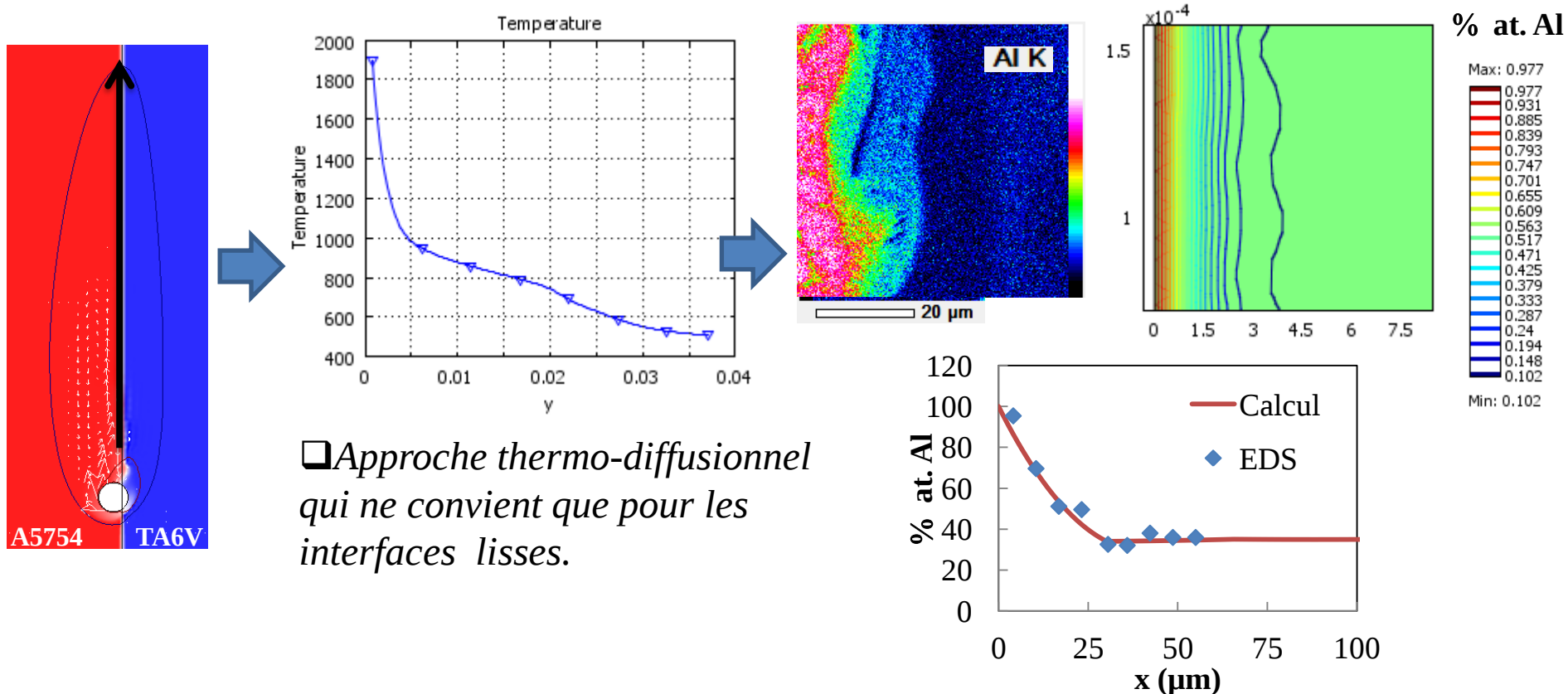
		V_s (m/min)			U_r (m/s)	
		12	9	6		
Δx (mm)	Ti					
	0.2	0,42	0,31	0,18		interface fissurée
	0	0,6	0,42	0,25		interfaces lisses
	-0.2	0,8	0,5	0,3		interfaces malaxées
						Al

La morphologie dépend de

- la position des écoulements
- la vitesse des écoulements
- le temps de vie du mélange

☐ *Comment l'histoire thermique influe sur la diffusion de Al liquide à l'interface Al/Ti?*
 (en cours de développement)

Exemple : un profil de diffusion de Al dans l'interface avec la zone solidifiée riche en Ti pour la soudure réalisée sous 5 kW et 6,6 m/min avec un décalage de 0,2mm vers A5754.



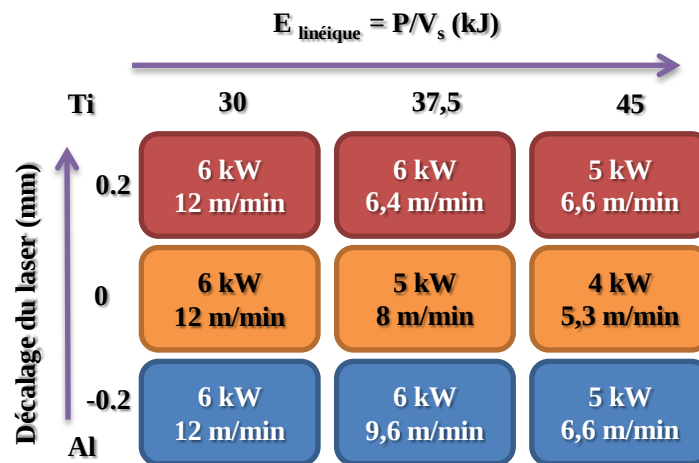
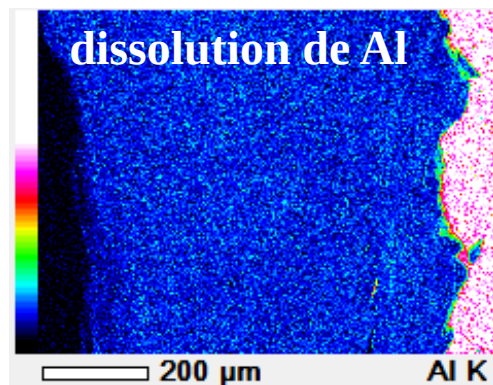
☐ *Approche thermo-diffusionnel qui ne convient que pour les interfaces lisses.*



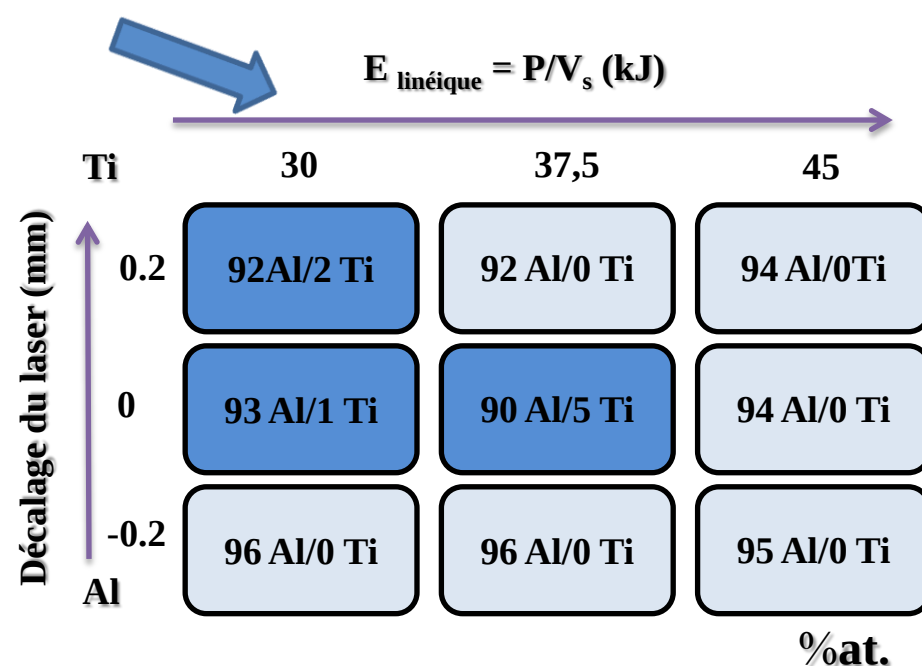
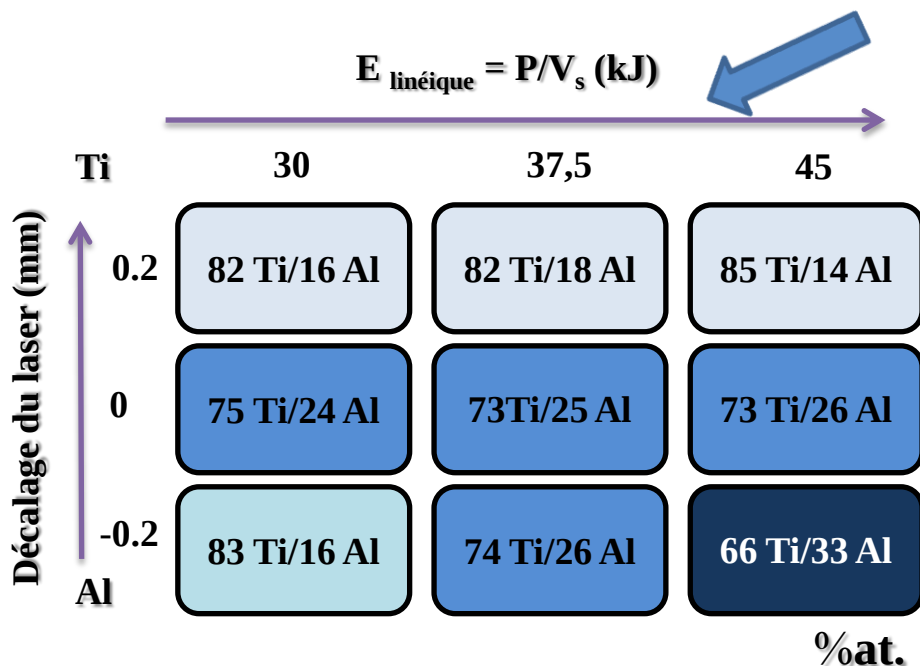
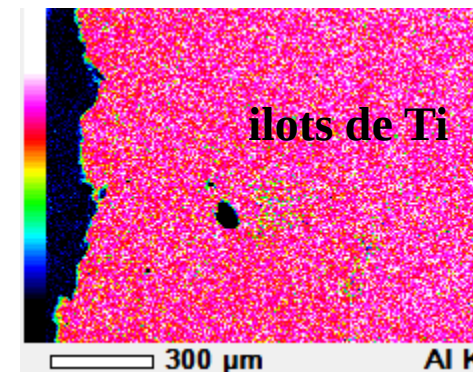
- ☐ Très peu du mélange entre les matériaux fondus
- ☐ L'interface entre les ZF des trois types : « lisse », « malaxée », « fissurée ».
- ☐ Le déplacement du capillaire vers A5754 permet d'obtenir l'interface de type « lisse » sous réserve de la vitesse du soudage inférieure à 10 m/min.
- ☐ L'étude numérique démontre que la morphologie de l'interface est déterminée par
 - ☐ la position du capillaire
 - ☐ la vitesse du soudage
- ☐ L'approche thermo-diffusionnel permet d'estimer la taille de l'interface diffusive de type « lisse ».
- ☐ La création du modèle 3D est en cours.

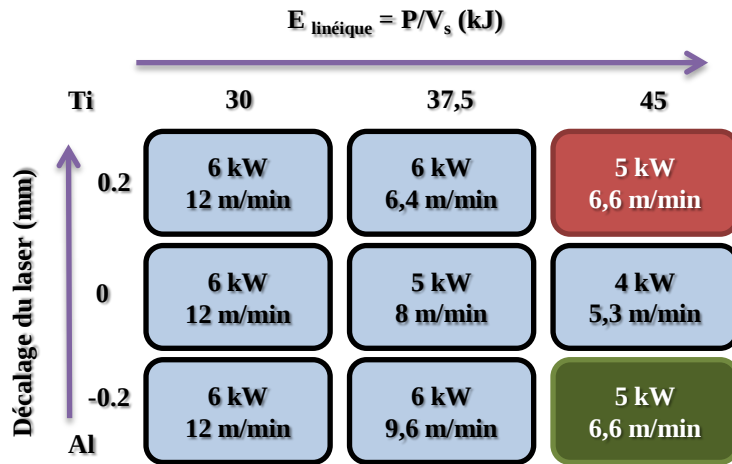
Merci de votre attention!

Zone riche en Ti



Zone riche en Al





- ☐ Phases identifiés sur les surfaces de la rupture et la hauteur relative de leurs pics isolés:

Phase	2θ	Hauteur relative, %	
		Int. lisse	Int. fissurée
Al	45,20	100	59,26
AlTi, Al ₃ Ti ₂ , Al ₂ Ti, Al ₃ Ti	45,83	26,27	100
Al ₂ Ti	53,76	2,27	7,33
Al ₃ Ti	55,69	6,15	24,8

