

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE BATNA 2  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Spécialité : Génie Mécanique- Master 1  
Option : Construction Mécanique

Unité d'enseignement: UED 1.1  
Cours

Intitulée du module

---

*Techniques de Soudage*

---

Réalisé par :

**Dr : El hachemi BAHLOUL**

**Année universitaire 2022/2023**

## 1. Généralités

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le plus répandu dans les domaines industriels (pétrolier et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.).

Le soudage est une liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur (combustion de gaz, arc électriques) et de la pression. On soude presque la totalité des métaux existants en utilisant plusieurs procédés.

## 2. Vocabulaire de base

**A/ Ensemble soudé:** ensemble formé par soudure, la zone affectée thermiquement et le métal de base.

**B/ Soudure bout à bout/en bout :** assemblage de deux pièces bord à bord.

**C/ Soudure d'angle :** assemblage en T ou en L de deux pièces qui se recouvrent ou qui sont perpendiculaires l'une à l'autre ;

**D/ Soudage par pression :** soudage avec application d'une pression provoquant une déformation plus ou moins plastique des surfaces à souder, sans métal d'apport. Aucune partie constitutive ne subit de fusion. Il est possible, au besoin, de chauffer les surfaces à souder pour faciliter l'assemblage.

**E/ Soudage par fusion :** soudage avec fusion assurant la formation du joint sans pression. L'utilisation d'un métal d'apport fondu n'est pas toujours nécessaire ;

**F/ Placage:** application par soudure, sur la pièce à souder, d'une ou plusieurs couches de métal différent de celui de la pièce. Pour améliorer la résistance à l'abrasion, à la corrosion ou à la chaleur ;

**G/ Qualification des modes opératoires de soudage (QMOS) :** document contenant la spécification des paramètres exigés pour une application donnée du soudage, en vue d'en assurer la répétabilité.

**H/ Taux de dépôt :** quantité de métal déposé par unité de temps lors du soudage.

**I/ Métal de base :** métal assemblé ou rechargé par soudage.

**J/ Zone affectée thermiquement (ZAT):** zone du métal de base qui n'a pas fondu mais dont les propriétés ont été affectées par la chaleur dégagée lors du soudage.

### 3. Propriétés des métaux

Les métaux se distinguent en fonction de caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques qui déterminent leur soudabilité, mais aussi la fonction du métal dans un assemblage.

**a. Fragilité :** La fragilité désigne la caractéristique d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement.

**b. Ductilité :** À l'opposé, la ductilité représente la capacité d'un métal à se déformer sans se rompre. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures créés par une déformation se propagent difficilement.

**c. Ténacité :** La ténacité correspond à la capacité des matériaux à résister aux chocs sans se briser ni s'écailler. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont constitués de matériaux de haute ténacité.

**d. Malléabilité :** La malléabilité est une caractéristique qui permet au métal de se laisser façonner. Elle réfère à la résistance relative du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Un exemple de matériel extrêmement malléable, quoique non soudable, est la pâte à modeler. Notons que la malléabilité d'un matériau croît avec l'augmentation de la température.

**e. Élasticité :** L'élasticité désigne la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche.

**f. Dureté :** La dureté est la capacité d'un corps à résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui. Elle se caractérise par sa résistance aux rayures. Le diamant est le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, est moins, et l'aluminium est de faible dureté.

**g. Résistance à l'abrasion :** Les matériaux durs présentent une bonne résistance à l'abrasion, ils ne s'usent pas facilement par frottement. En pratiques, ils sont plus difficiles à meuler.

**h. Résistance à la corrosion :** Désigne la capacité d'un matériau à ne pas se dégrader sous l'effet de la combinaison chimique de l'oxygène et du métal. Un métal ferreux résistant à la corrosion ne rouille pas ; c'est le cas des aciers inoxydables et de certains autres aciers d'alliage.

**i. Point de fusion :** C'est la température à laquelle un métal passe de l'état solide à l'état liquide. Le point de fusion est un facteur important pour déterminer la soudabilité d'un métal. Ainsi, plus le point de fusion d'un métal est bas, moins la chaleur nécessaire pour le souder sera élevée.

**j. Magnétisme :** Est la propriété des alliages ferreux, qui les rend sensibles aux aimants.

#### 4. Définition de l'opération de soudage

Le soudage est une opération qui consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler.

#### 5. Notion de soudabilité

On considère qu'un matériau métallique est soudable, à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé, qui par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leurs présences, satisfont aux propriétés requises, est choisies comme base de jugement.

Dans le cas des aciers, un critère de soudabilité est donné par la valeur de carbone équivalent fixé par l'institut international de soudure :

$$C_{eq} (\%) = \frac{C+Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Avec:  $C_{eq}$  : Valeur de Carbone équivalent

Et: C: Carbone, Mn: Manganèse, Cr: Chrome, Mo: Molybdène, V: Vanadium, Ni: Nickel, Cu: Cuivre.

Selon la valeur de Carbone équivalent on distingue que :

- Si  $C_{eq} \leq 0.40$ , soudage sans précaution ;
- Si  $0.40 \leq C_{eq} \leq 0.60$ , on effectue un préchauffage entre 100 à 250 C° ;
- Si  $C_{eq} \geq 0.60$ , soudage difficile ;
- Si  $C_{eq} > 0.70$ , acier non soudable.

## 6. Techniques de soudage

Différentes méthodes qui s'appliquent suivant les épaisseurs des joints et leur préparation dont :

**a-** bord à bord,

**b-** bords relevés,

**c-** sur chanfrein en V,

**d-** sur chanfrein en X, etc.

### 6.1. Position de soudage

Les principales positions de soudage sont les suivantes :

**a-** A plat.

**b-** Au plafond.

**c-** En corniche.

**d-** Verticale (montante ou descendante)

Dans la position à plat, il est assez aisé d'obtenir une bonne pénétration, convexe et régulière, le bain étant soutenu naturellement par les bords des pièces à souder.

En plafond, au contraire, du fait de la pesanteur du bain de fusion. Il sera difficile de réaliser une bonne pénétration, cette dernière se présentera sous forme concave ou plate. En soudage à l'arc, l'intensité est plus faible pour la position plafond que pour la position à plat (10 à 15 % de moins).

- En position descendante, l'intensité est 15 à 20% supérieure à celle nécessaire pour soudage à plat

- En position montante, l'intensité est 15 à 20% inférieure à celle nécessaire pour le soudage à plat.

## 6.2. Préparation des bords à souder

En pratique, le mode d'assemblage des bords à souder (écartement, forme des bords, positions respectives des bords) joue un rôle important sur la facilité d'exécution d'un joint et sur sa qualité.

La préparation des bords varie en fonction de l'épaisseur des pièces à assembler, de la méthode de soudage et de la position de soudage. Les coupes et chanfreins peuvent être obtenus par :

- Oxycoupage.
- Limage.
- Cisailage.
- Usinage, rabotage ou meulage.

## 7. Classification générale des procédés de soudage

Il existe plusieurs procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour l'échauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage.

### 7.1. Selon la source d'énergie

Selon le type de la source d'énergie on distingue les énergies du type :

- Energie thermoélectrique.
- Energie thermochimique.
- Energie mécanique.
- Energie de focalisation.

Les sources d'énergie doivent être capables d'apporter, en un temps assez court, une grande quantité de chaleur en un point bien localisé. Tout d'abord par l'emploi de la flamme oxyacétylénique puis de l'arc électrique. Les classes des procédés selon les sources d'énergie:

#### A/ Energie électrique :

a) Soudage à l'arc électrique sans protection gazeuse :

- Avec électrode fusible (M.I.G) ;
- Avec électrode réfractaire (T.I.G).

b) Soudage à l'arc électrique sous flux solide avec électrode fusible.

c) Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.

d) Soudage au plasma d'arc.

e) Soudage à l'hydrogène atomique.

f) Soudage par résistance électrique:

- A la molette ;

- Par point.

### **B/. Energie chimique**

Soudage à la flamme, spécifié par la nature de la flamme.

Ex.: soudage oxyacétylénique.

### **C/ Energie mécanique :**

Soudage à la forge. Soudage par friction. Soudage par pression.

### **D/ Energie focalisée**

Soudage au rayon laser. Soudage par bombardement électronique sous vide.

## **7.2. Selon l'état du métal pendant le soudage**

Selon l'état du métal pendant et à l'endroit du soudage on distingue :

### **A/ Le soudage par fusion**

Il consiste à porter à fusion les bords des pièces à souder à l'aide d'une source d'énergie tels que l'arc électrique, la flamme de gaz, la réaction chimique, l'énergie de rayons laser, le jet de plasma, etc. Sous l'action de la chaleur les bords du métal sont fondus et établissent une liaison entre eux ou encore avec un métal d'apport, ainsi formant le bain de fusion, après solidification constitue la soudure.

### **B/ Le Soudage par pression**

Regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage :

a) Soudage en bout par résistance.

b) Soudage par points par résistance.

## **8. Types d'assemblage**

Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler (figure 1).

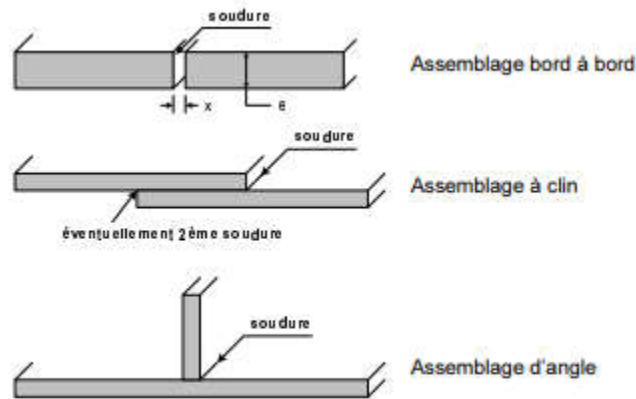


Fig.1. Principaux types d'assemblage

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base (c'est-à-dire les éléments à assembler) sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments (figure 2).

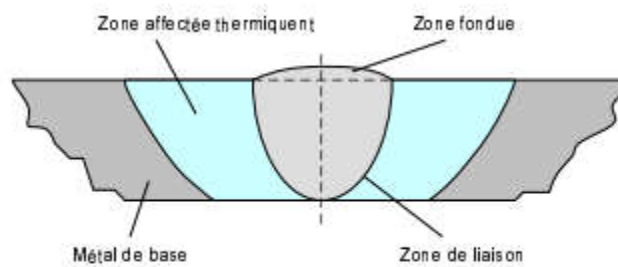
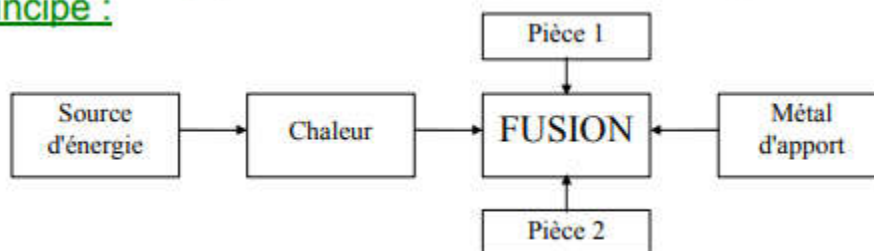


Fig.2 Coupe transversale d'un assemblage

### Principe :



### Deux cas :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder



## 9. Description de divers procédés de soudage

### 9.1. Soudage à l'arc

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder Figure 3.

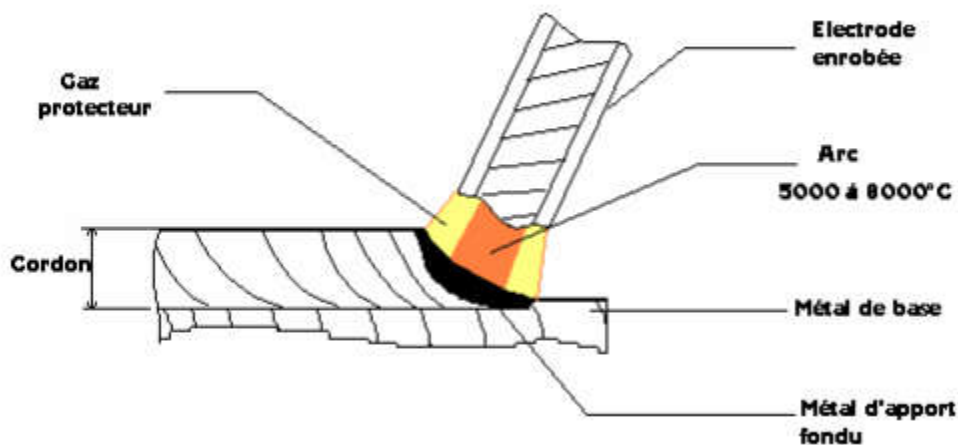


Fig. 3 Principe du soudage à l'arc

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

#### 9.1.1. Soudage à l'électrode enrobée :

L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport.

L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe (voir schéma précédant).

#### 9.1.2. Soudage MIG (Métal Inert Gas) :

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteur : argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

#### 9.1.3. Soudage MAG (Metal Active Gas) :

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO<sub>2</sub> et d'argon adaptée au soudage des aciers de construction au carbone.

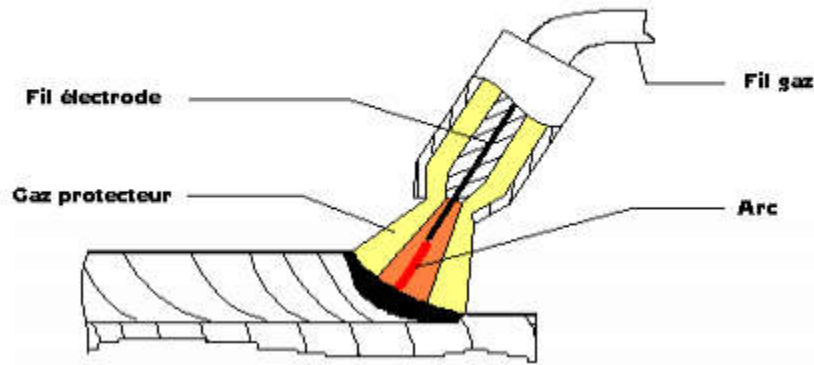


Fig. 4 Principe du soudage MIG et MAG

#### 9.1.4. Soudage TIG ( Tungsten Inert Gas ) :

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (bague) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance).

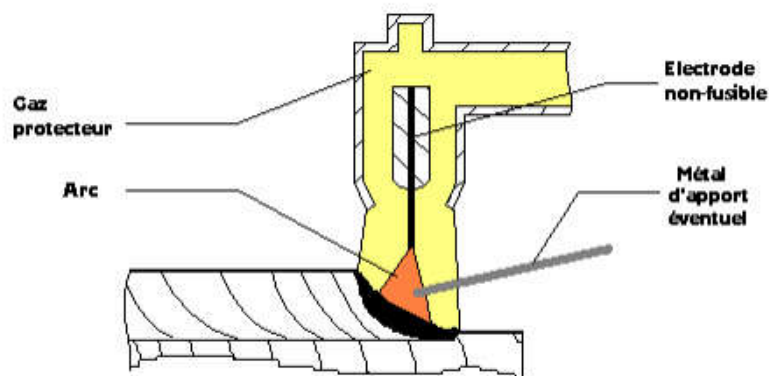


Fig. 5 Principe du soudage TIG

Ce procédé est très utilisé dans l'industrie, car son procédé de fusion entraîne moins de déformations que le chalumeau. Il est employé dans la construction mécano-soudée, la chaudronnerie, les charpentes métalliques, les chantiers navales, l'industrie automobile et l'aérospatiale.

#### 9.2. Soudage au gaz (au chalumeau).

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par la combustion de gaz. La composition oxygène-acétylène (oxyacétylénique) est aujourd'hui presque exclusivement employée. L'emploi de flux décapants permet de combattre

l'oxydation en cours de soudage. Ce procédé se subdivise comme suit : - sans flamme auxiliaire. - avec flamme auxiliaire réductrice.

Flamme oxyacétylénique résultant de la combustion d'un volume d'acétylène (gaz combustible) pour deux volumes et demi d'oxygène. On notera qu'une trop forte proportion d'oxygène entraîne une chaleur plus importante mais le risque d'oxydation augmente.

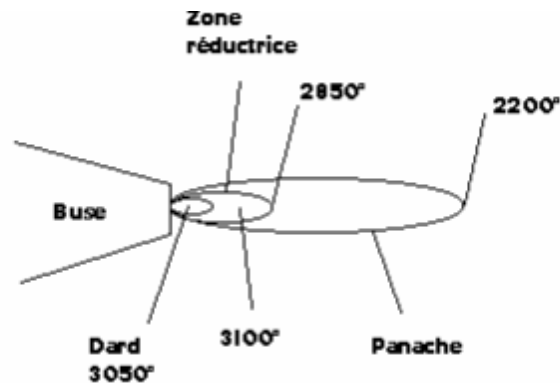


Fig. 6 Flamme oxyacétylénique

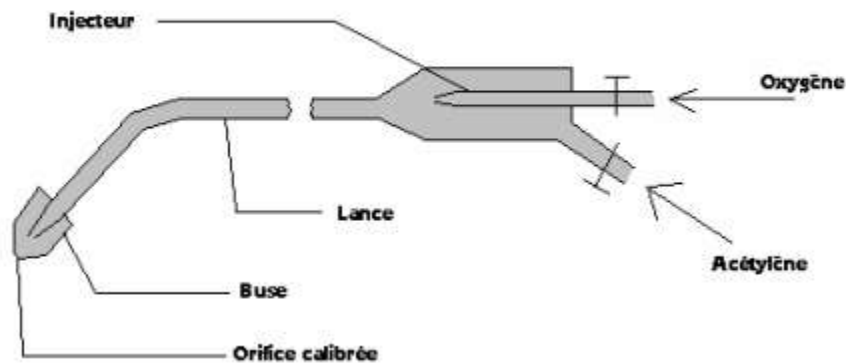


Fig. 7 Chalumeau soudeur

L'aspect économique et la rapidité d'exécution font que ce procédé est beaucoup plus employé par les artisans.

### 9.3. Le soudage par résistance

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ( $I > 2000 \text{ A}$ ) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «forge» la soudure.

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, le plus répandu et le soudage par points car il est utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder.

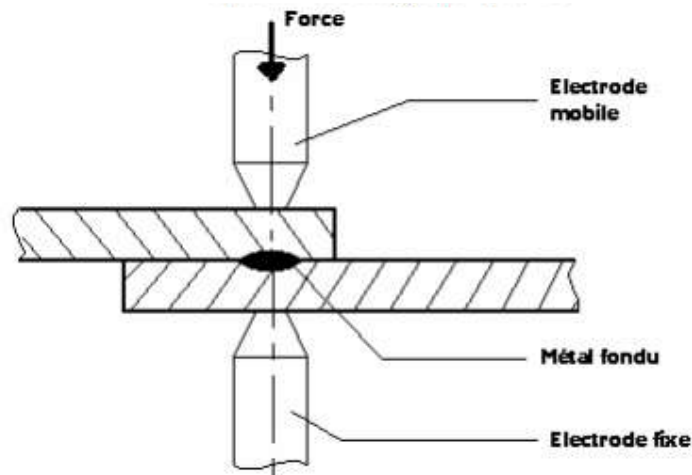


Fig. 8 Principe du soudage par points

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide (figure.9).

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...

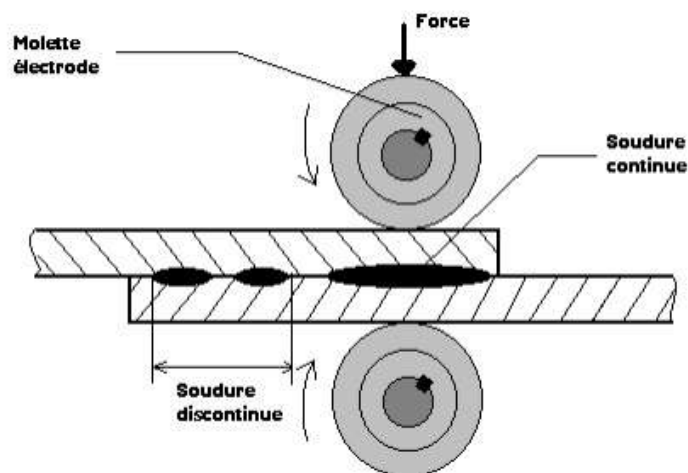


Fig. 9 Principe du soudage par molette

#### 9.4. Le soudage par friction

Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (fig. 10.a). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé (fig. 10 b). Par frottement les pièces s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ( $V = 100 \text{ m/min.}$ ). Un bourrelet commence à se former (fig. 10.c). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (fig. 10.d). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet par usinage. On notera qu'il est préférable de souder deux pièces de même section. Exemples d'applications : Utilisé dans les mécanismes nécessitant une grande résistance (arbres de boîtes de vitesses, leviers sur axes, goujons sur moyeu de poids lourds, rallonges de forets, queues de soupapes...)

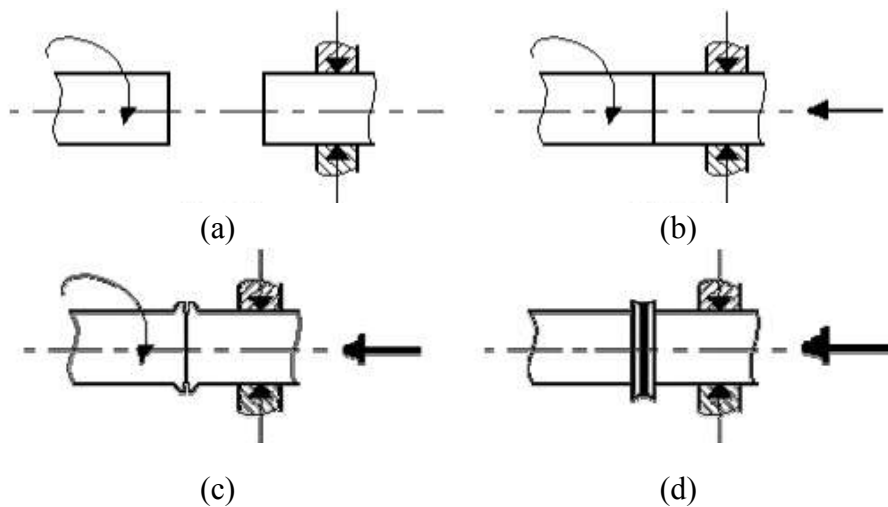


Fig. 10 Etapes du soudage par friction

**9.5. Le soudage au fer :** Ce procédé de soudage est employé majoritairement dans l'industrie électronique pour les petites soudures. On utilise un fer qui fait office de résistance ce qui produit la chaleur nécessaire à la fusion du métal d'apport souvent l'étain.

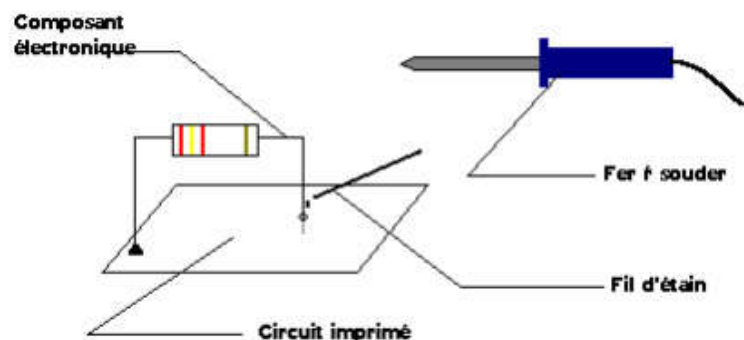


Fig. 11 Soudage au fer

Ce soudage n'est employé que dans l'électronique pour le soudage de composants, il est employé aussi bien dans l'industrie (soudage à la vague) que par les artisans (manuellement).

## 10. Règles a respecter

- 1 : Souder des épaisseurs aussi voisines que possible.
- 2 : Placer la soudure dans les zones les moins sollicitées. Eviter, en particulier, les sollicitations en flexion et en torsion.
- 3 : Penser aux déformations engendrées par les dilatations locales lors du soudage. Eviter en particulier les soudures d'angle sur pièces prismatiques
- 4 : Afin d'augmenter la durée de vie des outils, éviter d'usiner une soudure.
- 5 : Eviter les masses de soudure et veiller à une bonne conception des renforts. Pour une construction fortement sollicitée, on supprime les amorces de rupture en effectuant un cordon de soudure.
- 6 : Veiller aux possibilités d'accès du soudeur, du chalumeau ou des électrodes. A vérifier notamment dans le cas des soudures en X ou avec reprise à l'envers.
- 7 : Prévoir des formes qui permettent le positionnement des pièces à souder ou à défaut, concevoir un montage de soudage.
- 8 : Songer à des surépaisseurs pour l'usinage éventuel des faces après soudage (déformations).

## 11. Les avantages techniques et économiques du soudage

- a) Les assemblages soudés présentent une résistance élevée par rapport à d'autres assemblages
- b) Le soudage est très souvent employé en combinaison avec le moulage, forgeage, estampage etc , ce qui permet d'obtenir des pièces d'une forme très compliquées et de dimensions très grandes.
- c) Haute productivité, bas prix de revient avec possibilité d'obtention des assemblages étanches.
- d) Diminution des dépenses initiales des équipements des ateliers de soudage.

## 12. Principaux défauts des soudures

Les défauts des soudures peuvent être divisés en deux catégories : les défauts internes comme les fissures à chaud, les fissures à froid, les fissures au réchauffage et les porosités etc. ; et les défauts ayant une origine purement opératoire tels que caniveaux, manque de pénétration, collage.

### 12.1. Défauts des cavités

Ce sont des défauts volumiques, elles comprennent :

**12.1.1. Défauts des soufflures :** Les soufflures sont des défauts fréquents en soudage sphériques, formés par des bulles de gaz enfermées dans le cordon, si elles sont visibles en surface (débouchantes) on parle des piqûres et si elles sont allongées, on parle, à des soufflures vermiculaires.

Leurs causes sont dues à des courants d'air, un manque de gaz de protection, ou des impuretés dans le joint à souder. Les piqûres sont causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

**12.1.2. Défauts des retassures:** Les retassures sont des espaces vides apparaissant lors d'un retrait du métal en se refroidissant.

**12.1.3. Défauts des inclusions:** Les inclusions c'est l'incorporation dans le cordon, d'un composé étranger. Types d'inclusions.

**a - Inclusion solide:** Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (poussière).

**b-Inclusion de laitier:** Les inclusions de laitier peuvent être alignées, isolées ou distribuées aléatoire.

**c- Inclusion métallique:** Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu.

Ces défauts sont détectés par le contrôle visuel et le contrôle radiographie et ultrasons.

### 12.2. Les fissure

Connues comme des discontinuités brutale dans un matériau; ce sont les plus fréquents défauts dans la soudure. Elles sont divisées en deux catégories selon leur Orientation:

**a-** Les fissures longitudinales (parallèle à l'axe de la soudure): sont le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées dans les soudures de fortes sections.

**b-** Les fissures transversales (perpendiculaires à l'axe de la soudure) : sont le résultat des contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

**a-** Fissures à chaud: survient au moment de la solidification du bain de fusion, elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Elles peuvent être internes ou déboucher en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces inter-dendritiques et suivent donc les directions de solidification.

**b-** Fissures à froid: elles apparaissent à la phase de refroidissement, vers 200°C ou moins. Elles se développent dans la zone de soudage et la zone affectée thermiquement.

Les méthodes de détection des fissures sont: l'examen visuel, magnétique ou ressuage pour les fissures débouchant en surface; et l'examen par ultrasons ou radiographie pour fissures internes. Donc pour éviter les fissures il faut Choisir un métal d'apport approprié et effectuer un préchauffage approprié ainsi qu'une bonne préparation des joints.

### **12.3. Morsures et les Caniveaux**

**a-** Une morsure défaut est un creusage ou insuffisance du métal de base sur une partie du cordon.

**b-** Un caniveau est une morsure de grande taille due à une chaleur élevée du métal d'apport.

### **12.4 Défaut de manque de fusion**

Les manques de fusion ou collages sont des manques ou absence de contact entre le métal fondu et le métal de base, ces manques conduisent à des mauvaises continuités métallurgiques entre les métaux à assembler ce qui diminue la section efficace de la soudure.

### **12.5. Défauts de pénétration**

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration.

**a-** L'excès de pénétration est un surplus du métal d'apport à la racine ou à la surface du cordon,

**b-** Le manque de pénétration signifie insuffisance du métal d'apport au-dessus ou au-dessous de cordon

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et le contrôle radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).



## **12.6. Défauts de géométries des cordons**

Ce sont des défauts où les déformations du cordon sont liées à la mauvaise préparation des pièces à unir, ils peuvent être : des défauts d'alignement ou des défauts angulaires.

**12.6.1. Défaut d'alignement :** Il est remarqué en une soudure bout à bout quand les pièces à unir sont mal bridées le pointage est insuffisant.

**12.6.2. Défauts angulaires :** Les défauts angulaires sont des déformations (le pliage ou le cintrage) générés grâce à la dilatation des pièces sous le grand effet calorifique au cours de l'opération du soudage.

## **12.7. Défauts des projections**

Les projections sont des particules métalliques en fusion projetées pendant le soudage qui adhèrent au métal de base ou au cordon solidifié. Ils sont causés par un courant fort, un arc long.