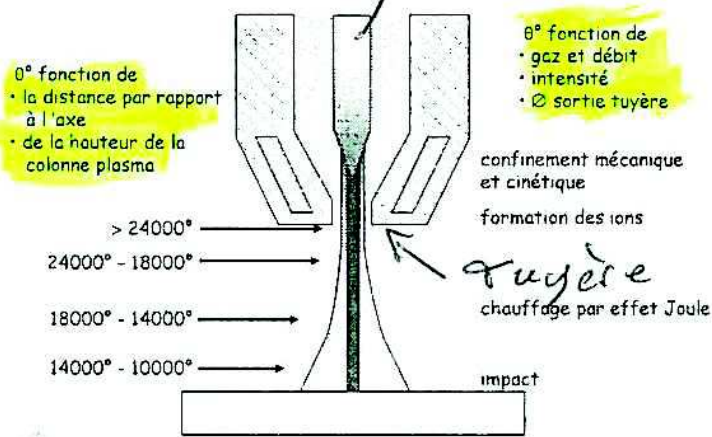


## PRINCIPE DU SOUDAGE PLASMA



### 1.14.1 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

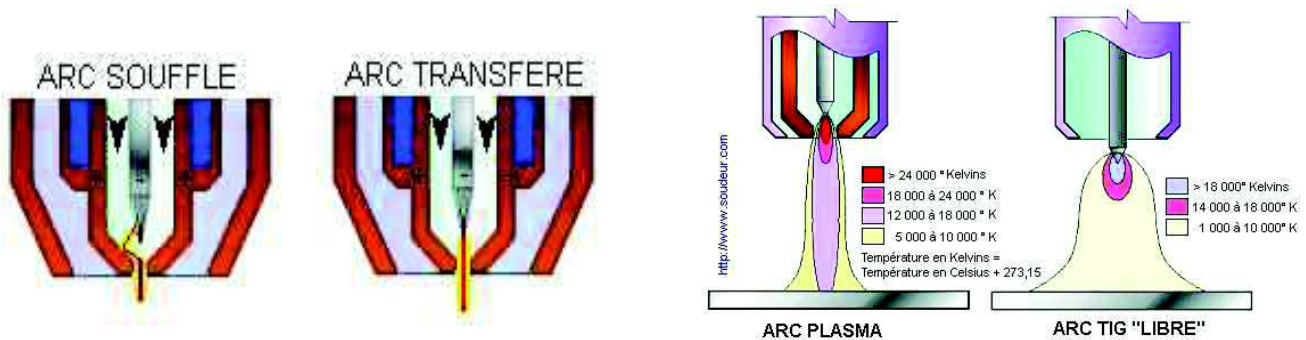
### 1.14.2 Différent utilisation :

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 métallurgiquement soudable, à l'exception des alliages d'ALU.

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



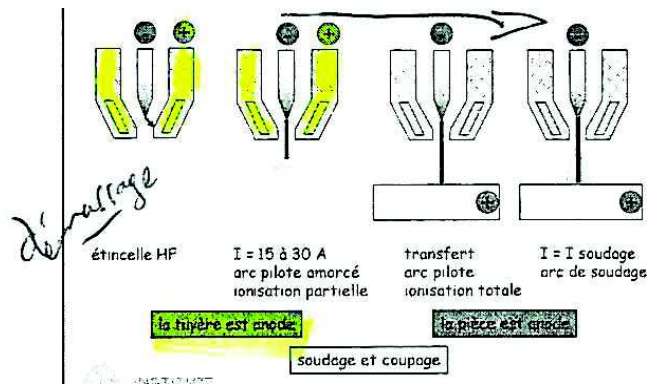
#### 1.14.2.1.1 Tuyère à arc transféré :

- **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

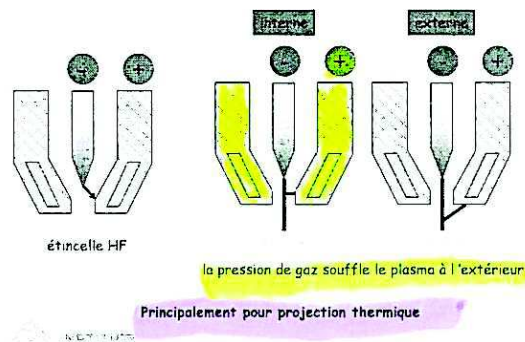


### 1.14.2.1.2 Tuyère à arc soufflé :

Le plasma débouche que sur 1 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



### 1.14.2.1.3 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.

### 1.14.3 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).

### 1.14.4 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.

### 1.14.5 Electrodes réfractaires :

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

## 1.14.6 Les gaz plasmagène et de protection :

### 1.14.6.1.1 Gaz plasmagène

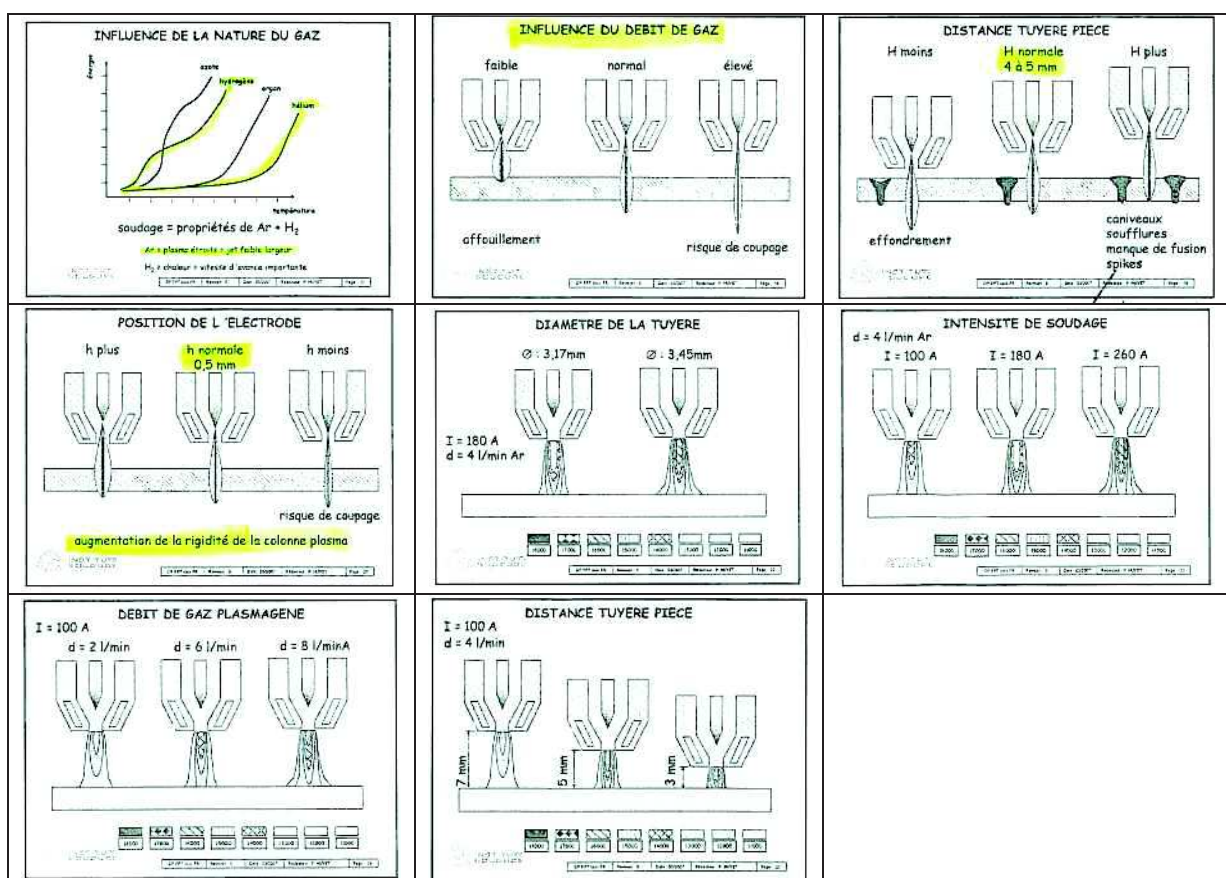
Il sert à conduire les électrons.

- **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**

### 1.14.6.1.2 Gaz de protection

C'est le gaz annulaire. C'est soit de l'argon pur, soit un mélange Ar+H<sub>2</sub> (maxi 10%), soit comme en MAG pour les aciers non faiblement alliés à savoir Ar+O<sub>2</sub> (maxi 5%) et Ar+CO<sub>2</sub> (maxi 20%). L'O<sub>2</sub> et le CO<sub>2</sub> 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.

## 1.14.7 Influence des paramètres:



## 1.14.8 Les différents modes opératoires en soudage plasma :

### 1.14.8.1.1 - 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

### 1.14.8.1.2 Soudage par jet débouchant

(technique du trou de serrure) :

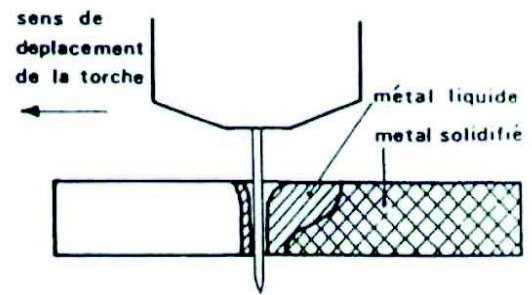
- Appelé aussi « **keyhole** », les tôles à assembler sont placées bord à bord, sans jeu. La torche est disposée au dessus du joint à réaliser. Le jet plasma est conditionné pour traverser toute l'épaisseur et déboucher sur l'autre face des tôles. Le trou réalisé est de l'ordre de 1 à 3 mm. Le métal 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 solidifie, la section transversale du cordon est semblable à forme d'un verre à pied.

Utilisation de métal d'apport possible.

Technique utilisable pratiquement qu'en automatique.

la protection envers comme le TIG



se  
la

### 1.14.8.1.3 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

### 1.14.9 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 graphite 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

### 1.14.10 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

### Le faisceau d'électron : n° 76

#### 1.14.11 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



### 1.14.12 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<sup>2</sup>. 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.

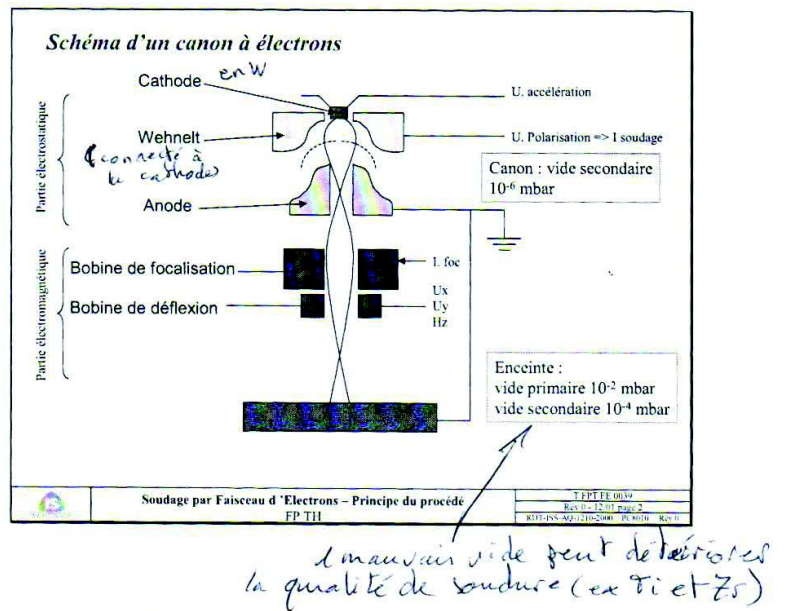
### 1.14.13 Constitution d'une installation

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.



### 1.14.14 Domaine d'application

- Soudage des aciers carbone jusqu'à 200 mm
- 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

### 1.14.15 Paramètres de soudage

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

#### 1.14.15.1 Intensité du courant cathodique

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

### 1.14.15.1.2 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  $U \nearrow$ ,  $I \searrow \Rightarrow$  la pénétration  $\nearrow$ .

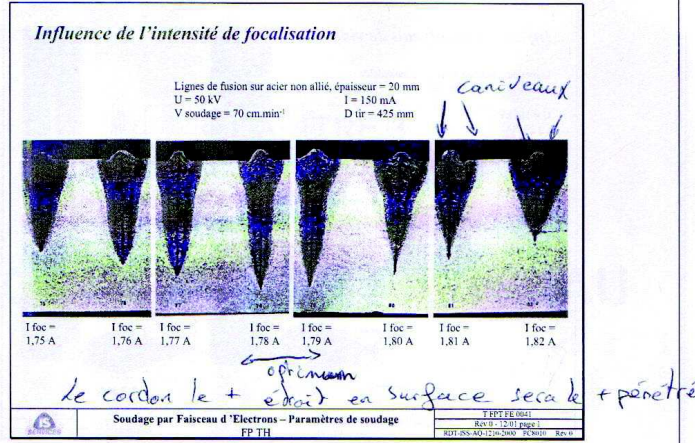
### 1.14.15.1.3 Focalisation du faisceau d'électrons

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  $I_{\text{foc}} \nearrow \Rightarrow$  la pénétration  $\nearrow$ , la largeur de la ZAT  $\searrow$  jusqu'à atteindre la pénétration maximum.

Ensuite si  $I_{\text{foc}} \searrow$  encore  $\Rightarrow$  la pénétration  $\searrow$ , la largeur de la ZAT  $\nearrow$ .



### 1.14.15.1.4 Couple vitesse/puissance

Si  $v \nearrow$  et  $I \nearrow \Rightarrow$  la largeur de la ZAT  $\searrow$ , la pénétration  $\searrow$  légèrement.

### 1.14.15.1.5 Niveau du vide

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

### 1.14.16 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  $10^{-2} \text{ Pa}$ .

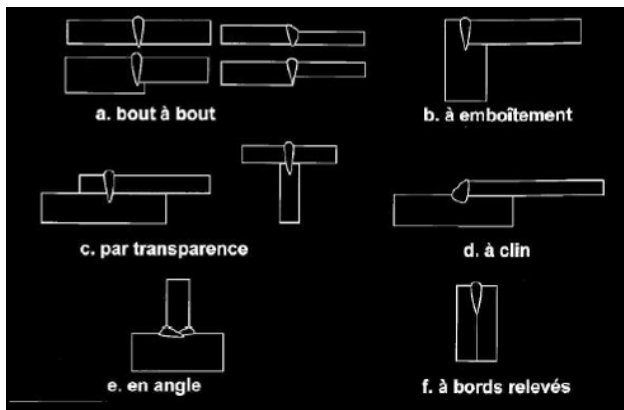
Un second pompage est réalisé avec une pompe secondaire de type moléculaire pour atteindre une dépression de  $10^{-4} \text{ Pa}$  à  $10^{-5} \text{ Pa}$ .

### 1.14.17 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



### 1.14.18 Cordon de soudure

Forme en doigt de gants



### 1.14.19 régimes de soudage, débouchant ou non débouchant.

#### 1.14.19.1 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

#### 1.14.19.2 Régime de soudage non débouchant

##### Avantages

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

##### Inconvénients

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

### 1.14.20 Avantages

- Soudage de pratiquement tous les matériaux.
- Epaisseur de soudage élevée (200 mm en corniche sur acier) «  $P (kw) \times 2 = e (mm)$
- 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).

### 1.14.21 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)

#### 1.14.22 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

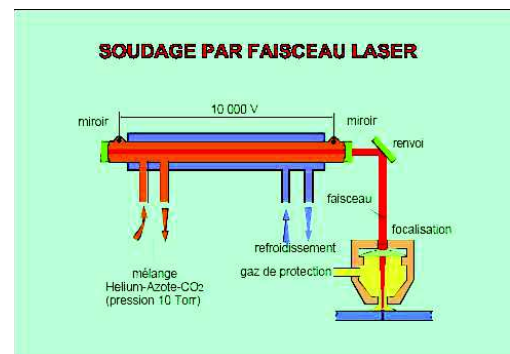
### Le faisceau LASER : Procédé 751

#### 1.14.23 Principe

**Procédé à 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 Co<sub>2</sub> 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

#### 1.14.24 LASER à GAZ

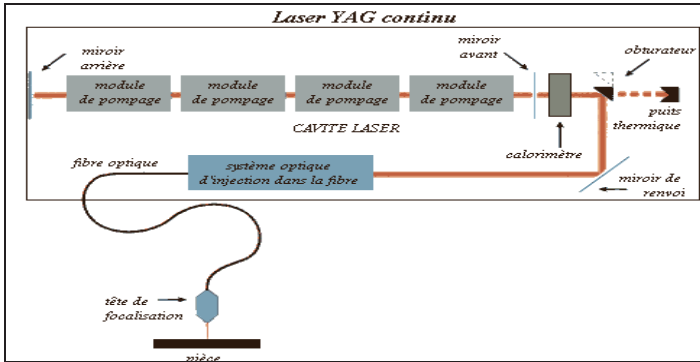
Le milieu actif est ici constitué d'un mélange gazeux contenant de l'hélium (50%), de l'azote (40%) et du CO<sub>2</sub> (10%). Le pompage s'effectue par décharge électrique ou de plus en plus souvent par radiofréquence. Les molécules d'azote ainsi excitées transfèrent leur excitation aux molécules de dioxyde de carbone. Le rayonnement **d'une longueur d'onde de 10,6  $\mu\text{m}$  autorise uniquement le transport du faisceau par miroirs.** Malgré la possibilité de pulser le faisceau, le procédé de soudage utilise principalement des sources laser CO<sub>2</sub> à **régime** de fonctionnement **continu**. Le rendement électrique de telles sources laser est inférieur à 10%.

#### 1.14.25 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 CO<sub>2</sub>, de pouvoir **utiliser des fibres optiques pour le transport du faisceau.** Il en existe **2 types, les continus et les pulsés.**

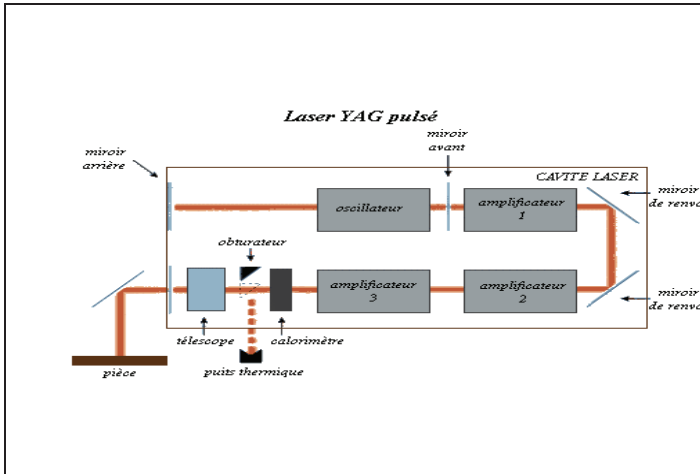


### 1.14.26 Les LASER YAG continus



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.

### 1.14.27 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.

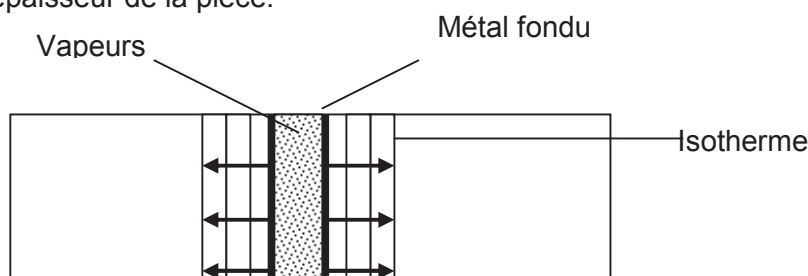
### 1.14.28 types d'installation :

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.

#### 1.14.28.1.1 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 <b>Pas de risque d'effondrement</b>	<b>Contrôle de la profondeur</b> 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.**

#### 1.14.28.1.2 Avantages du procédé

Vitesse de soudage rapide

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

#### 1.14.28.1.3 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

#### 1.14.29 Domaine d'application du procédé

##### 1.14.29.1.1 Alliage d'aluminium

Problème de fissuration et reflexion

##### 1.14.29.1.2 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.

##### 1.14.29.1.3 Acier inoxydables

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

Ferritique Martensitique : limitation du grossissement de grain

##### 1.14.29.1.4 Nickels et ses alliages :

risque de FAC -> vitesse de soudage faible

##### 1.14.29.1.5 Titane , Zirconium et alliages

:bonne soudabilité

##### 1.14.29.1.6 Cuivre et alliages :

soudage sans préchauffage,

problèmes de reflexion ,

exiger une nuance de cuivre désoxydé ,

le laiton ne se soude pas (Zn volatile)

### 1.14.30 Type de l'installation

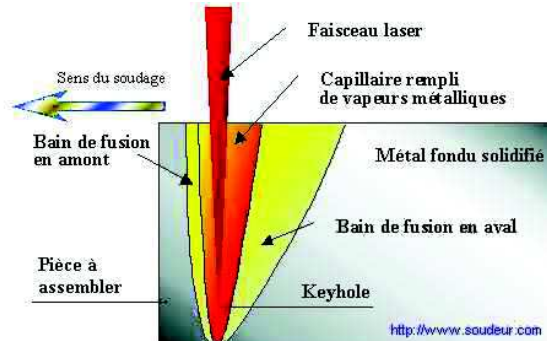
Installation avec fibre optique pour laser Yag et bras robotisé  
Installation en temps partagé

### 1.14.31 Préparation des bords

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

### 1.14.32 Cordon de soudure

En mode continu



### 1.14.33 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

### 1.14.34 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	

### 1.14.35 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/m<sup>2</sup>. 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

## 1.15 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>

### 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.

### 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 thermo-chimique. 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'oxycoupent 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 excimère

### Les différents types de coupage thermique :

Par fusion :

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

Par Oxydation

- Lance O<sup>2</sup>
- Oxycoupage
- Poudre de fer

### Plasma :

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

Plasma Argon hydrogène :

- Destiné principalement forte épaisseur pour acier inoxydable ou aluminium de 25 à 150mm

Plasma air comprimé (vortex air) ou ZIP :

- Tôle fine jusqu'à 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

## Laser :

Laser CO2 :

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

## 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 ( $1300^\circ C$ ) <  $\theta_f$  du métal ( $1535^\circ C$ )

température de fusion oxyde ( $1370$  à  $1597^\circ C$ ) <  $\theta_f$  du métal ( $1535^\circ C$ )

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.

Les paramètres de coupe sont l'épaisseur à couper (angle de chanfrein compris) qui détermine le diamètre de buse, la pression de coupe en  $O_2$ , la vitesse d'avance et la température de la flamme de chauffe.

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 épaisseurs 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.

## 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.

## 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.

### 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	+++	++	+	+	+

### 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 .....

### 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.

### 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.

### 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 :  $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + \text{calories}$

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.

## 1.16 Revêtement par rechargement et par pulvérisation

Pour une action curative ou préventive, le rechargement ou le revêtement s'accroche de différentes façons 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
- co-laminage
- 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

### 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 déterminé. Le matériau déposé 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

### 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

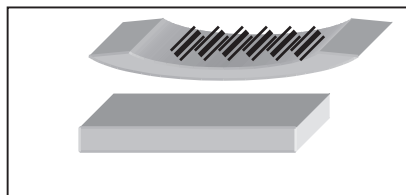
Procédés utilisables

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

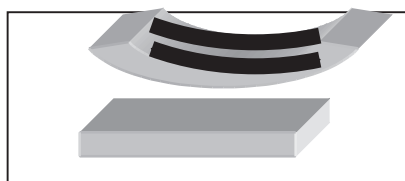
#### 1.16.1 [Méthodes de rechargement](#)

##### 1.16.1.1 [Par passes étroites](#)

Engendre une déformation transversale



##### 1.16.1.2 [Par passe larges](#)



Engendre une déformation longitudinale

#### **1.16.1.1.3 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

#### **1.16.1.1.4 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 thermique 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

## **1.17 Brasage fort et brasage tendre**

### **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**

#### **1.17.1 Brasage fort**

brasage dans lequel le joint généralement pelliculaire avec métal d'apport dont la température de fusion est **> 450 °C**

#### **1.17.2 Brasage tendre**

: avec métal d'apport dont la température de fusion est **< 450 °c**

#### **1.17.3 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.

#### **1.17.4 Brasage par diffusion :**

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



### 1.17.5 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 à ce que les caractéristiques du joint soient très voisines du métal de base. Une zone de métal fondu ne doit plus exister dans le joint après le traitement de brasage diffusion.

### 1.17.6 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 :

### Le mouillage

#### 1.17.7 Principe

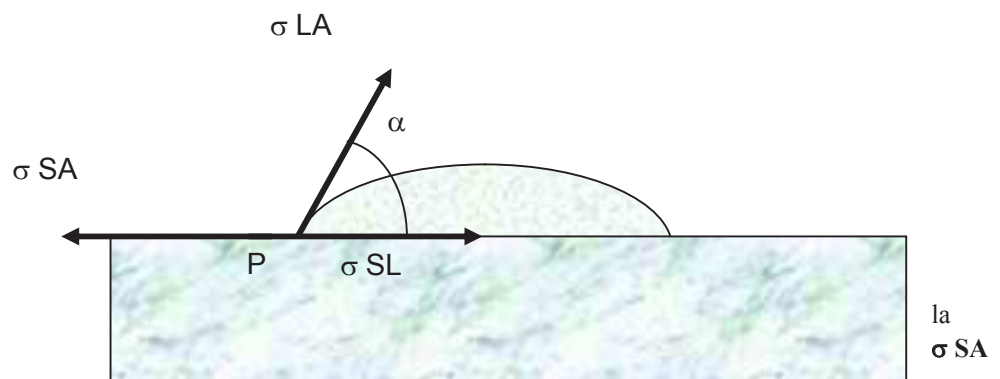
$\sigma_{SA}$  = Tension superficielle Solide Air

$\sigma_{LA}$  = Tension superficielle Liquide Air

$\sigma_{SL}$  = Tension superficielle Solide Liquide

Si  $\alpha$  est obtus pas de mouillage

Si  $\alpha$  est aigu mouillage sur pièces à brasier (puissance  $> \sigma_{LA} + \sigma_{SL}$ )



Au point P si équilibre :

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

Plus  $\sigma_{SL}$  devient petit, plus l'angle  $\alpha$  devient proche de 0. Or  $\sigma_{SL}$  dépend de la propreté des pièces (état de surface)

Plus les surfaces seront propres, plus l'angle  $\alpha$  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

### La diffusion

#### 1.17.8 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**

### 1.17.9 Paramètres

Température, temps, contrainte, coefficient de diffusion.

### 1.17.10 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  $Ti_3 Ag$ .) manque de ductilité

cela dépend

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

les remèdes ou maîtrise de la diffusion

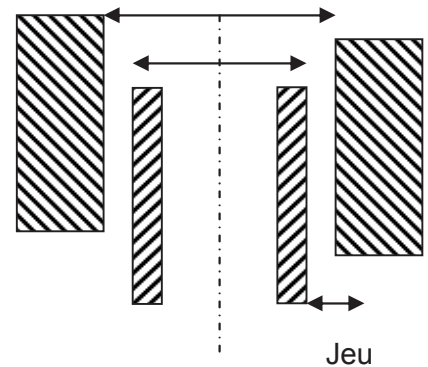
- baisse de la durée du brasage
- baisse de la température de brasage
- baisse de la quantité de métal d'apport

### 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.



### 1.17.11 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

### La tension de vapeur

Température de volatilisation ou ébullition des métaux

Éviter certains métaux volatils 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

### Etats de surface

pour un bon mouillage

- rugosité supérieure à  $2\mu m$
- 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 mécaniques
- décapage chimique (alcalin ou acide)
- rinçage et séchage des pièces

### le flux

nettoyer les surfaces pour éliminer les films chimisorbés et produits absorbés

protéger 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

### Synthèse : conditions pour brasage

CONDITION	POURQUOI ?	COMMENT	NOTION /MOYEN
Surface propres	Assurer un excellent mouillage	Décapage chimique Décapage mécanique	Brasabilité mesurée par Méniscographie 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 brasage	En fonction de l'alliage utilisé 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 brasage (50 à 100°C au dessus de la température de fusion de l'alliage)	Utiliser un moyen de chauffage adéquat.	Fer à brasage, 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 surfaces propres pendant le brasage	Conserver pendant le brasage des surfaces de métal nu pour assurer un bon mouillage de l'alliage d'apport.	Utiliser un flux décapant qu'il faudra éliminer après brasage (risque de corrosion)	Flux sous forme poudre, pâte, liquide, enrobés autour de baguettes de métal d'apport. Ils peuvent être non corrosifs, gazeux.
Apport d'alliage en quantité suffisante.	Alimenter le jeu de brasage en métal d'apport	Bonne conception et DMOB validé.	

## 1.18 ROBOTISATION

### 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.

### 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