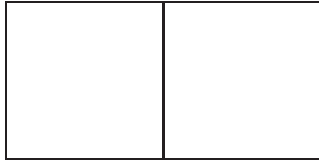


1.15.1 Le soudage plasma : 15

1.15.1.1 Principe du soudage



1.15.1.2 Principe :

Source de chaleur : jet de plasma très concentré permettant une fusion très rapide et profonde des pièces obtenu par constriction d'un arc TIG passant par un orifice très étroit d'une tuyère refroidie en même temps que le gaz inerte dit *plasmagène*.)

Métal d'apport : Possible, mais rarement utilisé car déviation de l'arc

Protection gazeuse (du bain de fusion et plasma): Gaz inerte diffusé à l'aide d'une buse entourant la tuyère.

Electrode : En général en tungstène.

Alimentation électrique : CCS plongeante souvent verticale en polarité directe

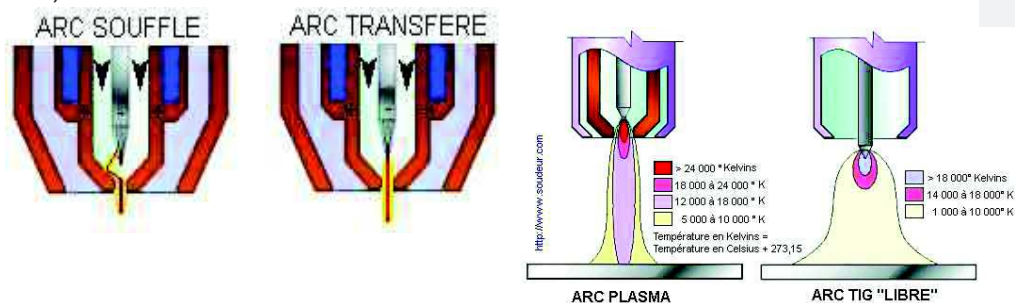
1.15.1.3 Différent utilisation :

Domaine d'emploi (4 utilisations)

- Micro soudage (rabotage de tôle très fine, soudage de composant électrique)
- Soudage Plasma
- Projection à chaud et le revêtement déposé par soudage.
- Coupage Plasma

S'applique sur presque tous les métaux métallurgique ment soudable, à l'exception des alliages d'ALU.

Essais sur cuivre : difficultés et limités dues à la conductibilité élevé (grande zone fondu).



1.15.1.3.1 Tuyère à arc transféré :

- Principe utilisé en soudage car c'est celui qui permet d'amener la plus grande énergie
- Rendement de l'ordre de 50 à 60% (rapport énergie sur la pièce / énergie à l'arc) perte due au refroidissement.
- L'arc se forme entre la cathode et la buse. Puis le circuit se fait entre la pièce et l'électrode grâce à la différence de potentiel qui permet d'attirer le plasma vers la pièce (polarité inverse le + à la pièce). Puis on ferme le circuit électrique entre la pièce et l'électrode ce qui permet de transférer l'arc vers la pièce .).
- La température dans l'axe du jet peut atteindre de 8 000 à 20 000°C, ces températures permettent la fusion de la plupart des matériaux

1.15.1.3.2 Tuyère à arc soufflé :

Le plasma débouche que sur longueur très faible, la pièce n'est atteinte que par le jet de gaz chaud (chauffage par effet joule dans le plasma que sur une toute petite partie de son parcours).

Rendement de l'ordre de 30% .

L'arc soufflé convient à la projection à chaud (poudre de revêtement amenée au droit de l'arc).rarement en soudage encore plus rarement en découpage

1.15.1.3.3 Arcs « mixtes » :

Le mélange des 2 arcs soufflé et transféré est possible, mais deux générateurs sont nécessaires. Pôles négatifs à l'électrode réfractaire. Un pôle positif est relié à la tuyère, l'autre à la pièce. En général utilisé pour le rechargement par projection à chaud.

1.15.1.4 Composition d'une installation de soudage :

- **Une source de courant** : Générateur à courant continu ($10A < I < 400A$) .
- **Une tension à vide** de 70 à 75 volts.
- **Un coffret de commande** : Pré-gaz, circuit d'eau, amorçage à distance, courant de soudage, évanouisseur d'arc, post gaz, courant pré-soudage, déviation magnétique, pulsations de courant, avance fil d'apport, balance, régulation d'arc.
- Alimentation en gaz de protection
- Dispositif d'amorçage
- Refroidissement ($I > 200A$).
- Torche de soudage
- Câble (amenée de l'électricité, gaz, canalisation eau).

1.15.1.5 Amorçage de l'arc :

- L'amorçage ne peut se faire qu'indirectement car l'électrode se trouve incorporée dans la torche (tuyère). Au moyen d'une étincelle dite pilote (onde électrique HF et HT) entre la cathode et la tuyère, on obtient l'ionisation très partielle du gaz

plasmagène qui circule ce qui est suffisant pour établir l'arc pilote (de type soufflé) entre la cathode et la tuyère. On insère dans ce circuit une résistance chutrice, ce qui augmente l'arc et ionise le gaz plasmagène. Cela provoque l'échauffement de l'électrode et favorise l'émission cathodique des électrons.

1.15.1.6 Electrodes réfractaires :

- L'électrode doit pouvoir résister à la chaleur produite par l'arc électrique, on utilise une électrode de tungstène (température de fusion = 3410°C, fort pouvoir émissif). Des éléments d'addition sont incorporés pour augmenter le pouvoir émissif

1.15.1.7 Les gaz plasmagène et de protection :

1.15.1.7.1 Gaz plasmagène

Il sert à conduire les électrons. L'argon (faible potentiel d'ionisation et faible conductibilité thermique) est le gaz le plus utilisé en soudage plasma, soit pur, soit additionné de 2 à 5% d'hydrogène (débit de 3 à 8 l/min). Il permet de réaliser des cordons étroits. Attention la présence d'hydrogène peut avoir des conséquences métallurgiques négatives (ex. : Ti).

L'hélium donne des jets larges donc des cordons larges de part sa conductibilité thermique. Donc il ne peut être utilisé en soudage, mais l'hélium peut être intéressant en rechargement

1.15.1.7.2 Gaz de protection

C'est le gaz annulaire. C'est soit de l'argon pur, soit un mélange Ar+H₂ (maxi 10%), soit comme en MAG pour les aciers non faiblement alliés à savoir Ar+O₂ (maxi 5%) et Ar+CO₂ (maxi 20%). L'O₂ et le CO₂ sont destinés à améliorer le mouillage. Les débits seront de l'ordre de 15 à 20 l/min. (exceptionnellement jusqu'à 30 l/min). Une protection envers sera nécessaire pour les aciers inoxydables.

1.15.1.8 Les différents modes opératoires en soudage plasma :

1.15.1.8.1 - Micro plasma :

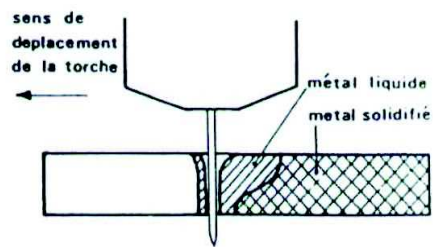
Il s'apparente pleinement au soudage TIG. Le mode opératoire de soudage est identique. En grande majorité, c'est du soudage manuel avec éventuellement un apport de fil.

Procédé avec des intensités faibles atteignant quelques dizaines de milliampères. Se pratique sur pièces de faibles épaisseurs, entre quelques dixièmes de mm à 1 ou 2 mm. Au-dessus on pratique le procédé TIG, soit le plasma en automatique par la méthode du jet débouchant

1.15.1.8.2 Soudage par jet débouchant

(technique du trou de serrure) :

- Appelé aussi « **keyhole** », les tôles à assembler sont placées bord à bord, sans jeu. La torche est disposée au dessus du joint à réaliser. Le jet plasma est conditionné pour traverser toute l'épaisseur et déboucher sur l'autre face des tôles. Le trou réalisé est de l'ordre de 1 à 3 mm. Le métal fondu autour du jet se trouve maintenu par les tensions superficielles et la pression de l'arc.



Ce métal fondu passe autour du jet de l'avant à l'arrière et se solidifie, la section transversale du cordon est semblable à la forme d'un verre à pied.

Utilisation de métal d'apport possible.

Technique utilisable pratiquement qu'en automatique.
la protection envers comme le TIG

1.15.1.8.3 **Le plasma à faible énergie pulsé**

Le plasma à faible énergie peut être utilisé en mode pulsé.

Les avantages sont

- Pénétration accrue moindre déformation.

Remarque le Laser utilise également la technique du courant pulsé

1.15.1.9 Préparation des pièces à souder :

- **Aciers inoxydables** : Sans préparation de bords e : 12 mm Maxi.

- **Cuivre** : En jet débouchant e : 4 mm sera un Maxi

- **Fontes à graphique sphéroïdale** : Essais réalisés sur e : 10 mm avec de bons résultats

- **Titane** : e : 20/25 mm en jet débouchant

- **Les aciers non alliés** : Le soudage tend à se développer.

Exception les aluminium et alliage ne peuvent pas se souder car polarité directe donc pas de décapage

1.15.1.10 Guide de choix :

	PLASMA	MICROPLASMA
INVESTISSEMENT :	50 à 150 KF hors automate de soudage	- 50 à 150 KF hors automate de soudage
MATERIAUX SOUDABLES :	Tous les aciers, titane, nickel et ses alliages, cuivre et ses alliages	Aciers non alliés, faiblement alliés, fortement alliés .Ni, Cu, Ti.
EPAISSEURS COURANTES	- 3 à 15 mm	- 0,01 à 0,08 mm
FACTEUR DE MARCHE	- 90%	

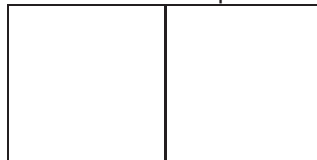
VITESSE LINEAIRE :	- 50 à 120 Cm/Min	- 10 à 40 Cm/Min.
INCONVENIENTS	Coût élevé, peu souple	- Coût élevé, peu souple, équipement fragile

1.15.2 faisceau d'électron : n°76

1.15.2.1 Principe

Consiste à utiliser dans le vide (10^{-3} à 10^{-5} torr), un faisceau d'électrons que l'on focalise sur le joint à souder. L'énergie cinétique des électrons est transformée en énergie calorifique au moment de leur impact sur les pièces provoquant ainsi la fusion. Le faisceau d'électrons est généré par un canon lui-même placé sous vide. Formation d'un capillaire de vapeur métallique qui maintient le métal liquide plaqué sur les parois du keyhole.

Energie du faisceau est d'environ 1000 fois supérieur au TIG



1.15.2.2 Définition

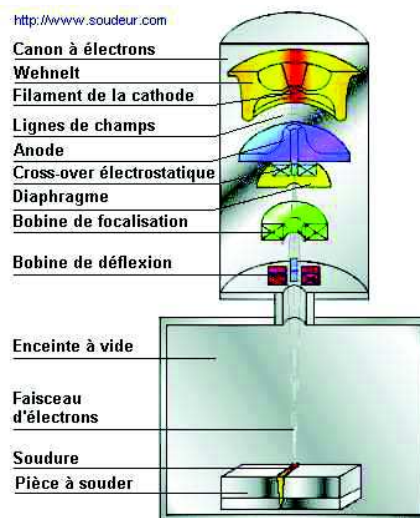
Le soudage par faisceau d'électrons, comme le soudage laser, fait partie des procédés de soudage dits « **à haute énergie** ». C'est un procédé caractérisé par une concentration très importante d'énergie en un point donné. Cette concentration thermique du faisceau très focalisé, permet d'obtenir des densités de puissance de l'ordre de 10 à 100 MW par cm^2 . Contrairement aux procédés conventionnels, les procédés à haute énergie ne réalisent pas la fusion des matériaux à souder par transfert thermique de la surface vers l'intérieur de la pièce mais bénéficient de la formation d'un capillaire ou «keyhole» rempli de vapeurs métalliques. La formation de ce capillaire permet donc un transfert direct de l'énergie au cœur de la matière, permettant ainsi l'obtention de cordons de soudure beaucoup moins larges que pénétrants.

1.15.2.3 Constitution d'une installation

La **cathode (-)** (filament réalisé en Tungstène ou en Tantale) du canon à électrons est traversée par un courant de faible tension (de l'ordre de 5 V) et de forte intensité (de 50 à 500 mA). La cathode s'échauffe et émet des électrons par effet thermoélectrique.

L'**anode (+)** est soumise à une forte tension de l'ordre de **25 000 à 250 000 Volts**. La différence de potentiel attire et accélère les électrons. Le faisceau d'électrons passe au milieu de l'anode qui assure une première focalisation.

La trajectoire des électrons est influencée par les champs électromagnétiques. La focalisation du faisceau d'électrons est assurée par des bobines magnétiques de correction, des bobines de focalisation et des bobines de déflexion. Le **wehnelt** est une électrode qui entoure la cathode et contribue à faire converger le faisceau d'électrons vers le centre de l'anode.



1.15.2.4 Domaine d'application

- Soudage des aciers
- Soudage des aciers inoxydables jusqu'à 100 mm
- Soudage des nickels et de ses alliages jusqu'à 100 mm
- Soudage des alliages d'aluminium jusqu'à 300 mm
- Soudage du titane et de ses alliages jusqu'à 50 mm
- Soudage du zirconium et de ses alliages jusqu'à 50 mm
- Soudage du cuivre et de ses alliages jusqu'à 15 mm

1.15.2.5 Paramètres de soudage

Les paramètres qui permettent de faire varier le faisceau d'électrons sont définis ci-dessous :

1.15.2.5.1 Intensité du courant cathodique

L'intensité du courant donc l'échauffement de la cathode permet de faire varier le nombre d'électrons.

1.15.2.5.2 Tension de l'anode

L'augmentation de la tension de l'anode assure l'augmentation de la vitesse et de l'énergie cinétique des électrons.

Si $U \uparrow$, $I \downarrow \Rightarrow$ la pénétration \uparrow .

1.15.2.5.3 Focalisation du faisceau d'électrons

La variation du champ magnétique de la bobine de focalisation permet d'obtenir une concentration plus ou moins importante du faisceau d'électrons sur la surface de la pièce.

Tous ces paramètres, ainsi que le cycle et la vitesse de soudage sont contrôlés et asservis par une commande numérique.

Si $I_{foc} \uparrow \Rightarrow$ la pénétration \uparrow , la largeur de la ZAT \downarrow jusqu'à atteindre la pénétration maximum. Ensuite si $I_{foc} \downarrow$ encore \Rightarrow la pénétration \downarrow , la largeur de la ZAT \uparrow .

1.15.2.5.4 Couple vitesse/puissance

Si $v \uparrow$ et $I \uparrow \Rightarrow$ la largeur de la ZAT \downarrow , la pénétration \downarrow légèrement.

1.15.2.5.5 Niveau du vide

Si le vide $\uparrow \Rightarrow$ la pénétration \uparrow .

1.15.2.6 Matériels pour mise en œuvre du vide

Le vide est obtenu par l'évacuation de l'air de l'enceinte de soudage, à l'aide d'une pompe primaire de type mécanique pouvant atteindre 10^{-2} Pa.

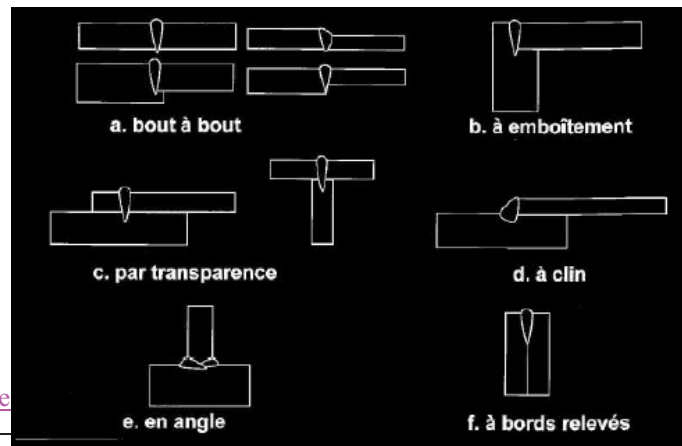
Un second pompage est réalisé avec une pompe secondaire de type moléculaire pour atteindre une dépression de 10^{-4} Pa à 10^{-5} Pa.

1.15.2.7 Préparation des bords

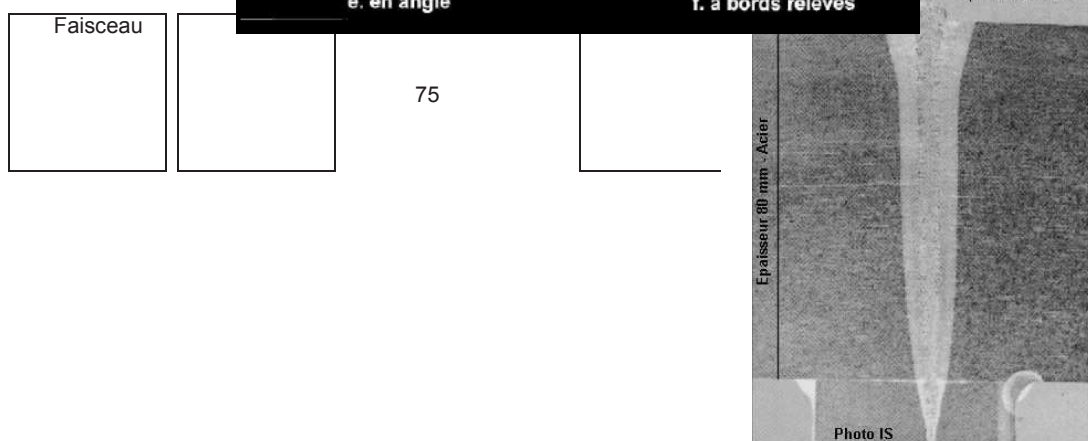
Bord à bord : jeu maxi $< 0.05 \times$ épaisseur

Clin : jeu maxi : $< 0.05 \times$ épaisseur

Recouvrement : jeu maxi $< 0.02 \times$ épaisseur



1.15.2.8 Cordon de soudure



1.15.2.9 régimes de soudage, débouchant ou non débouchant.

1.15.2.9.1 Régime débouchant :

Technique du keyhole,

Avantage

- Contrôle de la profondeur
- Bon dégazage , peu de porosité
- Pas de défaut type spikes
- Toutes positions
- Pas de limite en PC

Inconvénient

- Epaisseur limite en PA 25 à 30 mm Acier
- Cordon bombé aspect irrégulier
- Formation de caniveau
- Projections

1.15.2.9.2 Régime de soudage non débouchant

Avantage

- Cordons plat et régulier.
- Bonne tenue du bain en PA
- 120 mm de pénétration à plat

Inconvénient

- Formation de spikes (dent de scie)
- Effondrement du bain en position
- Dégazage par 1 seule face (risque de porosité)

1.15.2.10 Avantages

Soudage de pratiquement tous les matériaux.

Epaisseur de soudage élevée (200 mm en corniche sur acier) « P (kw) X 2= e (mm)

Faible déformation.

ZAT étroite

Très faible oxydation des joints soudés (absence d'air).

Soudage de matériaux très réactifs à l'oxydation (zirconium, tantale, titane).

Grande vitesse de soudage, supérieur au mètre/minute.

Soudage de matériaux hétérogènes sans métal d'apport (cuivre/inox).

1.15.2.11 Inconvénient

Investissement très important.

Matériel très sophistiqué

Préparation des bord à soigner par usinage (Ra :3,2micron)

Pièce limitées en tailles a la chambre sous vide

Soudage sous vide poussé.

Les matériaux à souder doivent être amagnétiques ou démagnétisés.

Impossibilité de souder des matériaux contenant du magnésium et du zinc (volatils)

1.15.2.12 Domaine d'application

Alliage d'aluminium jusqu'à 300mm

Acier carbone jusqu'à 200mm

Acier inoxydables jusqu'à 100mm

Nickels et ses alliages jusqu'à 100mm

Titane et alliages jusqu'à 50mm

Zirconium et alliages jusqu'à 50mm

Cuivre et alliages jusqu'à 15mm

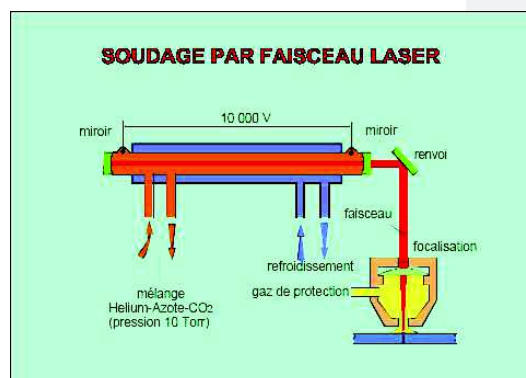
1.15.3 Le faisceau Laser

Procédé 751

1.15.3.1 Principe

Procédé a haute densité d'énergie, (1000 à 10000 fois plus élevé que les autres procédés de soudage) obtenu par la production d'un faisceau laser.

Le faisceau laser est le résultat d'une excitation d'un milieu actif par pompage , ce qui provoque l'émission de photons qui est ensuite amplifiée à l'aide d'un résonateur .



La sortie du faisceau laser se fait par un miroir semi- réfléchissant ou percé d'un trou à l'extrémité du résonateur.

Le faisceau est ensuite dirigé vers la pièce et focalisé pour atteindre quelques 1/10 de mm de diamètres

Le YAG est transporté par fibre optique : $\lambda 1.06 \mu\text{m}$

Le Co2 transporté par miroir $\lambda 10.6\mu\text{m}$

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation qui veut dire amplification de la lumière par émission stimulée de radiation. En fait, il s'agit d'une transformation d'une énergie électrique en une énergie lumineuse.

A ce jour, il existe, deux types de laser énergétique, les lasers à solide (YAG) et les lasers à gaz. Les premiers émettant de façon impulsionnelle alors que les seconds émettent en continu

1.15.3.2 LASER à GAZ

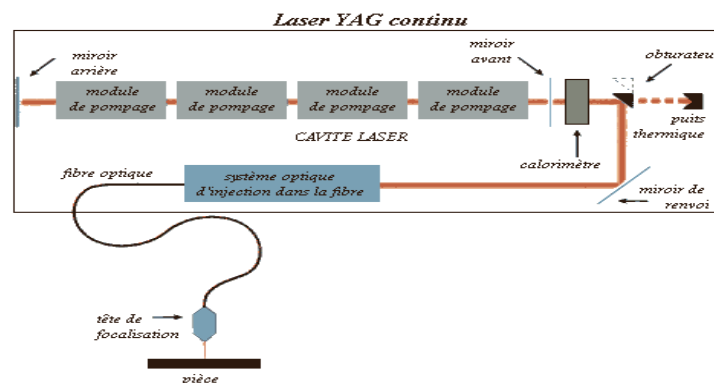
Le milieu actif est ici constitué d'un mélange gazeux contenant de l'hélium (50%), de l'azote (40%) et du dioxyde de carbone (10%). Le pompage s'effectue par décharge électrique ou de plus en plus souvent par radiofréquence. Les molécules d'azote ainsi excitées transfèrent leur excitation aux molécules de dioxyde de carbone. Le rayonnement d'une longueur d'onde de 10,6 μm autorise uniquement le transport du faisceau par miroirs. Malgré la possibilité de pulser le faisceau, le procédé de soudage utilise principalement des sources laser CO₂ à régime de fonctionnement continu. Le rendement électrique de telles sources laser est inférieur à 10%.

1.15.3.3 LASER YAG

Ces techniques privilégient la qualité ou la puissance maximale du faisceau pouvant être extraite de la cavité. Les lasers YAG présentent l'avantage, par rapport aux lasers CO₂, de pouvoir utiliser des fibres optiques pour le transport du faisceau. Il en existe 2 types, les continus et les pulsés.

1.15.3.4 Les LASER YAG continus

Le milieu actif est excité par une ou deux lampes flash émettant en "continu", l'ensemble constituant la chambre de pompage. Il est possible d'assembler plusieurs chambres de pompages et ainsi de réaliser des lasers pouvant aller jusqu'à une puissance de 5000W. L'amplification du faisceau d'énergie s'effectue par allers et retours successifs dans le milieu amplificateur. Le faisceau émis est guidé vers le ou les postes de travail par des miroirs fixes ou mobiles, ou par des fibres optiques.



1.15.3.5 Les LASERS YAG pulsés

Le résonateur et les chambres de pompage sont de conception similaire à celles des lasers YAG continus. L'excitation s'effectue de manière différente. Les lampes flash sont alimentées à des fréquences et des durées d'impulsion variables, parfaitement définies et reproductibles dans le temps. A chaque impulsion électrique correspond l'émission d'une impulsion laser. Un pilotage de l'excitation des lampes flash permet de contrôler le profil temporel de l'énergie émise par l'impulsion laser. Un module de pompage permet la production d'une énergie laser de l'ordre de 50 J pour une puissance moyenne de 500 W.

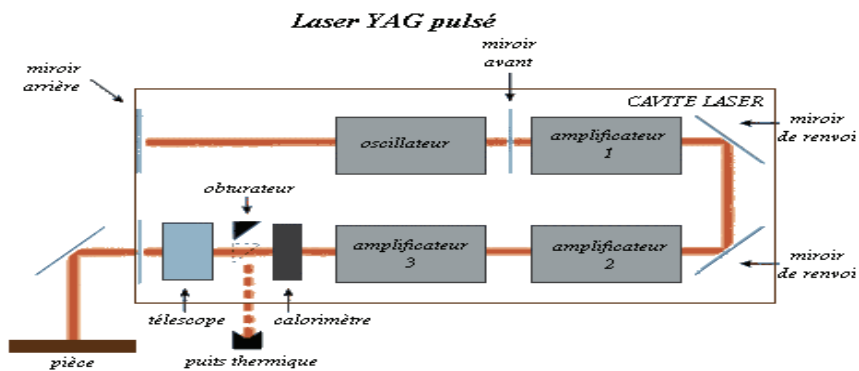


Tableau 1

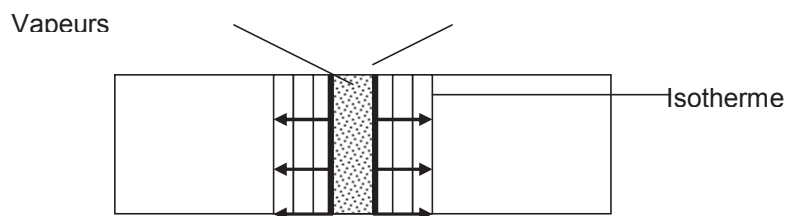
Type de Laser	YAG	CO2
Milieu actif	Cristal YAG	Mélange gazeux CO2 Helium
Système de pompage	Flash de lumière blanche	Décharge de condensateur
Système de guidage	Fibre optique	Miroirs plans
Système de focalisation	Lentilles	Miroirs paraboliques ou sphériques ; lentilles
Puissance	3kW max	45 KW max
Rendement	3 à 5%	10 à 15%

Longueur d'onde	1060 nm	10600 nm
-----------------	---------	----------

Ce procédé permet de découper, souder, percer, réaliser des traitements de surface.

1.15.3.6.1 Principe du soudage

Ce procédé à haute densité d'énergie provoque une fusion quasi instantanée au point d'impact du faisceau. Il se forme un capillaire (Keyhole) de vapeur métallique ; l'énergie se transfère alors à partir des parois du capillaire dans l'épaisseur de la pièce.



Le déplacement de ce capillaire de vapeur provoque de proche en proche la fusion en amont et la solidification en aval.

2 Régimes de soudage :

	NON DEBOUCHANT	DEBOUCHANT
Avantage	Cordons plat et régulier. Bonne tenue du bain en PA Pas de risque d'effondrement	Contrôle de la profondeur Bon dégazage , peu de porosité Pas de défaut type spikes Toutes positions Pas de limite en PC
Inconvénient	Formation de spikes (dent de scie) Effondrement du bain en position Dégazage par 1 seule face (risque de porosité)	Epaisseur limite en PA 25 à 30 mm Acier Cordon bombé aspect irrégulier Formation de caniveau Projections

Il est nécessaire d'avoir une protection gazeuse.

1.15.3.6.2 Avantages du procédé

Vitesse de soudage rapide

Zat étroite et Zf étroite -> Retrait longitudinaux et transversaux faible

1.15.3.6.3 Inconvénient

Risque de fissuration à chaud du fait du cycle thermique bref pour les aciers inox ,
alliage de Ni et acier avec S+P

Problème de réflexion du faisceau laser pour les alliages d'Al de Cu

Investissement encore élevé.

Risque de sécurité

1.15.3.7 Domaine d'application du procédé

1.15.3.7.1 Alliage d'aluminium

Problème de fissuration et reflexion

1.15.3.7.2 Acier carbone

Précaution si C>0.3% ; éviter les nuances à usinabilité améliorée (présence de
P+S= FAC) ;

possibilité de souder à l'état de traitement thermique final ; pas de post ni pré-
chauffage.

1.15.3.7.3 Acier inoxydables

Austénitique : vitesse de soudage faible, risque de FAC avec laser Yag.

Ferritique Martensitique : limitation du grossissement de grain

1.15.3.7.4 Nickels et ses alliages :

risque de FAC -> vitesse de soudage faible

1.15.3.7.5 Titane , Zirconium et alliages

:bonne soudabilité

1.15.3.7.6 Cuivre et alliages :

soudage sans préchauffage,

problèmes de reflexion ,

exiger une nuance de cuivre désoxydé ,

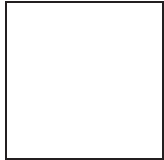
le laiton ne se soude pas (Zn volatile)

1.15.3.8 Type de l'installation

Installation avec fibre optique pour laser Yag et bras robotisé

Installation en temps partagé

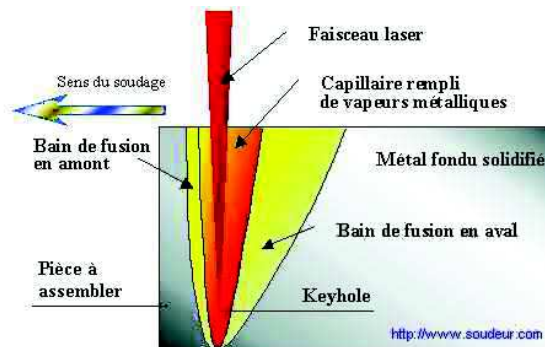
1.15.3.9 Préparation des bords



Jeu de 0.02 à 0.3 mm suivant épaisseur ; dénivellation < e/10.)

1.15.3.10 Cordon de soudure

En mode continu



1.15.3.11 Gaz de soudage

Comme pour les procédés de soudage classiques par fusion, le bain de fusion doit être protégé de l'air ambiant par un gaz de protection. Ce gaz est apporté coaxialement au faisceau par un tube d'amenée directement sur le bain de fusion. Le débit est compris entre 10 et 25 litres / minutes sous une pression de 1 bar.

Argon : bons résultats (jusqu'à 2 kW avec un laser CO2)

Hélium : utilisé pour les fortes puissances (>5 kW)

Hélium + Argon : bon compromis

Azote : réduit le taux de porosité dans les aciers inoxydables, puissances limitées à 2 kW

1.15.3.12 Paramètre de Soudage bord à bord

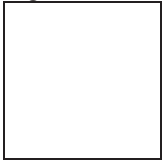
Matériau	Epaisseur	Puissance	Vitesse	Remarques
Acier ou inox	1 mm	2.5 kW	15 m/min	Attention à la protection sur inox
Acier ou inox	5 mm	6.0 kW	4 m/min	

Alliages d'aluminium	1 mm	2.5 kW	3 m/min	Utilisation de fil d'apport
Alliages d'aluminium	3 mm	2.5 kW	0.5 m/min	

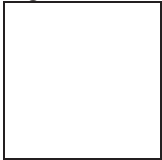
1.15.3.13 Sécurité

L'utilisateur peut être exposé à des rayonnements directs ou indirects d'un faisceau laser. Pour sa sécurité, il doit utiliser un dispositif laser de classe 1 dont la valeur ne dépasse pas 1000 W/m². Les risques encourus peuvent être très graves (brûlures cutanées et oculaires, lésions irréversibles sur l'œil dans certains cas laser classe 4).

Signalisation Européenne



Signalisation ANSI



Quelques conseils pour limiter le risque laser :

- ne jamais s'exposer directement au faisceau laser
- porter des lunettes de protection adaptées lors des opérations de maintenance, de réglage et de production.
- vérifier que les lunettes de protection sont adaptées au type de laser (longueur d'onde et puissance)
- éviter les surfaces réfléchissantes
- apposer des étiquettes signalant le type de risque laser et la classe
- être conscient qu'il y a toujours un risque de réflexion du faisceau laser
- limiter l'accès aux personnes habilitées

1.16 Coupage et autres procédés de préparation des bords

Réf : rev p 134 , cours technique généré. Coupage thermique

Internet : <http://www.evariste.org/100tc/1996/f128a.html>

1.16.1 Définition

Le coupage thermique est une opération qui consiste à sectionner par fusion, le métal ou l'alliage à découper en provoquant sa fusion localisée au moyen d'une source de chaleur en mouvement. Les deux principaux procédés:

- Oxycoupage (combustion du fer par un jet d'oxygène)

- Coupage plasma Le métal fondu est éliminé par l'effet du jet
- Coupage laser par quasi vaporisation

Il demeure sur les bords de la coupe une zone affectée par le cycle thermique engendré par l'opération.

1.16.2 Principe

L'oxycoupage est une opération de coupage par combustion localisée et continue sous l'action d'un jet, agissant en un point préalablement porté à une température d'environ 1800°C, dite température d'amorçage. La quantité de chaleur dégagée par la combustion du métal dans l'oxyde doit être suffisante pour atteindre et maintenir la température d'amorçage de la réaction thermochimique. La température de fusion de l'oxyde du métal doit être inférieure à la température du métal sinon les oxydes restent solides et créent un écran thermique qui arrête la combustion chimique. L'aluminium, le cuivre, le nickel et ses alliages ne s'oxycoupe pas.

Le coupage plasma met en œuvre une énergie concentrée sous forme d'un jet plasma à très haute température (15000 à 20000°C) qui fond le métal à son point d'impact et éjecte le métal fondu hors de la saignée par sa force vive. Ce jet plasma est généré par un arc électrique qui s'établit entre une électrode, interne à la torche et la pièce. Cet arc est placé dans un courant de gaz qui assure la génération du plasma. Il s'échappe par un petit orifice qui lui confère finesse et rigidité. Le coupage plasma peut intervenir sur tous matériaux conducteurs d'électricité.

Un faisceau laser focalisé par une lentille procure des densités d'énergie permettant d'obtenir la fusion ou la vaporisation quasi instantanée de presque tous les matériaux. L'éjection par un gaz d'assistance de la matière fondue ou vaporisée combinée à un déplacement donne une ligne de coupe. La découpe laser peut être effectuée au moyen d'un laser CO2 ou d'un laser YAG, il existe aussi les lasers à diode et eximère

1.16.3 Les différents types de coupage thermique :

Par fusion :

- Plasma (sublimation)
- Laser (sublimation)
- Arc électrique (Fusion)

Par Oxydation

- Lance O²
- Oxycoupage
- Poudre de fer

1.16.4 Plasma :

Rappel : plasma est le terme pour designer le quatrième état de la matière (solide, liquide, gazeux, plasma)

-
- Plasma Argon hydrogène :
- Destiné principalement forte épaisseur pour acier inoxydables ou aluminium de 25 a 150mm
- Plasma air comprimé (vortex air) ou ZIP :
- Tôle fine jusqu'a 5mm
- Plasma azote avec injection d'eau :
- De 3 à 70mm pour tout type de matériaux
- Plasma oxygène avec injection eau :
- Acier au Carbone de 6 à 35mm
- Plasma haute définition :
- De 1 à 10mm

1.16.5 Laser :

Laser CO2 :

- Puissance de 3Kw : 20mm Acier Carbonne
- 10mm Inox
- 4mm Alu (+ le métal est billant moins on peu couper épais

1.16.6 Oxycoupage

L'oxycoupage est un procédé de coupage obtenu par un jet d'oxygène et la combustion du métal grâce à une source calorifique qui est une flamme oxyacétylénique ($O_2 + C_2H_2$).

Trois conditions sont nécessaires pour que l'oxycoupage puisse se réaliser :

combustion exothermique : $2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO + \text{calories}$

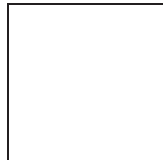
température d'amorçage de la réaction (1300°C) < θ_f du métal (1535°C)

température de fusion oxyde (1370 à 1597°C) < θ_f du métal (1535°C)

La température de fusion de l'oxyde du métal doit être inférieure à la température du métal sinon les oxydes restent solides et créent un écran thermique qui arrête la combustion chimique. Ainsi, les aciers inoxydables ne s'oxycoupent pas de part la

présence importante de chrome. De même, les alliages d'aluminium, de nickel et de cuivre ne sont pas oxycoupables car les oxydes de chrome, d'aluminium, de nickel et de cuivre sont très réfractaires.
chauffe.
Le profil des bords est le suivant :

Les paramètres de coupe sont l'épaisseur à couper (angle de chanfrein compris) qui détermine le diamètre de buse, la pression de coupe en O₂, la vitesse d'avance et la température de la flamme de chauffe.



Le principe d'avance et des réactions pendant la coupe est le suivant :



Les aciers alliés peuvent être oxycoupés à condition que les éléments d'alliage ne dépassent pas : Cr<5%, Mn<14%, Ni<25% et C<1%. A partir de C>0,3%, il est nécessaire de préchauffer pour éviter la fissuration à froid.

L'oxycoupage est généralement utilisé sur les aciers non ou faiblement alliés, le manganèse et théoriquement sur le titane avec des épaisseur de coupe allant de 3 à 1500mm. On reprend les bords pour enlever les scories d'oxycoupage (oxydes). Il est utilisé avec différents gaz :

- **Acétylène** : flamme fortement focalisée, 93% de la chaleur concentrée dans le dard.
- **Propane** : flamme faiblement focalisée, la plus grande partie de la chaleur se trouve dans le panache.
- **Crylène** : flamme comparable à l'acétylène, condition d'exploitation proche du propane.

- **Gaz de synthèse** : pas utilisés en France.
- **Gaz naturel** : faible coût, faible chaleur spécifique.

1.16.7 Arc air

Ce n'est pas à proprement parler un procédé de coupage mais on peut s'en servir ainsi. Il est généralement utilisé pour la reprise envers et la réparation de cordons de soudure présentant des défauts.

On utilise une électrode en graphite recouverte d'une fine pellicule de cuivre pour améliorer la conductibilité électrique (le Cu se volatilise pendant l'opération de gougeage). Un arc s'établit entre l'électrode et la pièce ce qui réalise la fusion du métal proche. L'air comprimé chasse ce métal en fusion et souffle aussi l'arc qui doit se réamorcer constamment (ce qui génère un bruit important).

La ZAT est faible car la vitesse de refroidissement est élevée (attention aux risques de trempe). Il est primordial de reprendre les bords par meulage pour enlever l'oxydation et le carbone du graphite.

1.16.8 Autre technique coupage non thermique

Le poinçonnage ou grignotage (poinçonnage répétitif) : moins souple, moins précis que le laser, difficile à utiliser si l'on veut réaliser des formes complexes, mais nettement moins cher.

La découpe par jet d'eau consiste à utiliser l'énergie cinétique de particules d'eau (pure ou chargée de particules abrasives) projetées à grande vitesse de l'ordre de 1000 m/s sur le matériau à découper. Cette découpe est opérée en appliquant une pression avoisinant les 3800 bars sur un débit d'eau allant de 0,5 à 10 litres(s)/minute et est réalisée par arrachement de matière. La puissance du jet d'eau sous la pression peut être amplifiée en ajoutant des abrasifs, des polymères ou le mélange des deux. Permet des découpe de forte épaisseur et de matériaux ne contenant pas de fer. Pas de zat.

1.16.9 Avantage inconvénient

	Oxycoupage	plasma	laser	jet d'eau	poinçonnage grignotage
Epaisseur limite	1500 mm +	100 mm	20 mm	100 mm	10 mm
qualité	+	+	++	+++	++
Investissement	++	+++	+	+	+
Prix rev	++	+++	++	+	+

Oxydation	+++	++	+	+	+
-----------	-----	----	---	---	---

1.16.10 Les aciers au CrMn

L'oxycoupage s'applique aux aciers non alliés ou faiblement alliés. A titre indicatif, les teneurs maximales en éléments d'alliage acceptables sont Cr 5%, Mn 14%, Ni 25%, C 1% (à partir de 0,3% de C, un préchauffage est conseillé pour éviter la micro-fissuration).

Pour ce type de matériaux le coupage plasma ou laser

1.16.11 Les aciers inox ferriques

Non oxycoupable, car température de fusion des oxydes sup. à température à celle du métal de base.

Les aciers inox ferriques une importante sensibilité à la surchauffe qui les conduit à fabriquer des gros grains. Le coupage faible énergie est conseillée : laser, plasma, jet d'eau, grignotage.

1.16.12 Les aciers inox austénitiques

Non oxycoupable, car température de fusion des oxydes sup. à température à celle du métal de base.

Risque de dé chromisation d'où utilisation de coupage faible énergie, exemple laser pour éviter la formation de carbure de chrome ou jet d'eau ou mécanique type, grignotage.

En conclusion les temps de chauffe doivent être réduits au minimum, la protection gazeuse adaptée pour éviter toute oxydation.

1.16.13 Conditions pour qu'un métal soit oxycoupable :

L'oxycoupage est un procédé de coupage obtenu par un jet d'oxygène et la combustion du métal grâce à une source calorifique qui est une flamme oxyacétylénique (oxygène + acétylène).

Trois conditions pour que l'oxycoupage puisse se réaliser :

Combustion exothermique : $2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO + \text{calories}$

température d'amorçage de la réaction < température de fusion du métal

température de fusion oxyde < température fusion du métal

la température de fusion de l'oxyde du métal doit être inférieure à la température du métal sinon les oxydes restent solides et créent un écran thermique qui arrêtent la combustion chimique. Ainsi, les aciers inoxydables ne s'oxycoupent pas de part la présence importante de chrome. De même, les alliages d'aluminium, de nickel et de cuivre ne sont pas oxycoupages car les oxydes de chrome, d'aluminium, de nickel et de cuivre sont très réfractaires.

Les aciers alliés peuvent être oxycoupés à condition que les éléments d'alliage ne dépassent pas : Cr<5%, Mn<14%, Ni<25% et C<1%. A partir de C<0,3%, il est nécessaire de préchauffer pour éviter la fissuration.

1.17 Revêtement par rechargement et par pulvérisation

Pour une action curative ou préventive, le rechargement ou le revêtement s'accroche de différente façon au substrat

- Projection thermique a chaud : accrochage mécanique
- Projection thermique + refusion : accrochage par dilution
- **soudage** : accrochage par dilution
- **soudo brasage** : accrochage par diffusion
- rechargement par dépôt et refusion
- cola minage
- soudage par explosion
- revêtement électrolytique
- rechargement à chaud par immersion

Pour chaque type d'usure sa méthode de réparation

- usure contact métal /métal
- usure par frottement glissement : on utilisera un alliage à haute résistance de compression
- usure par frottement roulement : un alliage à haute limite élastique pour éviter la déformation plastique
- usure par chocs
- usure abrasive
- le gougeage
- le broyage sous forte contrainte
- l'abrasion sous faible contrainte
- l'érosion
- usure par le milieu
- fatigue thermique
- la corrosion

1.17.1 Rechargement par projection à chaud

Le métal déposé est fondu (gaz + oxygène ou électrique) et projeté grâce à la source de chaleur (gaz sous pression) le substrat n'est pas fondu mais l'accrochage se fait mécaniquement par l'intermédiaire de la rugosité déterminée. Les matériaux déposés et le substrat ne sont pas forcément des métaux (Matériaux réfractaire, céramique, base Nickel ou cobalt ..)

ou par projection à l'arc plasma soufflé

Pour la préparation, soit le grenailage ou bien usinage mécanique, l'incrustation et l'accrochage mécanique du dépôt dans le substrat fera la qualité

1.17.2 Rechargement par soudage

Pour obtenir la continuité métallique, l'accrochage se fait par fusion partielle du substrat afin d'obtenir la reconstitution du réseau cristallin entre les deux parties métallurgiquement compatibles. En maîtrisant le taux de dilution afin que les propriétés de chaque partie ne soient pas modifiées notablement. En une ou plusieurs couches avec un ou plusieurs métaux d'apport

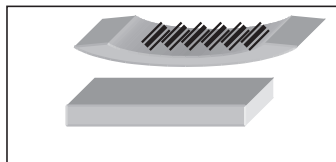
Procédés utilisables

- le chalumeau oxyacétylénique
- TIG
- électrode enrobée
- Arc plasma transféré
- Mig /mag
- Laser
- Friction linéaire
- Arc sous flux

1.17.2.1 Méthodes de rechargement

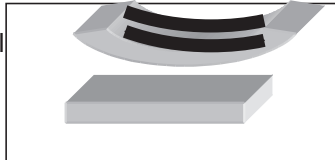
1.17.2.1.1 Par passes étroites

Engendre une déformation transversale



1.17.2.1.2 Par passe larges

Engendre une déformation longitudinal



1.17.2.1.3 Autres cas

En passes alternées large et étroites

- Avec des moules en graphite ou en cuivre
- Voir mode opératoire en fabrication soudé
- Il ne faut pas recharger les arrêtes à cause de la modification importante du taux de dilution

1.17.2.1.4 Produits d'apports

Il faut penser à

- La dilution risque que ne pas avoir les propriétés demandées dès la première couche (+ de couche ou sous couche)
- Aptitude à la fissuration dépend de la compatibilité métal apport substrat
- Compatibilité métallurgique : risques de composés intermétalliques à chaud
- Compatibilité mécanique : dilatation retrait = fissuration
- Compatibilité thermique : contraintes thermiques en cours de service entre le métal déposé et le substrat à haute température
- Fragilisation du dépôt : la fissuration du dépôt vient d'un refroidissement du dépôt dur
- Fragilisation de la ZAT : « martensite » et la présence de la trempe, contrainte, hydrogène

Les remèdes sont

- préchauffage
- post chauffage
- beurrage

1.18 Brasage fort et brasage tendre

1.18.1 Définitions

Assemblage de 2 pièces métalliques ou non à l'aide d'un métal d'apport à l'état liquide, ayant une température de fusion inférieure à la température des pièces à assembler et qui mouille le métal de base.

Le métal de base ne participe pas à la constitution du joint

1.18.1.1 Brasage fort

:brasage dans lequel le joint généralement pelliculaire avec métal d'apport dont la température de fusion est supérieure à 450 °c

1.18.1.2 Brasage tendre

: avec métal d'apport dont la température de fusion est inférieure à 450 °c

1.18.1.3 Soudobrasage :

Brasage obtenu de proche en proche par une technique analogue à celle du soudage autogène par fusion mais sans action capillaire ni fusion du métal de base, la température de fusion du métal d'apport étant supérieure à 450°C.

1.18.1.4 Brasage par diffusion :

Soudage en phase solide dans lequel les pièces, étant maintenues en contact sous pression donnée, sont portées à une température définie pendant un temps contrôlé. Ceci conduit par des déformations plastiques locales des surfaces, à un contact intime des surfaces et à une migration des atomes entre les éléments, ce qui permet d'obtenir une continuité de la matière sans métal d'apport

1.18.1.5 Brasage diffusion :

Le brasage diffusion est un procédé dans lequel l'assemblage des pièces est réalisé par chauffage à une certaine température avec un métal d'apport qui passe par l'état liquide, lequel est déposé au préalable ou formé in situ.

Le métal d'apport peut être formé entre les faces en contact ou distribué dans le joint par capillarité. Une pression peut éventuellement être appliquée. Le métal d'apport diffuse dans le métal de base de manière ce que les caractéristiques du joint soit très voisine du métal de base. Une zone de métal fondu ne doit plus exister dans le joint après le traitement de brasage diffusion.

1.18.1.6 Réussite d'un brasage

- Surfaces propres
- Jeu suffisant
- Température suffisante
- Protection des surfaces pendant l'opération
- Apport d'alliage suffisant

3 phénomènes principaux interviennent dans le brasage :

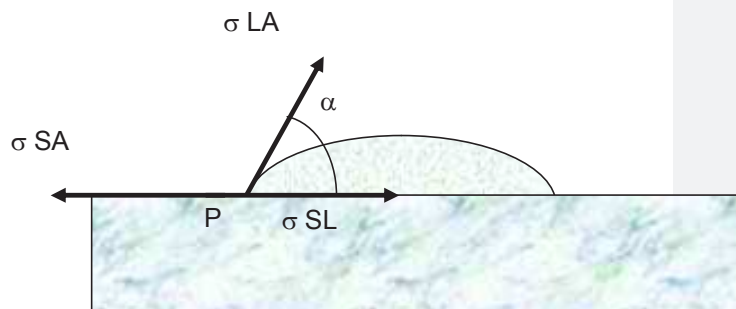
1.18.2 Phénomènes intervenants Le mouillage

1.18.2.1 Principe

σ_{SA} = Tension superficielle Solide Air

σ_{LA} = Tension superficielle Liquide Air

σ_{SL} = Tension superficielle Solide Liquide



Si α est obtus pas de mouillage

Si α est aigu mouillage

sur la pièces a braser (puissance $\sigma_{SA} > \sigma_{LA} + \sigma_{SL}$)

Au point P si équilibre :

$$\sigma_{SA} - \sigma_{SL} - \sigma_{LA} \cos \alpha = 0$$

Plus σ SL devient petit, plus l'angle α devient proche de 0. Or σ SL dépend de la propreté des pièces (état de surface)

Plus les surfaces seront propres, plus l'angle α tendra vers 0 ; meilleure sera la mouillabilité.

Il faut donc en conséquence :

- Dégraisser
- Décaper chimiquement ou mécaniquement les surfaces
- Utiliser un flux décapant pendant le brasage.

Adsorption physique : rapprochement physique des atomes par des forces d'attraction électrostatique de VAN DER WAALS

Adsorption chimique : mise en commun des électrons périphérique

1.18.3 La diffusion

1.18.3.1 Principe

A la faveur de l'agitation thermique, il y a un phénomène de diffusion réciproque dans la zone de liaison

Diffusion => formation d'un alliage entre le métal d'apport et le métal de base

1.18.3.2 Paramètres

Température, temps, contrainte, coefficient de diffusion.

1.18.3.3 Risques

Ce phénomène peut parfois entraîner une fragilisation du joint s'il y a formation de composé intermétallique (ex brasage de l'argent avec titane - > formation de Ti_3Ag .) manque de ductilité

cela dépend –

- de sa nature du composé
- de sa quantité
- de sa répartition

les remèdes ou maîtrise de la diffusion

- baisse de la durée du brasage
- baisse de la température de brasage

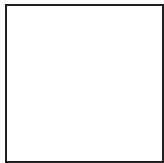
- baisse de la quantité de métal d'apport

1.18.4 Capillarité

La loi de Jurin dit que la colonne de liquide soulevée est surtout variable suivant le rayon (jeu) de la colonne. Le jeu intéressant en brasage est le jeu à chaud surtout si c'est des métaux de base différente

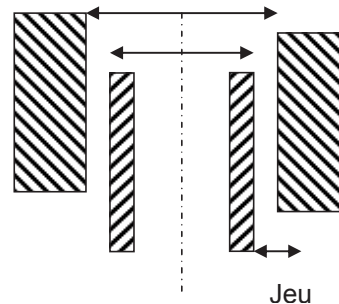
Si on plonge un tube capillaire dans un liquide, la colonne de liquide est en équilibre sous l'action des tensions superficielles.

Ce phénomène est vérifié lors des essais sur les éprouvettes à jeu variable.



1.18.4.1 Dilatation

Si l'on brase des tubes de matériaux différents, il faut être vigilant sur les coefficients de dilatation des deux matériaux pour obtenir un jeu suffisant à chaud. Prévoir le métal le plus dilatable à l'extérieur pour avoir un joint soudé en compression après refroidissement



1.18.5 La tension de vapeur

Température de volatilisation ou ébullition des métaux

Eviter certains métaux volatiles à haute température si chauffage sous vide

- pollution du vide
- diminution de la durée de vie des appareils de pompage
- pour remédier à une certaine température augmenter la pression par une injection de gaz neutre

1.18.6 états de surface

pour un bon mouillage

- rugosité supérieure à $2\mu\text{m}$
- éviter la présence d'un film chimique (oxydes, O_2 , H_2 , H_2O)
- éviter les graisses

- corps solide (sable et polissage

pour ceci

- des décapages mécanique
- décapage chimique (alcalin ou acide)
- rinçage et séchage des pièces

1.18.7 le flux

nettoyer les surfaces pour éliminer les films chimisorbés et produits absorbés protégé le métal d'apport et les pièces de l'oxydation par l'air, au moment du chauffage du brasage

- éliminer l'oxydation du métal d'apport du brasage
- s'étaler sur pièces à une température plus basse
- réactions chimiques limitées en flux et métal d'apport
- efficacité à la température pendant la durée du brasage
- élimination facile des résidus
- stable lors du transport et du stockage

1.18.8 Synthèse : conditions pour braser

CONDITION	POURQUOI	COMMENT	NOTION /MOYEN
Surface propres	Assurer un excellent mouillage	Décapage chimique Décapage mécanique	Brasabilité mesurée par Méniscographe et éprouvette à jeu variable
Jeu suffisant	Permettre à l'alliage d'apport de pénétrer par capillarité pour assurer la liaison entre les surfaces à braser	En fonction de l'alliage utiliser et du coefficient de dilatation des deux matériaux	Brasabilité mesurée par éprouvette à jeu variable.
Température suffisante	Faire fondre l'alliage sur les surfaces à braser (50 à 100°C au dessus de la température de fusion de l'alliage)	Utiliser un moyen de chauffage adéquate.	Fer à braser, thermodé, Air ou gaz chaud, au trempé, vague, four (sous vide, de refusion, à atmosphère contrôlée, infrarouge...), résistances, bains de sels, mig mag, laser, phase vapeur.... Tous les moyens sont bons.
Protection des	Conserver pendant le	Utiliser un flux	Flux sous forme poudre,

surfaces propres pendant le brasage	brasage des surfaces de métal nu pour assurer un bon mouillage de l'alliage d'apport.	décapant qu'il faudra éliminer après brasage (risque de corrosion)	pâte, liquide, enrobés autour de baguettes de métal d'apport. Ils peuvent être non corrosifs corrosifs, gazeux.
Apport d'alliage en quantité suffisante.	Alimenter le jeu de brasure en métal d'apport	Bonne conception et DMOB validé.	

1.19 ROBOTISATION

1.19.1 Définition

Mécanisme généralement composé d'éléments en série, articulés ou coulissant l'un par rapport à l'autre, dont le but est la saisie et le déplacement d'objet suivant plusieurs degrés de liberté. Il est multifonctionnel et peut être commandé directement par un opérateur humain ou par tout système logique.

1.19.2 Principe

L'automatisation des opérations de soudage présente beaucoup d'avantages :

- meilleure productivité
- aspect des cordons amélioré
- diminution des reprises dans le cas de cordons de grandes longueurs
- possibilité d'employer des paramètres de soudage plus élevés par l'utilisation de fils fourrés
- poste associé ou asservi au robot.

Il faut se définir un cahier des charges :

- La définition du besoin
- La définition des objectifs
- La recherche et la validation des solutions
- La rentabilité
- L'aspect social
- La formation
- ...

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

1.19.3 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).

1.19.4 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 palpée 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

1.19.5 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.

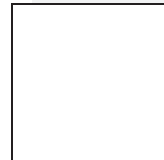
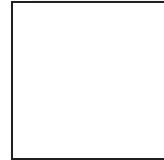
Une ou plusieurs traverses équipées de galets fous complètent l'installation.

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

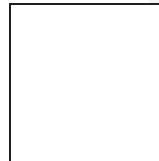
Elles permettent de mettre en rotation les pièces à souder.

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



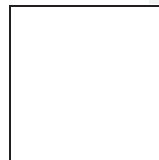
1.19.6 Le banc de soudage

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 rabouage d'éléments fixes. Certains bâtis comportent un chemin de roulement et permettent de souder des pièces immobiles comme la photo ci-contre.



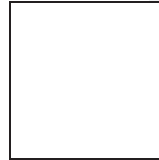
1.19.7 La potence de soudage

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.



1.19.8 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.

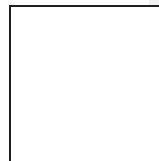
Le robot de soudage dit "polaire" :

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.).



1.20 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	

1.20.1 GENERALITE

1.20.1.1 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.

1.20.1.2 Désignation normalisée

Désignation Française : **Soudage par Friction**.

Désignation Américaine : **Friction welding**.

Désignation internationale : **42**.

1.20.1.3 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)**.

1.20.1.4 Type d'installation

Deux techniques de soudage par friction sont utilisées :

1.20.1.4.1 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 »

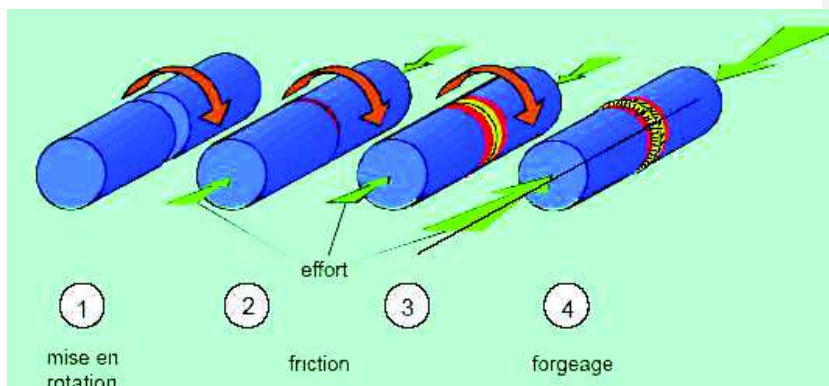
1.20.1.4.2 Soudage par friction inertielle

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.

1.20.2 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.



1.20.3 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^{ème} pièce. L'effort de compression auquel les pièces sont soumises peut être transmis soit par le mors tournant, soit par le mors fixe.

1.20.4 Paramètres de soudage

$$T = \boxed{}$$

$$\mu = F / W$$

Cr : couple résistant

μ : coefficient de frottement

ω : vitesse de rotation
frottement

F : force qui initie le

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 ω en fonction du résultat que l'on veut obtenir tant du point de vue mécanique que métallurgique.

1.20.4.1 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.

1.20.4.2 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.

1.20.4.3 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.

1.20.4.4 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.

1.20.4.5 Exemples de réglage

METAUX	Pression daN/mm ²		Ø 20 mm – S 315 mm ²	
	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

1.20.5 Autres procédés de soudage

1.20.5.1 Par friction pilotée et inertielle

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

1.20.5.2 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.

1.20.5.3 Par oscillations angulaires

Elévation 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.

1.20.5.4 Par oscillations linéaires

Pour l'assemblage des pièces prismatiques.

1.20.6 Contrôle des assemblages

1.20.6.1 Sur pièce

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

1.20.6.2 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.

1.20.6.3 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.

1.21 SOUDAGE PAR ALUMINOTHERMIE

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

1.21.1 Désignation normalisée

Française : Soudage Aluminothermique ou soudage par aluminothermie
Anglaise / Américaine : Aluminothermic Welding / Thermic Welding
Numérique internationale : 71

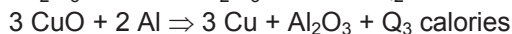
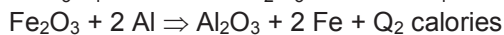
1.21.2 Définition

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.

1.21.3 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 m².

1.21.4 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.

1.21.5 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).

1.21.6 Hygiène et sécurité

Risques de brûlure causées par les pièces elles-mêmes.

1.21.7 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.

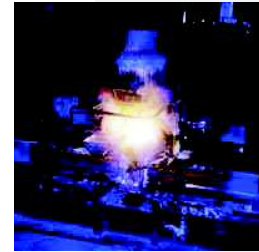
Pour rendre l'intérieur du moule totalement étanche, les interstices qui subsistent entre les bords du moule et la surface du rail, sont soigneusement colmatés avec une pâte à base d'argile et de sable.



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.



1.22 SOUDAGE VERTICAL SOUS LAITIER

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

1.22.1 Désignation normalisée

Française : Soudage VSL (Vertical Sous Laitier)

Américaine : Electroslag Welding

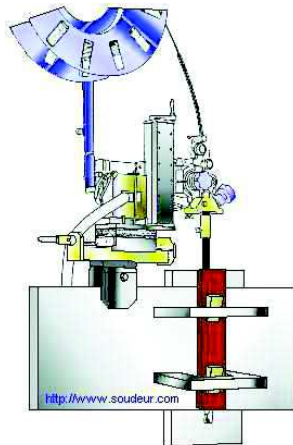
Numérique Internationale : 72

1.22.2 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.



1.22.3 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.

1.22.4 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.

1.22.5 Composition d'un 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 flâmes 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.

1.22.6 Paramètres opératoires

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

1.22.6.1 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

1.22.6.2 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.

1.22.6.3 Vitesse de dévidage du fil d'apport :

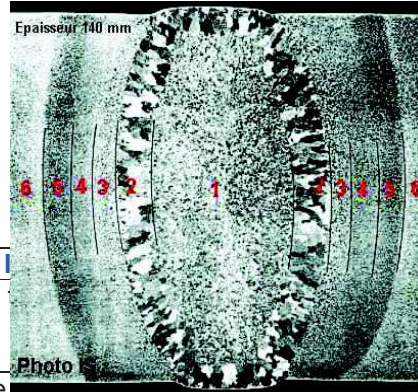
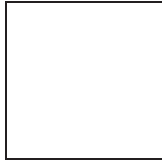
La vitesse de dévidage du fil est de l'ordre de 4 à 6 m/min.

1.22.7 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+CO₂ ou Ar+O₂) 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.



1.23 SOUDAGE PAR DIFFUSION

AVANTAGE	
Assemblage de certains matériaux hétérogènes (cuivre / aluminium)	Opération de soudage
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 dans les matériaux plus de 100°C lors du soudage
	Diffusion difficile sur matériaux avec des coefficients de dilatation très différents
	Contrôle difficile de la diffusion incomplète

1.23.1 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.

1.23.2 Désignation normalisée

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

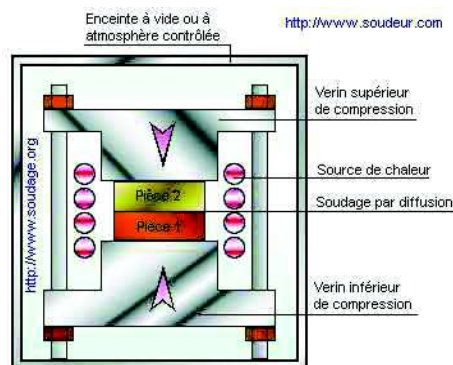
1.23.3 Définition du procédé par diffusion

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.

1.23.4 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.



1.23.5 Opération de s

- 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

1.23.6 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).

1.23.7 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.

1.23.8 Micrographie de soudage par diffusion



1.23.9 Paramètres d'influence

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

1.23.10 Performances

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

1.24 SOUDAGE PAR ARC TOURNANT

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Soudage de tous les aciers (excepté	Soudage pièce de révolution fermée

austénitique)	(épaisseur 0.8-5 mm et 300 mm ² 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	

1.24.1 GENERALITE

1.24.1.1 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).

1.24.1.2 Désignation normalisée

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

1.24.1.3 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.

1.24.1.3.1 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.

1.24.1.3.2 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