



Vendredi 04 mars 2016

Étude des **mécanismes de rupture** des **soudures** des **alliages d'aluminium 2219** par la technique de laminographie X pour application aérospatiale

EL KHOUKHI DRISS

Tuteurs académiques: MADI Yazid, MORGENEYER Thilo

Tuteur industriel: BORZEIX Julien



Introduction aux alliages d'aluminium pour corroyage

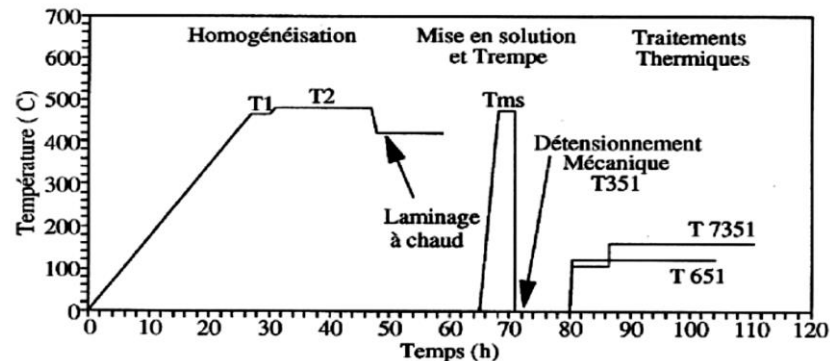
- Désignation des alliages d'aluminium pour corroyage

Série	Désignation	Élément d'alliage principal
Série 1000	1XXX	99 % d'aluminium au minimum
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)

- Composition chimique en pourcentage massique de l'alliage 2219 selon ASME Standards

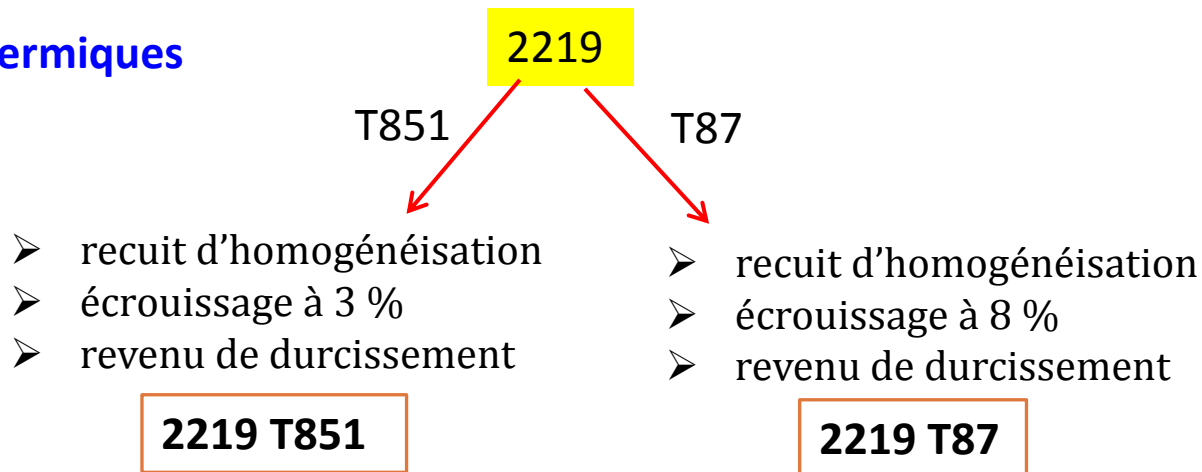
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	V	Zn	Zr	Ti	Al
max	0.20	0.30	6.8	0.40	0.02	0.15	0.10	0.25	0.10	le reste
AMSE 4295B										
min	--	--	5.8	0.20	--	0.05	--	0.10	0.02	
Echantillon	0.04	0.05	6.10	0.26	0.02	0.12	0.06	0.16	0.03	le reste

- Exemples de traitements thermiques



Choix des matériaux et traitements thermiques

Traitements thermiques



Propriétés mécaniques

ASME	Traitement thermique	Rm (MPa)	Re (MPa)	A (%)
	2219 T37	393	317	11
	2219 T62	414	290	10
	2219 T851	455	352	10
	2219 T87	476	393	10



Saturn-II

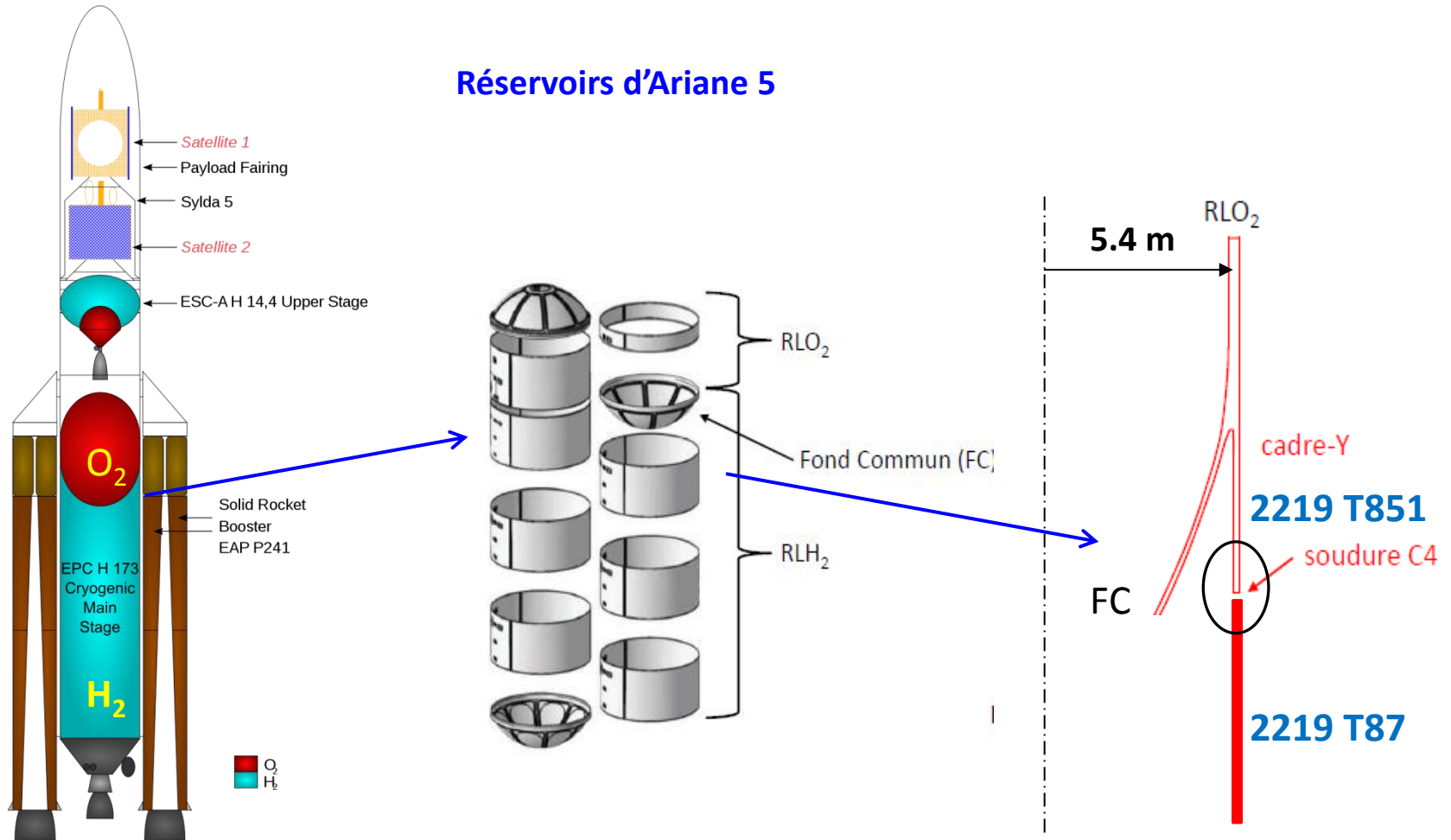


Thor-Delta

Propriétés mécaniques à basse température

ASME	Traitement thermique	T (°C)	Rm (MPa)	Re (MPa)	A (%)
	2219 T851	-196	572	421	15
		-80	490	372	13
		-28	476	359	12
		24	455	345	12
		100	414	324	15

Contexte industriel et problématique



Problématique

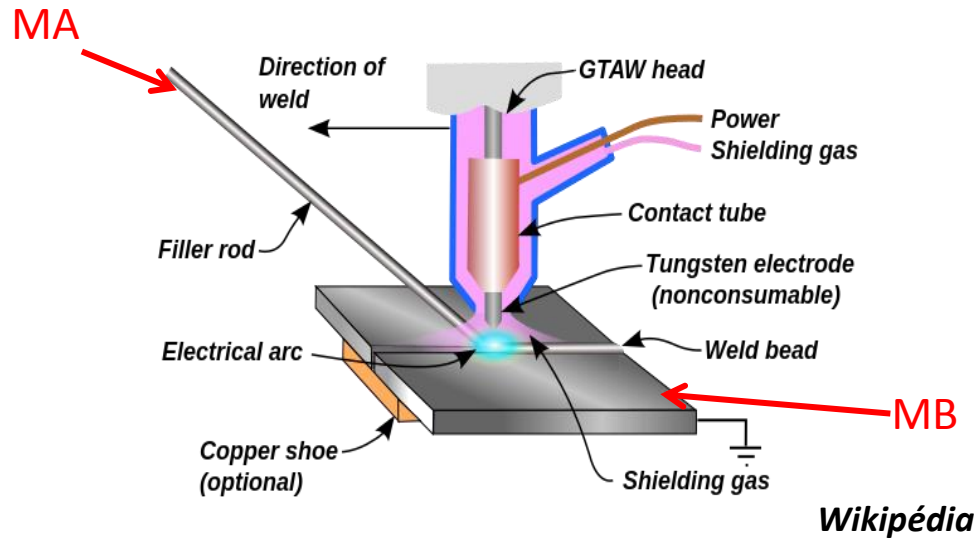
→ Baisse des caractéristiques mécaniques des soudures 2219 T87/2219 T851 à des températures cryogéniques ($20K = -253^{\circ}C$)

Contenu de l'exposé

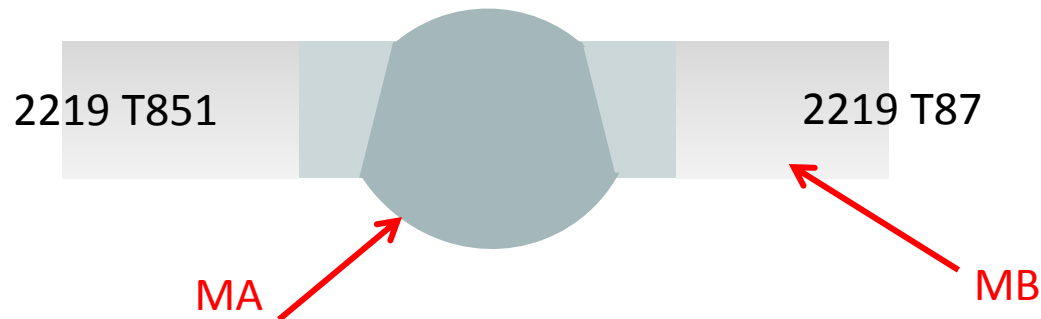
1. La soudure cadre-Y/virole (T87/T851)
 - Procédé TIG (Tungsten Inert Gas)
 - Métal de base et Métal d'apport
 - Premières observations au Centre des Matériaux
2. Le **mécanisme de rupture** par liquation
3. Méthodologie et démarche scientifique
4. Premiers résultats
 - Essais mécaniques
 - Laminographie par rayons X
5. Conclusion
6. Les prochaines étapes de l'étude

1- La soudure cadre-Y/virole (T87/T851)

Procédé TIG (Tungsten Inert Gas)



- Soudage à courant variable : empêcher la formation de la couche d'alumine
- % massique Cu > 4% => alliage d'Al soudable



1- La soudure cadre-Y/virole (T87/T851)

Métal d'apport et métal de base

	Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	V	Zr	Ti	Al
MB →	2219	0.20	0.30	5.8 -	0.20 -	0.02	0.10	0.05 -	0.10 -	0.02 -	Reste
				6.8	0.40			0.15	0.25 Zr	0.10	
MA →	2319	0.20	0.30	5.8 -	0.20 -	0.02	0.10	0.05 -	0.10 -	0.02 -	Reste
				6.8	0.40			0.15	0.25 Zr (*)	0.10	

(% massique)

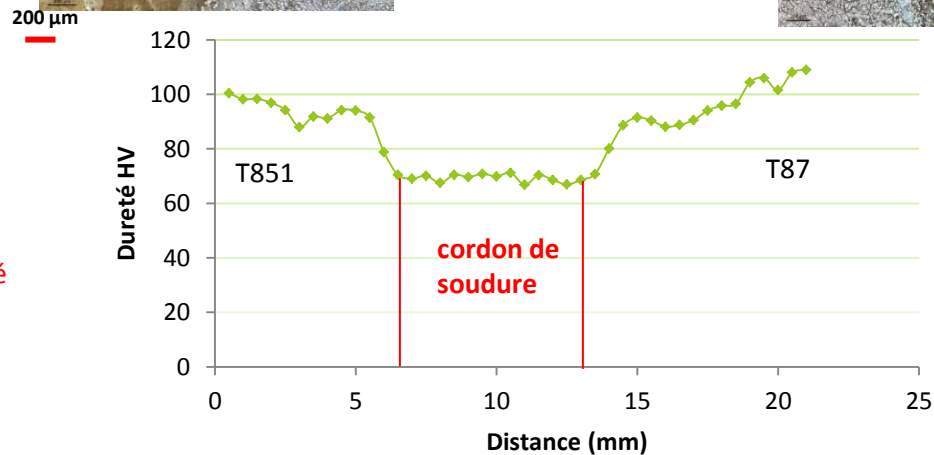
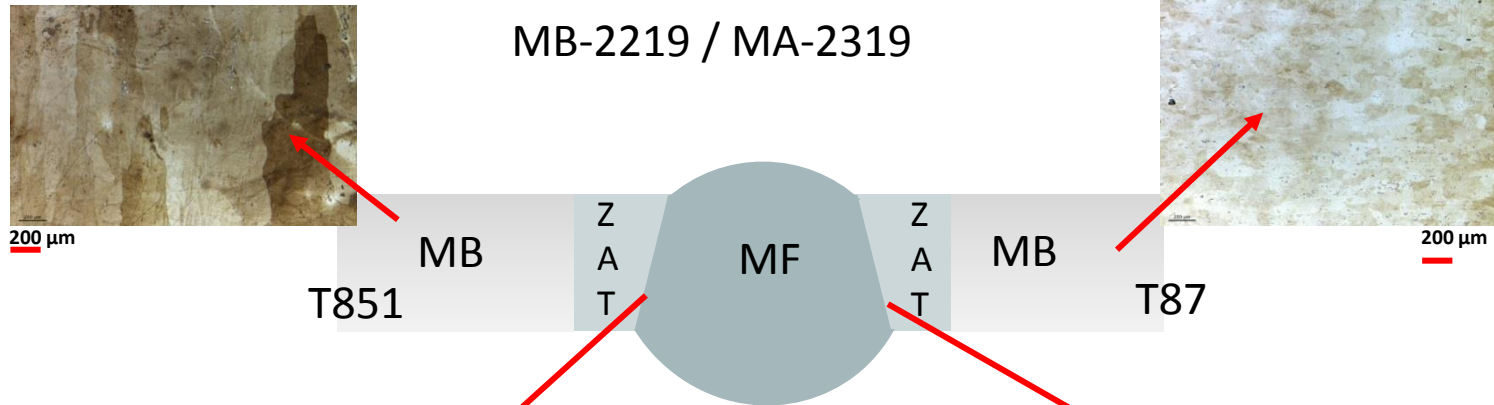
(*): 0.0008 Be max for welding electrode and filler wire only « ASME Standards ».

Base material	Highest strength	Best ductility	Salt water corrosion resistance	Least cracking tendency	Best for anodising
1100	4043	1050	1050	4043	1100
2219	2319	2319	2319	2319	2319
3103	4043	1050	1050	4043	1050
5052	5356	5356	5554	5356	5356
5083	5183	5356	5183	5356	5356

Choix du métal d'apport

1- La soudure cadre-Y/virole (T87/T851)

Analyses au Centre des Matériaux

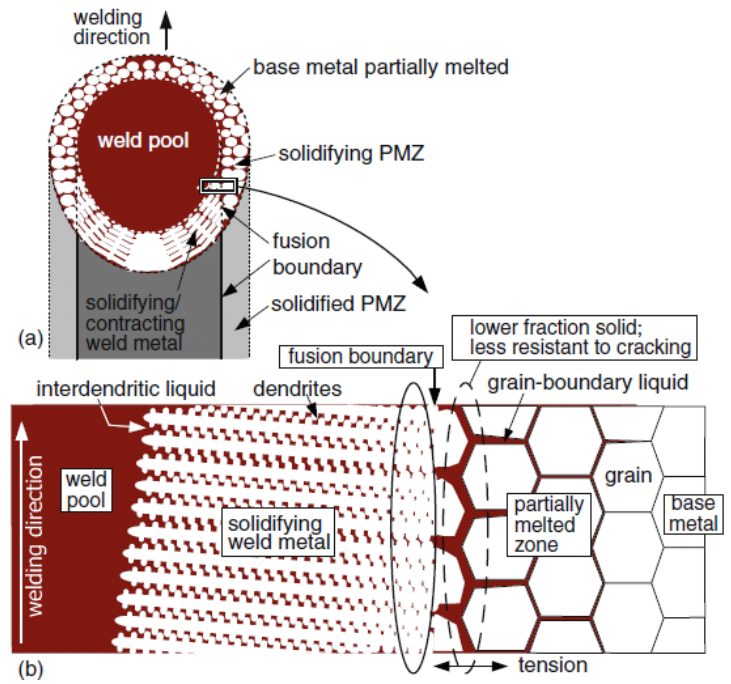
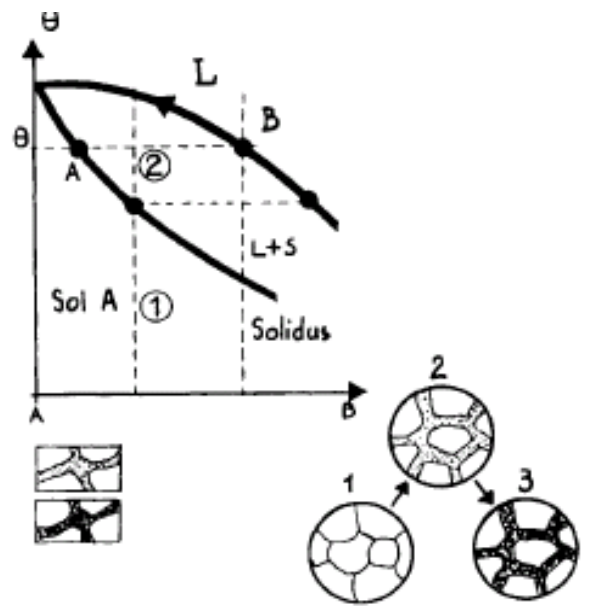


Mesures de la micro-dureté

Undermatching

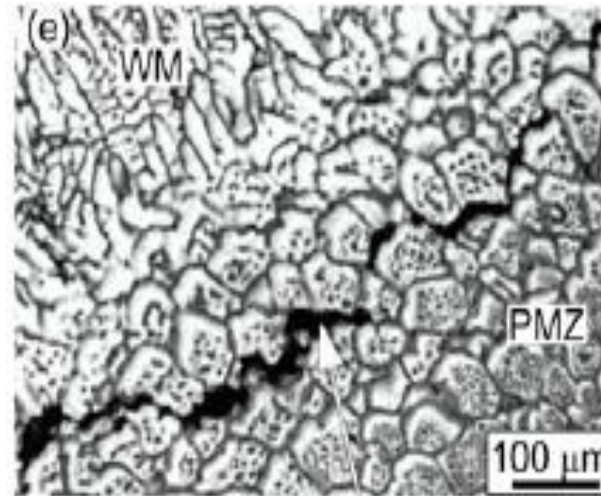
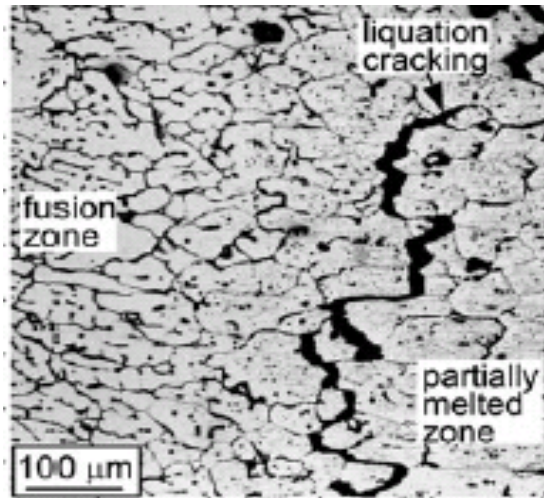
2- Le mécanisme de rupture par liquation

Cause de rupture: Décohésion au niveau des joints des grains (selon AIRBUS IW)
Phénomène de liquation liée à la présence de précipités intermétalliques Al_2Cu aux joints des grains.



[Abhay et al., 2009]

2- Le mécanisme de rupture par liquation



Al-4,5%Cu

[Huang et al., 2004]

Huang et al. ont montré que la **décohésion aux joints des grains** se fait suivant **la direction de la source de chaleur**.

Les fissures observées **s'amorcent et se propagent le long de joint de grain**

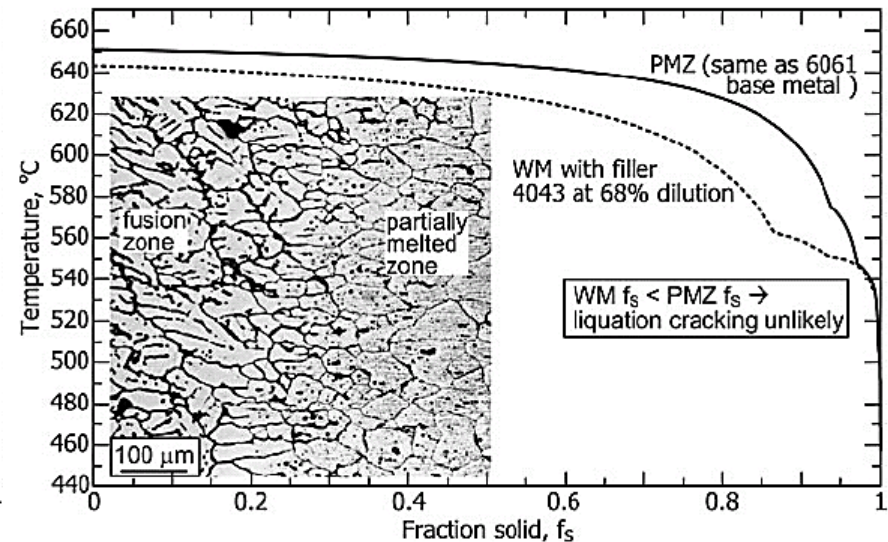
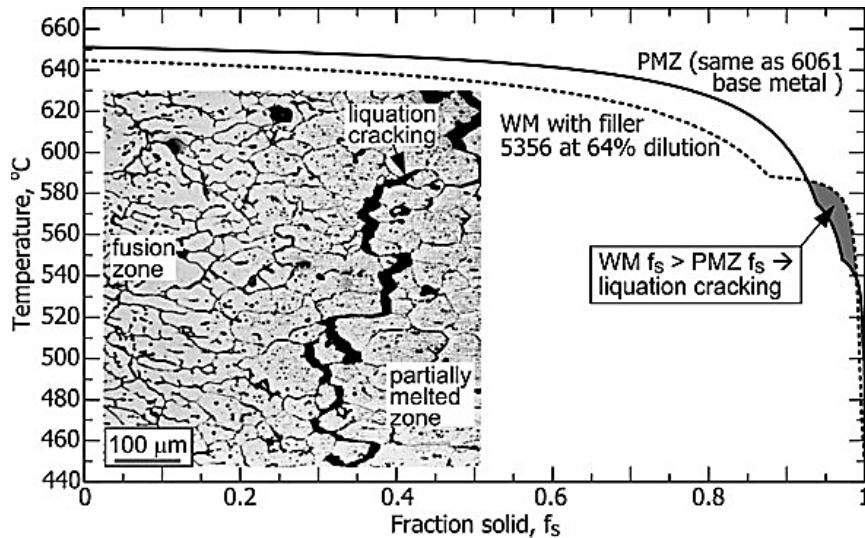
Rupture par liquation = décohésion aux joints de grains

Causes :

- métal d'apport inapproprié,
- fort retrait,
- ...

2- Le rôle de la liquation dans le mécanisme de rupture

Fraction de solide (MF) < Fraction de solide (PMZ)



[Huang C. and Kou S., 2004]



- L'effet du métal d'apport
- Optimisation de la présence de liquation (outil numérique)

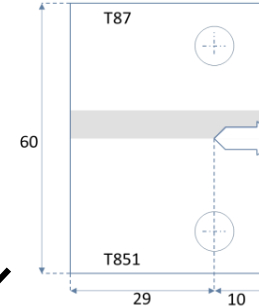
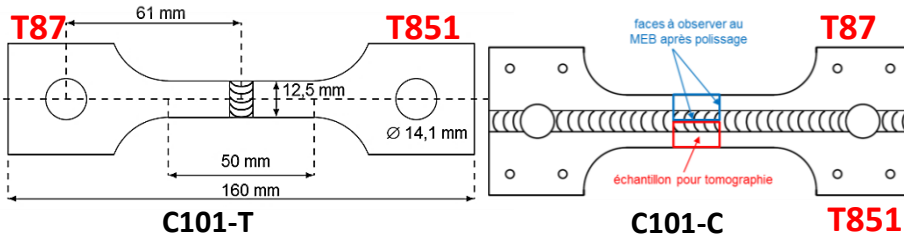
3- Démarche Scientifique

Préparation des échantillons chez ECS

Découpe des éprouvettes au Centre des Matériaux

Éprouvettes pour la traction à 20K et à 20°C

Éprouvettes de type Kahn (Essais à 20K et 20°C)



Méthodes d'analyse et d'investigation

Fractographie
Laminographie X (In-situ et Ex-situ)
Corrélation d'Image
Simulation numérique sur Zset
Observations (MEB, EBSD, ...)

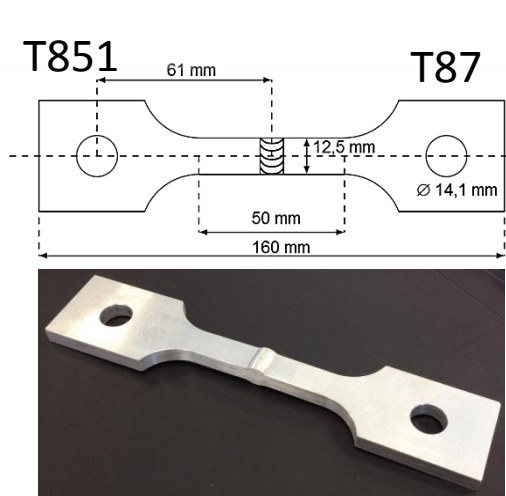
Influence de %Cu et %Fe

- Détermination des causes de rupture
- Scénario de rupture

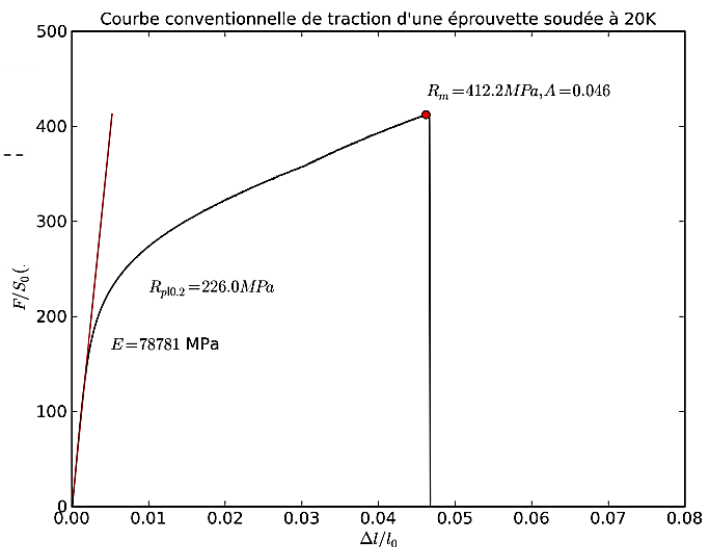
4- Premiers résultats

Essais mécaniques

■ Essais mécaniques à 20K - Essais monotones -



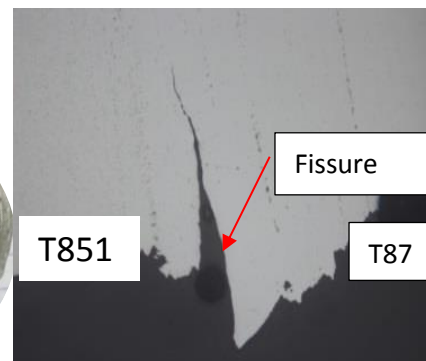
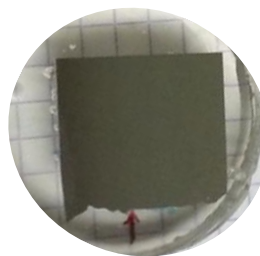
C101-T



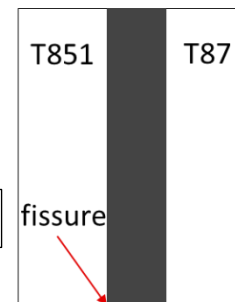
EuroCryospace



C101-C



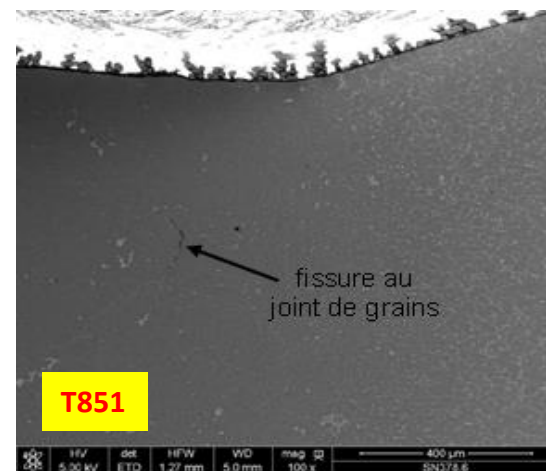
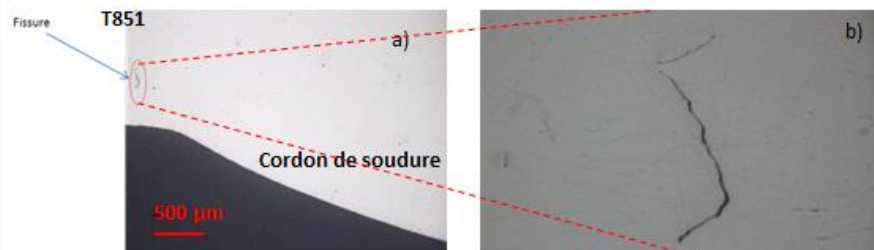
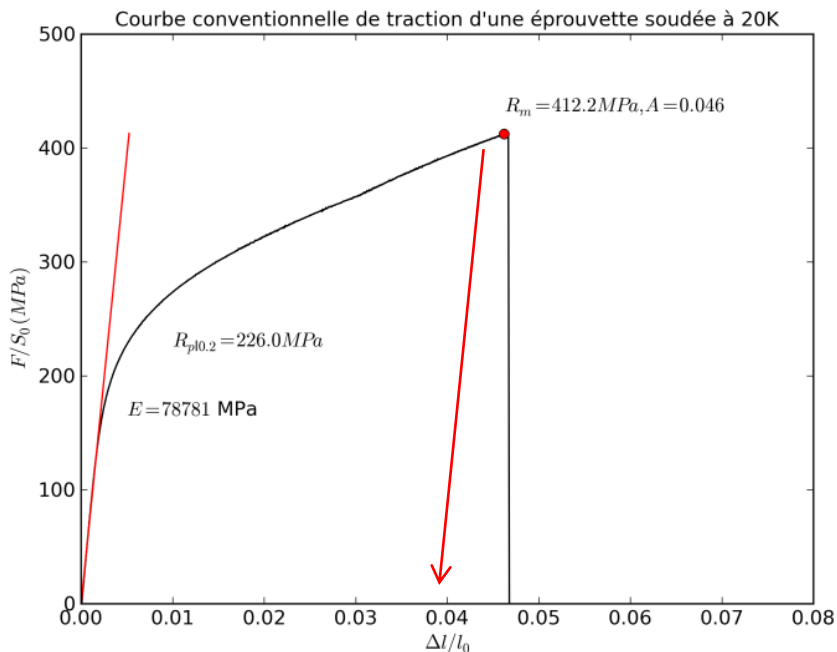
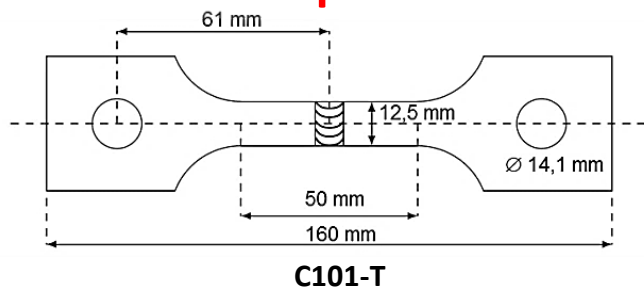
Centre des Matériaux



4- Premiers résultats

Essais mécaniques

■ Essais mécaniques à 20K - Essais charge/décharge) -



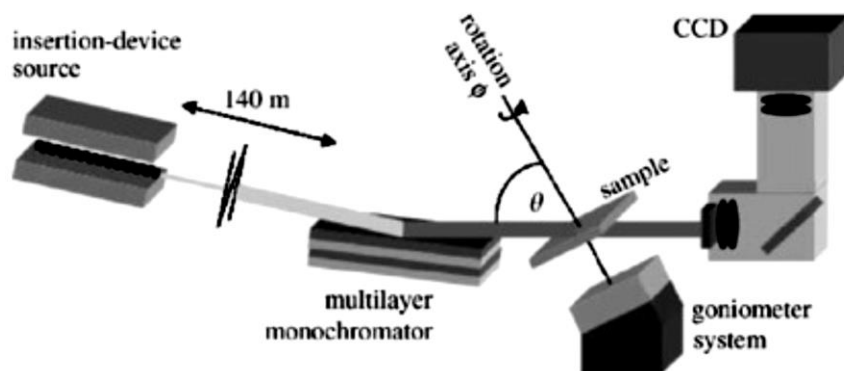
=> Rupture toujours du côté T851

4- Premiers résultats

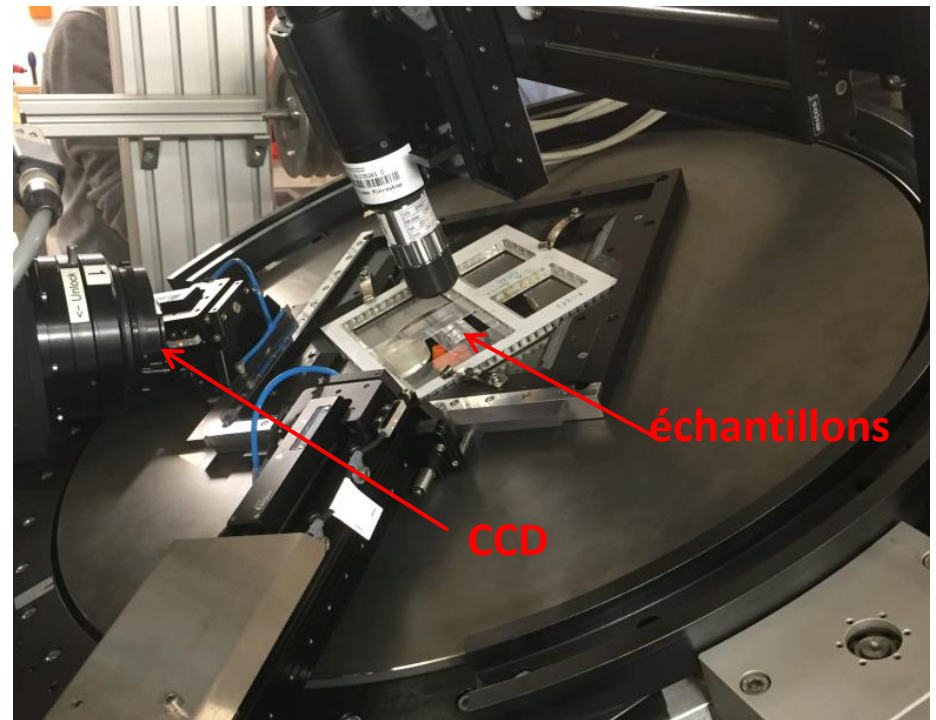
Laminographie par rayons X

ID19 "European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)", Grenoble – 10, 11,12 Février 2016

Principe



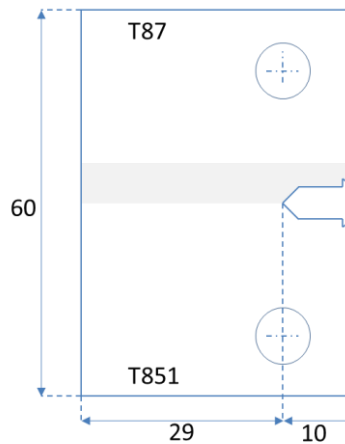
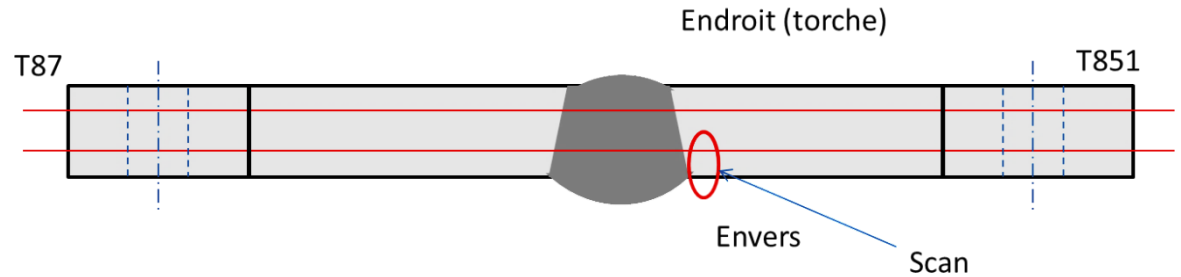
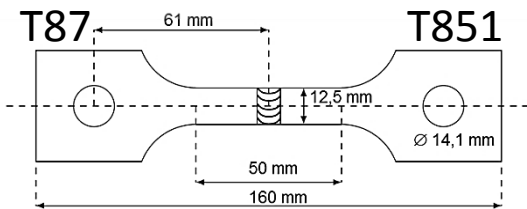
- Contrôle Non Destructif
- Image 3D de l'endommagement



4- Premiers résultats

Laminographie par rayons X

▪ Essais in-situ



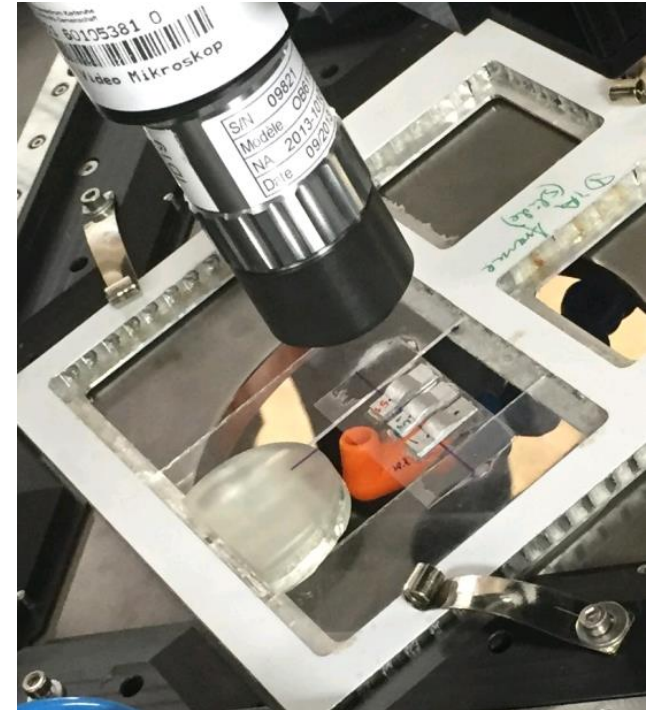
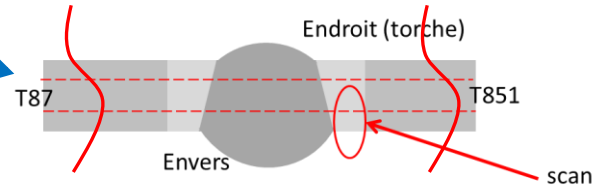
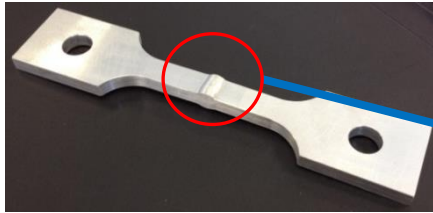
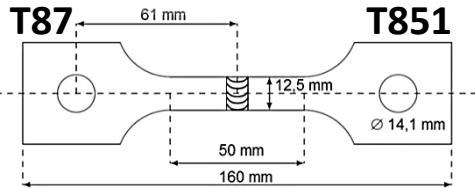
Observations réalisées en février 2016 à l'ESRF, Analyse des résultats au cours du semestre industriel

4- Premiers résultats

Laminographie par rayons X

Essais ex-situ Éprouvettes testées à 20K

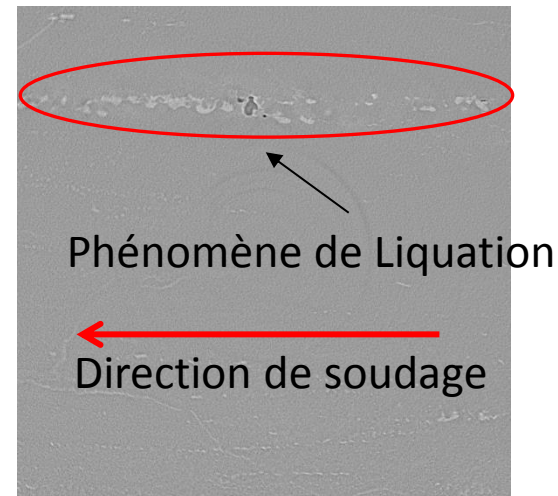
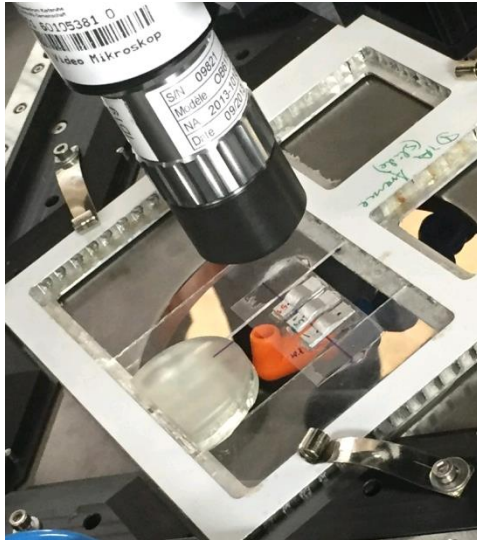
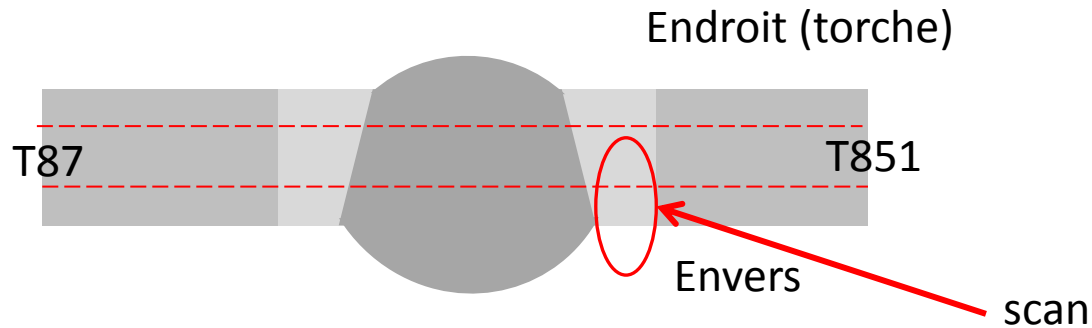
C101-T



4- Premiers résultats

Laminographie par rayons X

Essais ex-situ



Scan obtenu par laminographie X

Observations encourageantes !

5 – Conclusion

**Validation de la méthodologie
a priori concluante au vu des
premières observations**

6 – Les prochaines étapes

1. Analyse des observations par laminographie tout au long du semestre industriel
2. Formation - logiciel AVIZO pour le traitement des données de laminographie
le 11 et 12 mai 2016
3. Détermination de l'influence du taux de **Cu** et du taux de **Fe** sur le taux respectivement de précipités Al_2Cu et de liquation
→ Observations en nano-tomographie X prévues à l'ESRF **fin mars 2016**
4. L'analyse des résultats de **corrélation d'image** (contraintes locales dans les éprouvettes)
5. Calcul **éléments finis** des éprouvettes Khan pour évaluer les contraintes locales dans la soudure

Bibliographie:

Mathers, G., 2002. « The welding of aluminum and its alloys ». USA. 245 p.

Bonnet C., 2001. « Le Soudage, Métallurgie et Produits ». Air liquide/CTAS, France, 29 p.

Merci pour votre attention