



# Friction Stir Welding – principes de la technologie et cas d'applications industriels

Amarilys BEN ATTAR – Institut de Soudure

NAE Tech Hour FSW

30 Mars 2016



CE QUI NOUS LIE  
NOUS REND PLUS FORTS

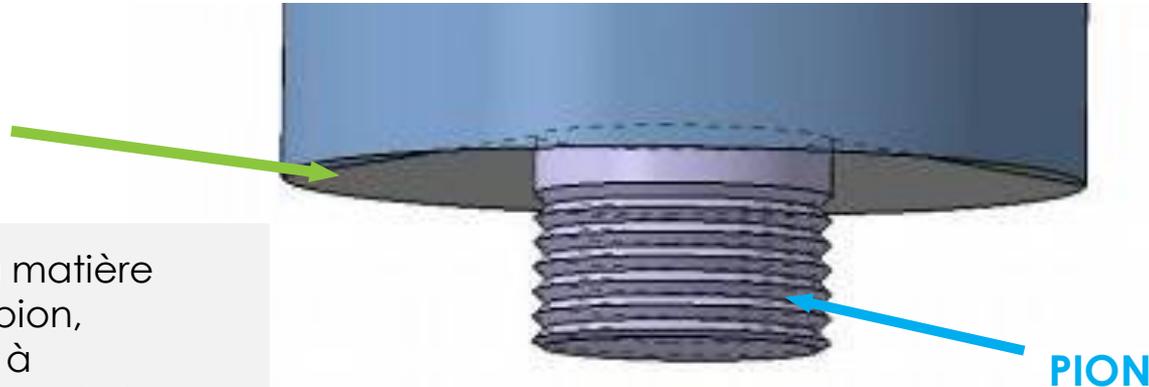


# Le procédé FSW

# Le procédé

## ▪ L'outil de soudage

### EPAULEMENT



#### Rôle

- Confiner la matière autour du pion,
- Contribuer à l'échauffement et au malaxage de la matière,
- Forgeage de la matière

#### Contact

Au niveau de la surface des pièces à assembler

#### Rôle

- Malaxer,
- Permettre une déformation plastique par rotation et par l'avance
- Extrusion de la matière

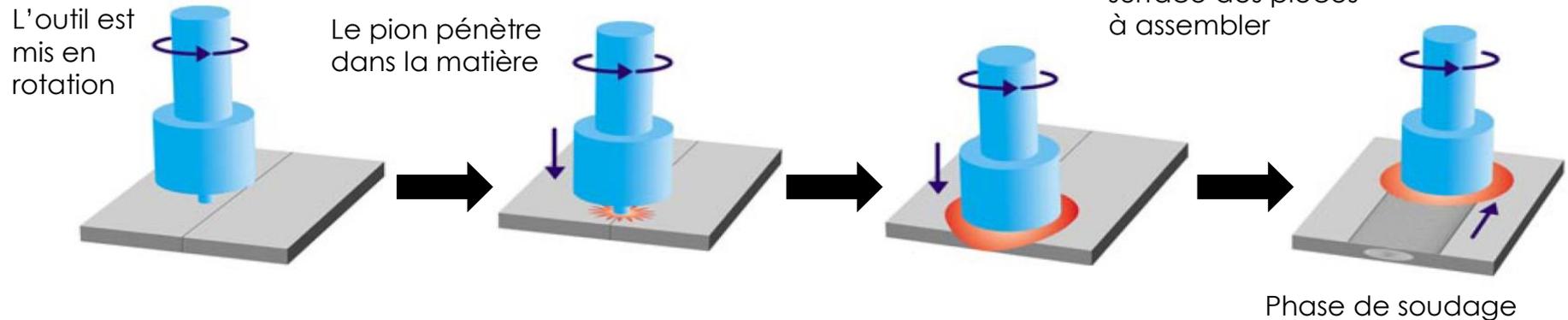
#### Contact

Au niveau de l'interface, pénètre dans la matière

# Le procédé

## ■ Phases du procédé

### – Phase de pénétration de l'outil

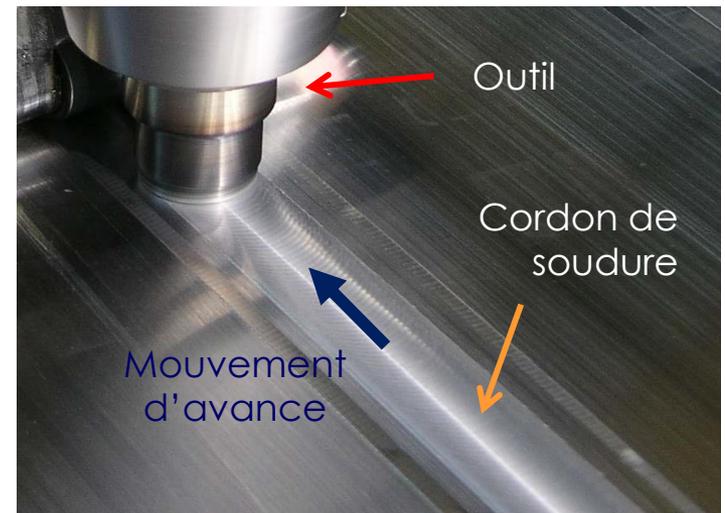


### – Phase de soudage

- L'outil avance le long du plan de joint et le cordon se forme derrière le passage de l'outil
- La soudure est réalisée de proche en proche

### – Phase de retrait

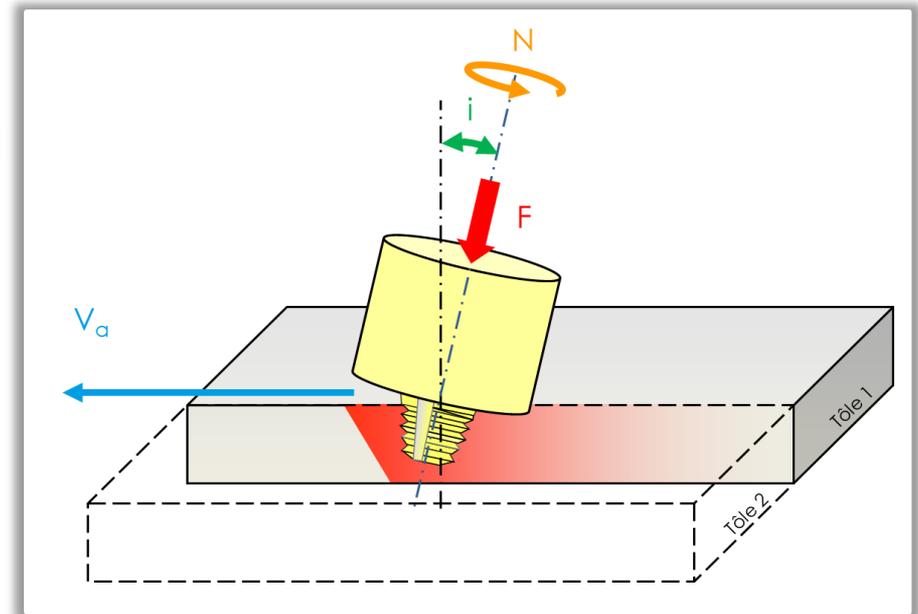
- selon le type d'outil un trou peut subsister



# Le procédé

## ■ Principaux paramètres :

- Vitesse de rotation de l'outil :
  - $N$  [tr/min]
- Vitesse d'avance de l'outil :
  - $v_a$  [mm/min]
- Effort de soudage :
  - $F$  [kN]



## ■ Autres paramètres :

- Forme et matière de l'outil
- Angle d'inclinaison de la tête de soudage :  $i$  [°]
- Mode d'asservissement de la machine (position ou effort)
- Montage de bridage

# Le procédé

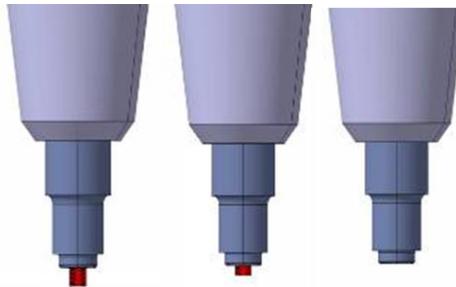
## ■ Gestion du trou de sortie :

### – Technologie conventionnelle

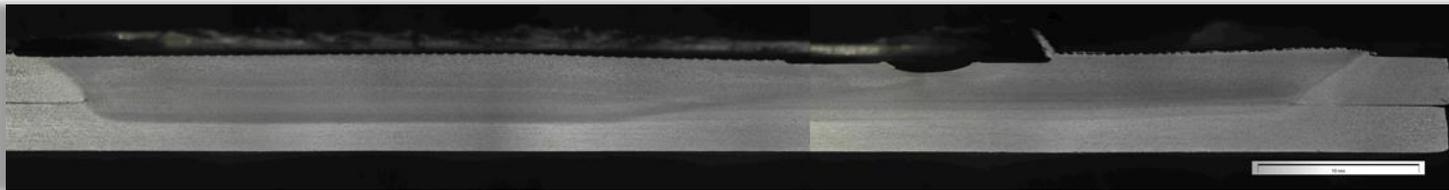
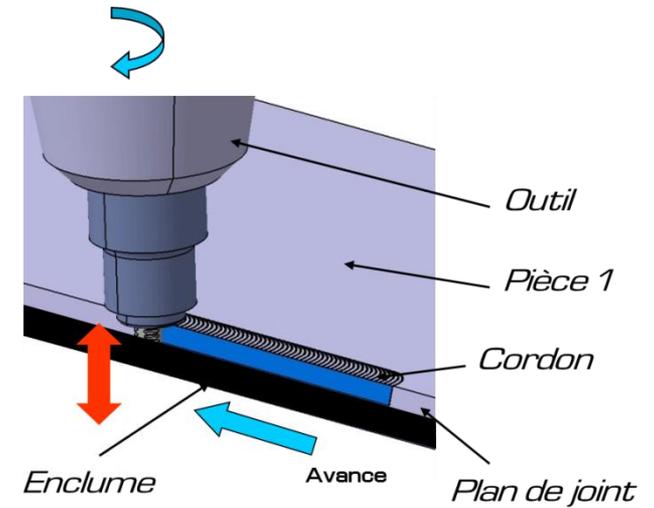
- Mise en place d'appendices d'entrée et de sortie
- Chute d'une partie de la pièce
- Rebouchage du trou

### – Technologie rétractable

- Rétractation progressive du pion
- Vitesse de rétractation à développer pour ne pas faire apparaître de défaut
- Léger enfoncement observé



## Pion Ajustable



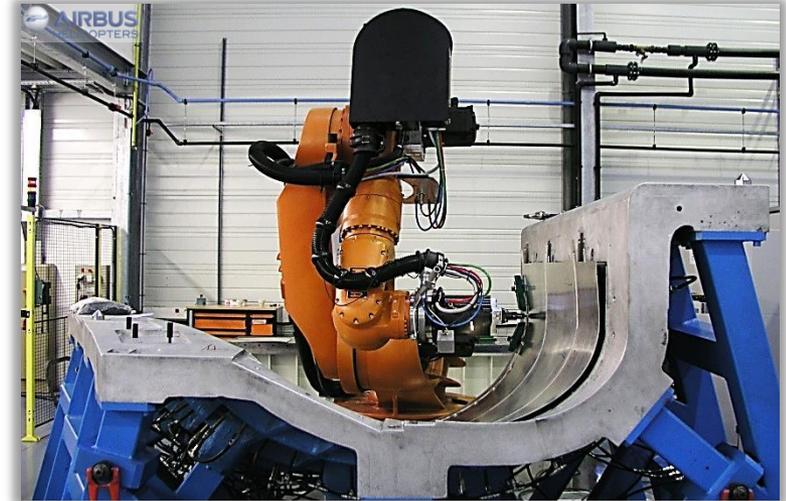
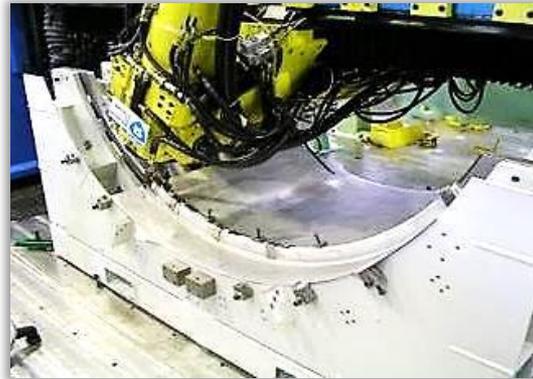
Coupe longitudinale d'une rétractation en configuration par recouvrement

## ■ Synthèse :

	Caractéristiques de la soudure	Mise en œuvre du procédé
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Soudabilité des alliages d'aluminium (notamment les séries 2*** et 7***)</li> <li>➤ Caractéristiques mécaniques du joint (tenue en fatigue)</li> <li>➤ Assemblages hétérogènes possibles</li> <li>➤ Pas de métal d'apport -&gt; maîtrise de la composition du joint</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pas de besoin en consommable (hors outil)</li> <li>➤ Déformations faibles des pièces à assembler, même pour des grandes longueurs</li> <li>➤ Soudure reproductible et automatisable</li> <li>➤ Vitesse élevée d'exécution</li> <li>➤ Pas ou peu d'usinage post soudage</li> <li>➤ Procédé « propre »</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Défaut d'accostage : pas de métal d'apport pour compenser le manque matière</li> <li>➤ Difficultés pour souder les matériaux à haut point de fusion (durée de vie de l'outil)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Maintien des parties à souder : difficultés de mise en œuvre, coût de l'outillage de bridage</li> <li>➤ Configurations limitées (tête de soudage + bridage)</li> <li>➤ Coûts d'investissement</li> <li>➤ Référentiel normatif</li> </ul>

# Le FSW à l'IS

- **Le FSW à l'Institut de Soudure**
  - Création du centre de Goin dédié au FSW en 2004 :



- Réalisations :
  - Études et développements industriels du soudage FSW :
    - phase de conception,
    - étude de faisabilité et développement,
    - réalisation de démonstrateurs (jusqu'à l'échelle 1),
    - industrialisation du procédé.
  - Études R&D : participation à des grands projets en partenariat avec des universités, des laboratoires et des industriels.

# Le FSW à l'IS

## Institut de Soudure Machine portique

### 3 technologies d'outil

**Effort de soudage max :** 89 kN

**Vitesse de soudage max :** 2 m/min

**Vitesse de rotation max :** 2 000 RPM

### Machine 5 axes

**Volume de travail :**  
X 19 m  
Y 3 m  
Z 1,2 m  
Roll  $\pm 35^\circ$   
Tilt  $\pm 15^\circ$



## Institut de Soudure Robot

### Technologie d'outil conventionnel

**Effort de soudage max :** 15 kN

**Vitesse de soudage max :** 6 m/min

**Vitesse de rotation max :** 2 500 RPM

### Trajectoires 3D (6 axes)

**Volume de travail :**  
X 2.5 m  
Y 2.5 m



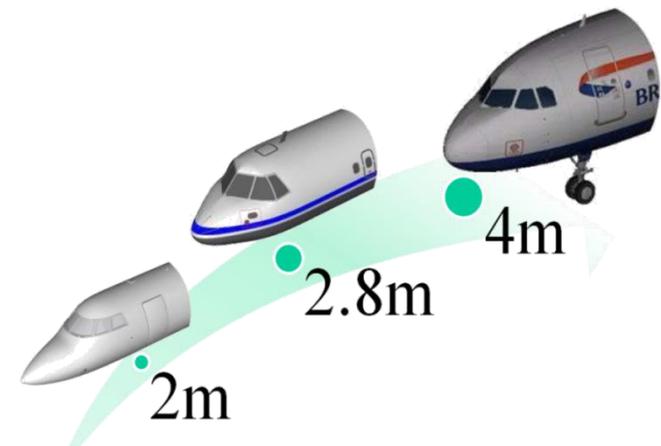


# Retour d'expérience sur deux cas de développements

# Développements pour STELIA Aerospace

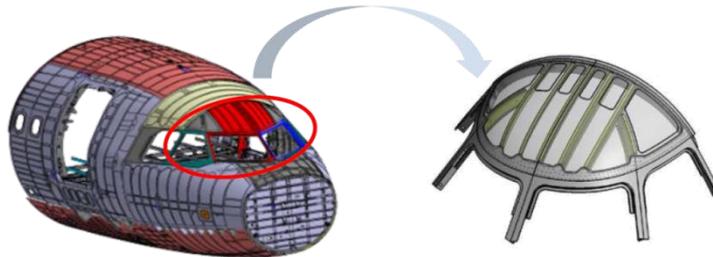
- **Projet OFFSET : Optimized Front Fuselage Structure with Enhanced Technologies**
  - Projet de recherche dédié aux structures de pointe avant de tout avion avec un fuselage de 2 à 4 m.
  - Projet 100% métallique sur 4 ans (2011-2014) subventionné à 50% par la DGAC.
  - Objectifs : développer de nouvelles « briques technologiques »
    - Limiter les coûts d'assemblage
    - Gagner de la masse

**STELIA**



# Développements pour STELIA Aerospace

STELIA



## Application : Soudage de 7 raidisseurs sur une peau casquette

Aluminium 7xxx et 2xxx

Configuration par recouvrement  
homogène (2 mm) et à clin  
hétérogène (3 mm)

Caractérisation  
mécanique des  
assemblages en  
statique, fatigue,  
corrosion

Utilisation du  
pion  
rétractable

Essai de choc  
à l'oiseau

Utilisation de  
la  
spécification  
Airbus

Trajectoire  
double  
courbure

# Développements pour STELIA Aerospace

## ■ Configurations de soudage :

- 2 configurations
- Développements effectués sur géométries représentatives :



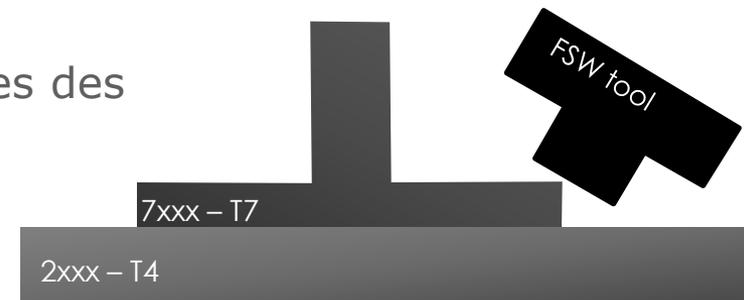
FSW : recouvrement homogène



## ■ Paramètre de soudage :

- Développés pour les 2 configurations
- Développés pour les phases de rétractation (run in et out)
- Validés suivant les propriétés mécaniques des assemblages

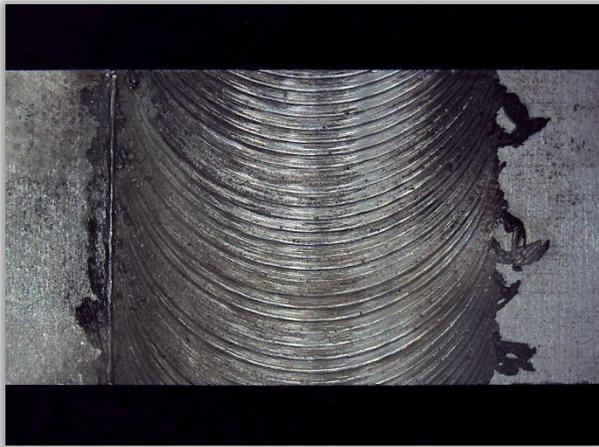
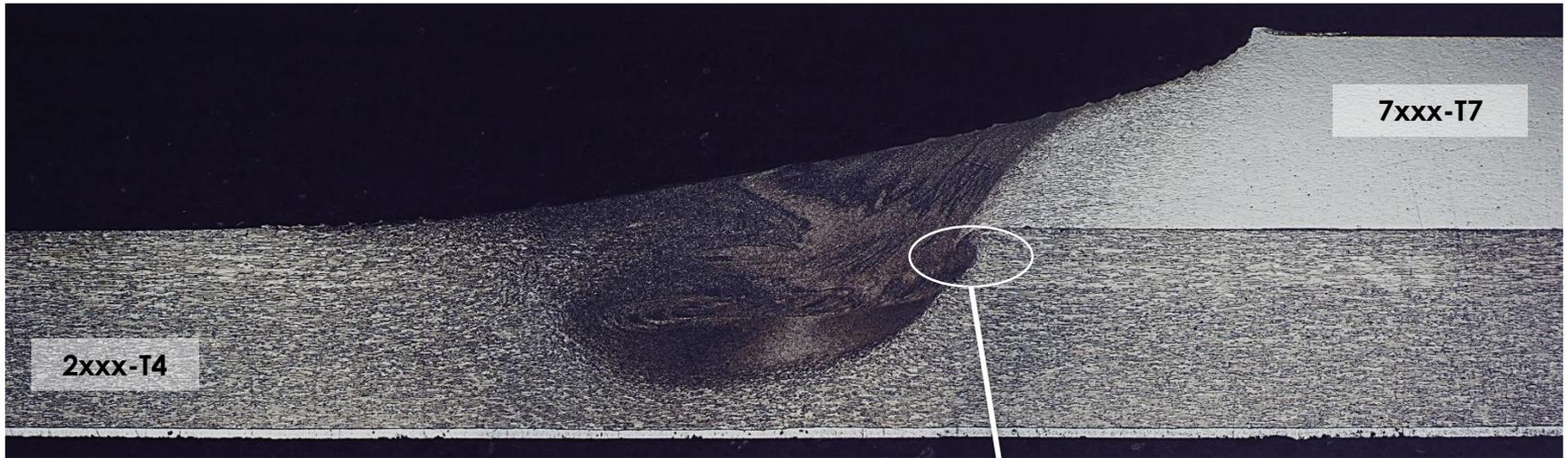
FSW : à clin hétérogène



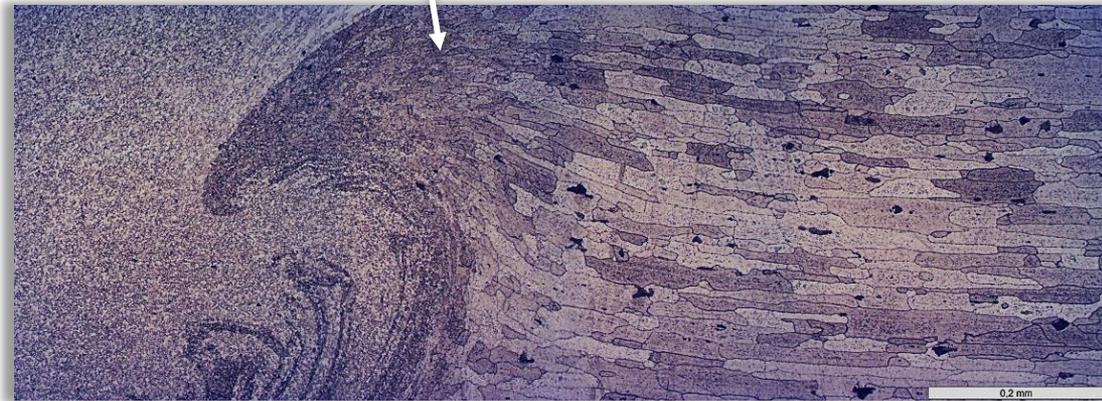
Éprouvette de traction



# Développements pour STELIA Aerospace



Vue macroscopique de la surface de la soudure



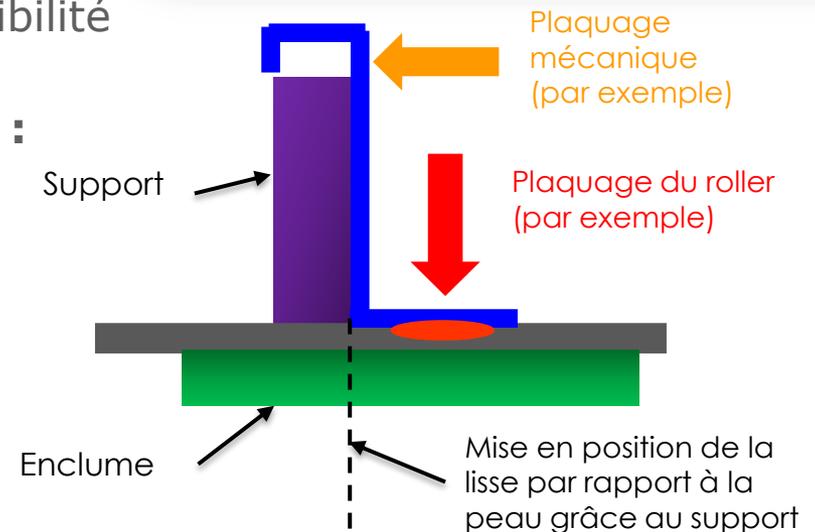
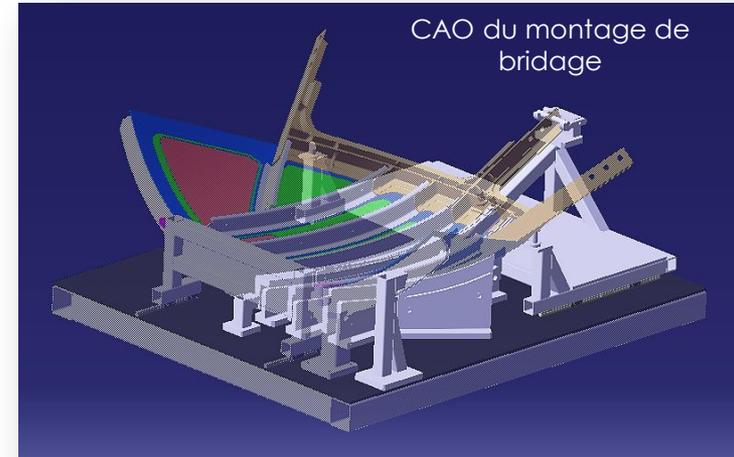
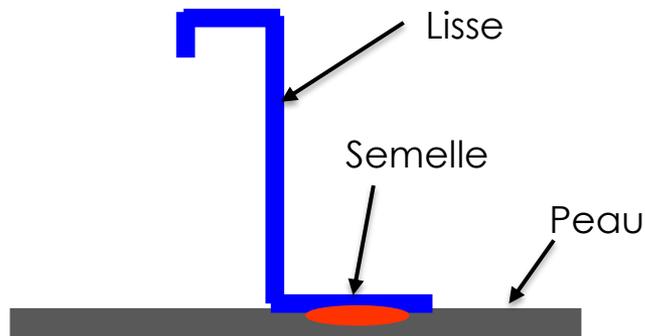
Observations microscopiques (SZ / TMAZ / HAZ – 2xxx)

# Développements pour STELIA Aerospace

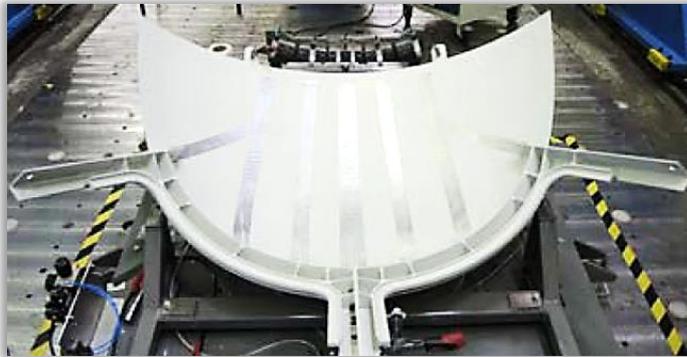
## ■ Bridage :

- Identification des degrés de liberté à bloquer,
- Contact des éléments à souder sur l'enclume et contact des éléments à souder entre eux,
- Assemblage de la pièce aux autres éléments de la pointe avant,
- Adaptation de l'ensemble à l'accessibilité machine.

## ■ Principe de bridage des raidisseurs :



# Développements pour STELIA Aerospace



Peau casquette avant soudage



Configuration par recouvrement



Casquette soudée



Soudage du raidisseur central à l'Institut de Soudure

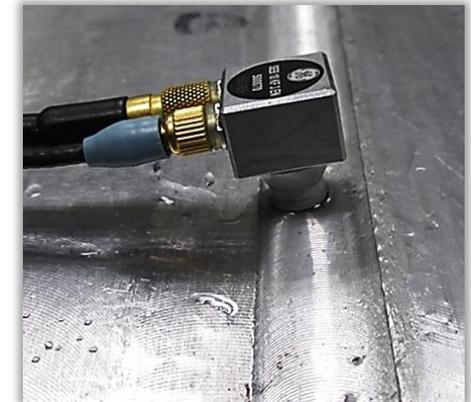
# Développements pour STELIA Aerospace

## ■ **Projet OFFSET :**

- 5 prototypes soudés :
  - 3 pour le développement
  - 1 pour le test de choc à l'oiseau
  - 1 pour la vitrine du projet
- Bonne qualité de cordons pour les 2 derniers (aucune indication CND).
- Conclusions du projet :
  - Acquisition d'un savoir faire
  - Mise en évidence des challenges en vue de l'industrialisation du procédé

CND ultrasons réalisés par l'Institut de Soudure

Homogène par recouvrement



Hétérogène à clin

## ■ **Industrialisation du FSW :**

- Besoin de prendre en compte le procédé dès les phases de conception afin de tirer tous les bénéfices qu'il peut apporter

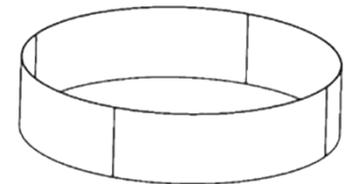
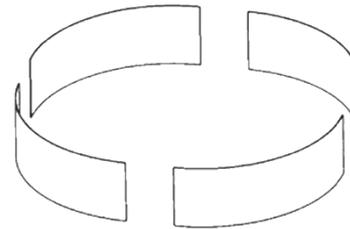
# Développements pour AIRBUS Defence & Space

- **Assemblage FSW de réservoir**
  - Programme R&T pour ARIANE 6
  - Remplacement du TIG



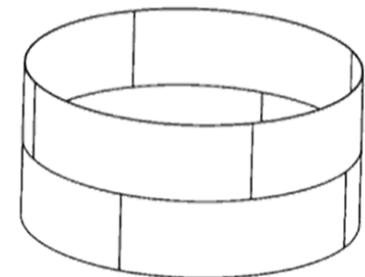
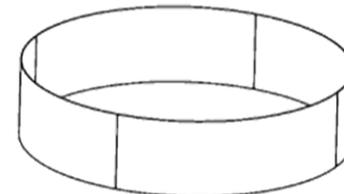
## ETAPE 1

4 panneaux soudés pour obtenir un cylindre (Ø2,3 m)

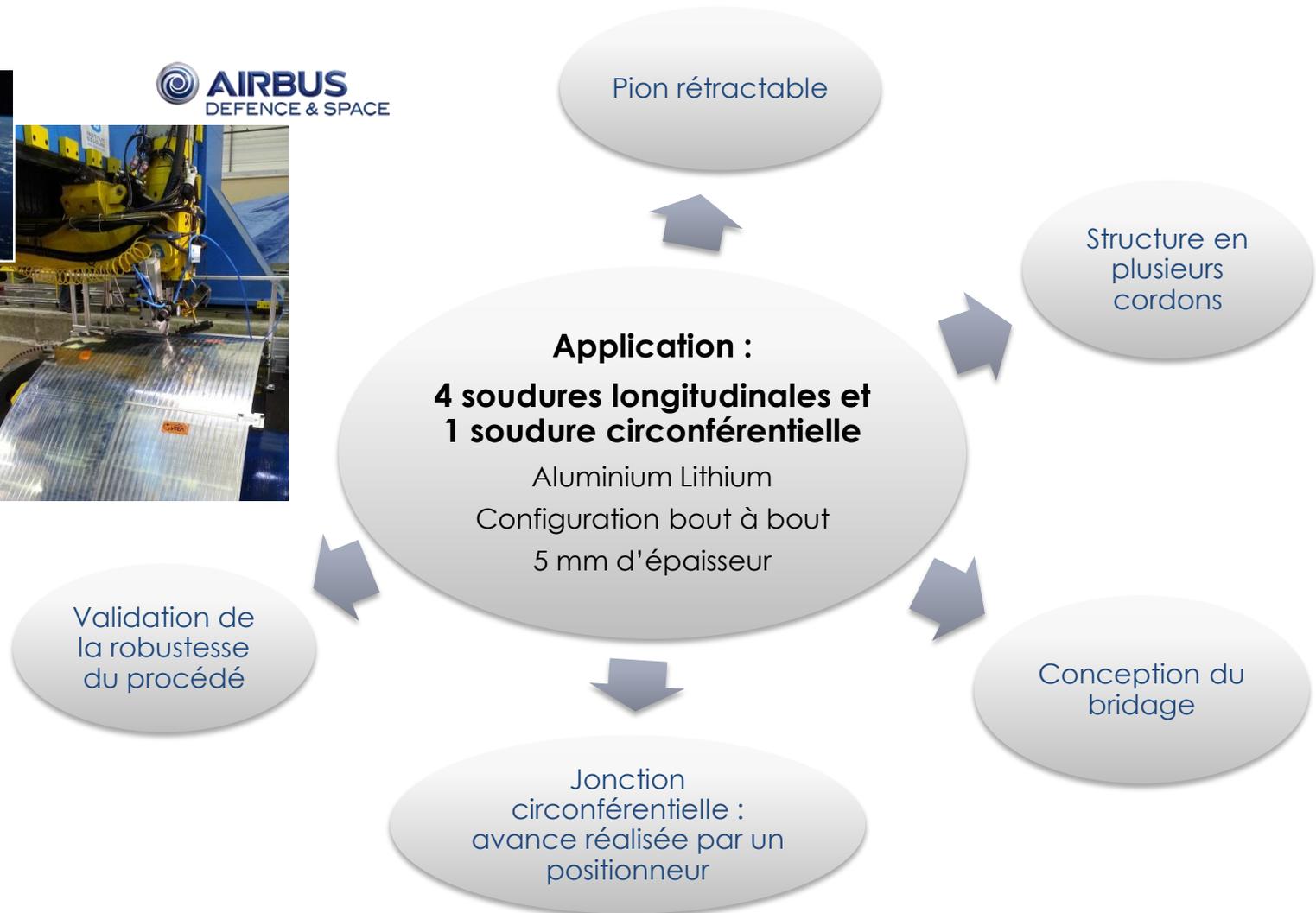
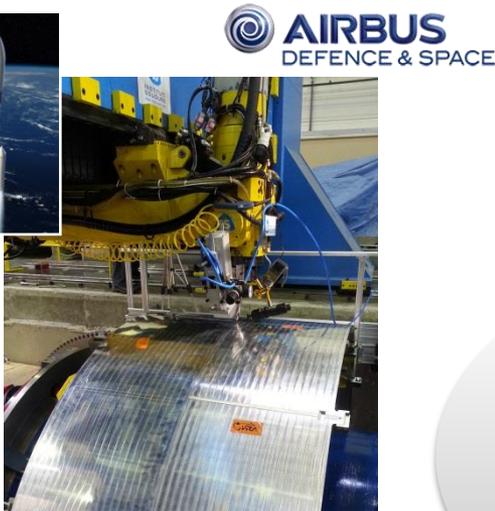


## ETAPE 2

2 cylindres assemblés par soudage circonférentiel afin d'obtenir un démonstrateur



# Développements pour AIRBUS Defence & Space



# Développements pour AIRBUS Defence & Space

## ▪ Développements :

### – Paramètres de soudage :

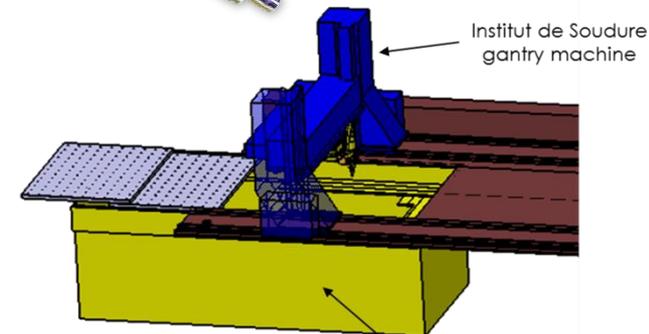
- Critère :
  - Robustesse
  - Limites dues à la mise en œuvre :
    - » Vitesse d'avance ( $>250$  mm/min)
    - » Effort de soudage ( $< 15$  kN)

### • Validation :

- Jeu entre les tôles
- Jeu entre les pièces et l'enclume

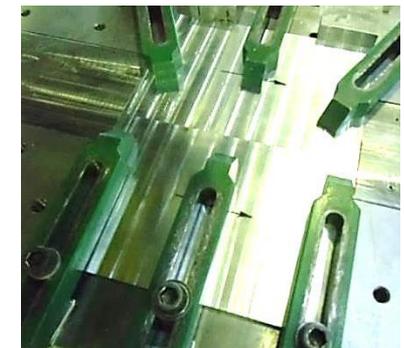
### – Conception de l'outillage de bridage qui doit :

- Assurer le contact entre les panneaux et l'enclume.
- Minimiser les jeux entre les panneaux et entre les cylindres.
- De mettre en place et débrider facilement les pièces.
- De résister aux efforts de soudage.
- De s'adapter aux moyens et au centre de l'Institut de Soudure.



Pit: 2,5 m x 3 m x 8 m

Coupe transversale d'un cordon



Essais sur coupons représentatifs

# Développements pour AIRBUS Defence & Space

- Bridage : conçu et fabriqué par RJ Industrie



RJ  
INDUSTRIE



Bridage latéral

Bridage par dépression

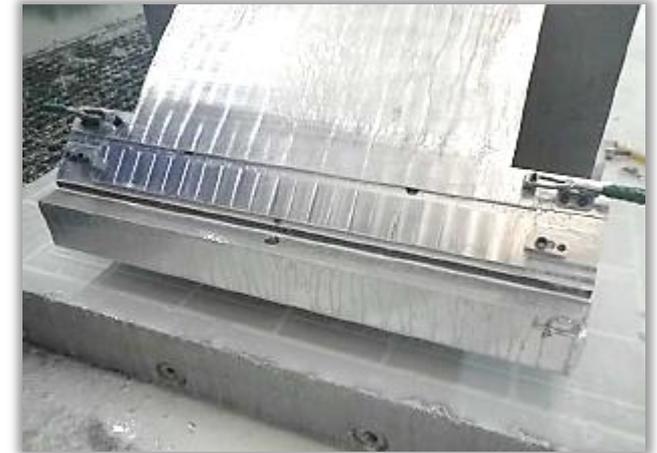
Enclume pour le soudage  
circconférentiel

Enclume pour le soudage  
longitudinal

# Développements pour AIRBUS Defence & Space

- **Prototype :**

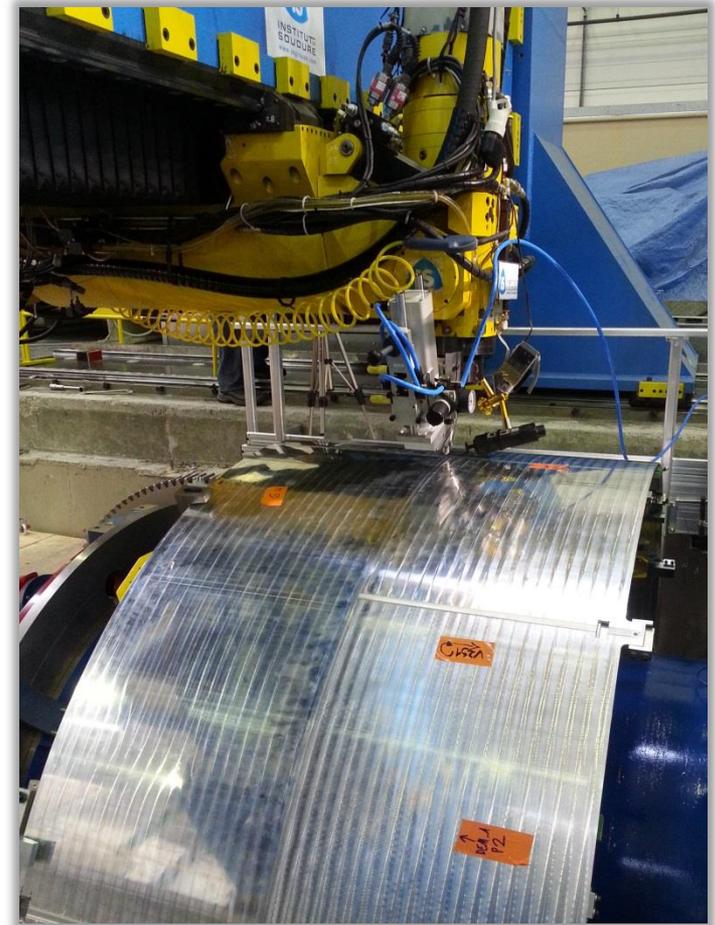
Fabrication des panneaux



Mise en place des équipements  
à l'Institut de Soudure

# Développements pour AIRBUS Defence & Space

- **Résultats :**
  - Bonne qualité des soudures (contrôles destructifs)
  - Validation de la séquence d'assemblage
  - TRL4-5 obtenu
- **Travaux à venir :**
  - Développement des procédures CND
  - Caractérisation mécanique sous conditions cryogéniques
  - Industrialisation du procédé



# Merci pour votre attention

## **Amarilyz BEN ATTAR**

Ingénieur chargé d'affaire  
Activités FSW

[a.benattar@isgroupe.com](mailto:a.benattar@isgroupe.com)

## **Institut de Soudure – Centre FSW**

Z A Aéroport de Metz  
2-4 rue Pilâtre de Rozier  
57420 Goin  
France





# Annexes

# Présentation générale

- Soudage par friction malaxage ou Friction Stir Welding (FSW)
- Développé par Thomas Wayne à l'institut de soudure britannique (The Welding Institute, TWI)

→ 1<sup>er</sup> brevet déposé en **1991**

- **Soudure par FSW :**

- Soudure de proche en proche à l'état solide :

$$T_{\text{Soudage}} < T_{\text{Fusion}}$$

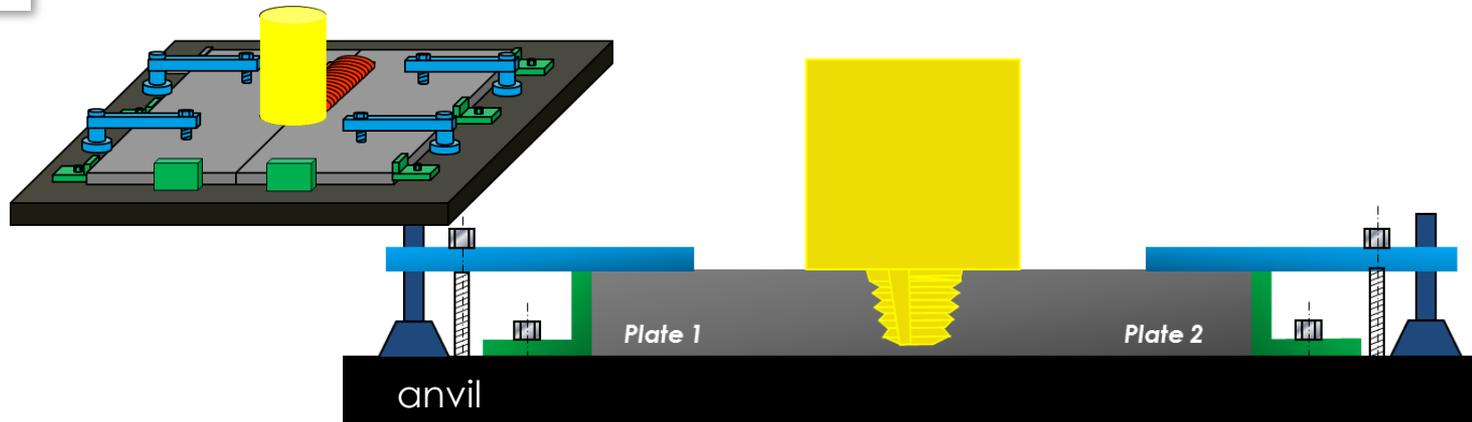
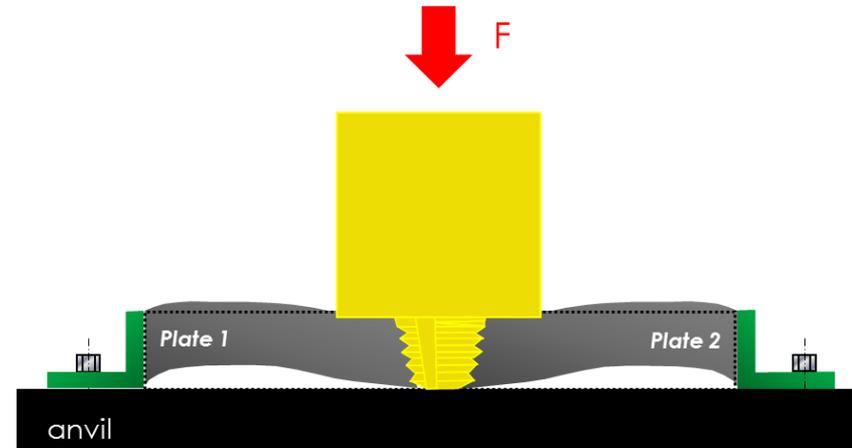
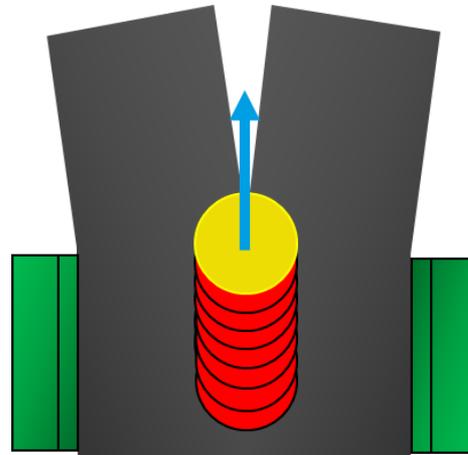
- **Brassage** et **mélange** local des matériaux des pièces à assembler



# Bridage

Efforts de soudage importants :

**Enclume et bridage nécessaires**



# Propriétés mécaniques

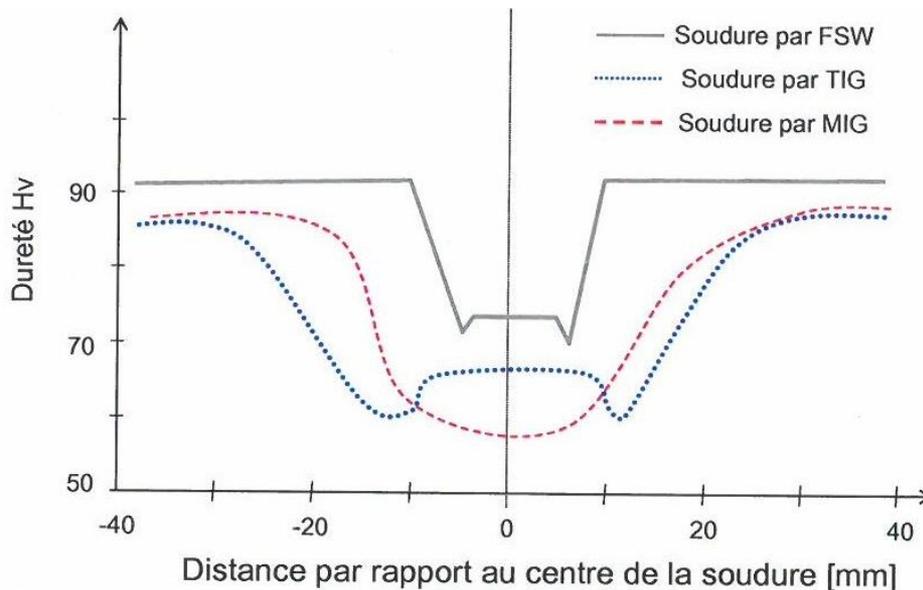
## ■ Dureté :

### – Propriétés :

- Chute de dureté dans la ZAT
- Augmentation de la dureté dans le noyau

### – Comparaison FSW – TIG – MIG :

- Etude comparative assemblage soudé en 6082 T6, épaisseur 4mm



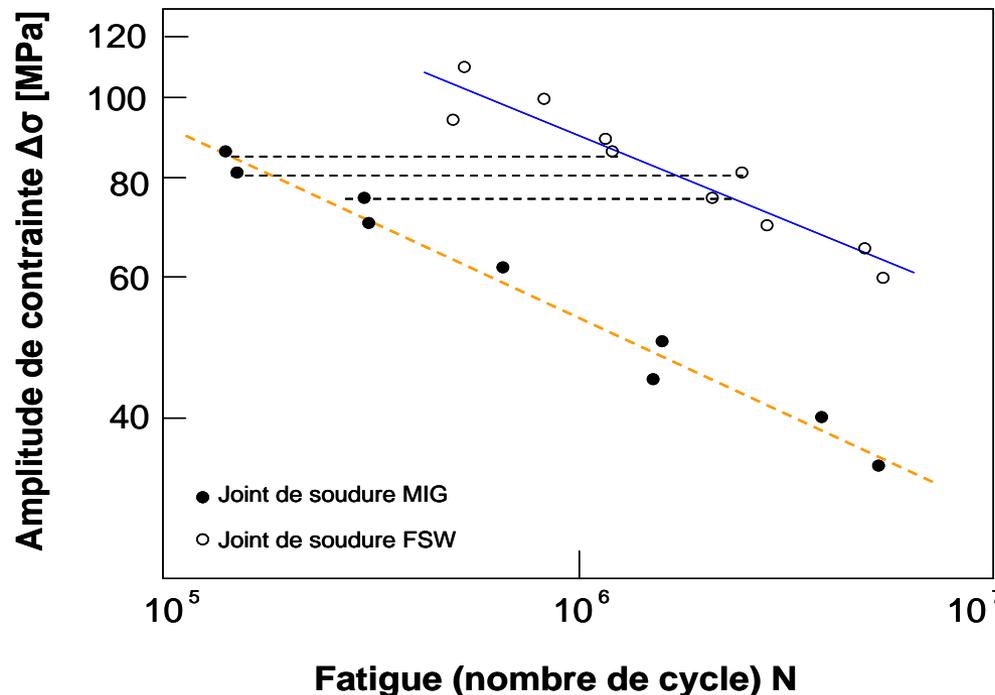
- Dureté plus élevée sur l'ensemble de la soudure
- Proportion plus faible de métal de base affecté

**Meilleures propriétés mécaniques à l'assemblage après soudage**

# Propriétés mécaniques

## ■ Fatigue

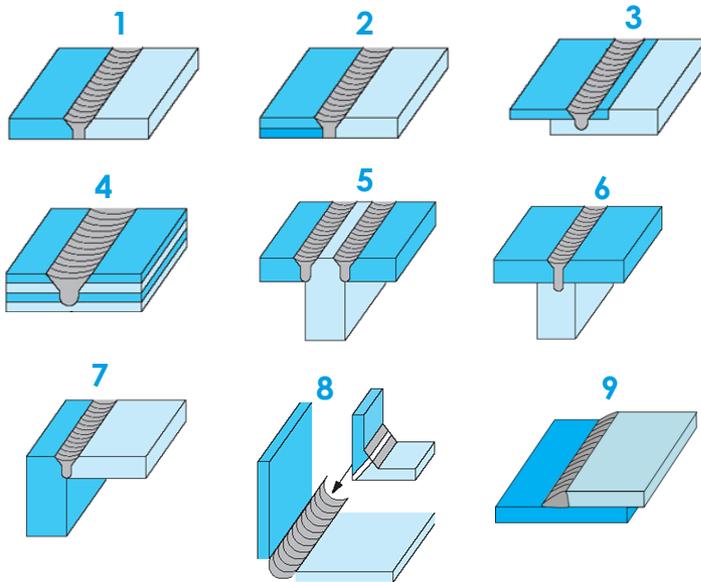
- **Meilleurs résultats** en FSW (par rapport aux autres procédés de soudage)
  - Exemples : comparaison courbes de Wöhler d'un joint de AA 5083 soudé au FSW et au MIG



Durée de vie supérieure pour les joints soudés par FSW (9 à 12 fois supérieure)

# Les types de soudures réalisables

## ■ Configurations de soudage :



- Soudage bout à bout (1)
- Soudage bout à bout avec deux plaques l'une sur l'autre (2)
- Soudage par recouvrement (3)
- Soudage par recouvrement multicouches (4)
- Soudure en T (5) et (6)
- Soudure en L (7) et (8)
- Soudage à clin (9)

# Les matériaux considérés

- **Matériaux soudables par FSW**
  - Les alliages d'aluminium : permet de souder toutes les nuances d'aluminium
  - Le cuivre et ses alliages
  - Le magnésium et ses alliages
  - Les aciers
  - Le titane et ses alliages
  - Les polymères
- **Possibilité d'assemblage hétérogènes :**
  - Différents alliages d'aluminium
  - Aluminium / Acier
  - Etc....