

Procédés de soudage



mercredi 19 mai 2021

U4 ETUDE DE PREINDUSTRIALISATION / COMPETENCES :

- C01. Proposer et argumenter des modifications de la pièce liées aux difficultés techniques et aux surcoûts de production.
- C03. Pour chacun des procédés visés, proposer un processus prévisionnel et des principes d'outillages associés.
- C04. Valider le choix du couple matériau - procédé d'élaboration au regard de la géométrie et des spécifications de la pièce à produire.
- C05. Spécifier les moyens de production nécessaires (machines-outils, outils, outillages...).
- C06. Établir les documents destinés aux partenaires co-traitants et sous-traitants.

. BO ou Référentiel : **BTS IPM 2005**

SAVOIRS / Niveau 2 : Expression

S7.3 Procédés d'assemblage

- Principe physique associé au procédé.
- Principe des outillages.
- Limites et performances (matériaux, formes et précisions réalisables).
- Incidences sur le matériau et sur les procédés de transformation et de traitement ultérieurs éventuels.
- Notion sur les coûts.

Des procédés suivants : vissage, boulonnage, rivetage, goupillage, clavetage, collage, frettage, sertissage, clinchage, soudage, brasage, surmoulage.

- **Décrire les différents procédés de soudage**

Objectif Opérationnel

Document Professeur

Procédés de soudage



mercredi 19 mai 2021

- . **SITUATION** : Classe de Deuxième Année de BTS IPM
- . **PREREQUIS** : - /
- . **DONNEES DU PROBLEME, CONDITIONS DE REALISATION** :
 - **DUREE** : 2 Heures
- . **TRAVAIL DEMANDE** :
 - Décrire le principe du soudage
 - Enumérer les procédés de soudage

PLAN ET DEROULEMENT DE L'ACTIVITE :

- . **METHODE** :
 - **ACTIVITE (de Groupe, d'Equipe, Individuelle)** : - Cours
- . **MOYENS DIDACTIQUES** :
 - **DOCUMENTS** : - Poly Cours
 - **AUDIO-VISUELS** : - Vidéos / Diaporamas et Animations
 - **AUTRES** : - /
 - **BIBLIOGRAPHIE** : - /
 - **LIENS** : http://www.otua.org/publication_dossier-soudage-assemblage.htm
<http://www.cofrend.com/>
<http://www.soudeur.com/>
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage>

EVALUATION DE L'ACTIVITE :

- . *Evaluation Formative*
- . *Evaluation Sommative*



Procédés de soudage

Page 1/10

1 PRINCIPE DU SOUDAGE

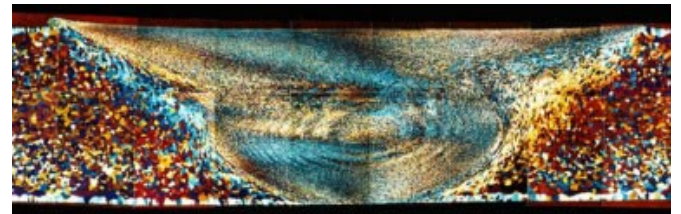
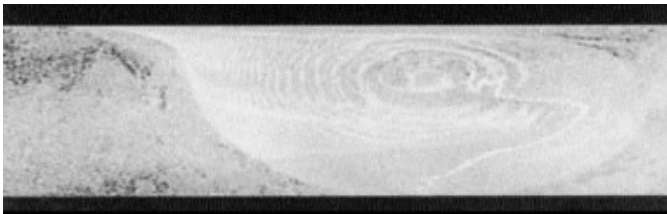
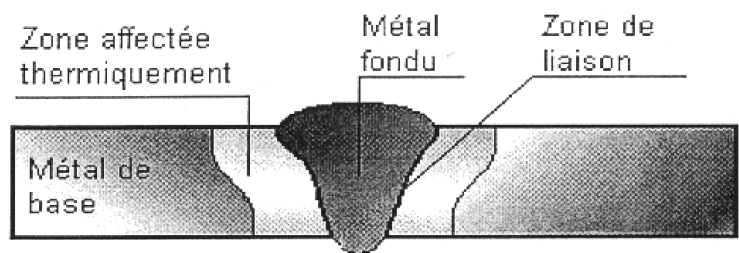
Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces ; il est dit **homogène** quand ces deux pièces, ainsi que le métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et **hétérogène** dans les autres cas.

Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Il s'applique aussi, dans une moindre mesure et depuis plus récemment, aux matériaux thermoplastiques.

Le soudage nécessite un apport de chaleur. Toutes les sources d'énergie peuvent être utilisées : chimique (flammes), lumineuse (laser), électrique ou mécanique.



Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :



La zone fondue : (nommée **ZF**) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

La zone affectée thermiquement : (nommée **ZAT**) zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

La zone de liaison : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.



Le métal de base : au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier dû fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Le faible temps de maintien de la température maximale.
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique du matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile. Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- Le couple métal d'apport – gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.

1.1 Les domaines d'application du soudage

Le soudage s'applique à tous les matériaux métalliques et peut être utilisé pour les plastiques. Ses principaux domaines d'application dans le domaine de l'acier : la mécanique au sens large et la construction, pour lesquels il constitue de loin le moyen d'assemblage n°1.

En construction métallique, lors de la préfabrication des éléments en atelier, on assemble systématiquement par soudage. Sur les chantiers, on a plutôt recours au boulonnage des éléments préfabriqués.



1.2 Les autres modes d'assemblage de l'acier

Les assemblages mécaniques (boulonnage, vissage, rivetage, sertissage, clinchage...) n'assurent pas une continuité idéale du métal. De plus ces techniques ne permettent pas d'assembler toutes les gammes d'épaisseur des métaux, allant de quelques microns à quelques centaines de millimètres pour l'acier.

Par exemple, le sertissage convient pour des sollicitations relativement peu élevées et des faibles épaisseurs (il est utilisé dans l'emballage, par exemple).

Les assemblages par collage conviennent seulement aux produits minces, faiblement sollicités, et ont une durabilité réduite.

1.3 Avantages du soudage, par rapport aux autres techniques d'assemblage

- Le soudage assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...).
- Il répond à des sollicitations élevées
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques ...)
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée.

1.4 Histoire du soudage en quelques étapes clés

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'âge de bronze on soudait à la poche
- à l'âge de fer on soudait à la forge

Jusqu'au milieu du 19ème siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850 on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Fin 19ème : mise en œuvre de nouveaux procédés :

- Le soudage oxyacétylénique
- Le soudage aluminothermique
- Le soudage à l'arc électrique
- Le soudage par résistance

Ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920.

Début du 20ème siècle : le soudage se répand dans tous les secteurs industriels.

Conséquence : une modification importante dans la conception et la réalisation des objets.

Exemple : l'utilisation pour les ponts de PRS (Poutres reconstituées soudées) de grandes dimensions et fortes épaisseurs. Le soudage devient indissociable du développement de nombreux secteurs économiques.

Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit : construction navale, automobile, aéronautique. Un nouveau métier est apparu : celui de soudeur. Il devient nécessaire de former les ouvriers et d'organiser des cours. Le CAP de soudeur est créé en 1931.



Procédés de soudage

Page 4/10

Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique.

- industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultrasons
- découvertes involontaires : le soudage par explosion et par diffusion
- introduction croissante de la microélectronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.

Depuis ces dix dernières années, les innovations portent moins sur les procédés mêmes, que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport. Ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité.

A l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100kW/cm².

1.5 L'acier, champion du soudage

L'acier est le métal le plus facile à souder – car on peut utiliser avec lui toute la gamme des procédés de soudage. Dans l'ère industrielle, c'est l'acier qui a le plus bénéficié du soudage. L'aluminium et le titane ont commencé à se souder plus tard et conviennent moins bien à ce procédé.

L'aluminium, par exemple, est moins facilement soudable, car il faut enlever la couche d'alumine réfractaire qui se forme naturellement à sa surface et prendre les précautions nécessaires pour éviter sa reformation durant le soudage.

Même chose pour le titane, qui est très fortement oxydable. Certains alliages sont d'ailleurs intrinsèquement non soudables.

1.6 Aptitude au soudage / soudabilité des matériaux

Soudable ou pas soudable ? : c'est une affaire de caractéristiques métallurgiques locales, mais aussi une question de procédés plus ou moins adaptés.

Le résultat du soudage dépend à la fois des caractéristiques de l'acier (composition chimique, état de livraison, épaisseur), du type de métal d'apport choisi et des réglages adoptés pour le procédé. On parle de « réponse au soudage » d'un matériau.

Exemple : si un acier « Carbone/Manganèse » de construction a une forte teneur en carbone, il est nécessaire de le préchauffer pour éviter sa fissuration, voire de mettre en œuvre des énergies de soudage plus élevées, ce qui peut nuire aux caractéristiques de résilience de l'acier, si l'on dépasse une certaine énergie.

La recommandation R581 / 1967 de l'ISO définit ainsi la soudabilité :

« On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement ».

Divers degrés de soudabilité selon les aciers

Jusqu'il y a 20 à 30 ans, les sidérurgistes mettaient au point les aciers et les soudeurs les soudaient. Depuis, à l'initiative du Japon, les choses ont évolué.



Procédés de soudage

Page 5/10

Les aciéristes se préoccupent, dès la phase d'élaboration de l'acier, de la dimension soudage, autrement dit de la soudabilité des aciers. Ceci dans un souci d'optimisation de la mise en œuvre ultérieure des aciers.

Toutes les nuances n'ont pas la même aptitude au soudage et affichent des degrés de soudabilité variables.

- La soudabilité d'un acier au carbone dépendra de sa composition chimique, notamment de son carbone équivalent.
- Quand on soude de l'inox, il faut protéger la zone en cours de soudage de l'oxygène ambiant. On soude sous argon (exemple : procédé **TIG**), pour éviter la formation d'oxydes de chrome, qui entraînera localement une baisse de la concentration en chrome et diminuera localement sa résistance à la corrosion.
- On peut souder directement des aciers revêtus, mais le résultat n'est pas optimal. La qualité du joint obtenu n'est jamais excellente, mais peut être suffisante, pour une application donnée. Les propriétés du métal peuvent être altérées par l'opération de soudage. On peut également privilégier certains types de revêtement « plus soudables », ou prendre des précautions particulières pour minimiser l'impact négatif du revêtement sur le résultat de l'opération de soudage. Exemple : dans l'automobile, on soude par points sur de l'acier galvanisé, ce qui nécessite le choix de paramètres adaptés.

2 PROCÉDES DE SOUDAGE

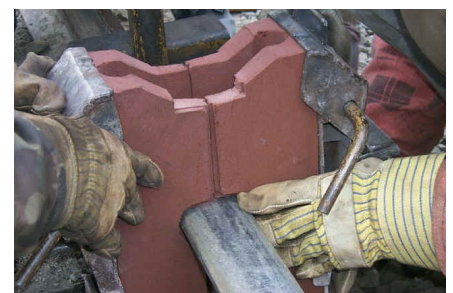
2.1 Soudage oxyacétylénique ou soudage oxy-gaz

L'énergie thermique est générée par la combustion du mélange oxygène-acétylène. Le métal d'apport est en général amené sous forme de baguette.



2.2 Soudage aluminothermique

Il est utilisé pour la réparation de pièces massives telles que les rails de chemin de fer; C'est une méthode de soudage chimique : le joint à réaliser est emprisonné dans une forme, que l'on remplit d'un mélange pulvérulent à base d'aluminium et d'oxyde de fer. Les pièces à souder sont chauffées au rouge et le mélange est ensuite enflammé : la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium provoque la fusion et l'alumine produite est expulsée vers le haut par décantation.



2.3 Soudage électrique par résistance (ou par points, ou à la molette, ou PSE, ou PSR)

Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage. Pour souder, une pince plaque l'assemblage avec des embouts, ou des électrodes en cuivre, matière bonne conductrice de l'électricité et de la chaleur, ce qui permet de moins chauffer la zone de contact avec cette pince et d'en éviter la fusion, qui se trouve limitée à la zone de contact entre les deux feuilles à souder .

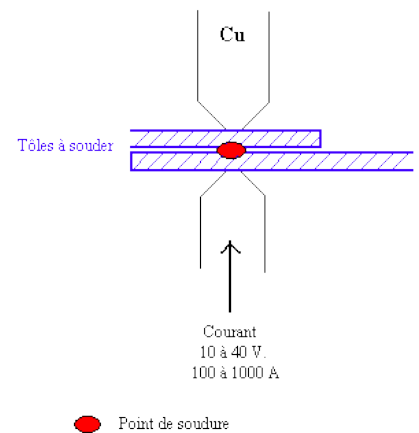


Procédés de soudage

Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (<6mm).

Cette technique bénéficie d'un savoir-faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, une caisse automobile est assemblée à plus de 80% par des points soudés.

Schéma du soudage par points



2.4 Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées (MMA : *Manual Metal Arc*, ou SMAW : *Shielded Metal Arc Welding*)

La température de soudage est générée par l'arc électrique entre deux électrodes que constituent la pièce à souder et la baguette de métal d'apport où le métal fondu est protégé par un laitier.

Le soudage à l'arc électrique est le plus connu des procédés de soudure.

Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort pouvoir calorifique provoquant la fusion de l'électrode.

L'électrode enrobée est constituée d'une âme métallique et d'un enrobage. L'âme métallique est le métal d'apport déposé pour assembler les pièces. L'enrobage peut être de différents types (rutile, le plus utilisé, acide, basique, cellulosique, oxydant, à haut rendement) et à différents rôles :

Electrique : meilleure ionisation qui améliore la stabilité de l'arc

Métallurgique : atmosphère gazeuse, le cratère protège le bain de fusion, le laitier protège de l'oxydation, de l'effet de trempe, évacue les gaz prisonniers, sert d'isolant thermique. L'enrobage peut apporter des éléments d'additions modifiant les propriétés mécanique (chrome, nickel manganèse...).

Mécanique : le cratère évite le collage ; le laitier maintient le métal en fusion.

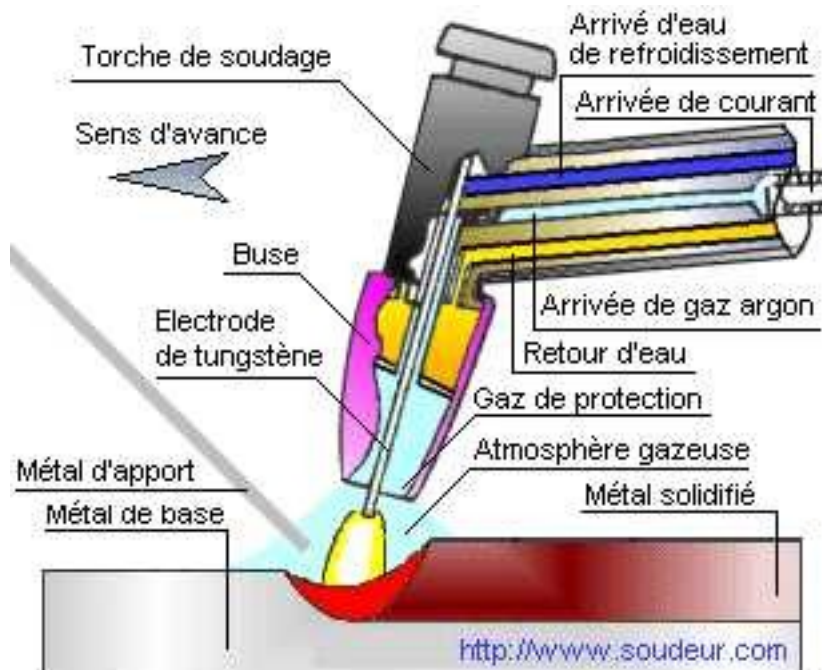
2.5 Soudage à l'arc avec électrodes non fusibles (Soudage TIG : *Tungsten Inert Gas*, GTAW *Gas Tungsten Arc Welding*)

Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode infusible en tungstène et la pièce à souder, sous la protection d'un gaz inerte (argon, hélium ou mélange argon-hélium...). Le métal d'apport est ajouté si nécessaire sous forme d'une baguette ou d'un feuillard placée dans l'arc électrique. Ce procédé peut s'automatiser voire se robotiser dans le cas fréquent du soudage TIG orbital.



Procédés de soudage

Page 7/10



2.5.1 LES PRINCIPALES ÉLECTRODES RÉFRACTAIRES

Dans le procédé de soudage à l'arc au tungstène, l'électrode n'est pas fusionnée comme dans le procédé à l'arc manuel. C'est pourquoi elle doit posséder un point de fusion élevé afin de conduire le courant et de maintenir l'arc sans qu'elle ne se fusionne elle-même. Le tungstène est le seul métal utilisé à cause de son point de fusion atteignant 3370°C.

Il existe trois principaux types d'électrodes de tungstène:

- Le tungstène pur (minimum 99,7%)
- Le tungstène thorié 1% et 2% (thorium)
- le tungstène au zirconium (zircon)

2.5.2 LES GAZ DE PROTECTION

L'argon et l'hélium sont les gaz inertes les plus couramment employés dans le procédé TIG. Cependant, on recommande particulièrement l'argon car il convient à une grande variété de métaux et le débit nécessaire est très inférieur à celui de l'hélium pour un travail donné.

On a besoin entre deux et trois volumes d'hélium comparativement à un seul volume d'argon pour obtenir la même protection.

L'argon est un gaz inerte qui ne s'allume pas, ne nourrit pas la combustion et ne réagit chimiquement à aucun autre élément. Il est sans couleur, sans odeur et est présent à 0.93% dans l'atmosphère.

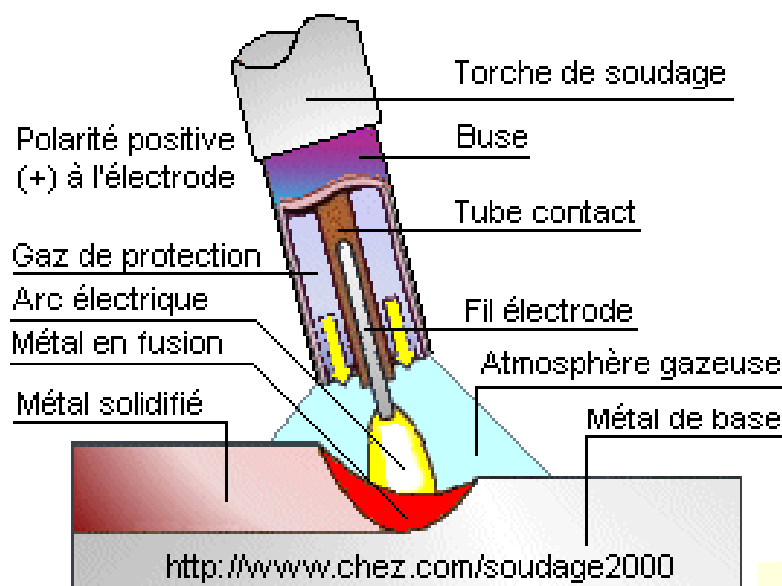


2.5.3 APPLICATIONS

Le procédé de soudage à l'arc au tungstène est surtout utilisé pour le soudage des tôles minces mais plus particulièrement pour tous les métaux difficiles à souder. Parmi ces métaux, mentionnons l'aluminium, le magnésium, l'acier inoxydable, le cuivre et ses alliages, et les aciers au carbone de différentes épaisseurs. On emploie le procédé dans la construction aéronautique, pour les ustensiles de cuisine, les blocs-moteurs, les réservoirs, les citernes les carrosseries, les cabines de camions, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques pour les échangeurs de chaleur, les pièces décoratives et bien d'autres encore.

2.6 Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage semi-automatique (soudage MIG-MAG : Metal Inert Gas-Metal Active Gas, GMAW Gas Metal Arc Welding)

Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode consommable et la pièce à assembler, sous la protection d'un mélange gazeux dont la nature dépend du type de soudure réalisée. L'électrode, amenée automatiquement de façon continue depuis un dévidoir, se présente sous la forme d'un fil massif ou fourré.



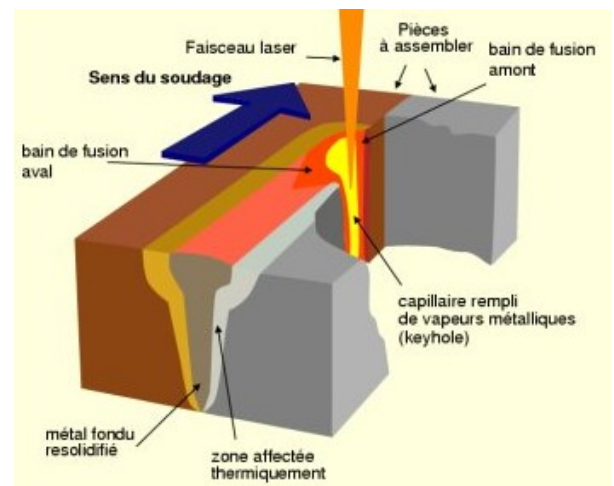
Le gaz inerte isole de l'air le métal en fusion et évite ainsi toute oxydation. Il se compose :

- Pour les alliages d'aluminium : d'argon (**Nertal**).
- Pour les aciers : d'un mélange d'argon et de CO² (**Atal 5**).

Argon et CO² permettent d'obtenir une grande stabilité de l'arc et le CO² apporte du carbone au métal pour remplacer celui qui est brûlé lors du soudage.

2.7 Soudage laser

L'énergie est apportée sous forme d'un faisceau laser. Les sources laser peuvent être de type CO₂ ou YAG ou LED.





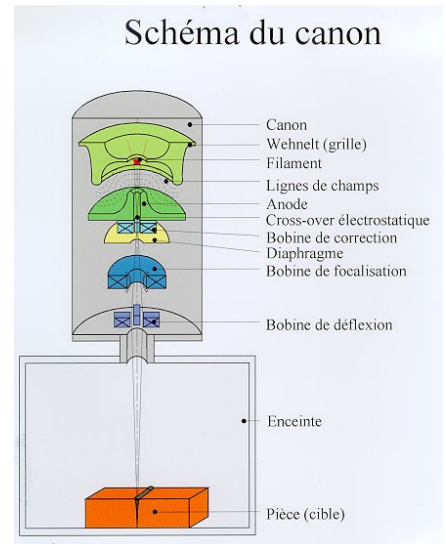
Procédés de soudage

2.8 Soudage plasma (PAW : *Plasma Arc Welding*)

Considéré comme une évolution de la soudure TIG, il s'en distingue par le fait que l'arc est contraint mécaniquement (constriction mécanique) ou pneumatiquement (constriction pneumatique), générant ainsi une densité d'énergie supérieure.

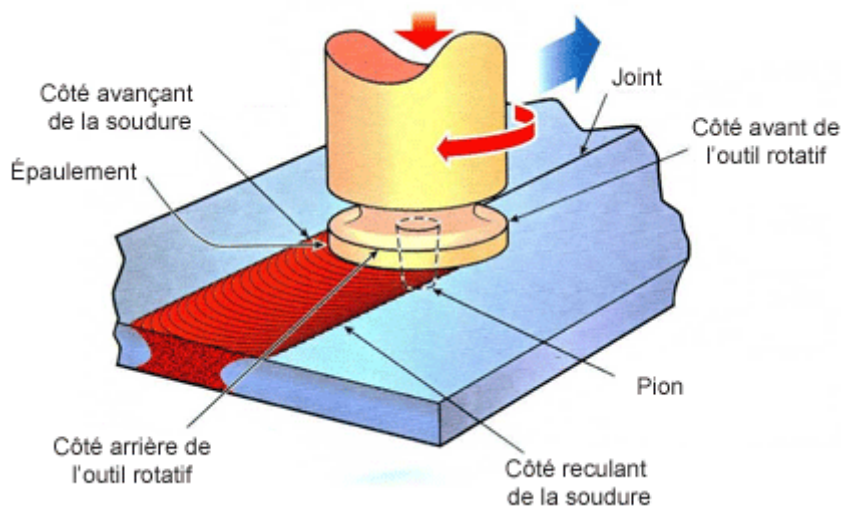
2.9 Soudage par faisceau d'électrons (EBW : *Electron Beam Welding*)

Utilise l'énergie cinétique des électrons projetés dans une enceinte sous vide et focalisés sur la pièce à souder pour créer une zone fondue.



2.10 Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique (FSW, *Friction Stir Welding*)

Ce type de soudage est aujourd'hui essentiellement utilisé pour les alliages d'aluminium car il demande des efforts très importants pour être mis en œuvre. De même les outils utilisés pour le soudage de nuances autres que l'aluminium (aciers) doivent être très durs et très résistants.



Dans le procédé illustré ci-dessus, une tige cylindrique (pion) tournant à grande vitesse est insérée à l'interface des deux pièces à souder. La friction de l'outil sur les pièces provoque un « amollissement » de la matière qui entre dans une phase pâteuse. Les bordures des pièces à souder se déforment plastiquement et sont mélangées; d'où le nom de friction-malaxage. L'épaulement qui s'appuie avec une force importante sur les bords des plaques empêche le métal brassé d'être expulsé et produit un effet de forgeage, à l'arrière sur le matériel qui vient d'être déformé et brassé.



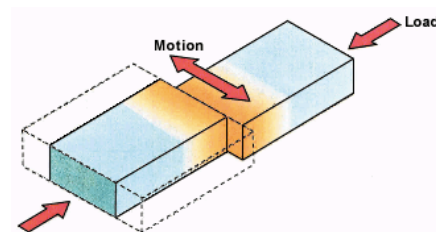
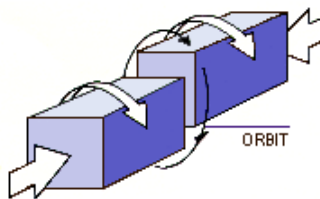
Procédés de soudage

2.11 Soudage par friction

Ce type de soudage est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique.

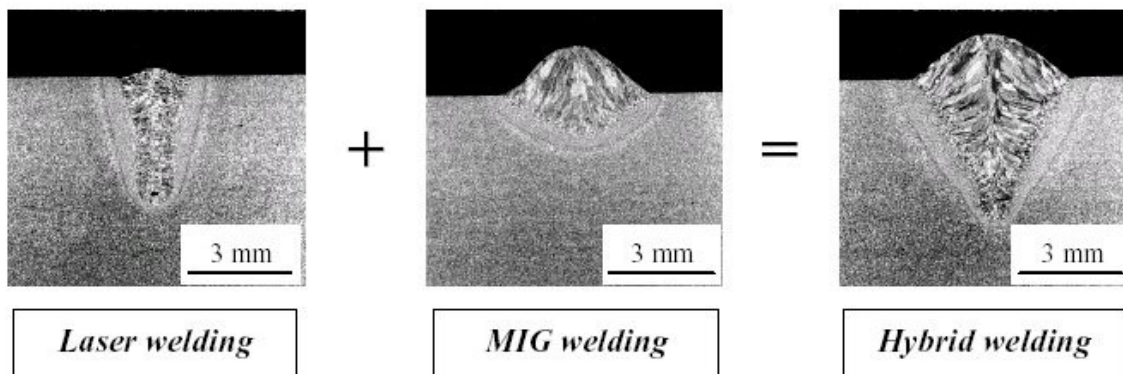
On distingue deux familles de soudage par friction :

- le soudage linéaire (LFW, Linear Friction Welding), obtenu par un mouvement d'aller/retour linéaire.
- le soudage orbital, obtenu par rotation relative des deux pièces.



2.12 Soudage par composition de procédés Dit hybride

Exemple : Laser plus MIG.



2.13 Autres procédés

Soudage à l'arc sous flux

Soudage électro-gaz Se rapproche de la fonderie.

Soudage par diffusion Consiste à se servir du phénomène de diffusion des atomes pour créer une liaison.

Soudage par explosion

2.14 Cas particulier : Le brasage à l'étain

Le brasage à l'étain s'effectue à basse température (200 °C - 250 °C), un alliage d'étain et de plomb est fondu et utilisé pour joindre des surfaces métalliques, en particulier dans le domaine de l'électronique et de la plomberie. Il s'agit **de brasure et non de soudure**, car seul le métal d'apport est fusionné.