

- La formation
- ...

Cette robotisation n'est utile que sur des moyennes ou grandes séries selon la flexibilité de l'installation.

## Installation

Elle va du chariot motorisé (1 axe) au robot multi-axes.

Caractéristique robots :	Contrainte
poids embarqué	Taille pièce
volume de travail	Morphologie pièce
morphologie nombre d'axes	Dimension
	Accessibilité int/ext
	Joint multipasses
précision	tolérance
vitesse accélération...	Cadence
contrôle commande	

Il existe différents types de programmation : par apprentissage (peinture), point par point (soudage) ou à distance du BE ou à l'extérieur de l'entreprise.

Le suivi du joint peut se faire à travers l'arc ou par capteur optique (soudage adaptif).

## Le chariot motorisé

L'utilisation d'un chariot motorisé ou chariot automoteur permet d'automatiser beaucoup de procédés de soudage comme le TIG/GTAW, le MIG/MAG/GMAW, le PLASMA/PAW et l'ARC SOUS FLUX SOLIDE/SAW.

La tête de soudage est positionnée et fixée sur le chariot qui assure son déplacement le long du joint à réaliser sur la tôle, sur un rail ou le long d'une poutre rigide et fixe.

On rencontre des chariots dits " légers " qui permettent de supporter des torches TIG ou MIG / MAG, le dévidoir de fil d'apport reste alors sur un poste fixe ou sur un accessoire annexe. Les chariots les plus lourds supportent jusqu'à 100 kilogrammes de charge et peuvent embarquer la tête de soudage, la bobine de fil d'apport et pour le procédé A.S.F., la trémie à flux en poudre, voir même le dispositif d'aspiration du surplus de flux.

Le chariot motorisé ou automoteur est caractérisé par :

Son système de réglage

Son système de guidage

Sa ou ses positions d'utilisation

Son poids

Son encombrement

Son type de motorisation

Sa facilité d'adaptabilité

Son entretien

Son système de fixation paroi verticale

La motorisation du chariot est caractérisée par :

Son alimentation électrique

Sa puissance absorbée

Sa gamme de vitesse d'avance

Sa précision de vitesse

Son poids

Le guidage de la tête de soudage sur le chariot est réalisé par une roulette de palpation caractérisée par :

Son mode de contact

Sa forme

Un rail caractérisé par :

Sa longueur

Sa forme

Son mode de fixation (vis, ventouses, aimants, ressorts)

Une poutre caractérisée par :

Sa longueur

Sa section

Sa forme

Sa rigidité

Son mode de fixation (pieds, support, etc.)

Le guidage de la tête de soudage sur le chariot est réalisé par une glissière de réglage caractérisée par :

Son mode de déplacement

Sa précision

Sa forme

## Les positionneurs

Les positionneurs qui permettent d'effectuer des soudures circulaires. La table sur laquelle se fixe la pièce à souder peut être inclinée et mise en rotation à la vitesse de soudage. Les positionneurs permettent d'obtenir une disposition de soudage favorable et un volume de travail optimal. Ils doivent être capables de supporter les pièces à souder et les montages de soudage. Ils doivent être rigides et précis.

Ils se composent d'un bâti fixe supportant une table inclinable et tournante. La combinaison de mouvement permet de donner aux pièces à souder une orientation quelconque. Ce dispositif permet de choisir la position de soudage la plus favorable (en gouttière ou à plat par exemple).

Un positionneur est caractérisé par :

Son couple de rotation et de basculement

Sa morphologie : table tournante, deux axes, etc.

Sa capacité de levage

Sa précision de réglage

Les vireurs qui ont pour principale fonction de mettre en rotation des pièces de forme cylindrique. Un ensemble vireur se compose d'au moins deux traverses équipées chacune de deux galets. L'écartement des galets se fait manuellement, soit par pas fixes soit par vis à pas contraires.

Ils permettent de mettre en rotation des pièces cylindriques de diamètres et de longueurs variées

Ils sont composés d'une traverse motorisée dont les galets d'entraînement permettent de mettre en rotation les pièces à souder.

Une ou plusieurs traverses équipées de galets fous complètent l'installation.

Les tables tournantes (exemple : poupée Top de la SAF) ont pour fonction de mettre en rotation des pièces de forme cylindrique.

Les tables tournantes sont constituées généralement d'un plateau circulaire

Elles permettent de mettre en rotation les pièces à souder.

L'axe des pièces à souder peut être dans la position horizontale ou verticale.

## Le banc de soudage

Le **banc de soudage** permet de réaliser à plat les rabouages de tôles ou le soudage en longitudinal (intérieur ou extérieur) suivant une génératrice de virole. La tête de soudage montée soit sur un chariot, soit sur un bâti fixe et rigide permet le raboutage d'éléments fixes. Certains bâtis comportent un chemin de roulement et permettent de souder des pièces immobiles comme la photo ci-contre.

## La potence de soudage

La **potence de soudage** permet de positionner et de déplacer la tête dans différentes directions et différents niveaux. La potence peut être fixée au sol ou être mobile sur des rails. Elle permet de placer la tête au-dessus de la pièce à souder qui se déplace, ou bien de mouvoir la tête au-dessus de la pièce à souder qui reste fixe. La potence est souvent utilisée conjointement avec un positionneur ou avec des vireurs.

## Le robot de soudage

Le **robot de soudage** permet de positionner et de déplacer la tête dans plusieurs axes de rotation, différentes directions et différents niveaux. Les robots de soudage sont généralement constitués de trois parties : le corps, le bras et le poignet. Le robot de soudage est fixé au sol ou bien est mobile sur des poutres. Le robot permet de placer la tête au-dessus de la pièce à souder qui se déplace, ou bien de mouvoir la tête au-dessus de la pièce à souder qui reste fixe. Le robot de soudage est souvent utilisé conjointement avec un positionneur.

Un robot de soudage est caractérisé par :

- Le mode de commande.
- Les caractéristiques de fonctionnement (charge utile, précision, courses, nombre d'axes)
- La conception mécanique (architecture et technologie d'actionnement)
- Sa capacité de levage
- Sa facilité et précision de réglage

Le robot de soudage dit "cartésien" :

Ce robot offre trois axes de mouvement (deux horizontaux et un vertical).

Le robot de soudage dit "cylindrique" :

Les axes du bras de ce robot se déplacent suivant un système de coordonnées cylindriques, deux translations (verticale et / ou horizontale ) et une rotation.

Le robot de soudage dit "polaire" :

Les axes du bras de ce robot se déplacent suivant un système de coordonnées polaires, deux rotations et une translation.

**Le robot de soudage dit "rotoïde" :**

La structure mécanique du bras de ces robots comprend trois articulations (trois rotations ; coordonnées rotoïdes). Le degré de liberté est déterminé par le nombre d'axes qui caractérise l'aptitude du robot à effectuer une opération sachant que pour définir la position et l'orientation de la torche de soudage, six coordonnées indépendantes sont souvent nécessaires.

Toutefois, le nombre d'axes peut varier en fonction des associations qui peuvent être faites (addition de vireur, association d'un robot rotoïde avec un système de coordonnées cartésiennes, etc.).

## 1.19 SOUDAGE PAR FRICTION

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Bonne tenue des soudures aux sollicitations mécaniques	Réservé uniquement aux pièces de révolution
Soudage sans métal d'apport, ni gaz de protection	Difficile sur métaux à faible coefficient de frottement (fonte grise, bronze, laiton...)
Perte de métal réduite	Assemblage par recouvrement uniquement
Tolérances serrées et reproductibles	$\varnothing_{\max}$ sur barre : 150mm
Echauffement rapide, gradué et localisé	$\varnothing_{\max}$ sur tube : 250 mm
Soudage de pièces de formes et de métaux différents	
Puissance installée réduite et entretien réduit	
Pas de préparation des surfaces à souder	

### GENERALITE

#### 1.19.1 Domaine d'utilisation

- Mise au point aux USA et en Union soviétique en 1950 simultanément. Né d'un constat observé en mécanique de pièces en mouvement. En l'absence de lubrifiant, le frottement entre 2 pièces s'accompagne d'un grippage, traduisant l'élévation de T°.
- Ne firent leur apparition dans l'industrie qu'en 1961.
- En application totale lors de la 2ème guerre mondiale.

#### 1.19.2 Désignation normalisée

Désignation Française : **Soudage par Friction**.

Désignation Américaine : **Friction welding**.

Désignation internationale : **42**.

#### 1.19.3 Principe

Les pièces, généralement de révolution, sont serrées l'une contre l'autre. L'une des pièces est mise en rotation de sorte que le frottement engendre à l'interface une chaleur nécessaire au soudage.

Quand la région du joint est suffisamment plastique (sous effet de l'élévation de température), on arrête la rotation et on augmente l'effort axial pour forger.

Le principe du soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation en énergie calorifique produite à l'interface des pièces à assembler. La chaleur ainsi engendrée augmente la T° de l'interface **sans atteindre la T° de fusion du métal (Environ 1200°C)**.

#### 1.19.4 Type d'installation

Deux techniques de soudage par friction sont utilisées :

##### 1.19.4.1.1 Soudage par friction pilotée

L'énergie de soudage est fournie par un mécanisme d'entraînement de la pièce assurant **une vitesse de rotation constante**. L'opération d'assemblage se termine par une séquence de forgeage (effort de compression) effectuée à vitesse nulle. « ROTATION → FRICTION → FORGEAGE »

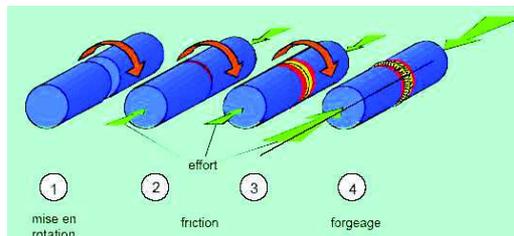
##### 1.19.4.1.2 Soudage par friction inertielle

L'énergie nécessaire au soudage est fournie par un volant d'inertie lancé à vitesse déterminée. L'ensemble volant d'inertie et pièce est désolidarisé du moteur d'entraînement dès le début du soudage. La séquence de soudage diffère de la précédente par le fait que la vitesse de rotation diminue au fur et à mesure qu'avance l'opération de soudage, jusqu'à s'annuler en fin de friction.

#### Séquence de soudage

Le soudage par friction pilotée se déroule en 3 périodes. Pour les 2 premières périodes, la vitesse de rotation de la pièce mobile est constante.

- **Accostage** : l'élément mobile vient en contact avec la pièce fixe sous une faible pression. Les irrégularités des surfaces créent des points localisés de surchauffe et de grippage sans raccourcissement mesurable des pièces.
- **Friction** : augmentation de la poussée axiale. La combinaison du mouvement de rotation et de l'effort de compression engendre un grippage généralisé de l'interface des pièces. La T° augmente jusqu'à la plasticité du métal et sous l'effort de compression, la phase pâteuse s'écoule vers l'extérieur.
- **Forgeage** : la séquence se termine par la période de forgeage consistant à appliquer un effort axial supplémentaire provoquant un refoulement du métal dans zone chauffée. Le rôle de ce forgeage est de favoriser l'interpénétration cristalline des 2 pièces pour réaliser une liaison analogue à celle que l'on obtiendrait en soudage à la forge.



#### Matériel

Elle comprend essentiellement un bâti rigide, un banc et 2 organes, l'un servant à la mise en rotation d'une des 2 pièces, l'autre maintenant fixe la 2<sup>ème</sup> pièce.

L'effort de compression auquel les pièces sont soumises peut être transmis soit par le mors tournant, soit par le mors fixe.

#### Paramètres de soudage

$$T = \mu = F / W$$

Cr : couple résistant

$\mu$  : coefficient de frottement

$\omega$  : vitesse de rotation

F : force qui initie le frottement

t : période de frottement ou période de friction

W : réaction d'un corps sur l'autre

Le choix des paramètres de soudage consiste donc à conjuguer Cr et  $\omega$  en fonction du résultat que l'on veut obtenir tant du point de vue mécanique que métallurgique.

#### 1.19.5 Pression de frottement

Le coefficient de frottement déterminant le couple résistant varie en fonction de l'effort de frottement et de la vitesse de rotation (varie entre 75 à 150 m/min). L'effort appliqué maintient un contact étroit entre les surfaces évitant toute contamination atmosphérique.

### 1.19.6 Vitesse d'échauffement

Elle doit répondre à certaines exigences métallurgiques et conditionne la vitesse de refroidissement (effet de trempe). Si elle est rapide : ZAT étroite, bourrelet faible et consommation faible. Si elle est lente : ZAT large, bourrelet important et consommation importante.

### 1.19.7 Temps de soudage

Il est lié à la vitesse de rotation et dépend aussi de la forme des pièces pour des nuances identiques. Les temps de soudage les plus courts sont obtenus pour de vitesse de rotation de 800 tr/min pour de l'acier S235.

### 1.19.8 Pression de forgeage (refoulement)

Elle est fonction de la capacité de déformation à chaud des métaux à souder. Le forgeage favorise l'interpénétration cristalline des joints de grain pour assurer une continuité métallique.

### 1.19.9 Exemples de réglage

METAUX	Pression daN/mm <sup>2</sup>		Ø 20 mm – S 315 mm <sup>2</sup>	
	Friction (réchauffement)	Forgeage (refoulement)	Temps total (friction)	Effort maxi daN (forgeage)
Acier doux	3,5 – 6	6 – 10	4	3150
Acier mi-dur	5 – 8	8 – 12	6	3800
Aciers spéciaux rapide	8 – 16	10 – 25	4 – 10	7500
Acier inoxydable	8 - 12	10 – 14	4 – 8	4400
Alliages légers	0,5 - 3	3 – 6	4	1900
Cuivre	2 - 4	2 - 6	12	1900

## Autres procédés de soudage

### 1.19.10 Par friction pilotée et inertielle

L'énergie de soudage est fournie par un moteur qui entraîne l'ensemble pièce-volant à vitesse constante.

### 1.19.11 Par friction orbitale

Technique dérivée du soudage par friction pilotée où les 2 pièces sont mises en rotation à des vitesses relatives différentes. L'échauffement est accompagné d'un mouvement orbital des pièces produit par combinaison des mouvements de rotation et de translation.

### 1.19.12 Par oscillations angulaires

Élévation de T° provoquée par frottement entre les faces, par oscillations angulaires de 5 à 20° avec des fréquences de 30 à 50 Hz. Phase d'échauffement importante.

### 1.19.13 Par oscillations linéaires

Pour l'assemblage des pièces prismatiques.

## Contrôle des assemblages

### 1.19.14 Sur pièce

- Examens visuels des bourrelets.
- Examens destructifs : métallographique, dureté, traction-pliage, résilience et fatigue.
- Examens non destructifs : radiographie, ultrasons, ressuage et magnétoscopie.

### 1.19.15 Sur machine

- Contrôle des paramètres par automate (pression, consommation de matière, temps, vitesse de rotation et couple résistant).
- Contrôle par enregistrement des paramètres

Courbes en fonction du temps : des efforts, de la consommation de matière, de la vitesse de rotation et du couple résistant.

- Contrôle dimensionnel.

#### 1.19.16 Remarques particulières

- Usinage des faces des pièces : l'état rugueux des faces favorise le GRIPPAGE en améliorant le coefficient de frottement.
- Protection atmosphérique : application des efforts exercée durant l'opération d'assemblage protège les faces à assembler.
- Alignement des pièces soudées : la coaxialité des assemblages soudés est fonction des tolérances des moyens de préhension assurant le positionnement relatif des pièces avant soudage.

## 1.20 SOUDAGE PAR ALUMINOTHERMIE

AVANTAGE	INCONVENIENTS
Pas d'énergie extérieure	Utilisation très limitée
Soudage des alliages de cuivre	

### Désignation normalisée

Française : Soudage Aluminothermique ou soudage par aluminothermie

Anglaise / Américaine : Aluminothermic Welding / Thermic Welding

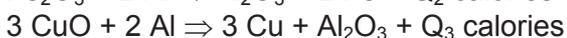
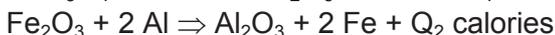
Numérique internationale : **71**

### Définition

Aluminothermie : production de hautes températures par réaction exothermique (transformation qui dégage de la chaleur) d'aluminium en poudre sur divers oxydes métalliques. Surtout utilisé dans le raboutage des rails.

### Principe

Il s'agit de faire réagir un mélange d'oxyde métallique et de poudre d'aluminium contenu dans un creuset. Le soudage aluminothermique est un procédé de soudage par lequel la fusion entre les pièces à souder est obtenue grâce à un métal d'apport liquide résultant d'une réaction exothermique entre des oxydes métalliques et de la poudre d'aluminium placés dans un creuset. La réaction chimique dégage une grande quantité de chaleur qui fait fondre les produits de la réaction et forme de l'acier liquide à plus de 2500°C que l'on verse dans un moule réfractaire contenant les extrémités des pièces à souder. Les principaux oxydes métalliques utilisés sont les oxydes de fer et de cuivre de sorte qu'il est possible de souder les aciers et le cuivre. Les produits concernés mettent en jeu les réactions chimiques suivantes qui ont lieu spontanément à partir d'une certaine température, appelée température d'amorçage (environ 1300°C pour les mélanges oxydes de fer aluminium).



Même si la température de la réaction atteint 2500°C, il faut préchauffer le plus souvent les pièces à souder. La charge peut atteindre de quelques centaines de grammes à plusieurs tonnes. La réaction est très rapide : de quelques dizaines de secondes à deux minutes. L'écartement des bords varie de 10 à 50 mm suivant la section à souder qui peut atteindre 2 m<sup>2</sup>.

### Domaine d'emploi

- Assemblage de pièces d'acier de dimensions moyennes à grosses.
- Raboutage de rails sur site (charge de quelques kg, durée de quelques minutes).
- Réparation de pièces massives moulées (par exemple un fond de pot de presse fissuré, 9 tonnes de mélange qui donnent 5 tonnes d'acier).
- Dans certains cas, le procédé aluminothermique peut être en concurrence avec le procédé de soudage vertical sous laitier (ESW).
- Raboutage de câbles, de barres et de tiges de cuivre ou d'alliage cuivreux avec d'autres compositions de charge.

### Utilisation pour chauffage

La chaleur de la réaction seule peut aussi être utilisée, et dans ce cas, le mélange exothermique joue uniquement le rôle de fourreau autour de la pièce à traiter, à souder (raboutage de câbles en aluminium) ou à chauffer (pour faire un traitement thermique par exemple).

### Hygiène et sécurité

Risques de brûlure causées par les pièces elles-mêmes.

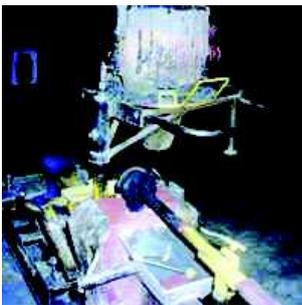
### Raboutage de rail

Les deux extrémités du rail à souder sont placées bout à bout et fixés solidement, en maintenant un écartement de 25 mm.



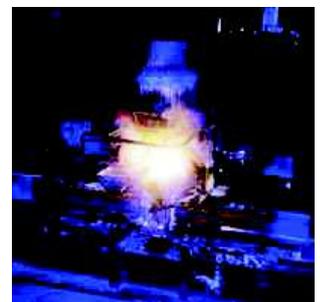
On met en place, autour de la zone à souder, les différentes parties du moule. Le moule est en matériau réfractaire à base de sable siliceux.

Pour rendre l'intérieur du moule totalement étanche, les interstices qui subsistent entre les bords du moule et la surface du rail, sont soigneusement colmatés avec une pâte à base d'argile et de sable.



On met en place un brûleur de préchauffage à la flamme pour chauffer l'intérieur du moule ainsi que les bords des rails. Le préchauffage joue plusieurs rôles dont celui de chasser l'humidité présente dans la zone à souder et d'apporter de la chaleur au joint, diminuer les contraintes et les risques de fissuration, etc. Cependant, pour de petites pièces, le préchauffage n'est pas toujours indispensable. Sur le dessus du brûleur (tube horizontal) la partie inférieure conique du creuset. Creuset de type standard, en acier avec paroi intérieure garnie de matériau réfractaire. Assez lourd mais réutilisable. L'intérieur du creuset contient un mélange de granules d'aluminium et d'oxydes de fer ainsi que des ferroalliages (de Mn, de Si et autres, qui sont destinés à apporter des éléments d'addition au futur bain de fusion), dans des proportions bien déterminées. Notons qu'il existe aussi sur le marché des " kits " de soudage aluminothermique avec creuset jetable.

Le creuset placé au-dessus de l'orifice du moule et on amorce la réaction chimique du mélange à l'aide d'une poudre d'allumage (à base de magnésie ou autre) amenée à combustion. Le but est de porter une petite portion du mélange à haute température (environ 1300°C) après quoi la réaction s'amorce violemment et se propage à tout le mélange en quelques secondes. Dès que la réaction chimique est terminée dans le creuset, on ouvre le clapet de retenue situé dans sa partie inférieure et on laisse couler le métal liquide dans le moule par gravité. La très haute température du métal d'apport liquide garantit l'obtention d'une bonne soudure. Il ne reste plus qu'à défaire le moule et à redonner au joint soudé par meulage le profil du rail.



## 1.21 SOUDAGE VERTICAL SOUS LAITIER

AVANTAGE	INCONVENIENTS
Soudage entièrement automatique	Équipement électromécanique complexe et coûteux
Soudage pièce très épaisses (35 à 600)	Soudage en continu sans interruption du joint

mm)	
Pas de préparation de joint	Caractéristiques mécaniques moyennes
Peu de déformation angulaire	Soudage en position verticale
Peu de risques de fissuration	Structure métallurgique à très gros grains en ZAT
	Traitement de normalisation nécessaire après soudage

### Désignation normalisée

Française : Soudage VSL (Vertical Sous Laitier)

Américaine : Electroslag Welding

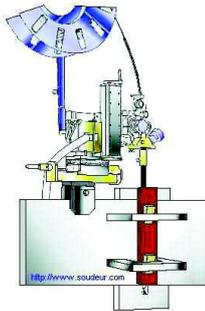
Numérique Internationale : 72

### Définition

L'opération de soudage consiste à effectuer une soudure en une seule passe sur des pièces placées verticalement et entre lesquelles on a aménagé un écartement sans préparation spéciale des bords. Le métal d'apport (1 ou plusieurs fils) plonge dans un bain de laitier et fond par effet joule, réalisé par la très haute résistance électrique du laitier et la forte intensité appliquée. **Le soudage VSL n'est pas un procédé à l'arc, bien que ce régime soit nécessaire quelques instants au démarrage.**

Le bain de fusion et le bain de laitier sont maintenus dans le joint par des patins de Cu refroidis, situés de part et d'autre des pièces. Ces patins se déplacent verticalement de bas en haut au fur et à mesure de l'avance de la soudure. Notons que la hauteur du bain de laitier fondu servant de source de chaleur et protégeant le métal des oxydations est de 40 à 60 mm. Cela implique des appendices pour le début et la fin du cordon. En cas d'interruption, la reprise est très difficile à effectuer.

Le soudage s'effectue en courant continu (polarité positive) ou en courant alternatif, pour éviter l'électrolyse du laitier.



### Domaine d'emploi

- Soudage des aciers non alliés et faiblement alliés (pas de trempe)
- Bout à bout de tôle de forte épaisseur
- Soudage d'angle avec sabots spéciaux
- Soudage circulaire de tubes de grand diamètre avec sabots spéciaux
- Employé principalement en soudage manuel mais peut être automatisé.

### Principes

- Soudage par coffrage
- Soudure réalisée en une seule passe entre deux tôles à bords droits à écartement constant (usage d'étriers)
- Métal fondu soutenu par patins en cuivre, refroidis par eau
- Flux employés avec haute viscosité à chaud pour éviter un écoulement intempestif et avec une conductivité élevée pour assurer le dégagement calorifique du bain.

### Composition d'une installation

- Un générateur de courant continu ou alternatif. Le courant alternatif est préférable pour limiter les effets de soufflage magnétique.
- Tête de soudage avec dispositifs de réglage de la position du ou des fils
- Un coffret de contrôle et de commande
- Un dispositif de déplacement des plaques du moules et du fil
- Une trémie d'alimentation en flux électroconducteur
- Un dispositif d'alimentation et d'oscillation du ou des fils électrodes

- Un sabot mobile en cuivre avec système réfrigérant sur chaque face du joint.

### Paramètres opératoires

Principalement lié à la sensibilité à la fissuration à chaud du matériau soudé.

#### 1.21.1 Intensité du courant :

Intensité du courant comprise entre 400 et 800 A pour un fil électrode Ø 3,2 mm. L'intensité peut atteindre 1000 A par guide-fil

#### 1.21.2 Tension du courant :

Tension comprise entre 30 et 55 V. Une tension faible augmente la profondeur du bain de fusion et diminue la largeur de la soudure.

#### 1.21.3 Vitesse de dévidage du fil d'apport :

La vitesse de dévidage du fil est de l'ordre de 4 à 6 m/min.

### Procédés dérivés

#### Soudage vertical sous gaz de protection (procédé 73).

Création d'un arc électrique entre la pièce à souder et le fil fourré. Le bain de fusion est protégé par un cône de gaz actif (Ar+CO<sub>2</sub> ou Ar+O<sub>2</sub>) et est soutenu par des flasques en cuivre placées de part et autres du joint soudé et refroidi par une circulation de réfrigérant.

Avantage et inconvénient similaire au procédé 72.

## 1.22 SOUDAGE PAR DIFFUSION

AVANTAGE	INCONVENIENTS
Assemblage de certains matériaux hétérogènes (cuivre / aluminium)	Opération de soudage très coûteuse
Réalisation de liaisons difficiles (métal / graphite ou métal / céramique)	Préparation de surface très soignée
Limitation des déformations	Soudage sur pièces de petites dimensions
Pas de transformations de structure des matériaux par la chaleur	Temps de soudage parfois très long (plusieurs heures)
	Diffusion difficile sur matériaux avec des coefficients de dilatation très différents
	Contrôle difficile de la diffusion incomplète

### GENERALITE

- Technique développée par les soviétique
- A pris naissance suite à l'observation d'incidents rencontrés dans les engins aérospatiaux où des soudage involontaire se sont produits dans le vide spatial.

### Désignation normalisée

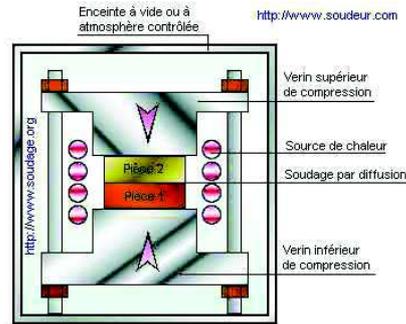
- Française : Soudage par diffusion
- Anglaise / Américaine : Diffusion Welding / Diffusion Bonding
- Numérique internationale : 45

### Définition du procédé par diffusion

Le soudage par diffusion (Diffusion Bonding) est un procédé opérant en phase solide et statique. La préparation des surfaces des pièces, par rectification et par polissage, est très soignée (rugosité inférieure à 1 µm). La propreté et le dégraissage des surfaces des pièces doivent être rigoureuses et vérifiées. Les pièces à souder sont maintenues en contact parfait l'une contre l'autre par une pression donnée. Les pièces sont portées à une température de diffusion égale à 0,6 fois la température absolue de fusion du matériau à assembler pendant un temps déterminé. Le soudage est réalisé sous vide d'air ou dans une atmosphère protectrice inerte contrôlée.

## Installation pour soudage par diffusion

- Une chambre à vide ou à atmosphère protectrice contrôlée.
- Un dispositif de serrage des pièces par vérins.
- Un dispositif de chauffage (chaleur diffuse en milieu isotherme).
- Un dispositif de commande du cycle de soudage.



## Opération de soudage

- Mise en place des pièces sur un montage dans l'enceinte.
- Réalisation du vide ou création de l'atmosphère protectrice par injection de gaz
- Chauffage des pièces par rayonnement ou HF puis mise sous pression.
- Fin du cycle de soudage avec arrêt du chauffage et de la pression
- Purge de l'atmosphère de l'enceinte
- Déchargement des pièces soudées par diffusion

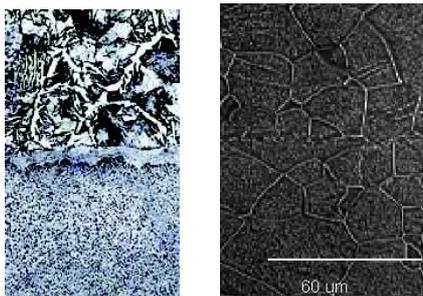
## Paramètres du procédé

- La pression et force de contact.
- La température de chauffe.
- Le temps de chauffe et de pression.
- Les caractéristiques des matériaux (dilatation, élasticité, fusion).

## Mode opératoire

L'accostage des pièces sous pression assure le contact des aspérités microscopiques. Sous l'action de la pression et de la chaleur, les déformations plastiques permettent aux atomes de se rapprocher à des distances inter atomiques et de créer des liaisons métalliques entre les deux pièces. Il y a diffusion et migration des joints de grain par germination dans la matière. La continuité de la matière est ainsi assurée.

## Micrographie de soudage par diffusion



## Paramètres d'influence

- Pression et force de contact
- Température de chauffe
- Temps de chauffe et de pression
- Caractéristique des matériaux (dilatation, élasticité, fusion...)

## Performances

- Coefficient de dépôt :

- Vitesse de soudage à plat en remplissage :
- Facteur de marche opérationnel :

## 1.23 SOUDAGE PAR ARC TOURNANT

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Soudage de tous les aciers (excepté austénitique)	Soudage pièce de révolution fermée (épaisseur 0.8-5 mm et 300 mm <sup>2</sup> maxi)
Pas de préparation spéciale des extrémités à souder	Procédé limité au soudage des tubes en «acier noir»
Position relative des pièces (position angulaire) précise	Elimination du bourrelet sur poste ≠
Faible consommation de matière et absence de métal d'apport	Gaz de protection
Forme du bourrelet arrondi sans arête vive	
Soudage pièce grande longueur	
Tolérances serrées et reproductibles	
Temps de soudage très court	
Excellent rendement énergétique	
Entretien réduit	
Faible coût de la soudure	

### GENERALITE

#### 1.23.1 Domaine d'utilisation

La première machine est apparue en 1973 (ESSEN). Ce procédé est classé dans les moyens de soudage autogène sans métal d'apport. Cette technique de soudage est à la fois un complément et un concurrent des autres de soudage de tubes bout à bout (étincelage, friction, TIG, MIG et MAG).

#### 1.23.2 Désignation normalisée

Française : Soudage par Arc tournant  
 Américaine : Magnetically impelled arc butt welding  
 Désignation numérique internationale : **185**

#### 1.23.3 Principe

Application de la LOI de LAPLACE :  $F = I \times L \times B$ . La force **F** appliquée à un conducteur électrique **L** parcouru par un courant **I** en présence d'une induction magnétique **B**. En principe, on le trouvera pour le soudage en bout et soudage à bord relevé.

##### 1.23.3.1.1 Soudage en bout par pression

C'est la variante la plus utilisée. L'arc se déplace entre les pièces à assembler sous effet d'un champ magnétique généré par une bobine. Appliquer à un arc électrique les lois de l'électrotechnique en ce qui concerne les conducteurs rectilignes parcourus par des courants électriques.

##### 1.23.3.1.2 Soudage sur bords relevés

Utilisé que dans des cas particulier. La soudure n'est pas soumise à un forgeage sous pression comme dans le cas précédent. Donc il présente une faible résistance car la hauteur zone fondue n'excède pas 0.2 à 0.5 mm. L'arc est amorcé puis se déplace entre les bords relevés des 2 pièces à assembler d'une part et une électrode auxiliaire non consommable d'autre part. L'amorçage de l'arc se fait soit par un dispositif haute fréquence, soit par l'établissement d'un contact entre les bords relevés et l'électrode auxiliaire.

#### Mise en œuvre du procédé

De principe, le soudage par arc tournant s'applique à tous les profilés fermés.

##### 1.23.3.1.3 Etat initial :

- Serrage des extrémités pièces dans les mors assurant la position relative des pièces.
- Mise en place des la bobine de déflexion magnétique

- Mise en contact des 2 extrémités sous un faible effort.

#### 1.23.3.1.4 Début soudage :

- Courant de soudage (tension d'arc), l'alimentation électrique de la bobine magnétique et le débit de gaz interviennent simultanément.
- Les extrémités des pièces qui se touchaient sont écartées l'une de l'autre d'une distance prédéterminée : l'arc s'amorce.

#### 1.23.3.1.5 Soudage :

- L'arc tourne
- Les bords des pièces entrent en fusion pâteuse.

#### 1.23.3.1.6 Fin du soudage :

- Un effort de refoulement par vérin ramène les pièces en contact l'une de l'autre et les maintient en pression.
- Le courant de soudage, le champ magnétique et l'arrivée de gaz inerte sont coupés

### Matériel (éléments constitutif d'une machine)

2 machines standards en 2 catégories : Machines verticales et horizontales.

- Chariot mobile sur lequel est bridée et prend appui une des pièces à assembler
- Chariot inférieur fixe sur lequel est bridée la seconde pièce à souder
- Butée d'appui de la pièce fixe
- Bobine magnétique
- Cylindre commandant les déplacements rectilignes du chariot mobile et exerçant en particulier l'effort de refoulement
- Groupe hydraulique
- Source des courants de soudage et d'alimentation de la bobine magnétique
- Alimentation du gaz de protection (CO<sub>2</sub>)
- Pupitre de commande, de réglage et de contrôle des paramètres

#### 1.23.4 Tous les mouvements sont hydrauliques

L'écartement des pièces ou «distance d'arc» est réalisé par dosage d'une fuite temporaire du vérin à partir du contact entre pièces. 20 N/mm<sup>2</sup>.

#### 1.23.5 Courant de soudage

Amené par les dispositifs de serrage, la gamme des intensités va de 50 à 1000 A. La tension étant de 30 Volts.

Le générateur de courant continu a une tension à vide élevée et de forte pente.

#### 1.23.6 Bobine magnétique

Aucun contact avec les pièces. Plusieurs dispositifs : bobines extérieures ou inférieures aux pièces.

#### 1.23.7 Gaz de protection

Fonction de la capacité de déformation à chaud des métaux à souder. Le forgeage favorise l'interpénétration cristalline des joints de grain pour assurer une continuité métallique.

#### 1.23.8 Gaz de protection

Généralement utilisé dans les applications pratiques, en dehors des aciers austénitiques, est du CO<sub>2</sub>. L'alimentation du gaz se fait en regard de l'extrémité des pièces à assembler : soit au travers de la bobine magnétique, soit au travers des pièces en fonction de la conception de ces dernières.

### Paramètres de soudage

#### 1.23.9 Position de départ

Pression de départ 20 N/mm<sup>2</sup>, longueur des pièces brute, durée 0.2 s.

#### 1.23.10 Courant de soudage

Soudage courant continu 50 à 1000 A. La tension étant de 30 Volts. Bobine 5 et 15A.

### 1.23.11 Gaz de protection

CO<sub>2</sub> avec 20l/min.

### 1.23.12 Ecartement

Fonction de l'épaisseur et du diamètre du tube = 1.5 mm à 2.5 mm.

### 1.23.13 Temps de chauffage

Temporisé et fonction de l'épaisseur du tube.

### 1.23.14 Efforts et temps de refoulement

Réglage identique à la phase de forgeage en friction.

### 1.23.15 Raccourcissement des pièces

Contrôlé en fin d'opération par capteur de déplacement.

## **1.24 SOUDAGE PAR FRICTION MALAXER**

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Grande productivité	Industrie automobile
Aucune préparation de joint (dégraissage uniquement)	Industrie aéronautique
Aucun consommable de soudage utilisé (pas de gaz, pas de métal d'apport)	Industrie ferroviaire
Soudage monopasse bord à bord sans préparation jusqu'à 15 mm	Chantiers navals (Bateaux à grande vitesse)
Soudage d'assemblage hétérogène (Cu/Al, Mg/Cu)	
Déformations et contraintes très faibles	
Complètement automatisé et informatisé	
Excellentes qualités de joint	
Bonnes caractéristiques mécaniques	
Aucune nuisance environnementale (pas de fumée, pas d'arc, pas de projections)	

## **GENERALITE**

### 1.24.1 Désignation normalisée

Française : Soudage par Friction malaxage.

Américaine : Friction Stir welding System

Désignation numérique Internationale : 42 (doit être confirmé, car nouveau procédé)

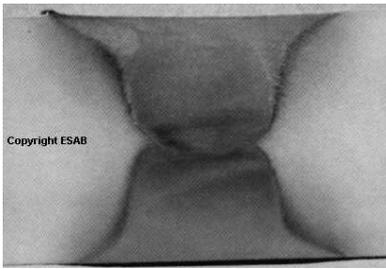
### 1.24.2 Domaine d'utilisation / Définition

Le soudage «Friction Stir Welding System» ou Soudage par friction malaxage (brevet **TWI**) ou soudage tixotropique est un procédé relativement nouveau, développé depuis 1992 par TWI et ESAB. Ce procédé particulièrement adapté pour le rabotage de tôles et profilés en alliage d'aluminium. Il permet l'assemblage d'alliages d'aluminium réputés difficiles à souder (séries 2xxx et 7xxx). Il est aussi utilisé pour les jonctions hétérogènes Aluminium/Cuivre, Aluminium/Acier, Magnésium/Cuivre et Cuivre/Acier. Ce procédé assure des soudures de très haute qualité avec un minimum de déformations.

### 1.24.3 Principe

Les pièces à assembler en bout à bout sont solidement maintenues sur un bâti rigide. Un outil rotatif ou fraise avec un profil spécial est positionné au droit du joint. Une certaine vitesse de rotation de la fraise et une force de pression très élevée sont imprimées à l'outil à la surface de la pièce à assembler. La chaleur dégagée par le frottement de la fraise associée à la pression d'appui assure la mise à l'état plastique des matériaux à assembler et assure leur jonction. L'outil rotatif mélange le métal des pièces. La soudure est réalisée par un mouvement linéaire de l'outil en rotation à une certaine vitesse d'avance. Il autorise l'assemblage de pièces d'épaisseurs comprises entre 1,5 mm et 30 mm.

### 1.24.4 Coupe macrographique d'une soudure Friction Malaxage



Coupe macrographique réalisée sur une soudure de tôles d'aluminium 7050-T7451 de 25 mm d'épaisseur



## 1.25 SOUDAGE PAR EXPLOSION

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Permet d'assembler des matériaux très dissemblables	Procédé très coûteux
Aluminium et acier	Mise en œuvre très difficile et dangereuse
Titane et Acier	Autorisation ministérielle de mise en oeuvre
Zirconium et tantale et acier inoxydable	
Cuivre et acier	
Plaquage de surface planes ou cylindriques	
Plaquage plaque tubulaire	

### GENERALITE

Découvert fortuitement en **1957** au cours d'opérations de formage par explosion.

#### 1.25.1 Désignation normalisée

Française : Soudage par Explosion

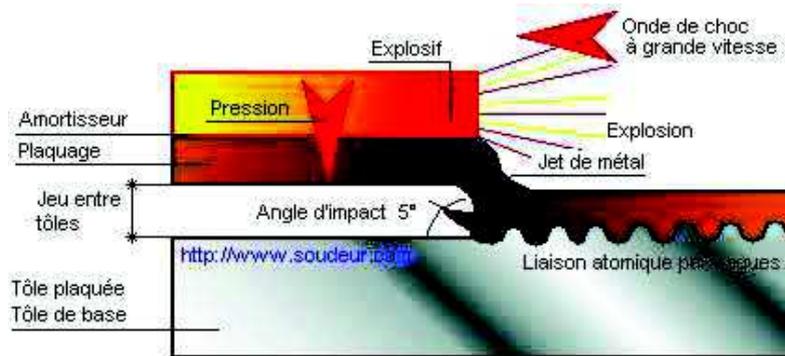
Anglaise / Américaine : Explosive Welding / Explosion Welding

Numérique internationale : **441**

#### 1.25.2 Définition

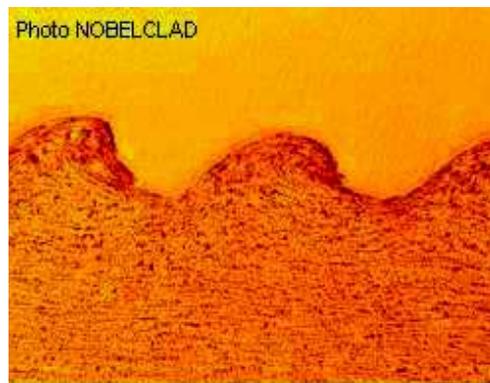
La liaison entre les deux pièces est obtenue par la projection d'une pièce sur l'autre par pression et vitesse élevées. L'onde de choc de l'explosion par détonation contrôlée est utilisée pour assembler les matériaux avec une vitesse de déformation très élevée, à très grande vitesse de déplacement (de l'ordre de 3500 à 5000 mètres / seconde) et sous une très forte pression (> 20 000 MPa). Le soudage par explosion (EXW)

est un procédé d'assemblage à haute énergie à l'état de phase solide de matériaux non miscibles entre eux.



### 1.25.3 Principe

Le soudage par explosion est un procédé de soudage par recouvrement de deux ou plusieurs matériaux. L'explosif utilisé est à base de **nitrate d'ammonium**. Il est uniformément réparti sur la partie supérieure de l'élément à plaquer. Il est conçu pour que le front de détonation se déplace de façon tangentielle le long de la pièce à plaquer. Le soudage par explosion est utilisé pour assembler de larges surfaces de tôles de nuances très différentes. La tôle de revêtement est très souvent d'épaisseur inférieure à la tôle à plaquer. L'ensemble du dispositif est placé sur un ensemble massif très dense nommé cible. Un amortisseur constitué d'une plaque de chlorure de polyvinyle ou de caoutchouc est interposé entre l'explosif et le matériau à plaquer afin de contrôler la force explosive. La liaison intermétallique ou coalescence des deux matériaux est effectuée par la déformation plastique avec la formation de vagues ou ondulations. (voir photo ci-dessous)



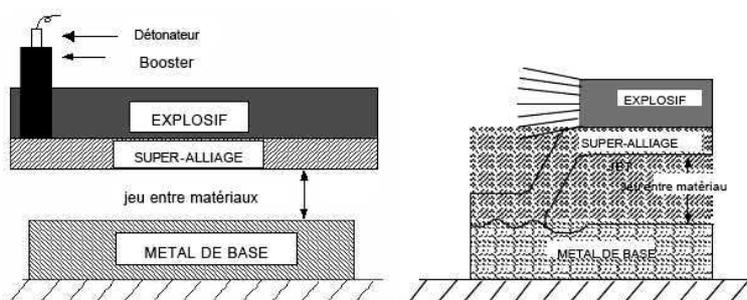
$$\lambda = K e \sin^2(\beta / 2)$$

### 1.25.4 Paramètres opératoires

- Les propriétés de l'explosif utilisé
- La disposition de la charge explosive
- La vitesse d'impact
- L'angle d'impact (tir en parallèle ou tir incliné/tir en dièdre)

### 1.25.5 Hygiène et sécurité

- Risques avec la manutention des explosifs



## 1.26 Procédés d'assemblage des plastiques

### Types de plastiques

2 types :

- les thermoplastiques, de structure linéaire, ramifiée, branchée sont fusibles **donc soudable**.
  - PVC
  - Polyéthylène (PE)
  - Polypropylène (PP)
  - ...
- les thermodurcissables, de structure tri dimensionnelle, réticulée **sont infusibles et insolubles** → non recyclable.
  - Acrylonitrile / butadiène / styrène : ABS
  - Poly Methacrylate de Methyle : PMMA
  - Fibres de verre renforcées GFK

### Procédés de soudage

#### 1.26.1 Soudage au miroir

Les extrémités des surfaces à souder sont plastifiées par contact avec un élément chauffant (miroir). Après recul du miroir, les pièces sont pressées l'une contre l'autre.

- dressage et positionnement des pièces : bonne rectification des extrémités
- égalisation et chauffage
- escamotage élément chauffant
- assemblage et refroidissement : mise sous pression maintenue pendant tout le refroidissement

#### 1.26.2 Soudage au chalumeau électrique à chaud

Technique manuelle pour épaisseur de 1 à 10 mm.

Un flux de gaz chaud plastifie les surfaces à assembler et l'extrémité du fil d'apport.

- chalumeau à buse ronde
  - o T° 300 à 420°C, mesure avec TC à 5 mm extrémité buse
  - o Pression verticale sur le fil d'apport
  - o Débit gaz de 40 à 60 l/min
- Chalumeau à buse rapide
  - o Même conditions de température et débit que buse ronde.
  - o Le fil est fondu dans la buse qui a une forme de bec
  - o Vit soudage 3 à 4 fois plus élevée que buse ronde (40-50cm/min)

#### 1.26.3 Soudage par cordon extrudé

Pour parois épaisses. Une extrudeuse, alimentée en granulés ou fil, plastifie matériau d'apport puis déposé dans le joint.

Les bords de la pièce sont chauffés par le chalumeau.

T° de 250 à 300°C – débit < 300 l/min

#### 1.26.4 Autres procédés

- chauffage par résistance
- soudage par résistance noyée
- chauffage par induction
- soudage par ultrasons
- soudage par friction vibratoire

#### 1.26.5 Préparation des bords

Joint en V, T ou X

### 1.26.6 Défauts des soudures

Comme pour le soudage des métaux, selon norme A89 800, six groupes :

- 1. Fissures
- 2. Cavités
- 3. Inclusions solides
- 4. Manque de fusion
- 5. Défaut de forme
- 6. Défauts divers

### 1.26.7 Contrôle des soudures

4 types de contrôle :

- contrôle visuel
- contrôle diélectrique
- contrôle radiographique
- contrôle par ultrasons

## 1.27 Défauts des soudures

### Origine des défauts

Les défauts trouvent leurs origines :

- dans le procédé de soudage
- dans les paramètres
- nature des pièces
- métal d'apport, préparation
- atmosphère de travail (humidité, courant d'air)
- le soudeur

### Classement des défauts

Il existe 6 types de défauts classés par groupe selon norme **NF EN ISO 6520-1** concernant le soudage par fusion. Le soudage avec pression est traité dans la norme **NF EN ISO 6520-2**.

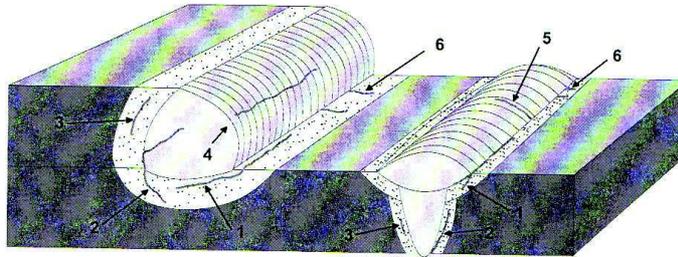
La numérotation commence par le numéro du groupe puis du type de défaut en centaine.

#### 1.27.1 Groupe 1 : Fissures

	mdb	ZAT	ZL	ZF	
101. Longitudinales	X	X	X	X	
102. transversales	X	X		X	
103. rayonnantes				X	
104. de cratère				X	+ fréquentes en fin de cordon / retassure
105. marbrées	X	X		X	Petites fissures //
106. ramifiées	X	X		X	
10040. microfissures					

→ La fissuration à chaud se situe dans toutes les zones de l'assemblage et de forme soit oblique (ZF), longi (ZF et ZL), transversale (en ZL). Si le rapport Profondeur/Largeur ↗ alors le risque ↗

→ La fissuration à froid se situe également dans toutes les zones de l'assemblage et dans toutes ses formes, longi, obliques, transverse ...



- 1- fissure au raccordement
- 2- fissure à la racine
- 3- fissure sous cordon
- 4- fissure longitudinale du métal fondu
- 5- transversale
- 6- transversale ZTA

### 1.27.2 Groupe 2 : Cavités

201 : Soufflures	2011. sphéroïdales
	2012. uniformément réparties
	2013. nid de soufflures
	2014. alignées
	2015. allongées
	2016. vermiculaires
	2017. piqûres
202 : Retassures	
203 : micro retassures	

Bulles de gaz + solidification rapide → soufflures  
 Retrait de solidification + manque de métal liquide → retassure

### 1.27.3 Groupe 3 : Inclusions solides

- 301. de laitier
- 302. de flux
- 303. d'oxyde
- 304. métallique

### 1.27.4 Groupe 4 : Manque de fusion et pénétrations

- 401. Manque de fusion (collage)  
*Manque de liaison entre métal déposé et métal de base*  
 Soit de bord à bord, entre passe, à la racine,...
- 402. manque de pénétration  
*Différence entre pénétration réelle et pénétration nominale*
- 403. pénétration en doigt de gant ou en dent de scie ou spiking  
*Défaut observé pour le soudage à haute énergie*

### 1.27.5 Groupe 5 : Défauts de formes et défauts dimensionnels

501. Caniveau	511. Manque d'épaisseur
502. Surépaisseur excessive	512. Défaut de symétrie
503. Convexité excessives	513. Largeur irrégulière
504. Excès de pénétration	514. Surface irrégulière
505. Défaut de raccordement	515. Retassure à la racine
506. Débordement	516. Rochage
507. Défaut d'alignement	517. Mauvaise reprise
508. Défaut angulaire	520. Déformation excessive
509. Effondrement	521. Dimensions incorrectes
510. Trou	

- Le caniveau (501) est dû :
- à trop d'intensité ou de tension
  - mauvaise position fil d'apport
  - temporisation en passe balayée large

Les dimensions incorrectes (521) sont visibles par :

- largeur et épaisseur cordon trop importante (ou pas assez)
- gorge excessive ou insuffisante

#### 1.27.6 Groupe 6 : Défauts divers

- 601. Coups d'arc
- 602. Projection (ou perles)
- 603. déchirure
- 604. Coup de meule
- 605. Coup de burin
- 607. Défaut de pointage
- 608. Cordons opposés décalés
- 614. Résidu de flux

#### Contrôle Visuel

Selon la norme EN 970 = ISO 17637

L'observation doit se faire suivant un angle d'au moins 30° et à une distance max de 60 cm. La luminosité doit atteindre 350 Lux (mieux 500 Lux)

- Le personnel :
  - o Doit connaître les normes, règles et spécifications
  - o Connaître mode opératoire de soudage
  - o Avoir une bonne vue
- Préparation des bords
- Pendant le soudage
  - o Passe nettoyée
  - o Pas de défaut visible
- Après soudage
  - o Nettoyage et finition
  - o Forme et dimension : profil, hauteur, surépaisseur, largeur,...
  - o Racine et surface

Matériel :

Matériel de mesure : mètre à ruban, pied à coulisse, jauge d'épaisseur,...

Codes et critères :

[Les différents codes donnent leur degré d'acceptation des soudures](#)

Selon CODAP 2000 :

Groupes 1 à 4 inacceptables

Surépaisseur, caniveaux, manque d'épaisseur, défaut d'alignement acceptables dans les limites d'une abaque

Selon RCCM 2000 :

Par exemple sont inacceptables :

Les débordements de la surépaisseur

Les manques de pénétrations

Les caniveaux, morsures,...

Selon AIR 9118 :

Les manques de pénétration

Les caniveaux, morsures, effondrements,...

Procès Verbaux

A l'issue du contrôle, un procès verbal est effectué avec les résultats.

Il peut contenir :

- L'identification de l'assemblage
- Condition d'examen (œil, loupe)

- Etat de surface (meulé, brut,...)
- Préparation de la pièce avant examen (meulage, sablage, décapage,...)
- Tableau de résultats indiquant
  - o La nature du défaut, son emplacement, dimension, acceptation (conforme ou non)