

Procédés d'assemblage : soudage

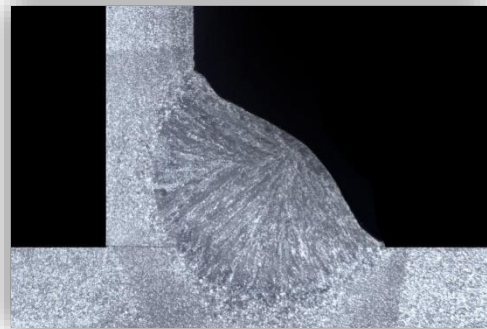
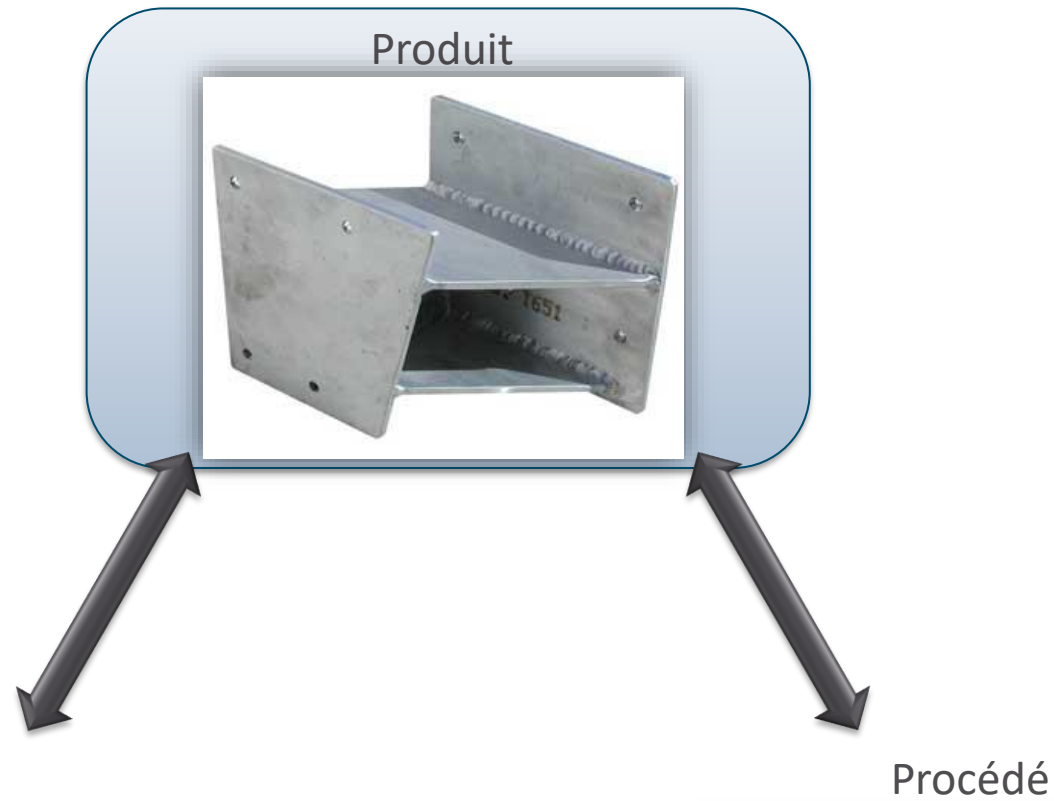
GM-3-PROFA

Équipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martinie, N. Tardif

v.2022

Assemblage par soudage



Exemples de pièces

- Bâtis mécano-soudés



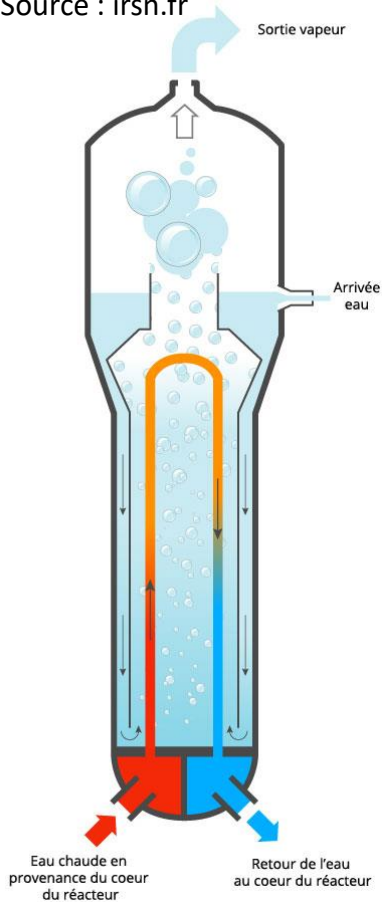
Source : mongin.eu

MONGIN

Exemples de pièces

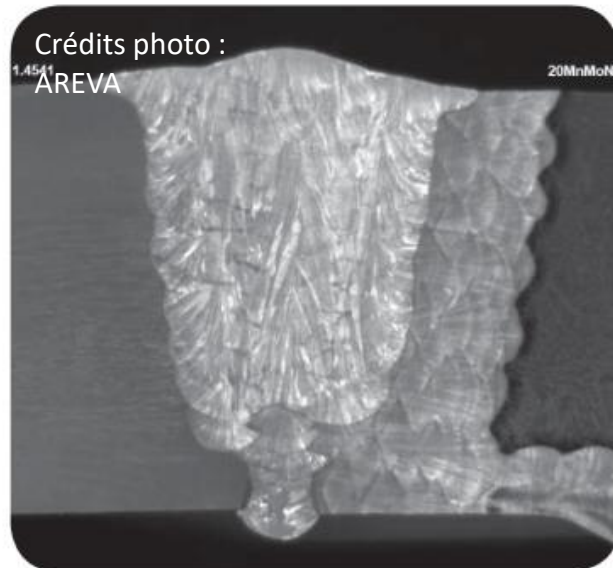
- **Éléments de générateurs de vapeur (Centrale nucléaire) – source : Framatome (AREVA)**

Source : irsn.fr



Exemples de pièces

- Éléments de générateurs de vapeur (Centrale nucléaire) – *source : Framatome (AREVA)*



Dissimilar weld between ferritic tube sheet with austenitic weld overlay and austenitic bottom dome using nickel alloy filler metal (alloy 82)



Exemples de pièces

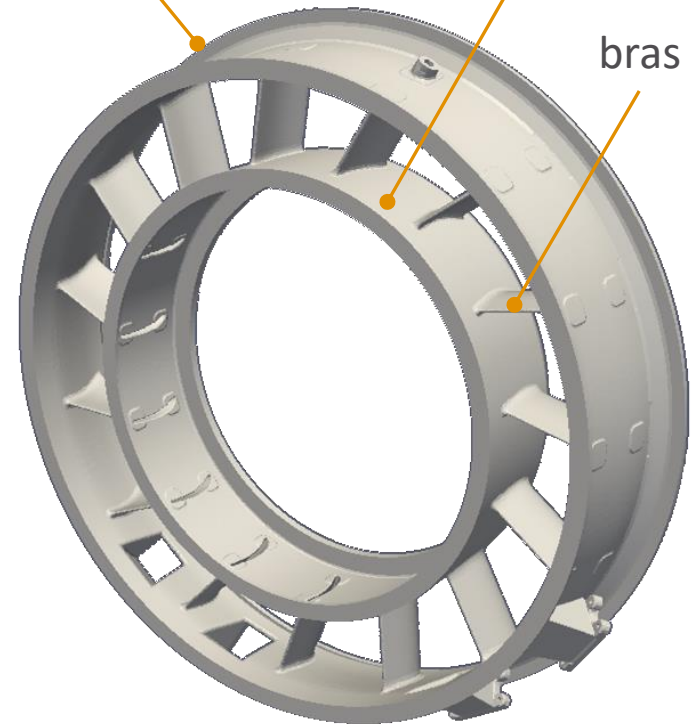
- Turboréacteur – *Source Safran Aircraft Engines*



Virole externe

Virole interne

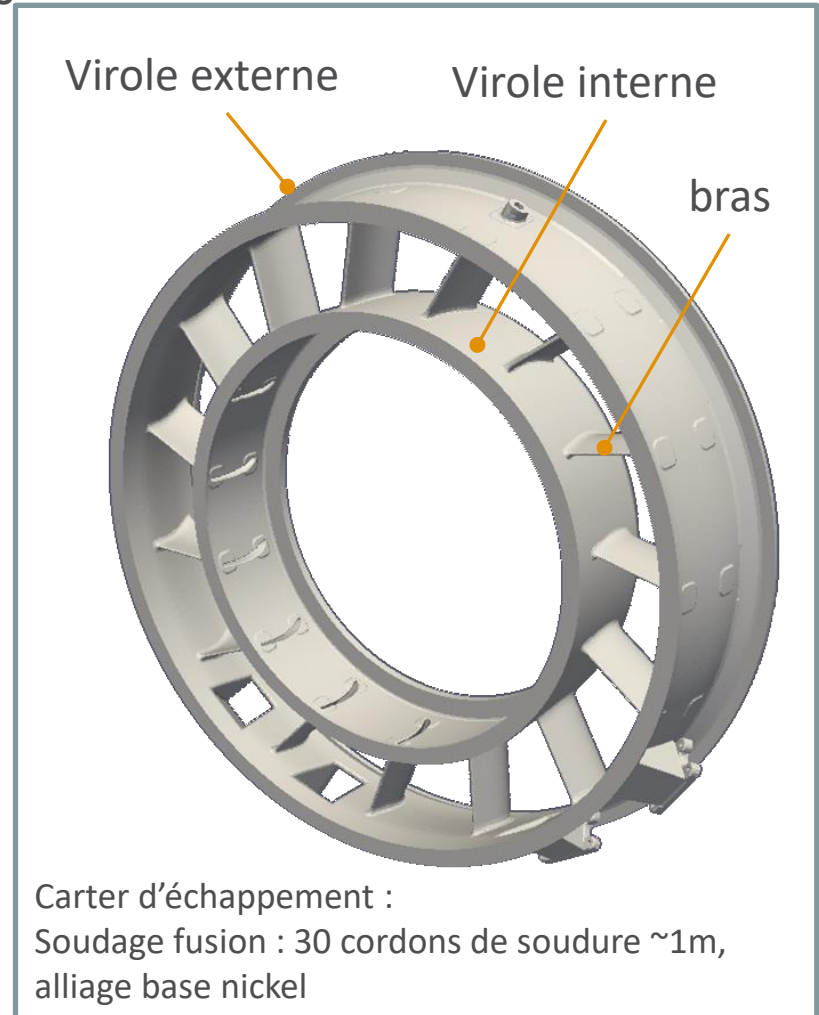
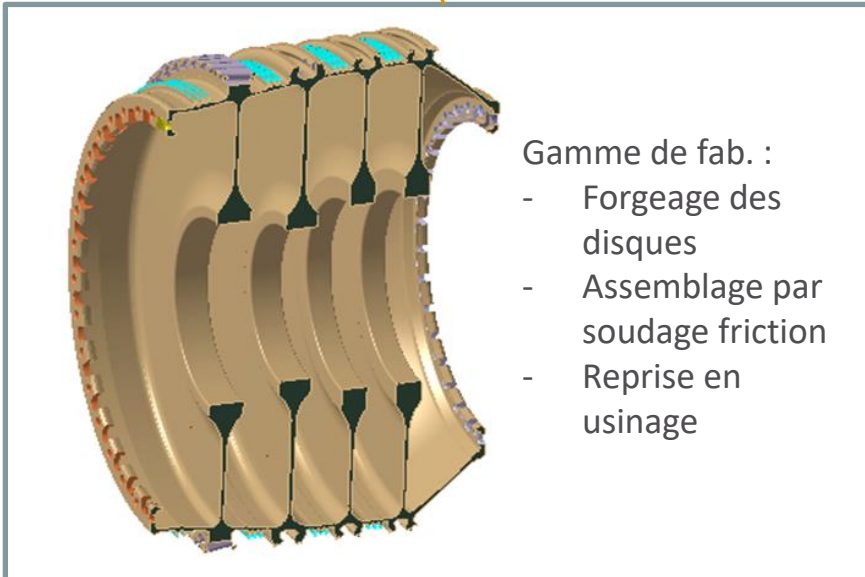
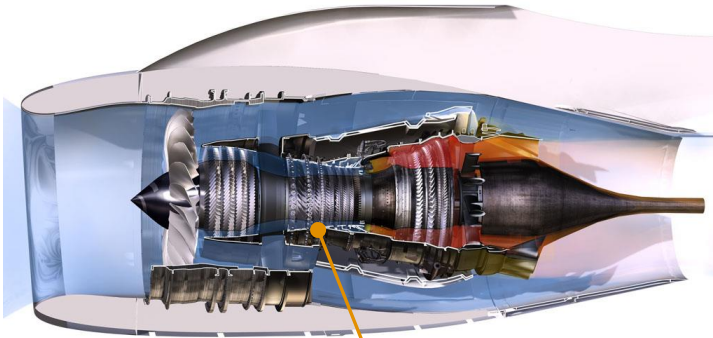
bras



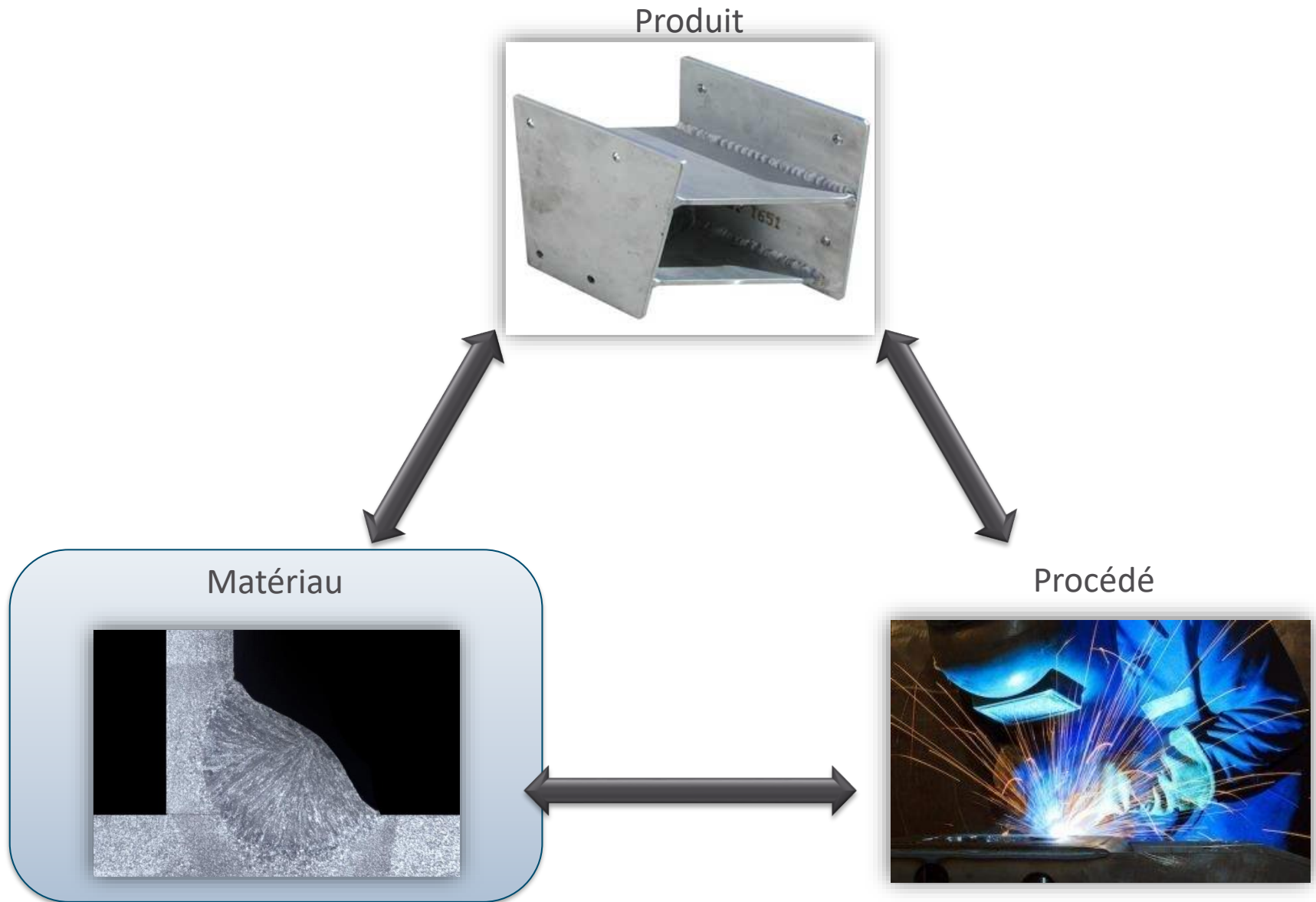
Carter d'échappement :
Soudage fusion : 30 cordons de soudure ~1m,
alliage base nickel

Exemples de pièces

- Turboréacteur – *Source Safran Aircraft Engines*



Assemblage par soudage



Physique du procédé

- **Au tableau !**

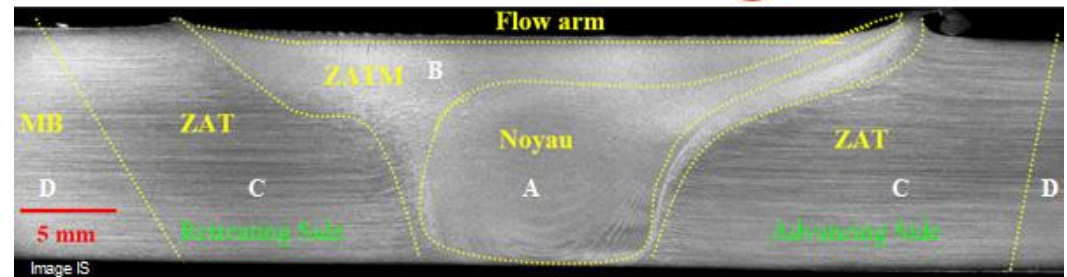
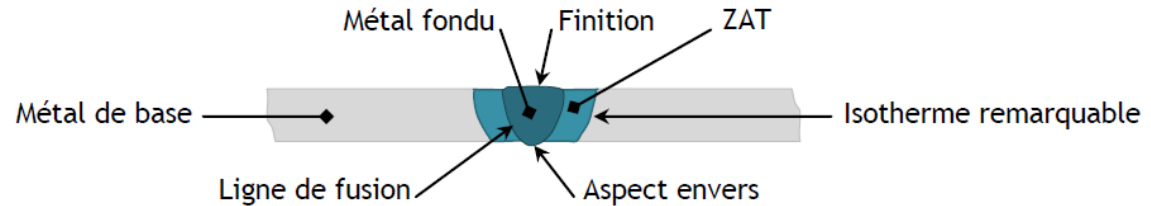
⇒ **Propriétés importantes pour la soudabilité**

- **Dilatation** et contraction (ou retrait) **thermique** : risque de fissurations ou de déformation
 - **Point de fusion** : pilote la quantité de chaleur à apporter
 - **Conductivité thermique** (et électrique pour les procédés à arc) : pilote la quantité de chaleur et le préchauffage
-
- **Le matériau subit un(des) cycle(s) chauffage-fusion-solidification-refroidissement**

Conséquences du soudage

- Pour du soudage en phase liquide

- Zone fondue
⇒ métal resolidifié
- Zone Affectée Thermiquement
Zone non fondue mais dont les propriétés métallurgiques ont été modifiées
- Métal de base



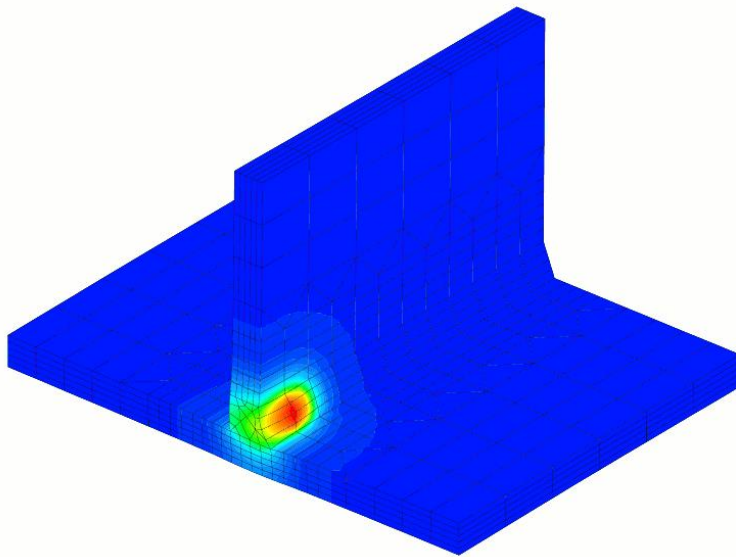
Zone affectée thermo-mécaniquement – Soudage FSW

⇒ Plusieurs conséquences notables :

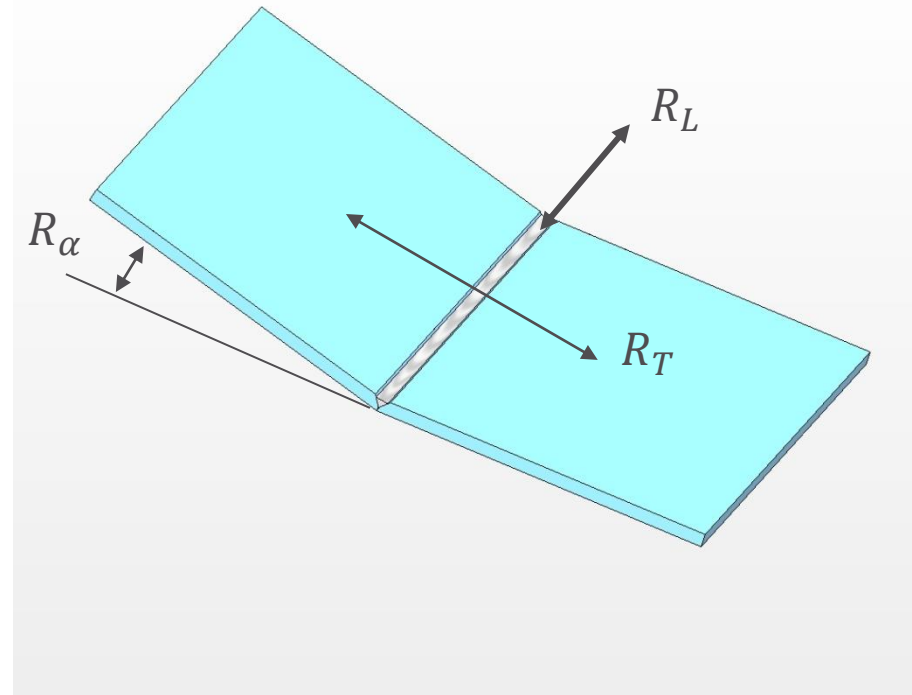
- Distorsions résiduelles des pièces
- Contraintes résiduelles
- Modifications métallurgiques

Retrait du cordon

- Diminution du volume de la zone fondue au refroidissement (retrait > dilatation)
 - ⇒ Retrait longitudinal (parallèle au cordon)
 - ⇒ Retrait transversal (lié à la largeur du cordon)
 - ⇒ Retrait angulaire



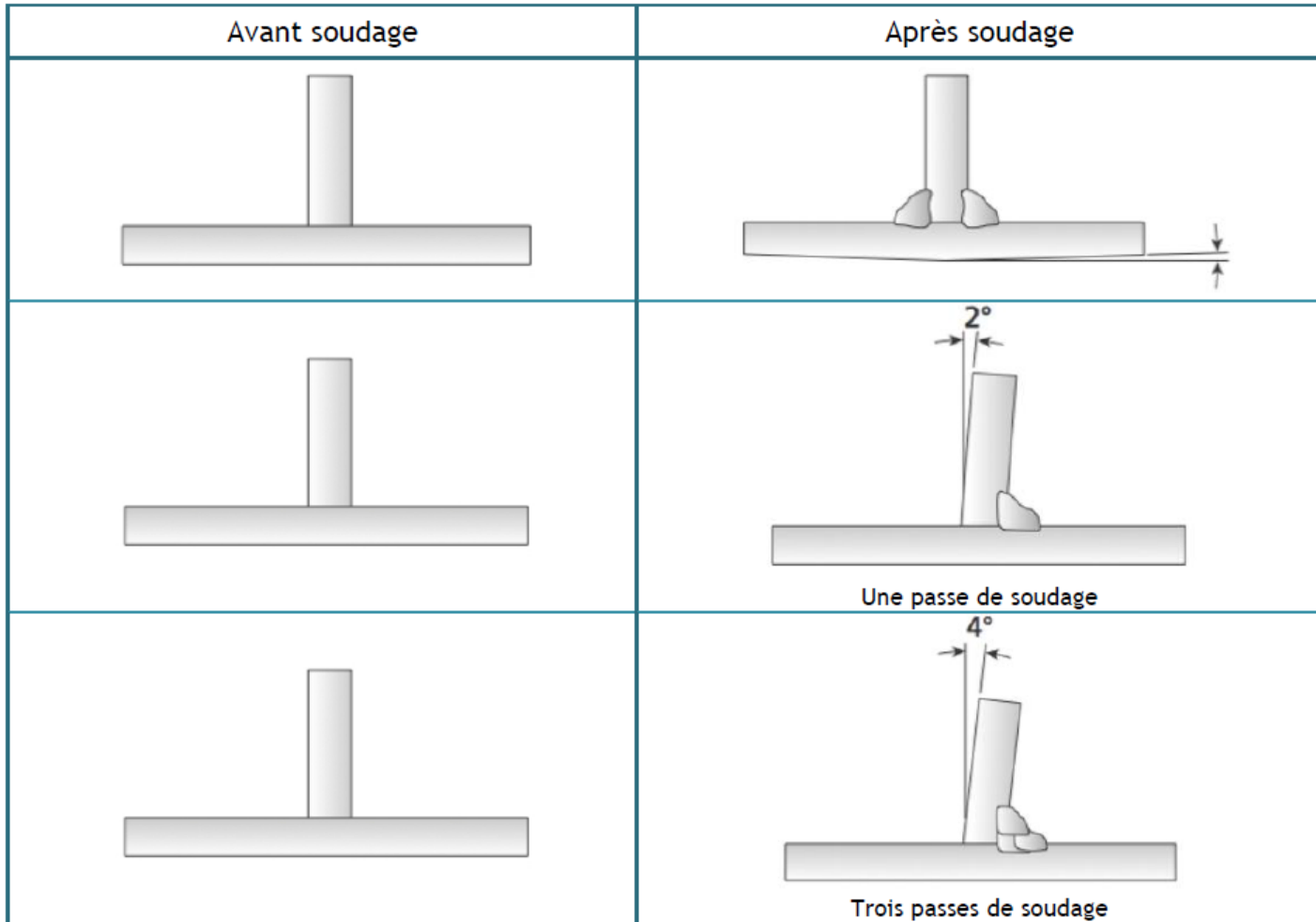
Source : ec2-modélisation



Définition des retraits sur une soudure bord à bord

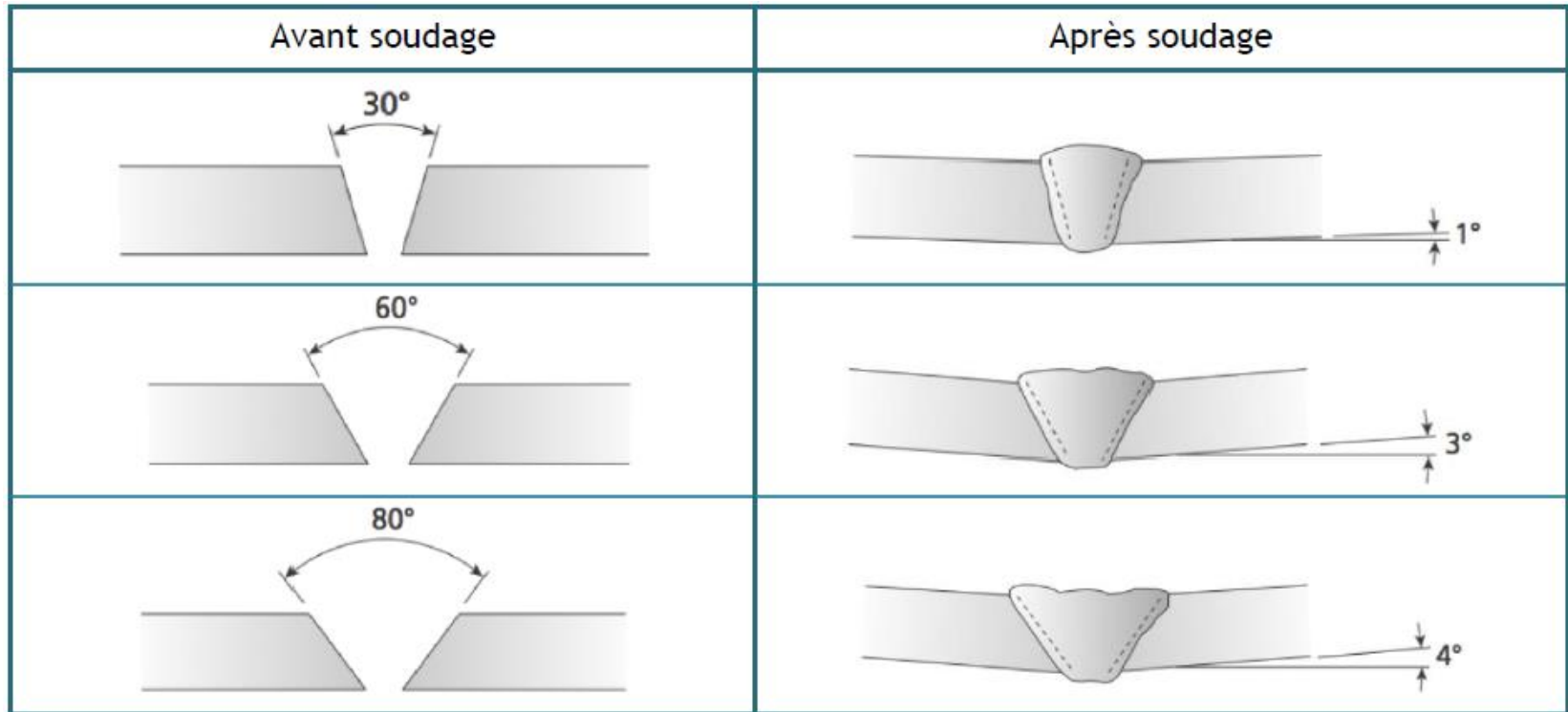
Déformations résiduelles

- Ordres de grandeurs du retrait angulaire – Déformation de soudage d'assemblages T



Déformations résiduelles

- Ordres de grandeurs du retrait angulaire – Déformation de soudage de joint V



Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

- Pour limiter les déformations :

Bonne préparation des joints ; limiter le nombre de passes ; augmenter la vitesse de soudage ;
préchauffage ; bridage ; pointage

Conséquences métallurgiques - Aciers

- Transformations métallurgiques dans la ZAT

Effet de trempe plus ou moins rapide selon :

- la distance à la zone fondue
 - La conductivité thermique
 - L'épaisseur des pièces
 - L'énergie apportée
 - La température initiale
- ⇒ Taille de grain (≈ proportionnelle chaleur atteinte)

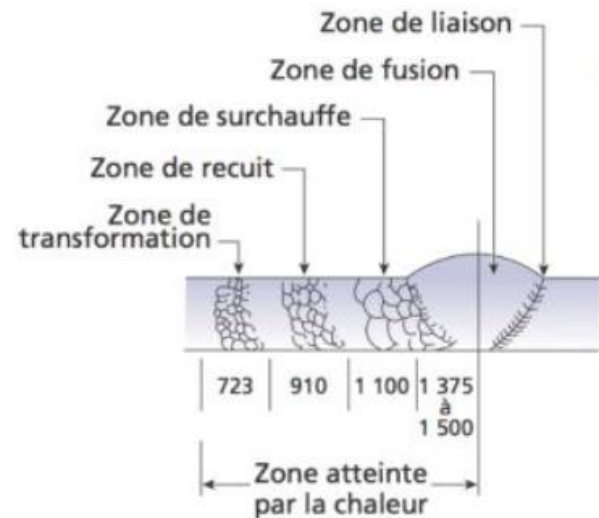
- Risque de formation de martensite (fragile) si trempe trop rapide

$\%C < 0,25\% \Rightarrow$ soudable

$\%C \in [0,25; 0,6\%] \Rightarrow$ soudable avec précaution

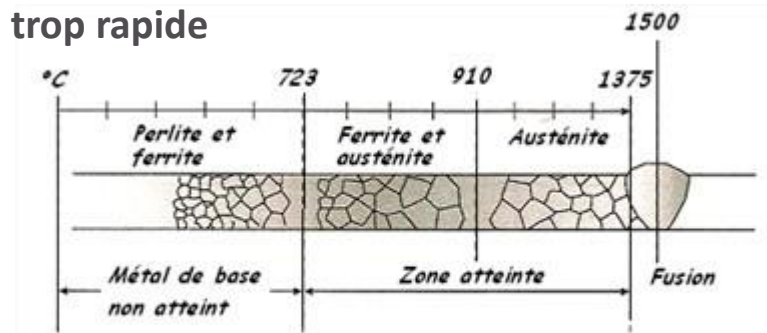
$\%C > 0,6\% \Rightarrow$ difficilement soudable

- Règles de calcul des pourcentages équivalents de carbone pour les aciers alliés pouvant aussi prendre en compte l'épaisseur et guider le choix de la température de préchauffage



Structure dans la ZAT

Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

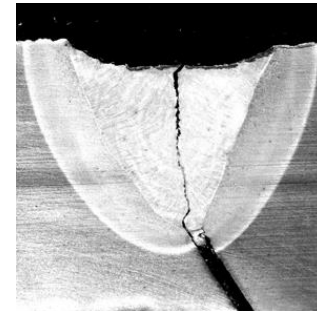


Effet de la température sur les grains dans l'acier

Source : rodacier.com

Principaux risques liés au soudage

- Fissuration à froid (ZAT), à chaud (zone pâteuse)

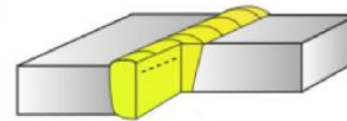


- Soufflure

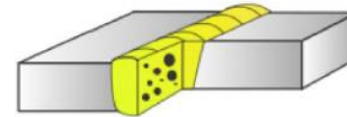
Défauts creux, liés à la présence de gaz

Piqûres si débouchant

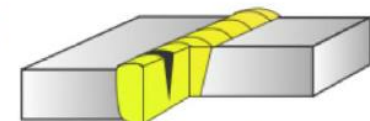
Soufflures alignées



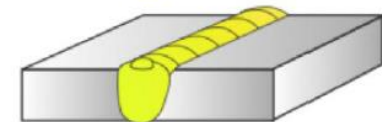
Nid de soufflures



Soufflures vermiculaires



Piqûres



- Pollution, corrosion des surfaces

- Retassures, criques de solidification

Voir cours sur le moulage

- Inclusion (présence d'un corps étranger dans le cordon de soudure)

Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

Autres matériaux

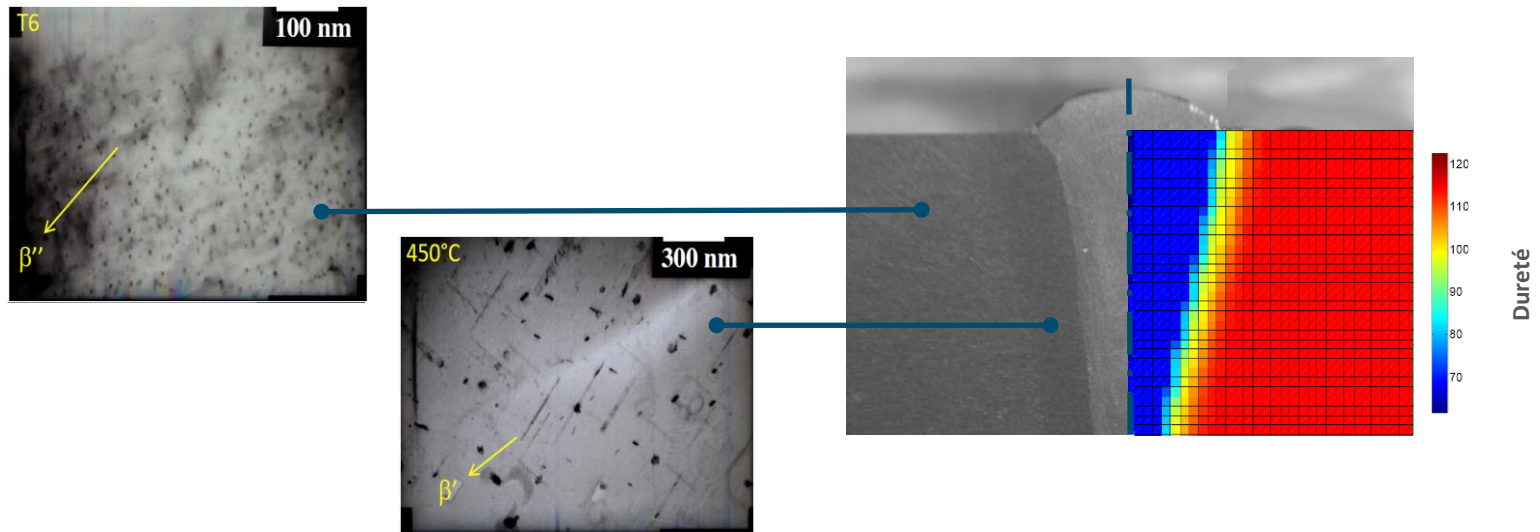
- **Soudage de l'aluminium**

Forte conduction thermique \Rightarrow difficulté à souder (*idem* pièces de grandes dimensions)

Si oxydation des surfaces : $T_{fusion} = 2054^{\circ}C$ au lieu de $660^{\circ}C$

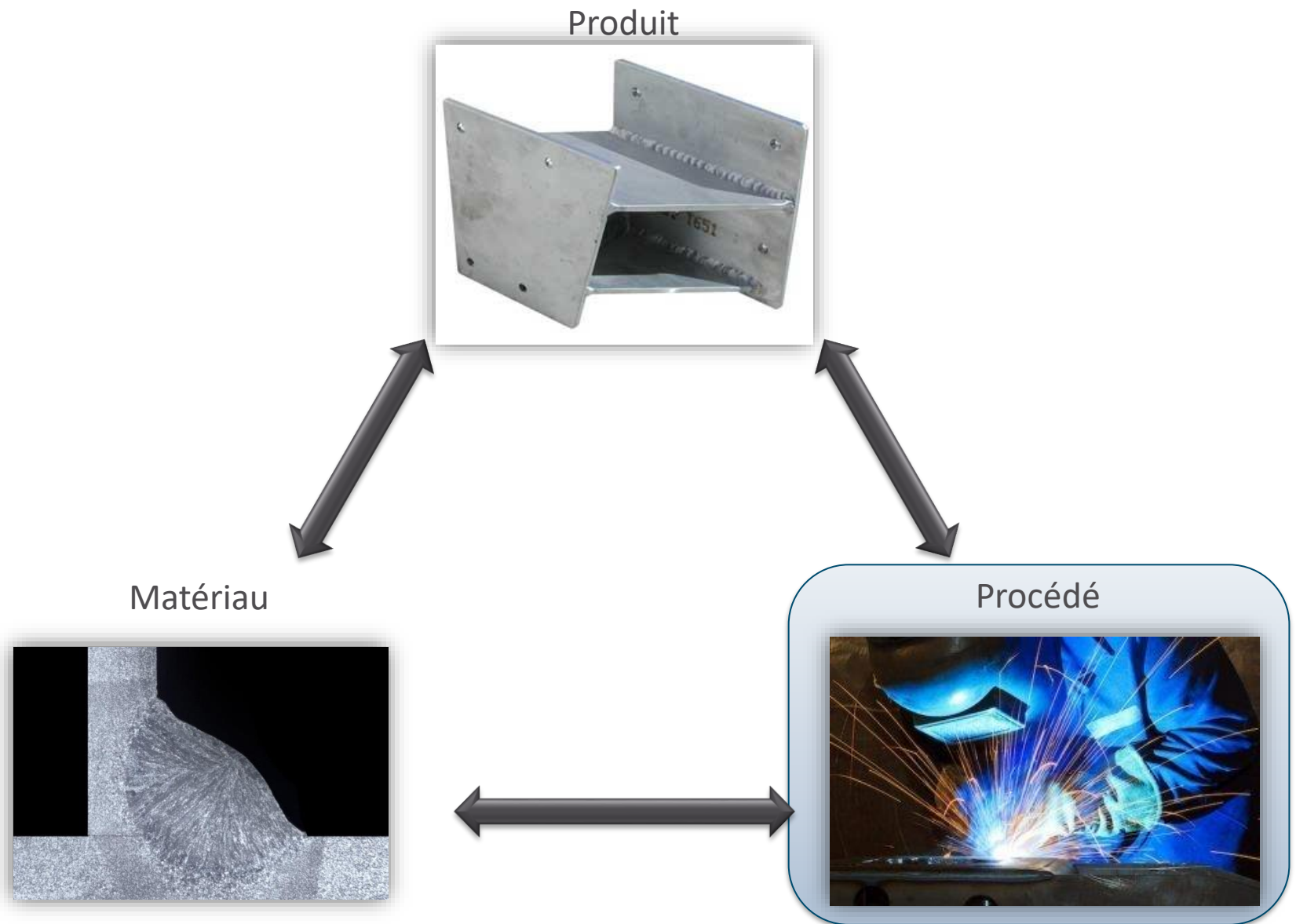
- **Alliages à durcissement structural (certains alliages d'aluminium, base nickel)**

Chute des propriétés mécaniques dans la ZAT, fragilisation de la structure autour du cordon

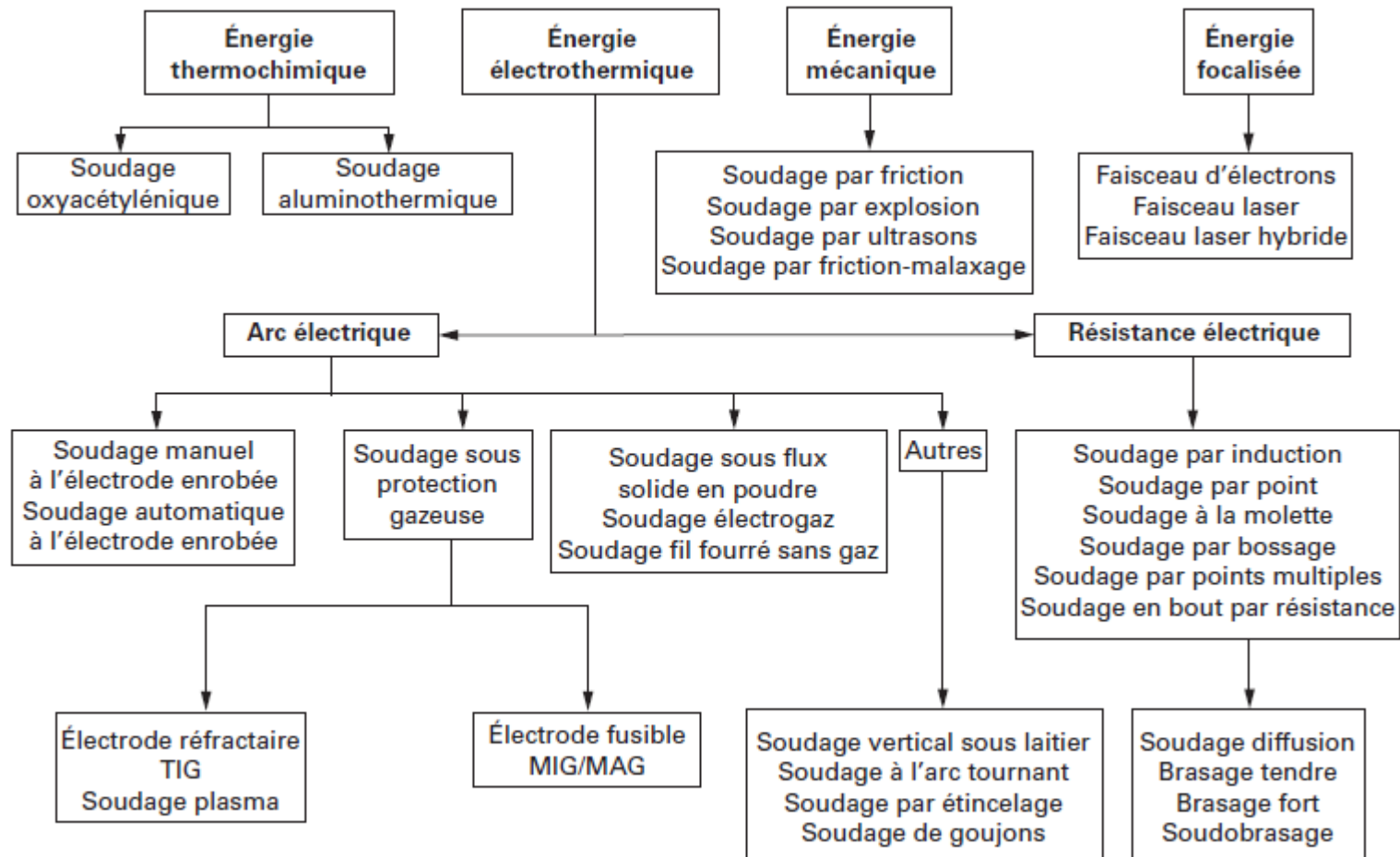


Cartographie de dureté autour d'un joint en AA6061 soudé par faisceau d'électrons

Assemblage par soudage



Classification des procédés de soudage, selon la nature de l'énergie utilisée - variante



Classification des procédés de soudage

	PRINCIPE	ENERGIE	PROCEDE	
EN PHASE LIQUIDE	Coulée du métal d'apport	Foyer extérieur	Soudage à la poche	
		Réaction exothermique	Aluminothermie	
	Fusion de proche en proche du cordon	Combustion gazeuse	Soudage oxy-acétylique	
		Arc électrique	Electrode réfractraire	TIG
			Electrode fusible, métal d'apport	Electrode enrobée
				Fil fourré
				MIG
				MAG
				Sous flux solide
			Sous laitier	
	Chaleur du plasma	Plasma		
	Energie cinétique	Faisceau d'électrons		
	Energie optique	Laser		
	Recouvrement	Effet Joule dans une résistance	Par points	
A la molette				
En bout	Par bossages			
	Etincelage			

Classification des procédés de soudage

	PRINCIPE	ENERGIE	PROCEDE
SOLIDE	Pression de contact	Foyer extérieur	Colaminage
			Diffusion moléculaire
	Onde de choc	Echauffement mécanique	Explosion
			Friction
Frottement solide	Ultra-sons		
			Stir welding

- **Phase liquide :**

Métal en fusion mobile => occupation de l'espace entre éléments solides

- **Phase solide :**

$T \sim 0.6T_f [K]$ + effort presseur

Gain énergétique

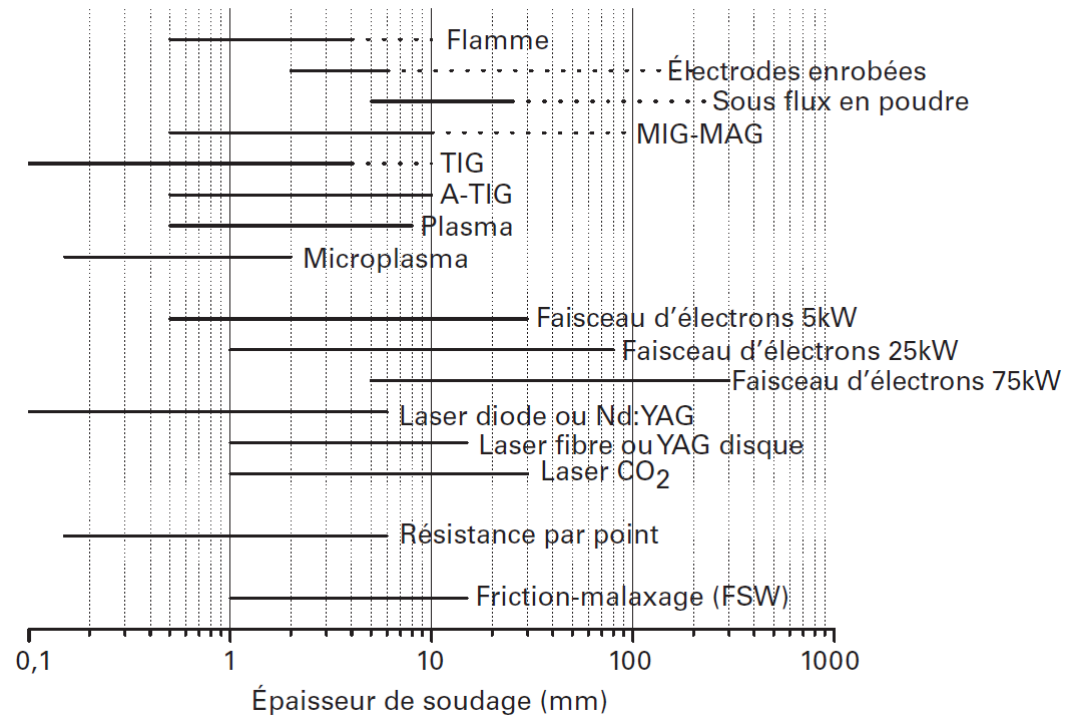
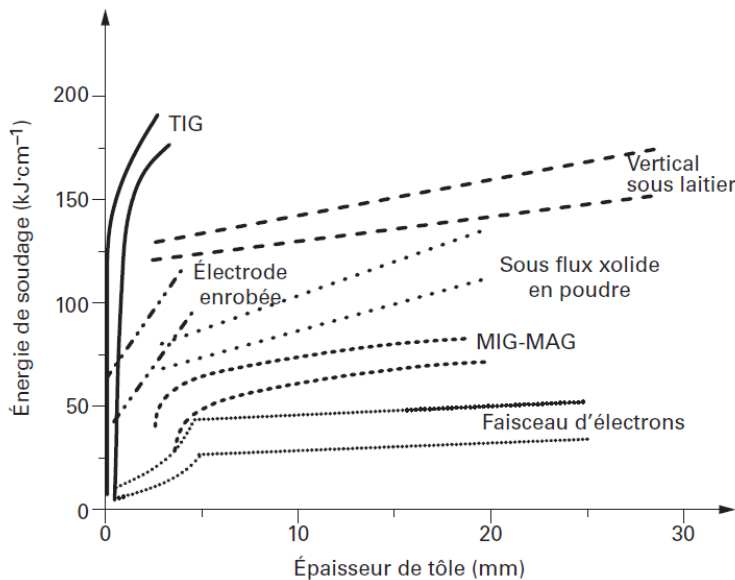
Déformations résiduelles moindres

Possibilité de rester sous les températures de transfo. métallurgiques

Bilan – Comparaison des procédés de soudage

Performance des procédés de soudage en termes de possibilité d'épaisseur soudable en mono ou multipasse (pointillés)

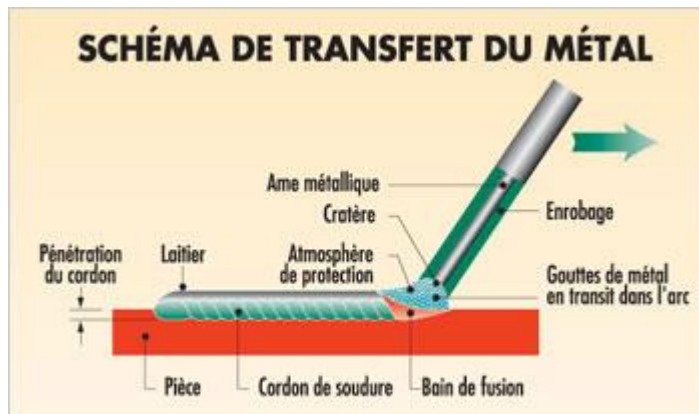
Influence du procédé et de l'énergie de soudage sur les épaisseurs soudables atteintes



Source : Techniques de l'ingénieur

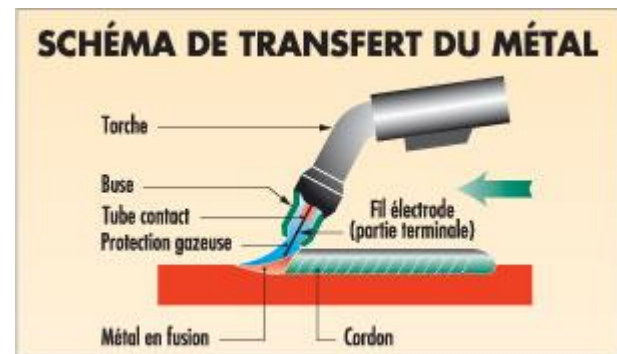
Soudage électrique à l'électrode enrobée

- Electrode enrobée fusible => stabilisation arc, guidage fil, protection métal d'apport et métal fondu (laitier)
- Courant ; faible investissement ; manuel ; peu productif
- Aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment), bases nickel et fontes



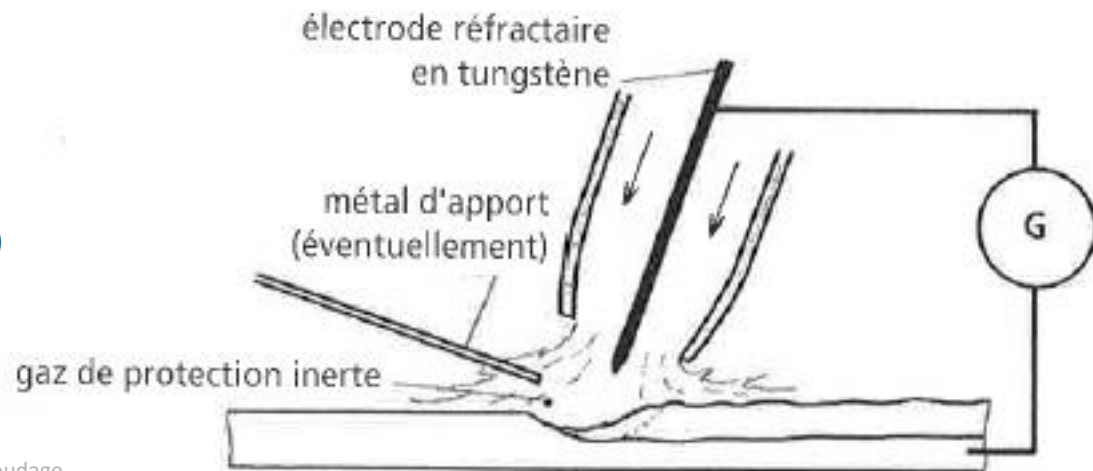
Soudage électrique - MIG/MAG

- Metal Inerit/Active Gaz (même poste, simple changement du fil et du gaz (
- MIG (Ar ou Ar+O₂) : alliages Aluminium, Inox, mais aussi alliages cuivreux, de nickel ou titane
- MAG (CO₂ ou AR+CO₂) : plutôt pour les aciers non ou faiblement alliés
- **Avantages :**
 - Grand type de matériaux
 - Rendement élevé
 - Apport de matière important (0.8-6kg/h)
 - ⇒ Fortes épaisseurs et cordons de grandes dimensions
 - Facilement automatisable (immense majorité des bâtis mécano-soudés)
- **Inconvénients :**
 - Pas de laitier
 - Torche encombrante
 - Aspiration des fumées



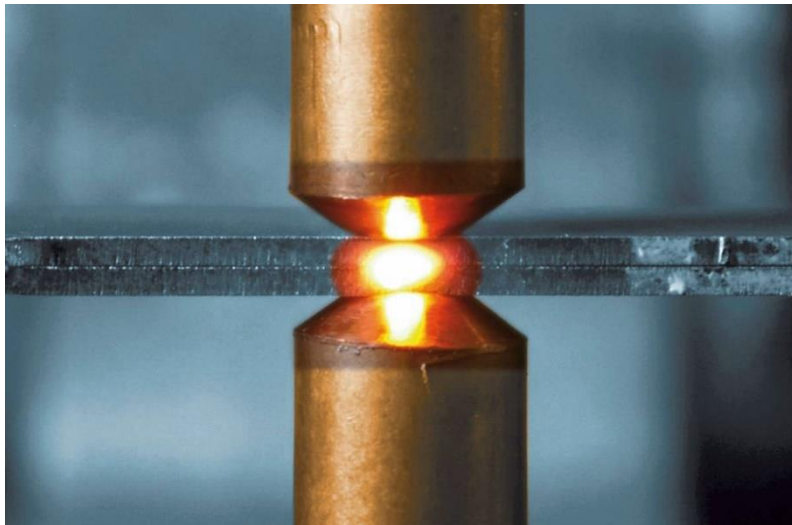
Soudage électrique - TIG

- **Tungsten Inert Gaz** : électrode réfractaire en Tungstène + Argon et/ou Hélium
 - ⇒ Pas d'oxydation du métal en fusion
- Avec ou sans métal d'apport ; lent mais grande qualité => passes racines et métaux nobles ; automatisable ; $e = 0,5 - 6mm$
- **Avantages :**
 - Grand type de matériaux : aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment), alliages légers et cuivreux, nickel, titane, tantale, zirconium et leurs alliages
 - Excellente qualité et bel aspect
 - Soudage dans différentes positions (idem MIG/MAG)
 - Automatisable
- **Inconvénients :**
 - Faible apport de métal
 - Lent ⇒ faibles épaisseurs (0,5 – 6 mm)
 - Température élevée



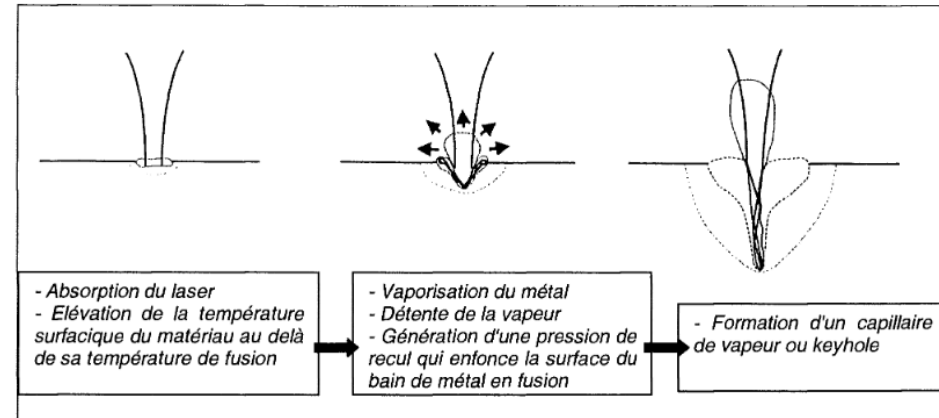
Soudage par résistance ou par points

- Passage de courant (dizaines de kA)
- + Rapide, bonne qualité, faibles déformations, soudure continue possible
- Epaisseur limitée
- Soudage par résistance, à la molette

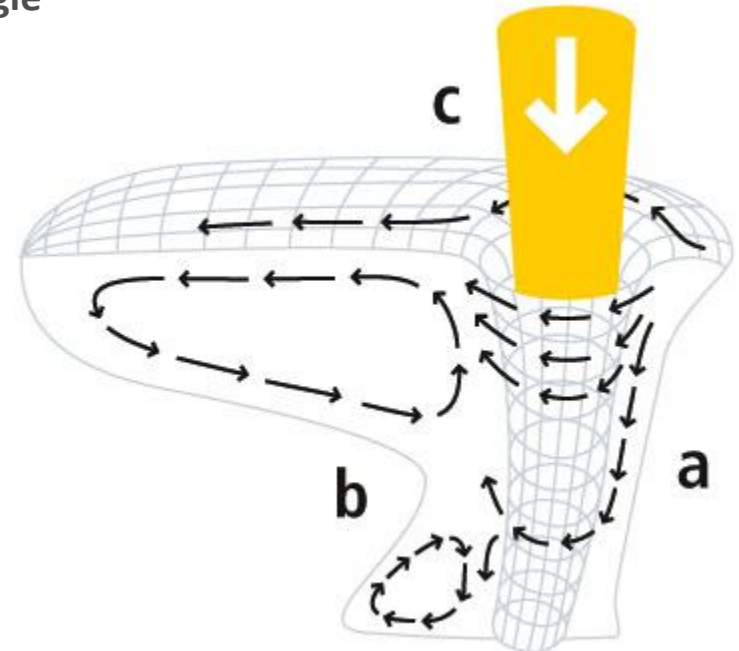


Soudages à haute densité d'énergie

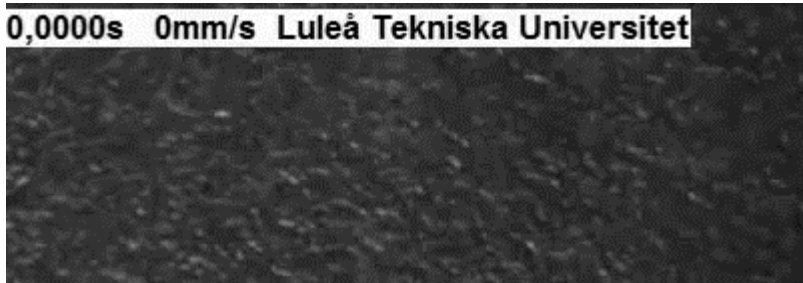
- Sources de chaleurs de forte densité
Effet volumique (et plus seulement surfacique)
de l'apport de chaleur
Fusion plus rapide
⇒ Moins de conduction thermique



- Structure typique des soudures à haute densité d'énergie
Formation d'un keyhole
- Forte pénétration de la soudure

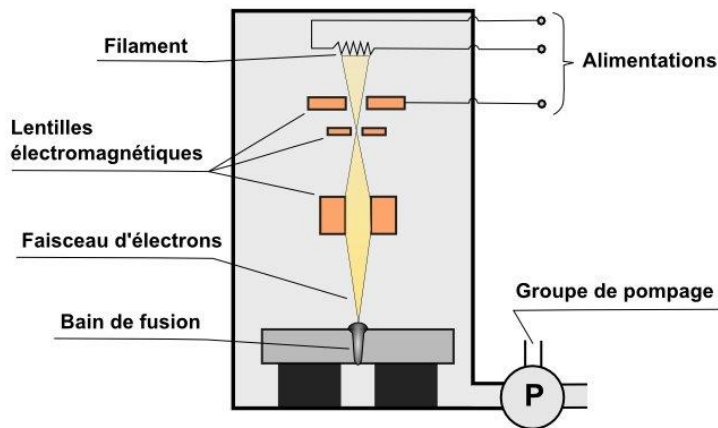


0,0000s 0mm/s Luleå Tekniska Universitet



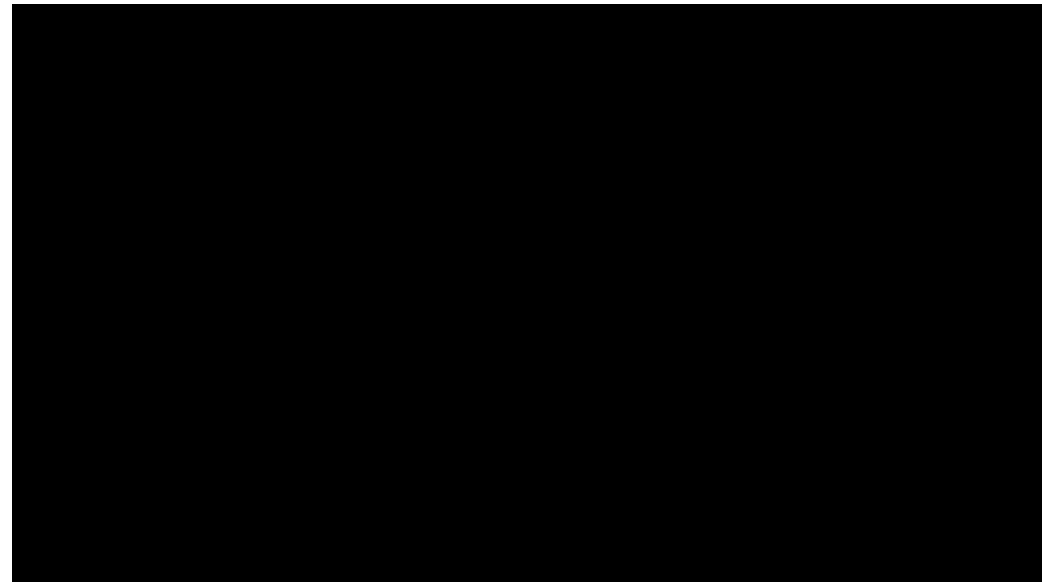
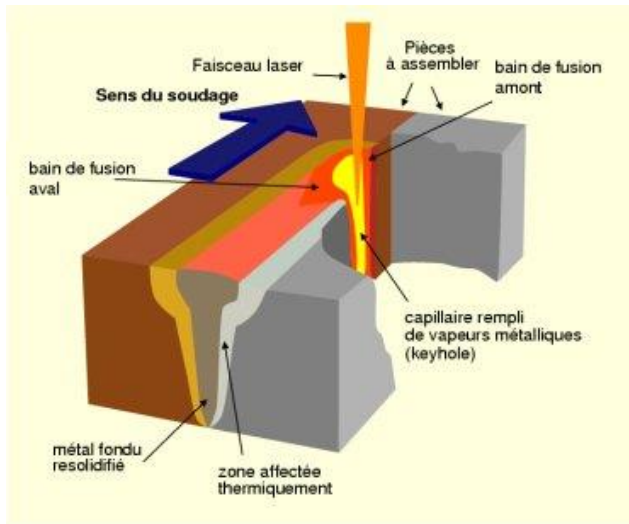
Soudage par faisceau d'électrons

- Faisceau d'électrons créé par techno ~cube cathodique => énergie cinétique => chaleur
- Vide primaire (0,1-1Pa) => pompage long 5 min/m^3 mais pas d'oxydation !
- Haute densité d'énergie
 - ⇒ $prof/L_{fondue}=40-50$; profondeur jusqu'à 300mm en acier (pour P=100kW)
- Faible largeur fondue ⇒ surfaces à apprêter en usinage
- Faibles distorsions ⇒ pas de reprise



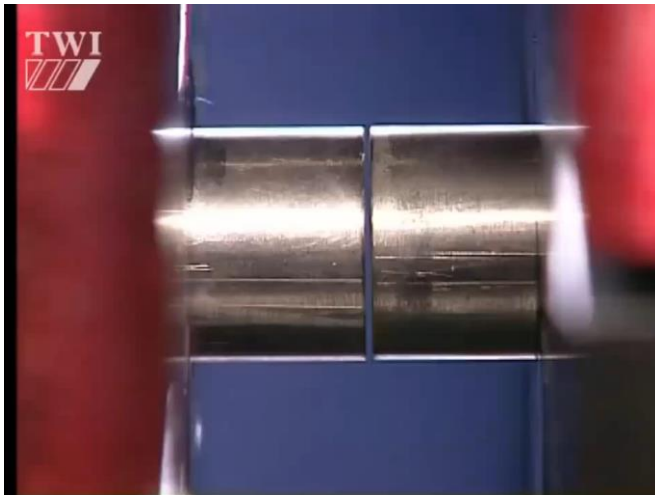
Soudage par laser

- **Source laser**
Nd:Yag ou CO₂ sur S=0.1mm² + gaz inerte
- **Haute densité énergie**
 $P = 10 - 100 \text{ MW/cm}^2 ; \eta \approx 6\%$
- **Faibles distorsions, grande pénétration, faible largeur**
- **Epaisseurs 0.1 à 6-8mm**



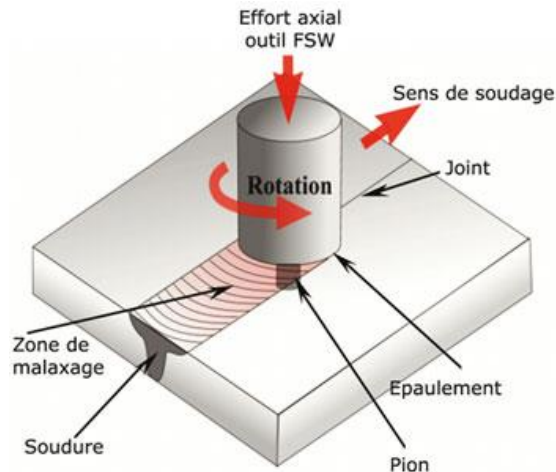
Soudage en phase solide - soudage friction

- Procédé en phase solide
- Très rapide, faibles déformations
- Sur machine dédiée \Rightarrow plutôt sur des séries de pièces
- Ex : soudage acier par restitution d'énergie cinétique d'un volant d'inertie $\Rightarrow S=16\text{dm}^2$ avec $D_{\text{max}}=1.5\text{m}$
- Précision élevée, pas de reprise d'usinage : coaxialité 0,2mm, calage angulaire 0,5°



Soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding)

- Procédé récent : brevet TWI 1991
- Frottement solide avec outil tournant, fort bridage ; pas de métal d'apport
- Essentiellement alliages légers
- $E=0,2E_{MIG}$; pas de fumée, pas d'UV
- 1 outil = 1000m soudure Alu 6xxx ; e=15mm (30 sur 2 passes)
- Montable sur une machine d'usinage...



Bilan – Avantages/Inconvénients

- **Avantages**

Liaison continue

Economie de matière

Étanchéité

Automatisation (souvent)

Bien adapté aux métaux

Productif (pas de perçage, repérage simple, rapide, coût faible...)

Gains de masse (par rapport à d'autres assemblages)

Variations brusques et importantes d'épaisseurs possibles

Pièces de très grandes dimensions possibles

- **Inconvénients**

Liaison indémontable

Modifie la structure matière

Induit des contraintes et/ou des déformations résiduelles

Difficile de joindre des matériaux différents (brasage/soudure hétérogène)

Le contrôle précis est complexe

Tous les matériaux ne sont pas soudables (ex. AU4G, fonte...)

Bilan – Quelques règles de conception

- **Règles de conception**

- Sollicitation du cordon en traction ou cisaillement

- Situer les cordons dans les zones les moins sollicitées (fibre neutre)

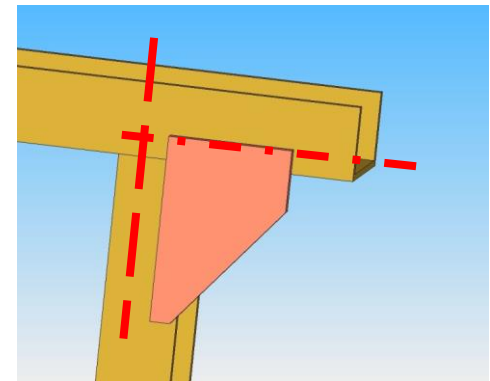
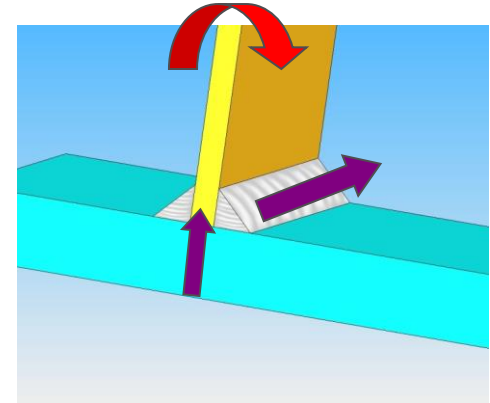
- Limiter les déformations en disposant des soudures symétriques

- Une sollicitation // axe de la soudure est préférable

- Éviter le croisement des cordons

- Privilégier au maximum la réalisation de soudures à plat

- ⇒ problématique de manutention des pièces massives



- **Nombreuses règles de calcul disponibles et réglementations**

- Eurocodes (construction métallique EC3), RCCMR (ingénierie nucléaire),

- CODAP (appareils à pression, réservoirs...), FEM (fédération européenne

- de la manutention : engins de levage et de manutention)

