

# Procédés d'assemblage : soudage

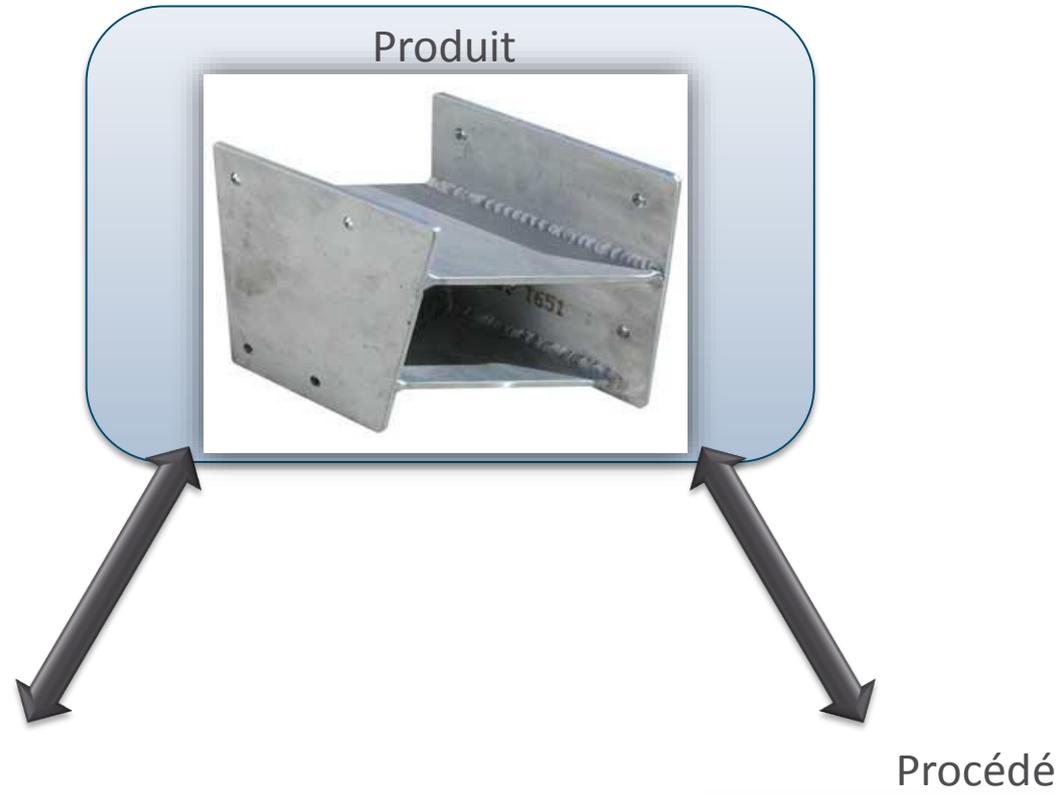
GM-3-PROFA

Équipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martini, N. Noel,

N. Tardif

# Assemblage par soudage



# Soudage : définition

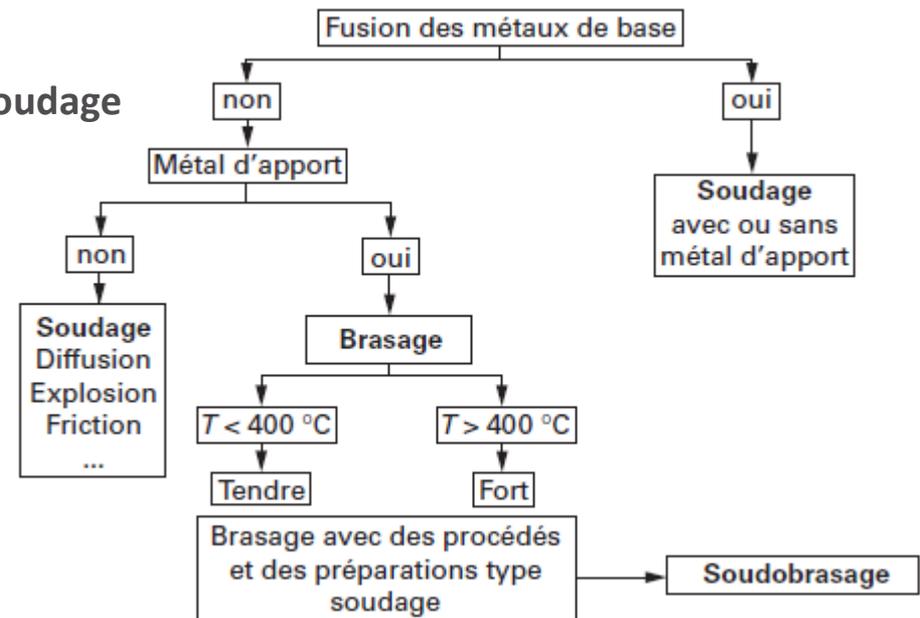
- **Soudage – Techniques de l'ingénieur**

- Opération consistant à réunir deux ou plusieurs d'un assemblage pour en obtenir la continuité mécanique, thermique, électrique
- Par chauffage et/ou intervention de pression
- Avec ou sans produit d'apport dont la température de fusion  $T_f$  est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base

- **La soudure est le résultat de l'opération de soudage**

- **Brasage**

- Opération consistant à assembler des surfaces métalliques à l'aide d'un métal ou alliage d'apport à l'état liquide, ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces
- Les surfaces assemblées ne participent pas par leur fusion à la constitution du joint



Source : Techniques de l'ingénieur

- **Le joint brasé est le résultat d'une opération de brasage.**

# Exemples de pièces

- Bâtis mécano-soudés



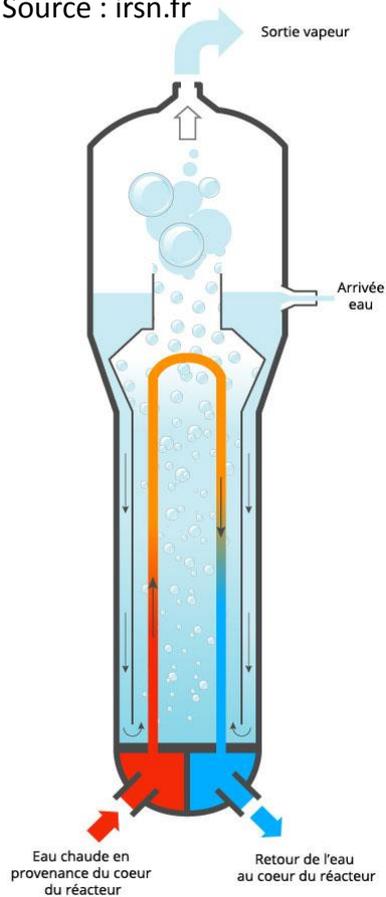
Source : mongin.eu

**MONGIN**

# Exemples de pièces

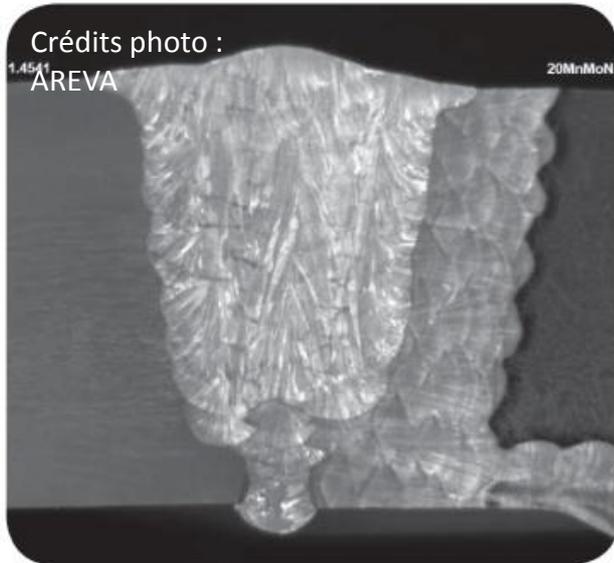
- **Éléments de générateurs de vapeur (Centrale nucléaire) – source : AREVA**

Source : irsn.fr



# Exemples de pièces

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

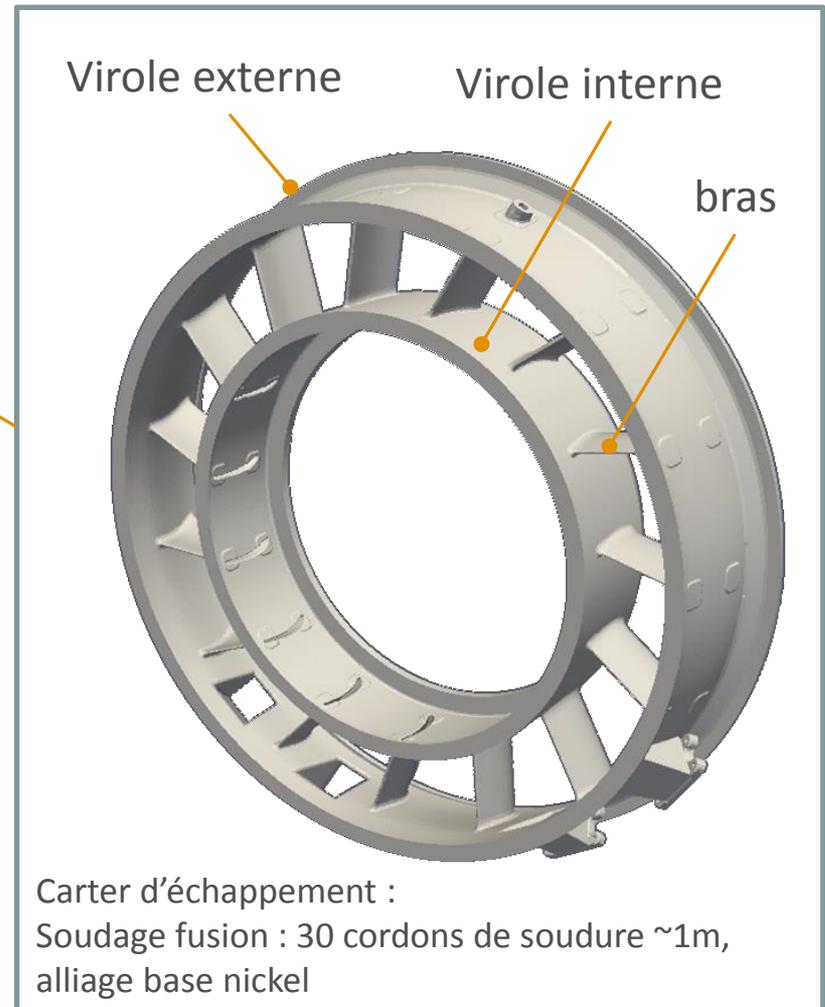


*Dissimilar weld between ferritic tube sheet with austenitic weld overlay and austenitic bottom dome using nickel alloy filler metal (alloy 82)*



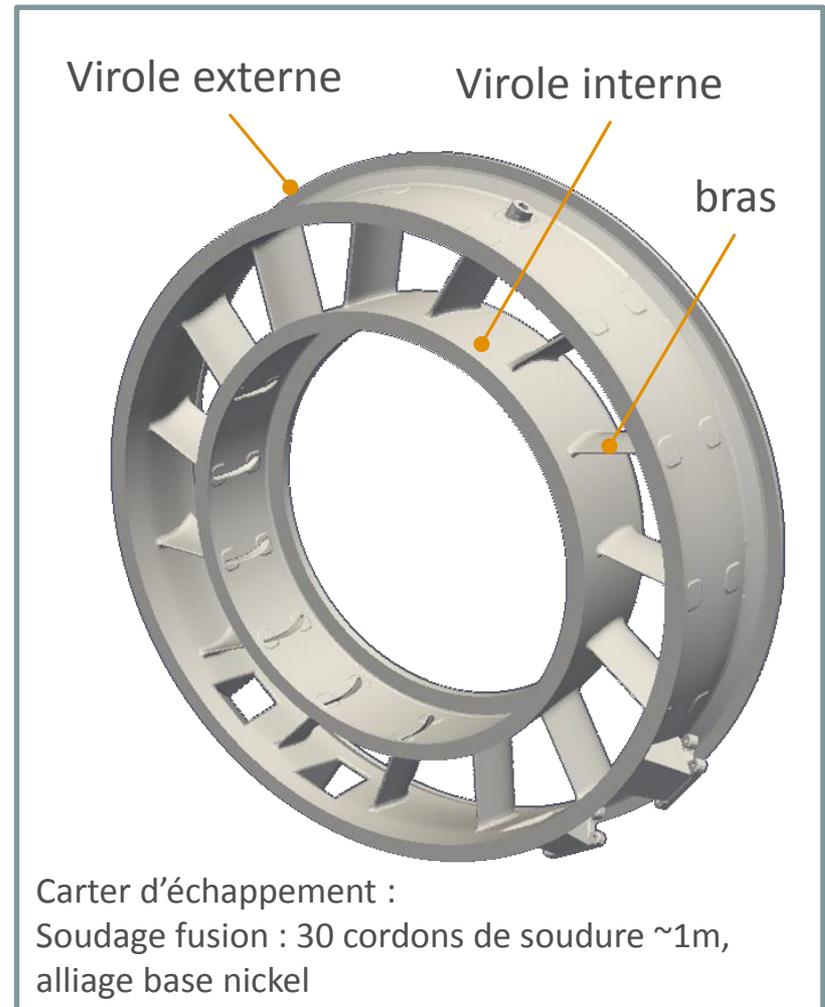
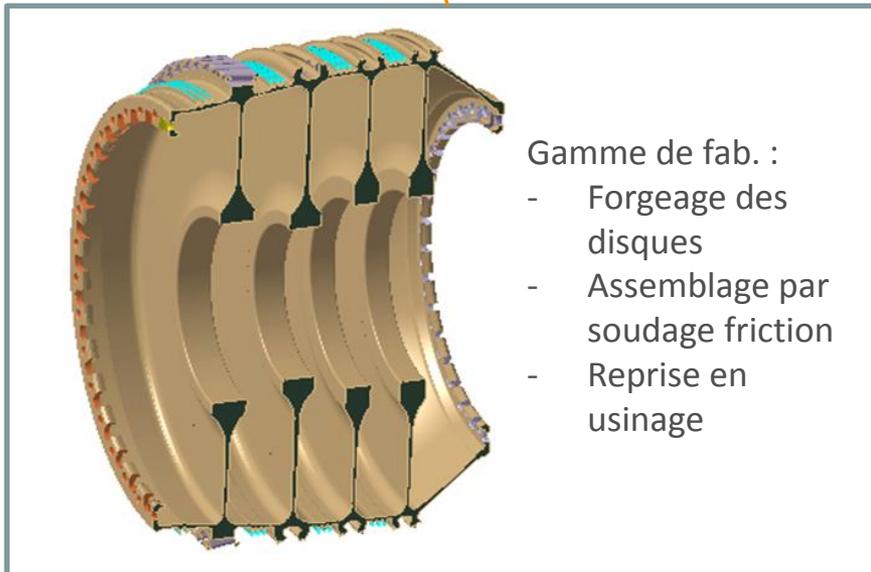
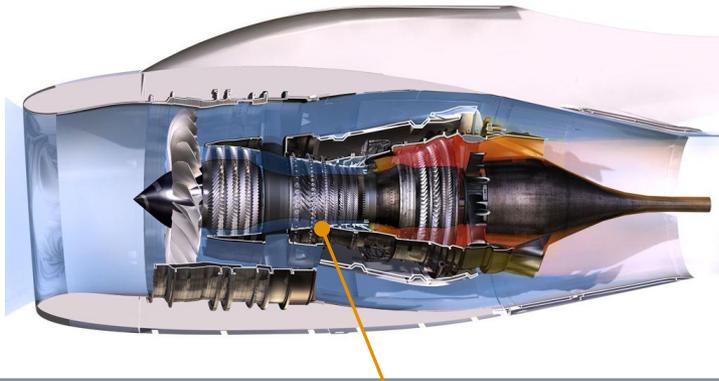
# Exemples de pièces

- Turboréacteur – *Source Safran*



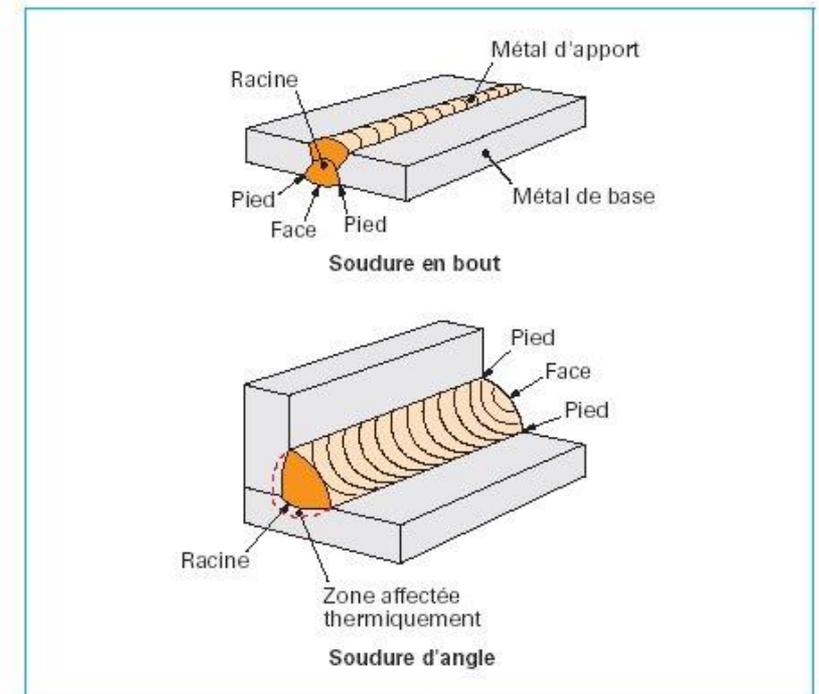
# Exemples de pièces

- Turboréacteur – *Source Safran*



# Vocabulaire

- **Métal de base :**  
matériau de la pièce
- **Métal d'apport :**  
matériau de l'électrode
- **Face :**  
surface extérieure de la soudure
- **Racine :**  
lieu de l'assemblage jusqu'ou le cordon a pénétré
- **ZAT : Zone affectée thermiquement :**  
Zone non fondue mais échauffement /refroidissement rapide



# Vocabulaire

- Types de soudure :

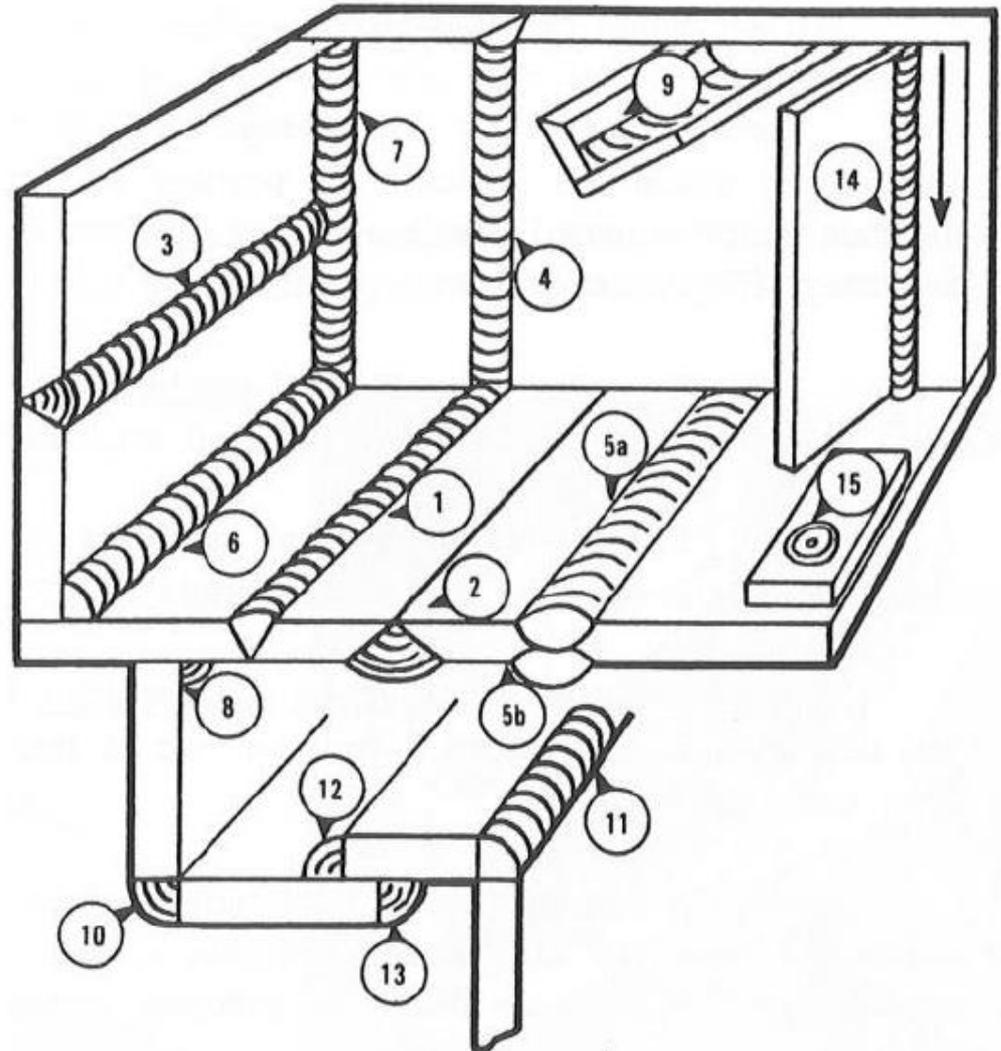
Bord à bord : 1-5

En angle intérieur : 6-9, 14

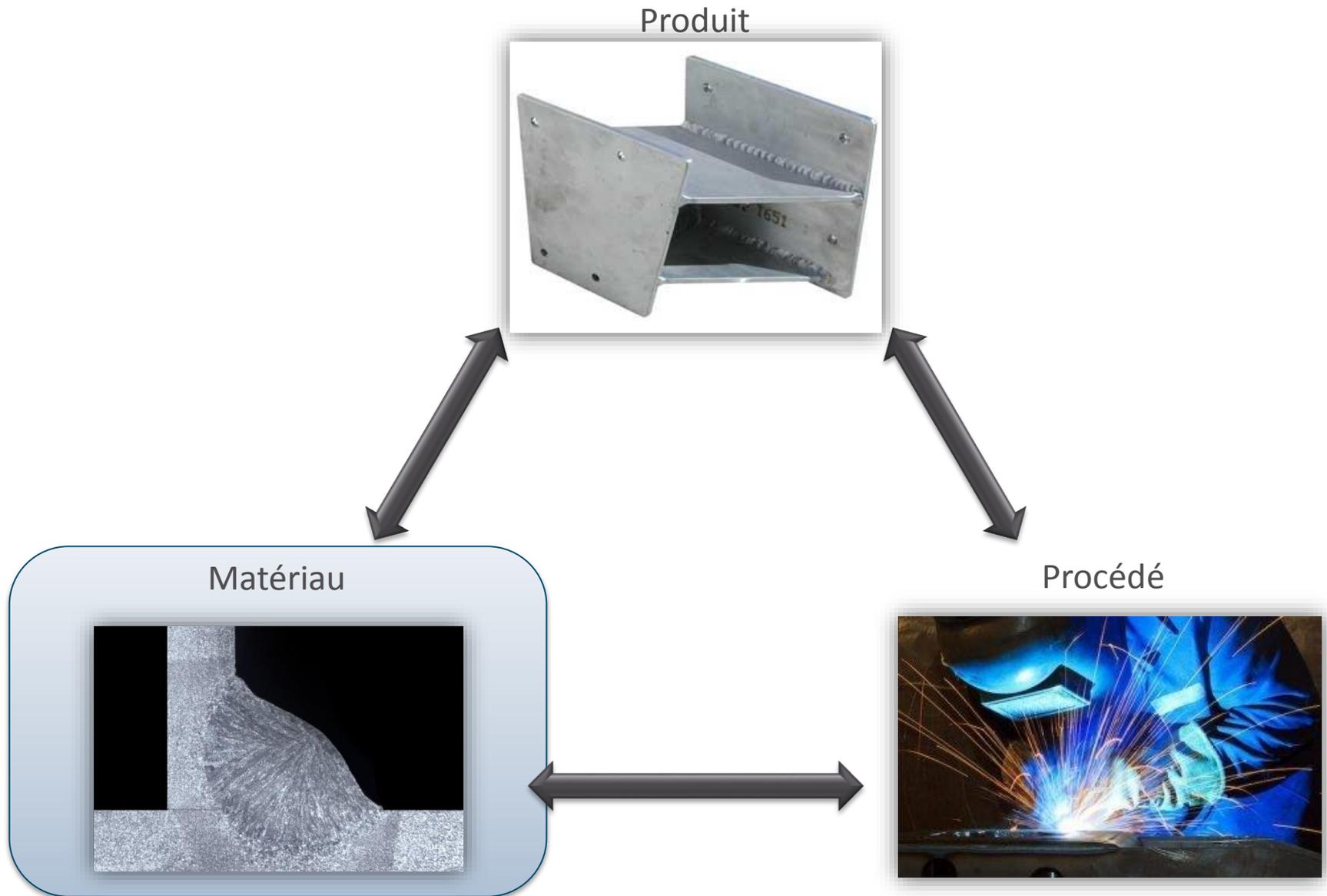
En angle extérieur : 10, 11

Soudure à clin : 12,13

En bouchon : 15



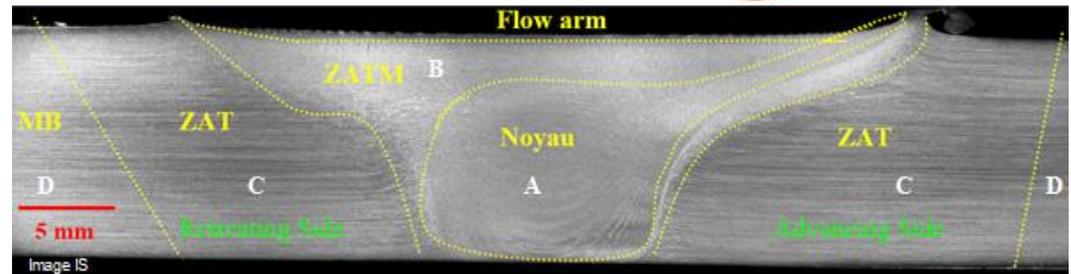
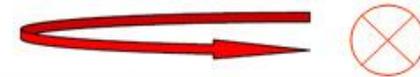
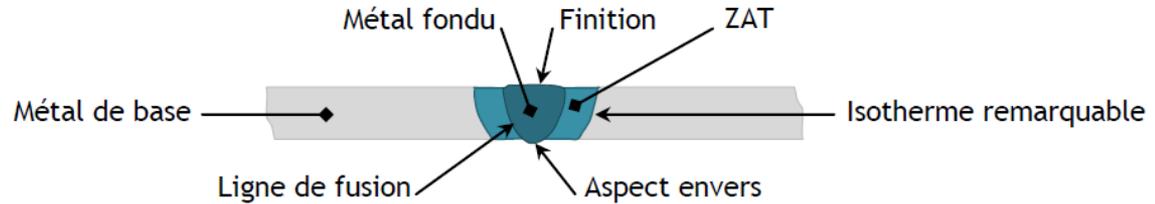
# Assemblage par soudage



# 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



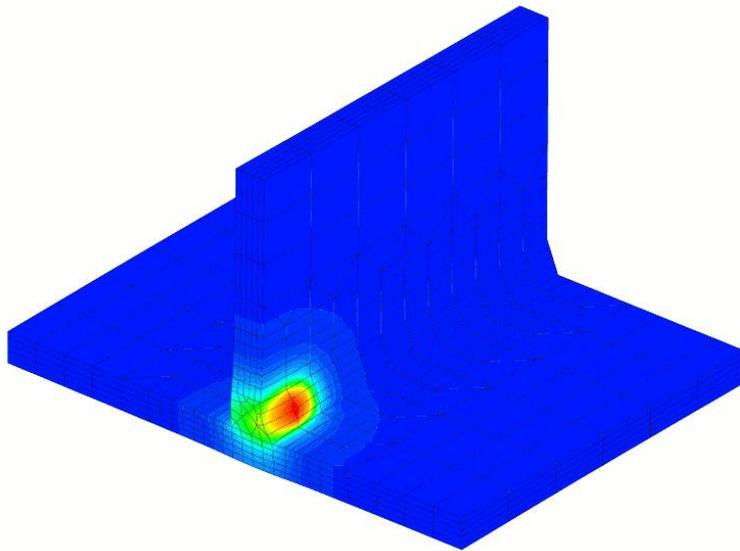
Zone affectée thermo-mécaniquement – Soudage FSW

⇒ Plusieurs conséquences notables :

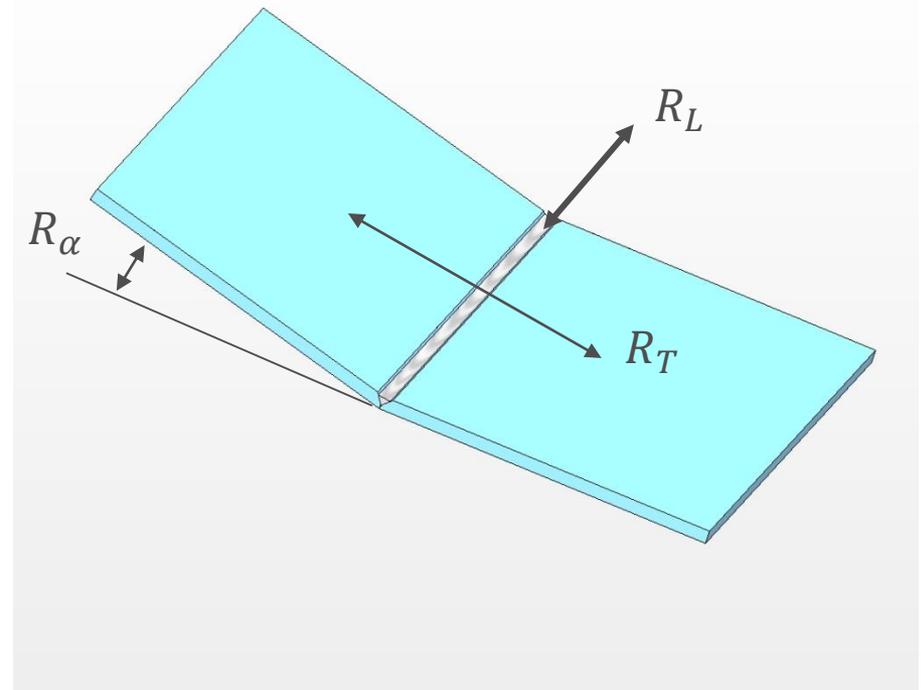
- Distorsions résiduelles des pièces
- Contraintes résiduelles
- Modifications métallurgiques

# 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



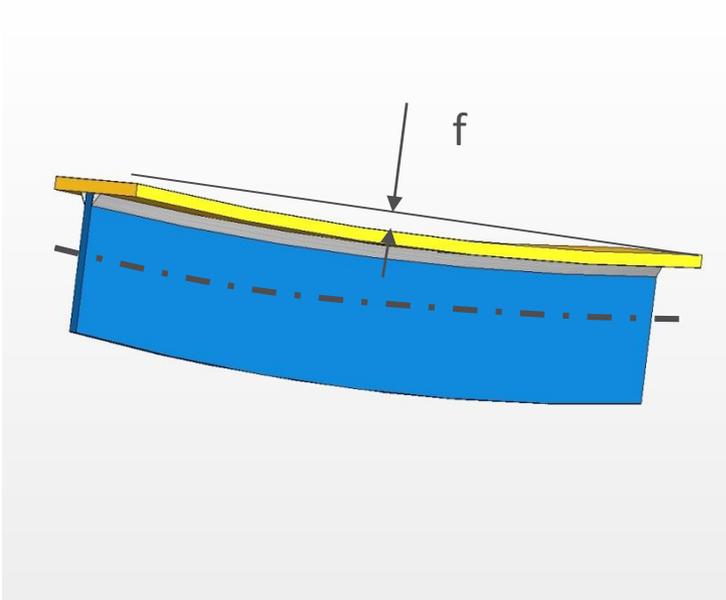
Source : ec2-modélisation



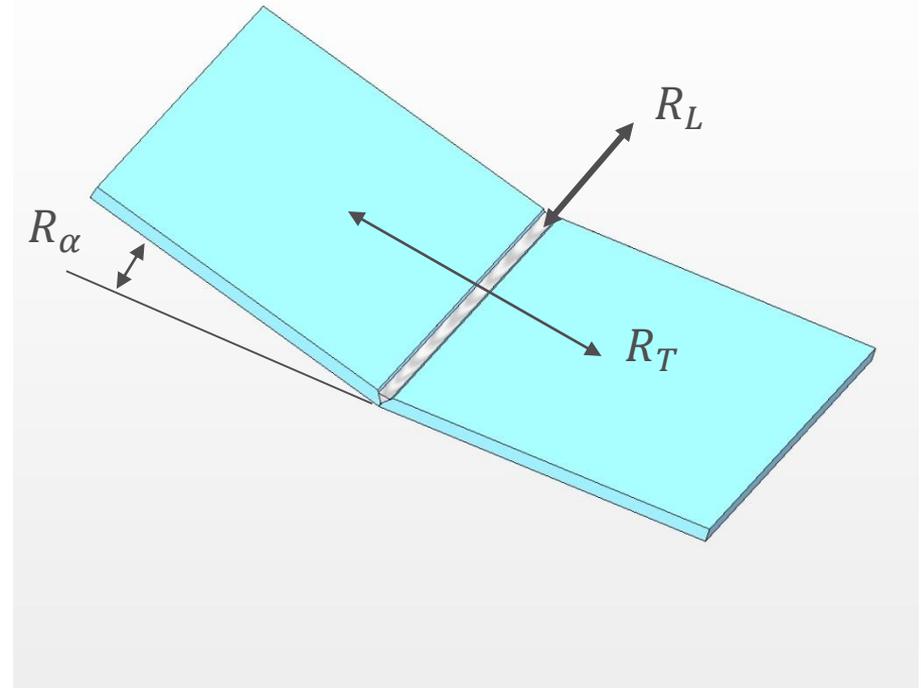
Définition des retraits sur une soudure bord à bord

# Retrait du cordon

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



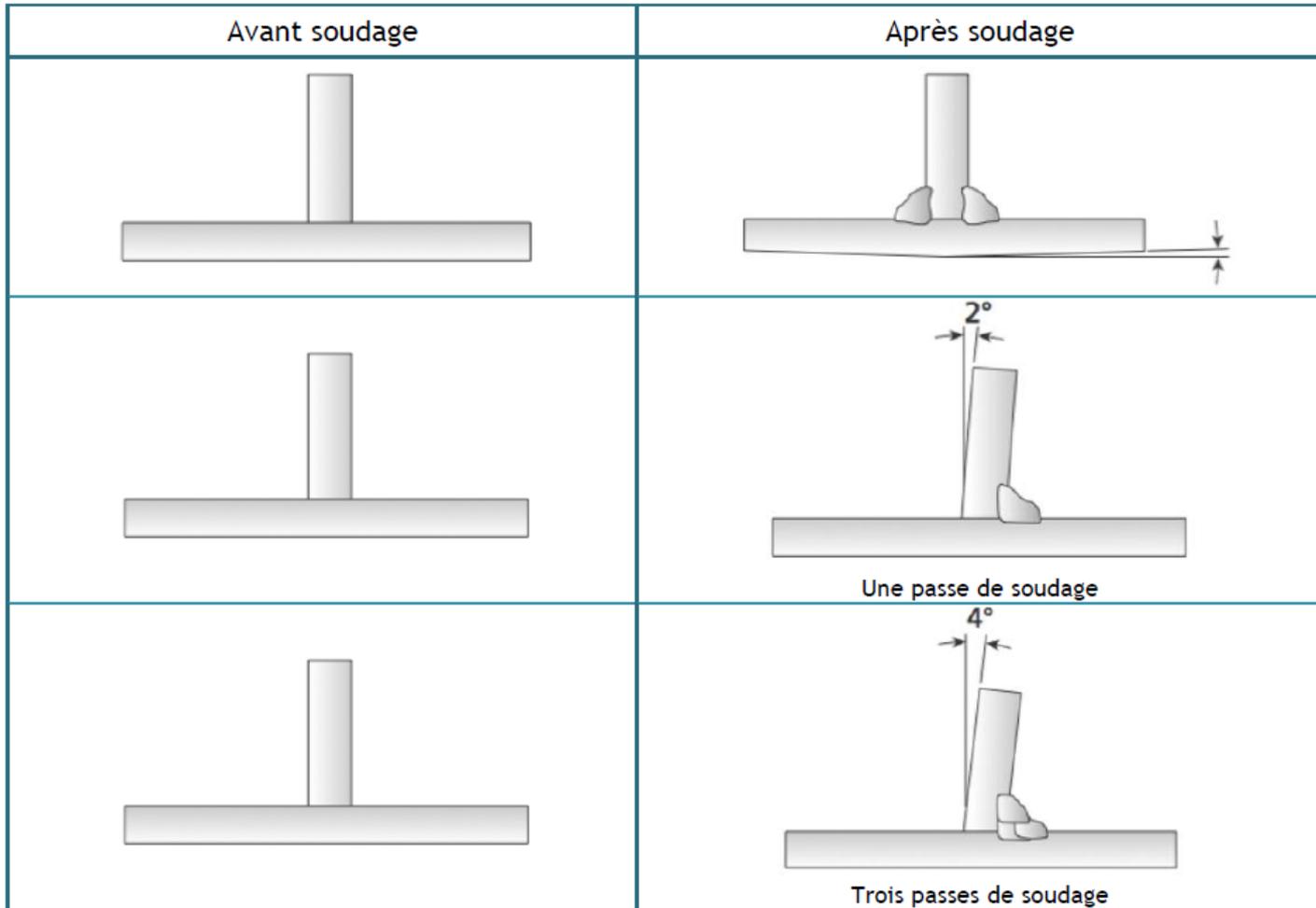
Distorsions résiduelles sur une soudure en T



Définition des retraits sur une soudure bord à bord

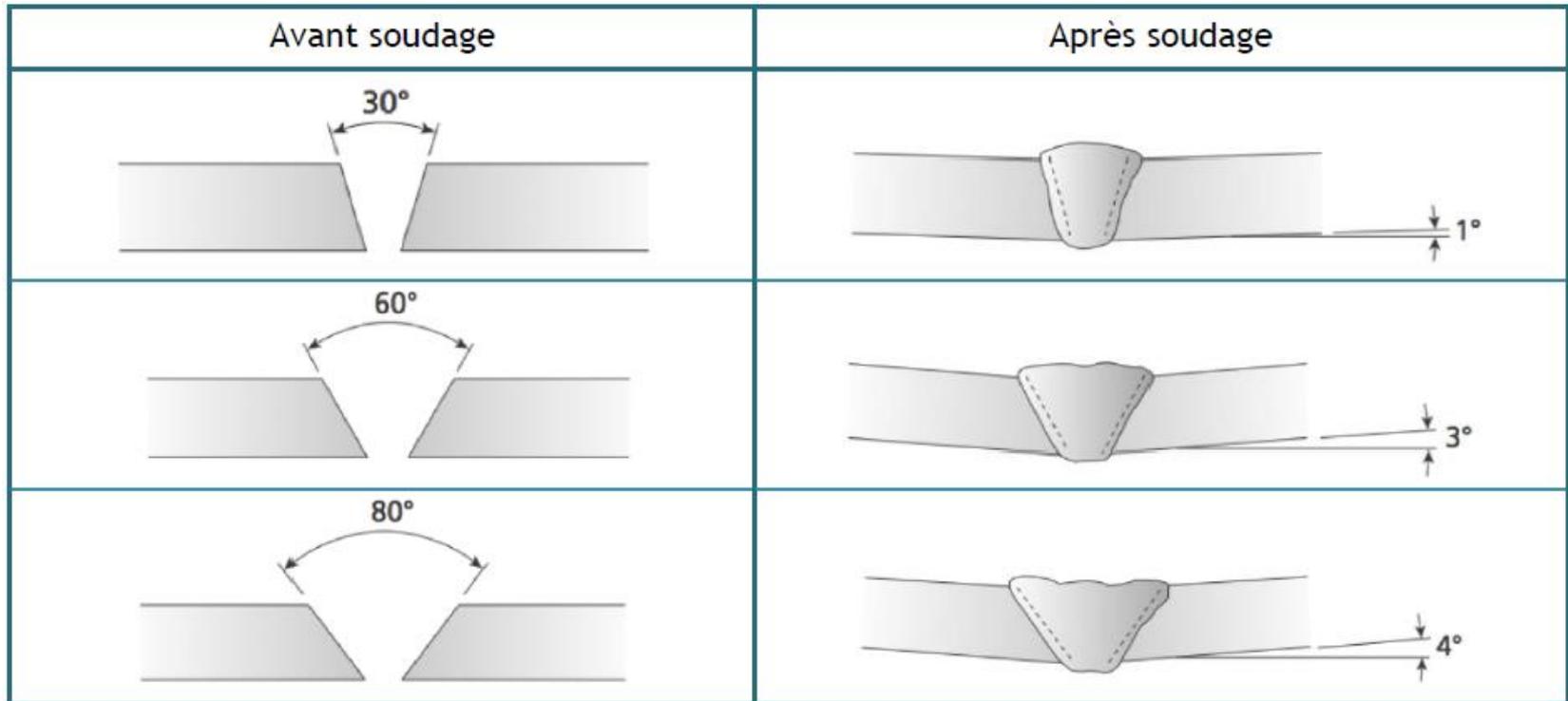
# Déformations résiduelles

- 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



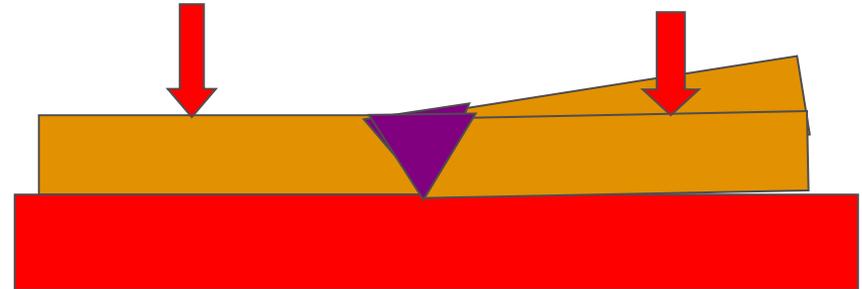
Source : ENS Paris-Saclay – Sciences de l'ingénieur

- Pour limiter les déformations :

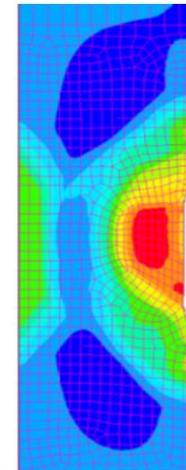
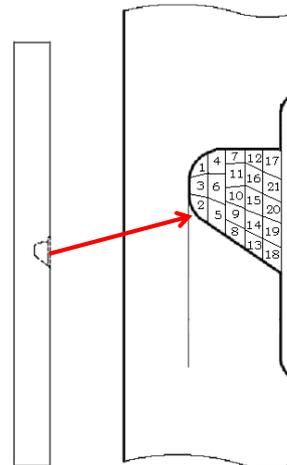
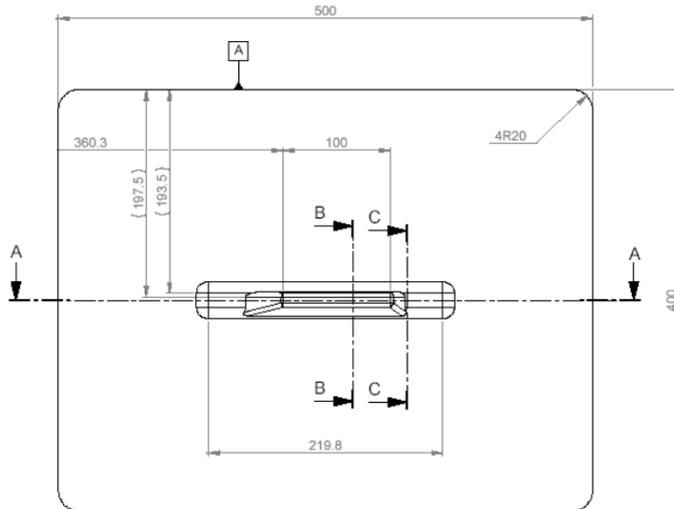
Bonne préparation des joints ; limiter le nombre de passes ; augmenter la vitesse de soudage ;  
préchauffage ; bridage ; pointage

# Contraintes résiduelles

- Pièces laissées libres  $\Rightarrow$  déformation maxi.
- Pièces bridées  $\Rightarrow$  contraintes maxi.



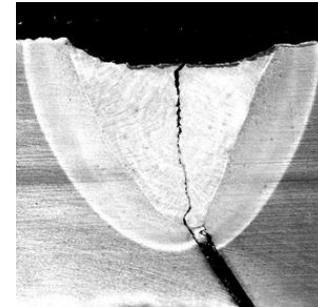
- La zone chauffée est « bridée » par le métal de base, froid, lors de sa dilatation  $\Rightarrow$  Contraintes résiduelles de traction dans le cordon et de compression autour
- Exemple : opération de réparation sur pièce en Inconel 600 – 21 cordons, TIG pulsé



Contrainte résiduelle équivalente de von Mises (*simulation*)

# Principaux risques liés au soudage

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

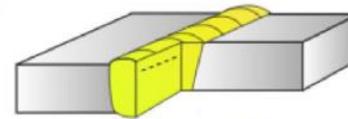


- Soufflure

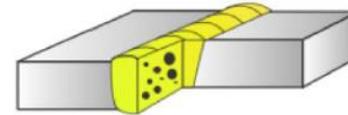
Défauts creux, liés à la présence de gaz

Piqûres si débouchant

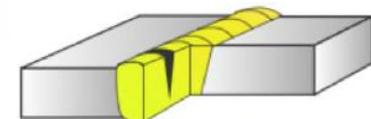
Soufflures alignées



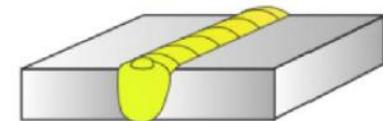
Nid de soufflures



Soufflures vermiculaires



Piqûres



- Pollution, corrosion des surfaces

- Retassures, criques de solidification

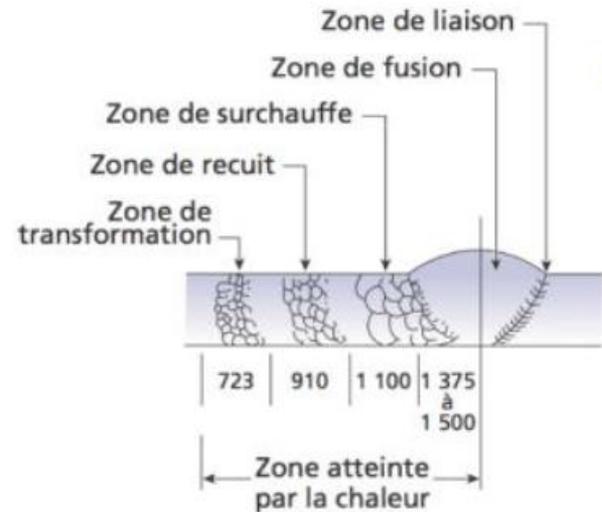
Voir cours sur le moulage

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

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

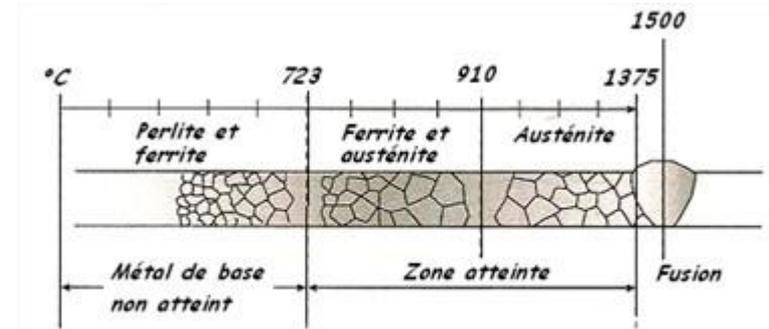
# Conséquences métallurgiques - Aciers

- 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
- 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



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

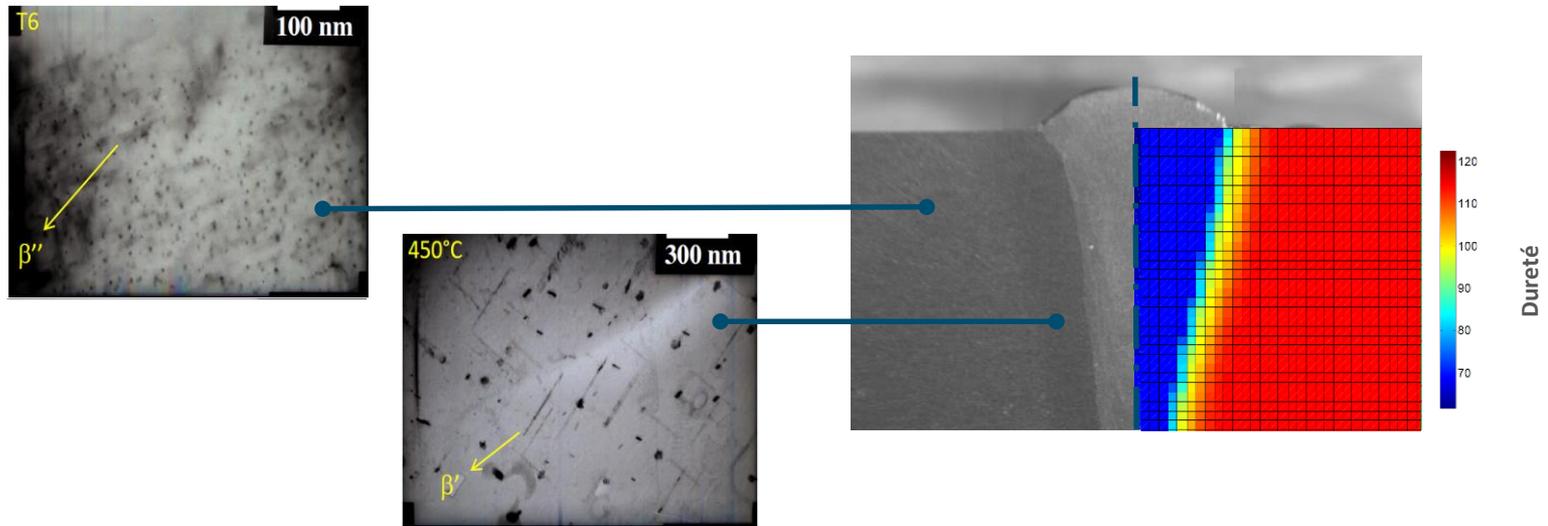
# Autres matériaux

- **Soudage de l'aluminium**

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

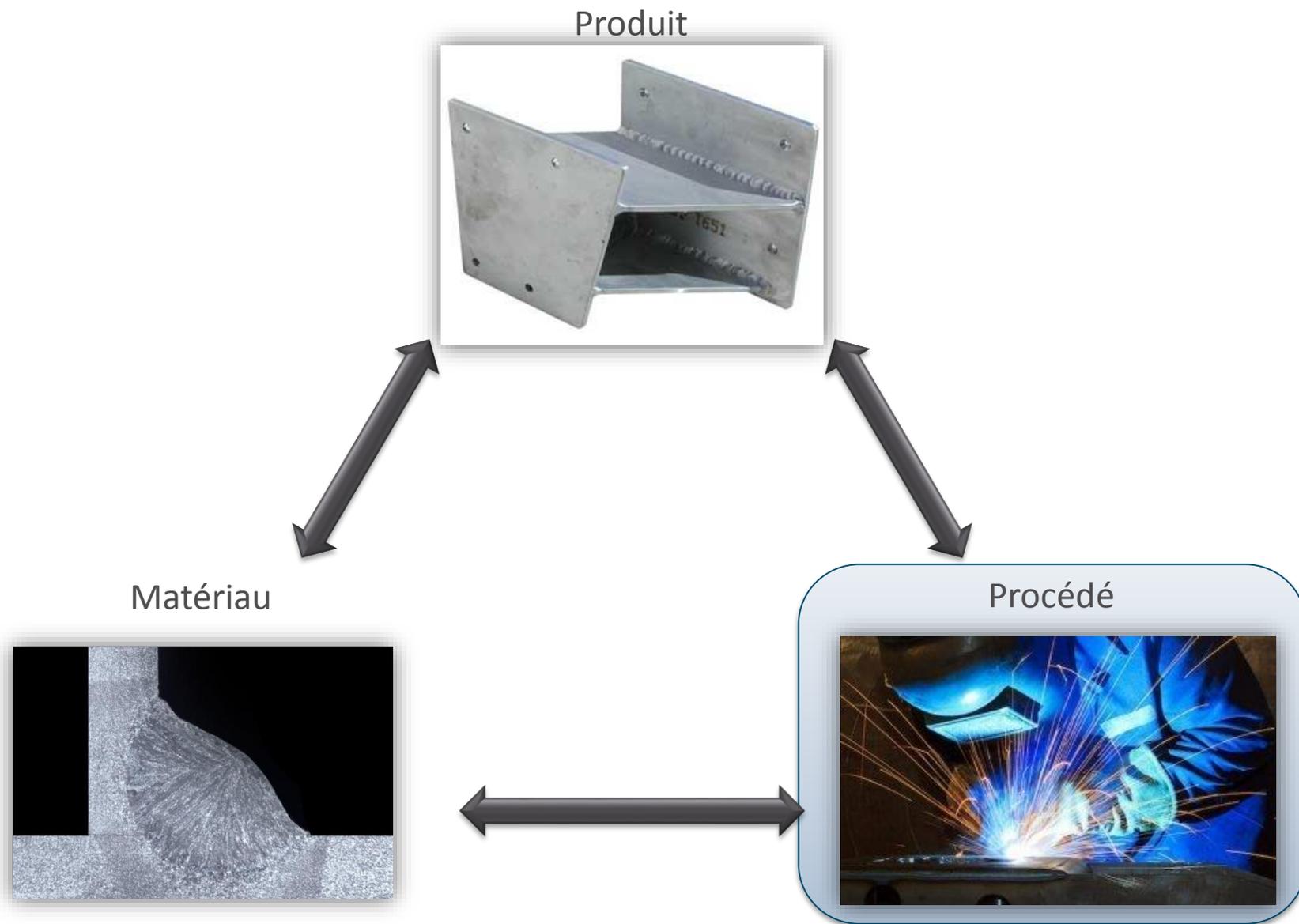
- **Alliages à durcissement structural (certains alliages d'aluminium, base nickel)**

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

	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
	Onde de choc	Echauffement mécanique	Diffusion moléculaire
	Frottement solide		Explosion
			Friction
			Ultra-sons
			Stir welding

- **Phase liquide :**

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

- **Phase solide :**

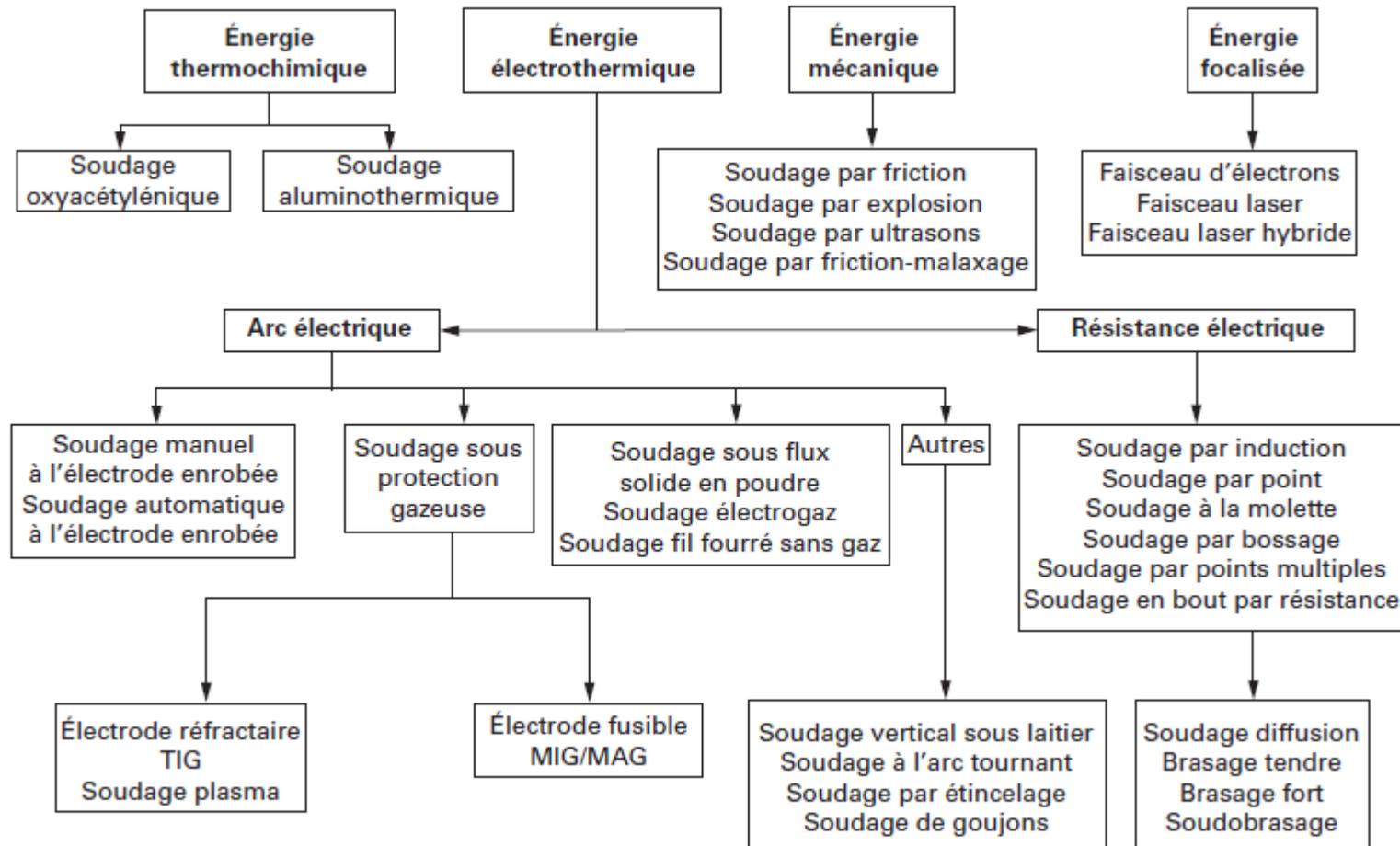
$T \sim 0.6T_f [K] + \text{effort presseur}$

Gain énergétique

Déformations résiduelles moindres

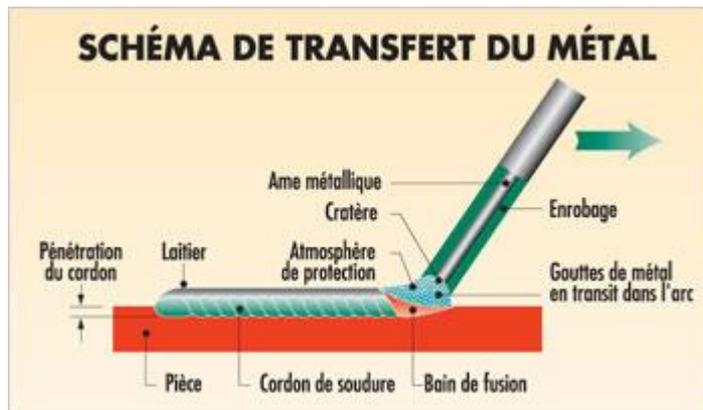
Possibilité de rester sous les températures de transfo. métallurgiques

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



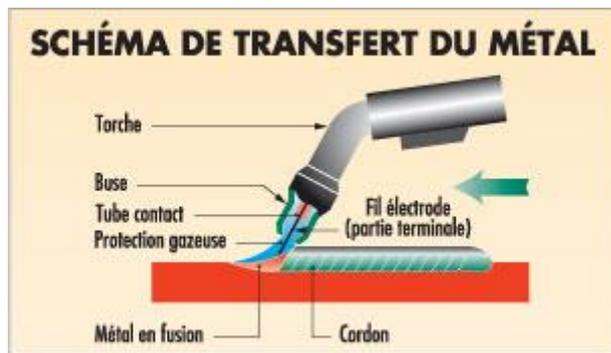
# Electrode enrobée

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



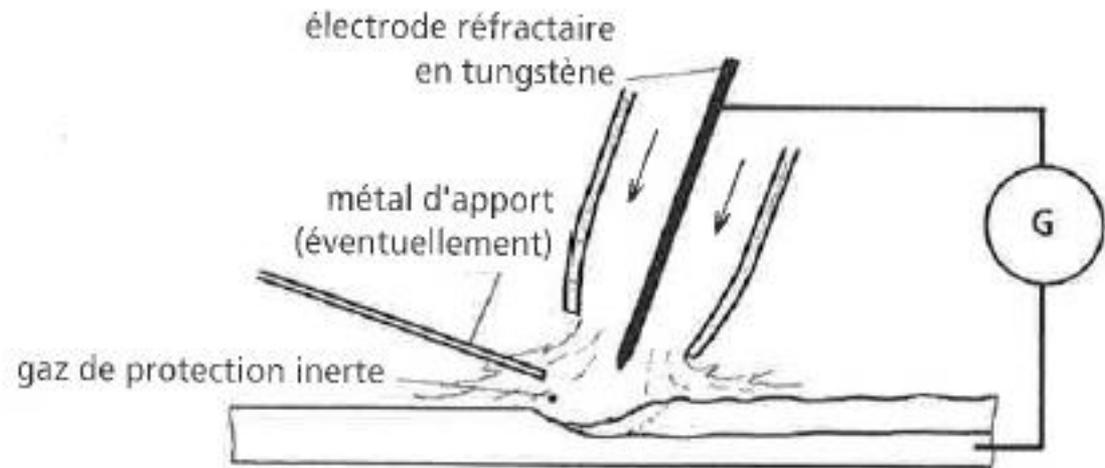
# MIG/MAG

- Metal Incert/Active Gaz ; même poste, simple changement du fil et du gaz
- Automatisable ; pas de laitier ;  $\Phi_{\text{fil}} = [0,6 - 2,4\text{mm}]$
- Grande souplesse  $\leq$  diamètre fil, type régimes : variation énergie apportée
- MIG : alliages légers et cuivreux, nickel et ses alliages, titane et ses alliages
- MAG : aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment)  
Fortes épaisseurs, pas de laitier, torche encombrante, apport de matière important



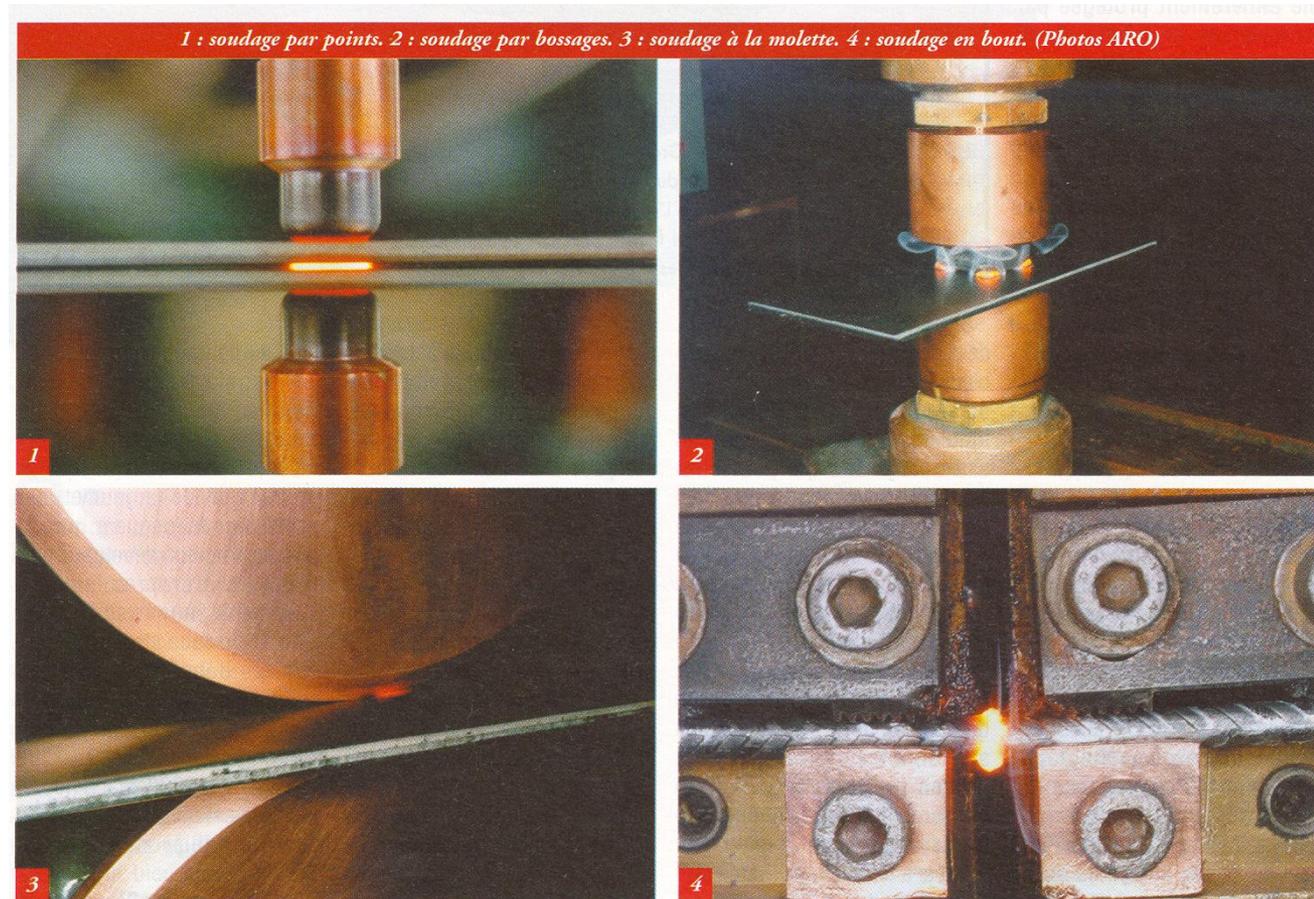
# TIG

- **Tungsten Inert Gaz** : électrode réfractaire en Tungstène + Argon et/ou Hélium
- Avec ou sans métal d'apport ; lent mais grande qualité => passes racines et métaux nobles ; automatisable ;  $e = 0,5 - 6mm$
- Aciers non alliés, faiblement et fortement alliés (inoxydables notamment), alliages légers et cuivreux, nickel, titane, tantale, zirconium et leurs alliages
- Faible apport de métal
- Température élevée



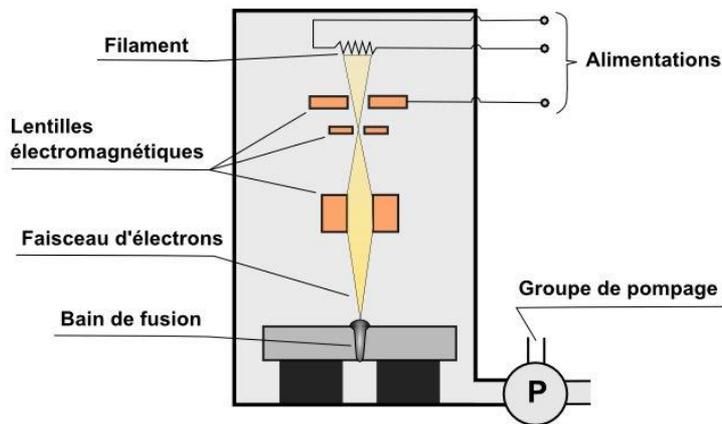
# Soudage par résistance

- ou soudage par points
- Rapide, bonne qualité
- Déformations faibles
- Soudure continue possible
- Epaisseur limitée



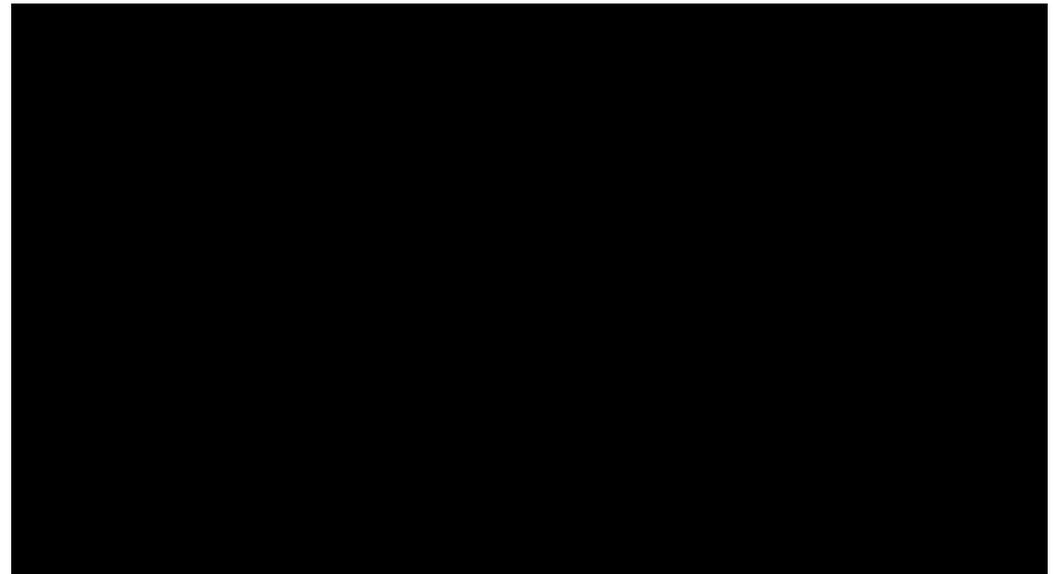
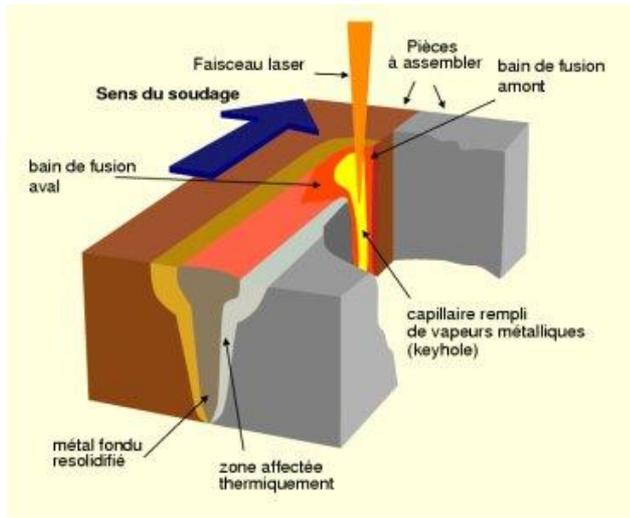
# Faisceau d'électrons

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



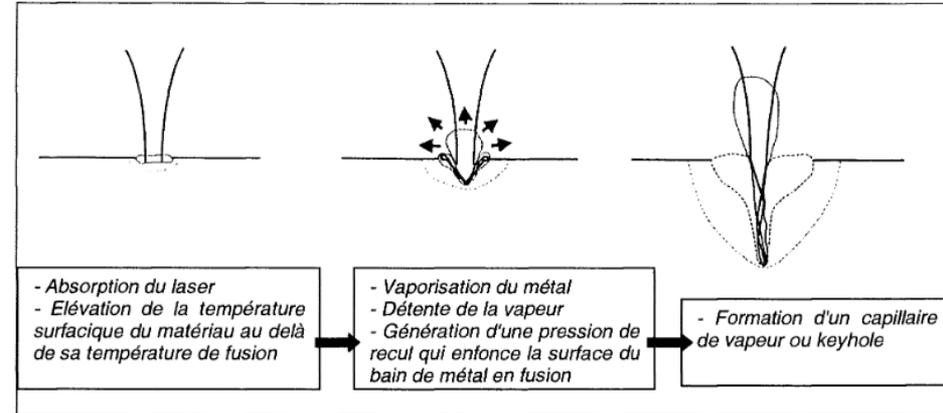
# Laser

- Laser, Nd:Yag CO<sub>2</sub> sur S=0.1mm<sup>2</sup> + gaz inerte
- Haute densité énergie (10-100MW/cm<sup>2</sup>) ;  $\eta \approx 6\%$
- Faibles distorsions <= grande pénétration, faible largeur
- Epaisseurs 0.1 à 6-8mm

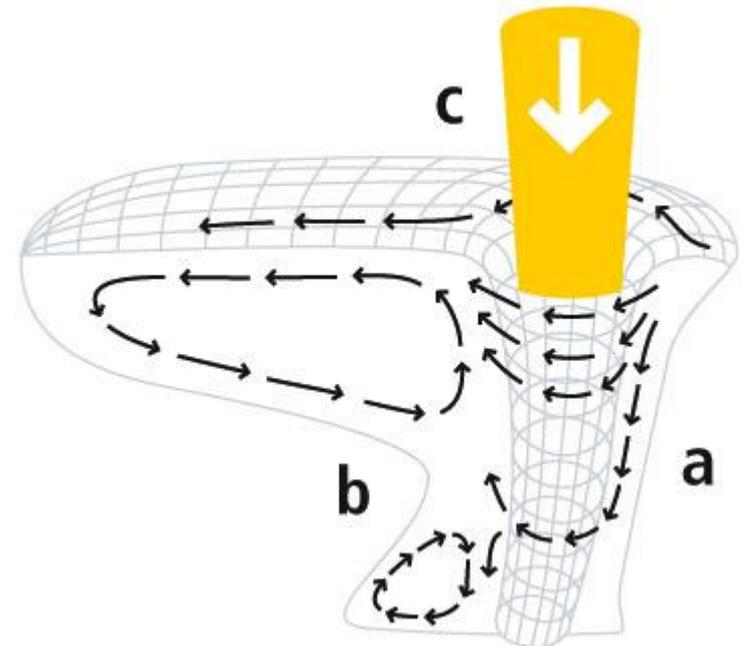
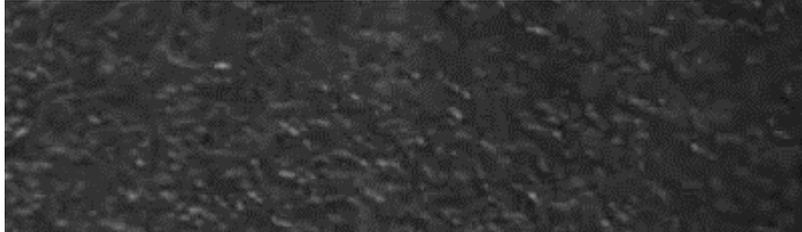


# Formation du keyhole

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

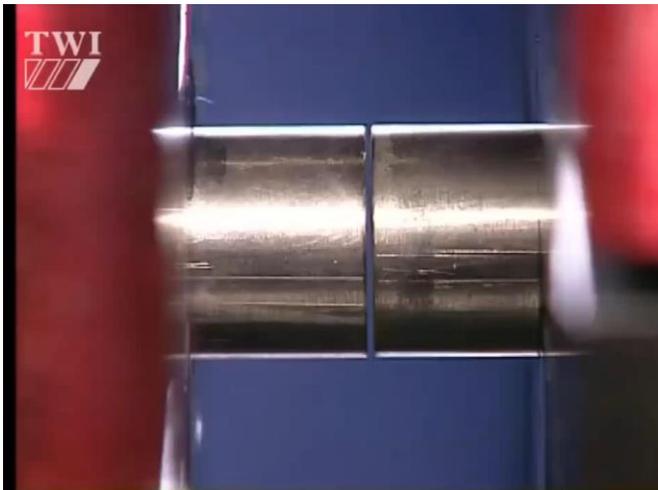


0,0000s 0mm/s Luleå Tekniska Universitet



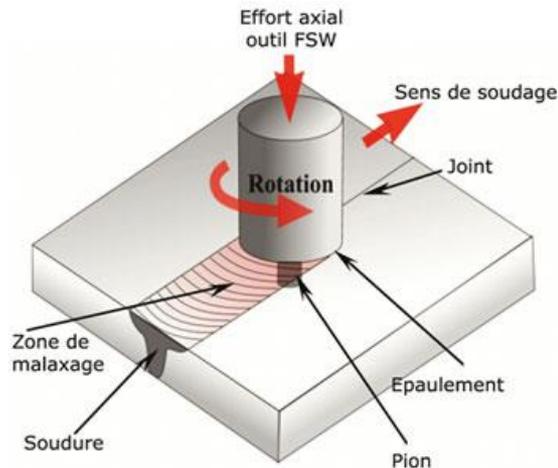
# Soudage friction

- 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)

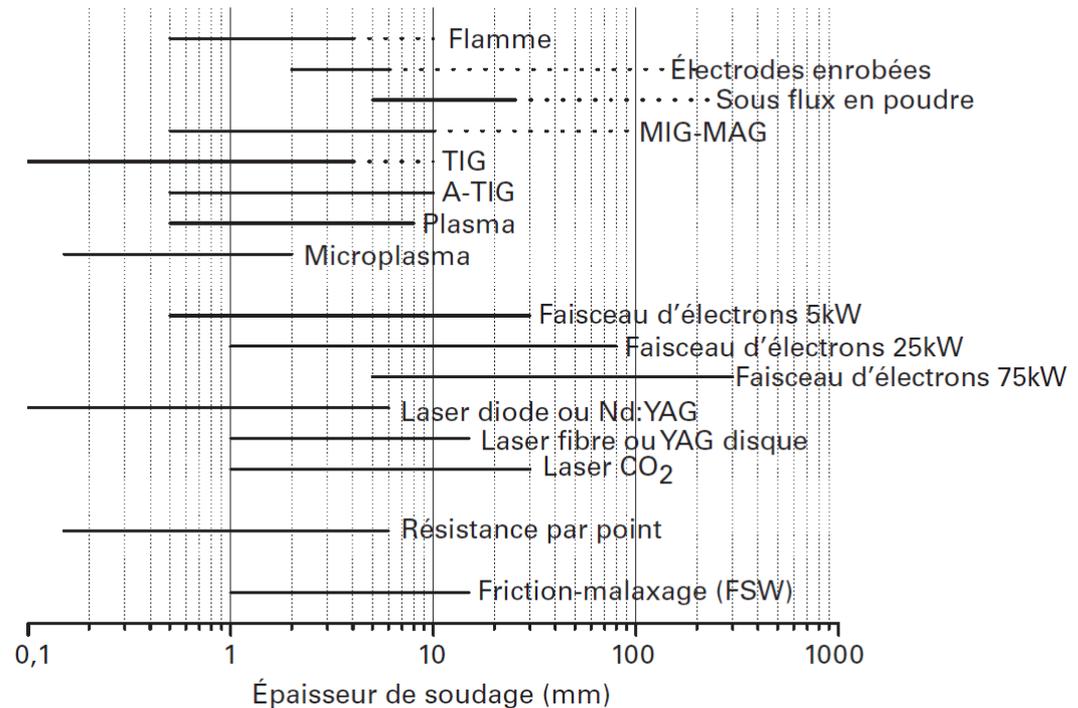
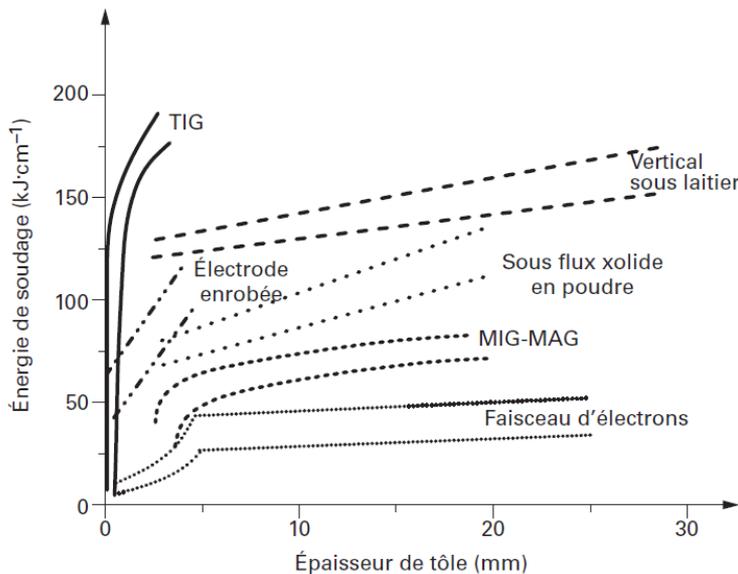
- Procédé récent : brevet TWI 1991
- Frottement solide avec outil tournant, fort bridage ; pas de métal d'apport
- Essentiellement alliages légers
- $E=0,2E_{MIG}$  ; pas de fumée, pas d'UV
- 1 outil = 1000m soudure Alu 6xxx ; e=15mm (30 sur 2 passes)
- Montable sur une machine d'usinage...



# Bilan – 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

# Bilan – Avantages/Inconvénients

- **Avantages**

- Liaison continue

- Economie de matière

- Étanchéité

- Automatisation (souvent)

- Bien adapté aux métaux

- Productif (pas de perçage, repérage simple, rapide...)

- **Inconvénients**

- Liaison indémontable

- Modifie la structure matière

- Induit des contraintes et/ou des déformations résiduelles

- Difficile de joindre des matériaux différents

- 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)

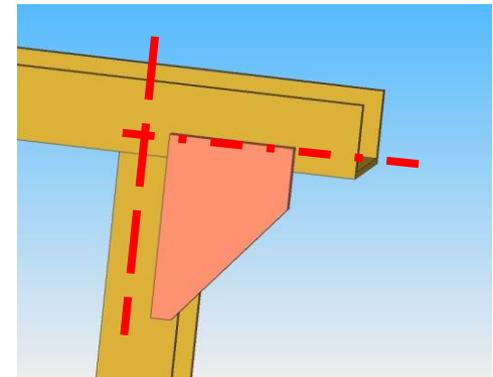
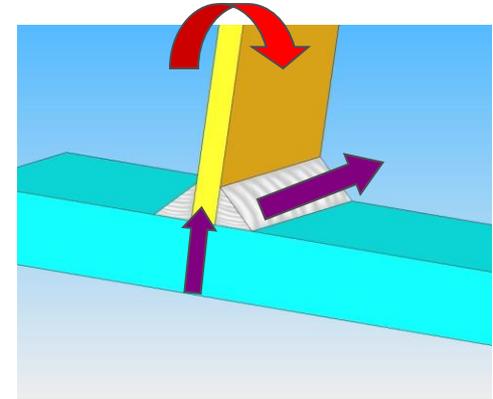
- Limiter les déformations en disposant des soudures symétriques

- 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)

