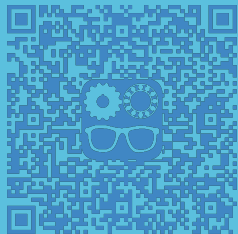




# Mécano-soudage



Renaud Costadoat  
Lycée Dorian



**DORIAN**



## Introduction

### Savoir

Vous êtes capables :

- donner certaines caractéristiques d'un matériau.

### Problématique

Vous devez être capables de choisir un procédé de fabrication en fonction:

- de la géométrie d'une pièce,
- de son matériau,
- de la production associée à la pièce.

## Propriétés et définitions

### Definition

Le soudage regroupe les procédés de jonction tendant à réaliser la continuité de l'état de matière, sous l'effet de la température ou de la pression.

### Remarque

- **Utilisation:** En raison de son faible coût, la soudure est l'un des moyens le plus utilisé dans l'assemblage de barres, de tubes, de profilés, de cornières, de plats, de tôles épaisses ou fines.
- **Matériaux:** Les aciers habituellement utilisés en construction sont facilement soudable.

## Généralités

Procédé d'assemblage permanent par fusion localisée du matériau.

- **Le métal de base** : Le métal de base constitue les pièces à assembler, de même nature ou de nature différente,
- **Le métal d'apport** : Le métal d'apport sert à unir les deux pièces à souder. Il intervient partiellement (en plus de la fusion du métal de base) des deux pièces à unir ou totalement (quand les deux métaux de base sont différents) dans l'élaboration du joint soudé.
  - ▶ La soudure est Autogène quand le métal qui compose le joint est de même composition chimique que les pièces à souder,
  - ▶ La soudure est Hétérogène quand le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder
- **Le métal du joint** : Le métal du joint comprend le métal déposé et les bords fondus dilués. Au-delà du joint, une zone plus ou moins étendue (dite ZAT), zone thermiquement affectée, peut subir des modifications de structure

## Procédés de soudage

### Électrique

- Arc,
  - ▶ soudage manuel avec électrodes enrobées,
  - ▶ soudage sous protection gazeuse:
    - ▶ Avec électrode réfractaire TIG,
    - ▶ Avec électrode fusible MIG et MAG.
  - ▶ soudage sous flux solide,
  - ▶ soudage par plasma d'arc.
- Résistance.
  - ▶ soudage par points,
  - ▶ soudage à la molette,
  - ▶ soudage par bossages,
  - ▶ soudage en bout par étincelage,
  - ▶ soudage par induction.

### Thermochimique,

- soudage aluminothermique,
- soudage oxyacétylénique.

### Mécanique

- soudage par friction, friction modelage,
- soudage par explosion,
- soudage par ultrasons,
- soudage par diffusion.

### Focalisé

- soudage par bombardement électronique,
- soudage par laser.

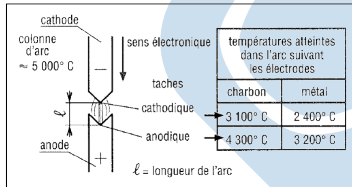
## Procédés de soudage électrique à l'arc

**Procédé de soudage autogène par fusion.** La chaleur est produite par l'arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes.

La réalisation de l'arc est conditionnée par :

- la tension aux bornes de l'arc,
- l'intensité du courant qui le parcourt,
- la distance séparant les extrémités des électrodes.

L'électrode apporte le métal d'apport.



## Procédés de soudage électrique à l'arc

- Avantage : la fusion, très localisée, amène moins de déformation que le chalumeau et une plus grande productivité. Il est très utilisé dans l'industrie.
- Inconvénient majeur : le refroidissement rapide, génère de contraintes internes et des déformations parfois difficiles à corriger.

La création d'une atmosphère autour du bain de fusion :

- Un gaz protège la zone du bain de fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air,
- L'enrobage en fondant crée une atmosphère protégeant le bain de fusion contre l'oxygène et l'azote de l'air. Il forme également un laitier enrobant chaque goutte de métal fondu transféré de l'extrémité de l'âme jusqu'au bain de fusion.

## Les techniques de soudage électrique à l'arc

### Soudage à l'électrode enrobée

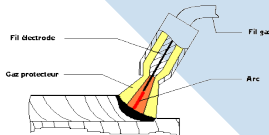
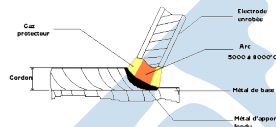
L'électrode, dirigée manuellement est fusible et fournit le métal d'apport. L'enrobage assure un rôle protecteur et son épaisseur permet de jouer sur la forme du cordon, concave ou convexe.

### Soudage MIG (Metal Inert Gas)

L'électrode fusible travaille en atmosphère inerte ( gaz protecteur : argon, argon + hélium) afin de protéger le bain de fusion. 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.

### Soudage MAG (Metal Active Gas)

Cette variante du MIG utilise un mélange de gaz actif (gaz carbonique CO2 et d'argon), elle est adaptée aux aciers de construction au carbone.

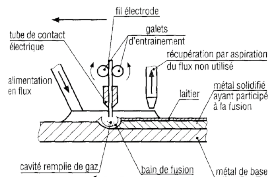




## Les techniques de soudage électrique à l'arc

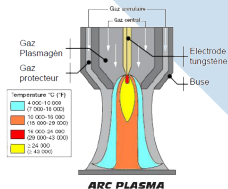
### Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

Variante des précédents, plus productive et utilisant une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé) le bain de fusion et les zones avoisinantes sont protégées contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air par une atmosphère de gaz neutre dit inerte, généralement de l'argon.



**Soudage électrique à l'arc sous flux solide** Ce procédé consiste à effectuer un joint de soudure sur de l'acier à l'aide d'un arc électrique qui est submergé de flux en poudre.

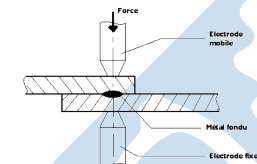
**Soudage électrique à l'arc au plasma** Le soudage au plasma est en fait un soudage T.I.G. dans lequel l'arc est étranglé (ou confiné) dans une tuyère.



## Les techniques de soudage électrique à résistance

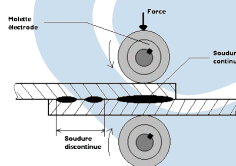
### Procédé de soudage électrique par points

La soudure est réalisée entre deux électrodes. 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.



### Procédé de soudage électrique à la molette

Les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide.



### Procédé de soudage électrique par bossages

Autre variante, ce procédé permet de souder plusieurs points en même temps. Les électrodes sont remplacées par des plateaux permettant de souder des formes et treillis, des tubes superposés et croisés.

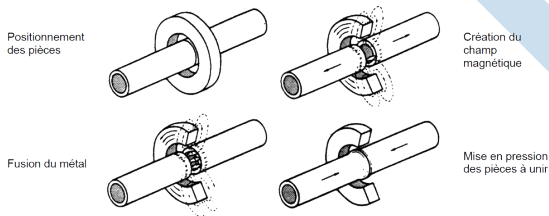
## Les techniques de soudage électrique à résistance

### Procédé de soudage électrique en bout par étincelage

Les pièces à souder sont maintenues par des mâchoires, et sont mises en contact puis chauffées par effet Joule (petites sections), soit par étincelage (fortes sections). Après coupure du courant, un refoulement "forge" la soudure.

### Soudage par impulsion magnétique

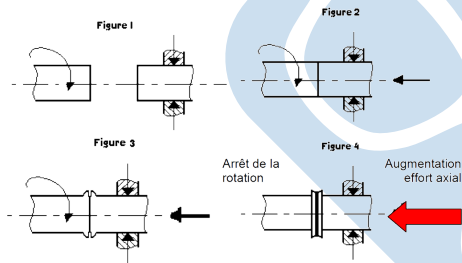
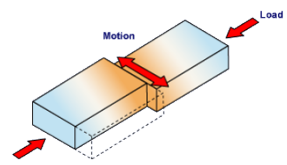
Un champ magnétique circule dans l'anneau ce qui provoque un courant induit dans les deux pièces qui montent alors en température. Au moment de la fusion du métal un important effort axial permet l'assemblage.



## Les techniques de soudage mécanique

### Procédé de soudage mécanique par friction

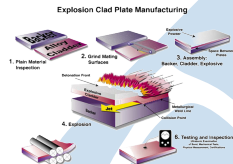
Un échauffement est créé entre deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre.



## Les techniques de soudage mécanique

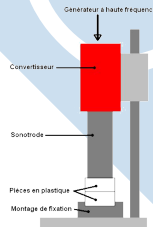
### Procédé de soudage par explosion

Essentiellement employée pour assembler des métaux de nature différente (ex: superstructures en aluminium sur un bateau à coque en acier pour abaisser le centre de gravité). Les métaux à assembler sont superposés selon un certain angle et recouverts d'une couche uniforme d'explosif, la combustion provoque la fusion.



### Procédé de soudage par ultrason

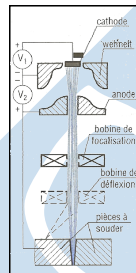
Des vibrations de haute fréquence 20, 30, 35, 40 et 70 kHz sont envoyées aux deux pièces par le biais d'un outil vibrant appelé sonotrode ou tête de soudure. Les amplitudes des vibration varient entre 10 et 120 micromètres, La soudure se fait grâce à la chaleur engendrée à l'interface des deux pièces.



## Les techniques de soudage focalisé

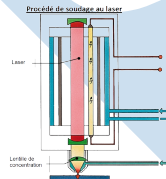
### Procédé de soudage par bombardement électronique

Réalise un soudage autogène sous vide, généralement sans métal d'apport, en utilisant un faisceau d'électrons.



### Procédé de soudage au laser

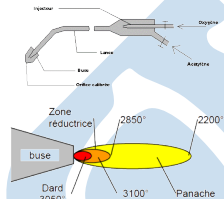
Le faisceau laser est une source de chaleur extrêmement concentrée qui permet des soudages étroits, profonds, à une cadence rapide.



## Les techniques de soudage thermochimiques

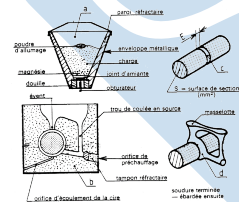
**Procédé de soudage oxyacétylénique** C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par la combustion de gaz mélange d'oxygène et d'acétylène à l'extrémité d'un chalumeau.

L'épaisseur des pièces à souder est inférieure à 8 mm pour les métaux lourds, et de 15 mm pour les métaux légers.



### Procédé de soudage aluminothermique

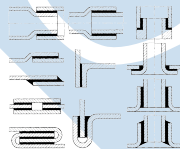
De la poudre d'allumage est placée sur une charge (appelée « thermit ») dans un creuset métallique. La réaction du mélange composé d'aluminium granulé (0,5 à 2 mm) et d'oxyde de fer pulvérulent provoque une brusque élévation de température qui fond le métal. Cela permet le soudage sur place de grosses pièces en acier (rails de chemin de fer)



## Autre procédés d'assemblage non démontable

### Le brasage

- La brasure est un assemblage toujours hétérogène. Les pièces à assembler (métal de base) sont chauffées en présence d'un métal ou alliage différent (métal d'apport),
- La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle du métal de base,
- La formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une « colle ».

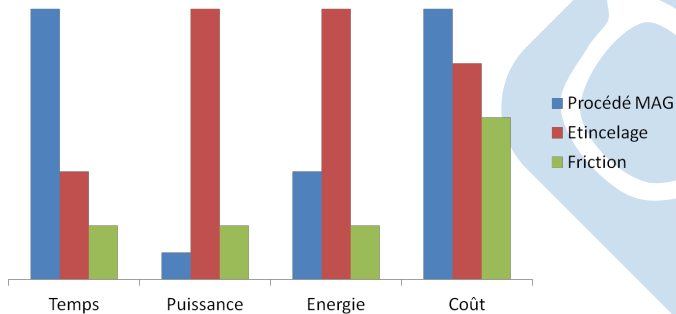


### Le soudobrasage

Le soudobrasage est différent du brasage car les pièces à assembler ne sont en général pas chauffées.



## Comparaison économique des procédés



## Avantages de la soudure

### Procédés concurrents

- Les assemblages mécaniques (boulonnage, vissage, rivetage, sertissage, clinchage,...) n'assurent pas une continuité du métal, et ne conviennent pas à toutes les gammes d'épaisseur des métaux,
- Les assemblages par collage seulement pour les produits minces, faiblement sollicités, et ont une durabilité réduite.

### Avantages du soudage

- Continuité de la pièce qui confère ainsi à l'assemblage des caractéristiques équivalentes à celles du matériau de base (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité,...),
- Il peut donc, selon le procédé, assurer l'étanchéité de la pièce soudée. Rapide et économique il est aussi durable, car insensible aux variations de température et aux conditions climatiques

## Défauts de la soudure

- **Fragilité produite par la ségrégation:** Le chauffage local du métal produit un traitement thermique local. Il y a donc une modification locale de la microstructure et de l'état métallurgique de la zone du métal affectée par le chauffage (ZAT : zone affectée thermiquement),
- **Corrosion au cordon de soudure:** La juxtaposition de métaux différents peut avoir un phénomène de corrosion galvanique,
- **Porosités:** Il s'agit de défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchants,
- **Soufflures:** Ce terme désigne un groupe de porosités non débouchants,
- **Inclusions:** Elles désignent un composé étranger à la soudure,
- **Retassures:** Suite à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparaît visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon,
- **Criques de solidification:** Défauts semblables aux retassures mais non apparents.

## Défauts de la soudure

- **Excès de pénétration:** Métal débordant du côté envers du cordon,
- **Collage ou manque de pénétration:** Le métal de base n'est pas fondu, ce qui diminue la section efficace de la soudure,
- **Morsures:** Défaut où le métal de base est « creusé » sur une partie du cordon,
- **Fissures:** La fissuration à froid est causée par des contraintes mécaniques résiduelles importantes,
- **Caniveaux:** Morsure de grande taille proportionnellement à la grandeur du métal de base due à une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur,
- **Pollution ferreuse:** Corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche de passivation et activée par la présence de fer,
- **Défauts géométriques:** Peuvent être des défauts d'alignement entre les pièces, un cordon trop bombé...

## Principaux matériaux soudables

L'aptitude au soudage est qualifiée par le degrés de soudabilité du matériau.

### Soudage des aciers

- La soudabilité d'un acier dépendra de son pourcentage de carbone. Un pourcentage de carbone élevé rends difficile le soudage,
  - ▶ La majorité des aciers de constructions, type S ou E, sont soudables parce que faiblement alliés et pauvres en carbones ( $\%C < 0,5$ ),
  - ▶ Les aciers inoxydables à condition que le pourcentage de carbone ( $\%C$ ) reste inférieur à 0,05%,
  - ▶ Les aciers de type C et les aciers faiblement alliés, ont un titrage en carbone qui favorise la trempe.
- La soudabilité peut être estimée par le calcul du pourcentage de carbone équivalent ( $C_{eq}$ ) exprimé en pourcentage de masse.
$$C_{eq} = \%C + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + \%Mn/6 + (\%Ni + \%Cu)/15$$
  - ▶ Si  $C_{eq} < 0,4$  : l'acier est parfaitement soudable à température ambiante,
  - ▶ Si  $0,45 < C_{eq} < 0,7$  : l'acier est moyennement soudable, préchauffage de 100 à 400 °C,
  - ▶ Si  $C_{eq} > 0,7$  : l'acier est difficilement soudable, préchauffage, électrodes spéciales, traitements thermiques..

## Principaux matériaux soudables

### Les fontes

Leur soudage est en général très difficile (électrodes spéciales, préchauffage, ?) et donc utilisé en réparation ou en rechargement de pièces accidentées ou usées.

### Les alliages d'aluminium

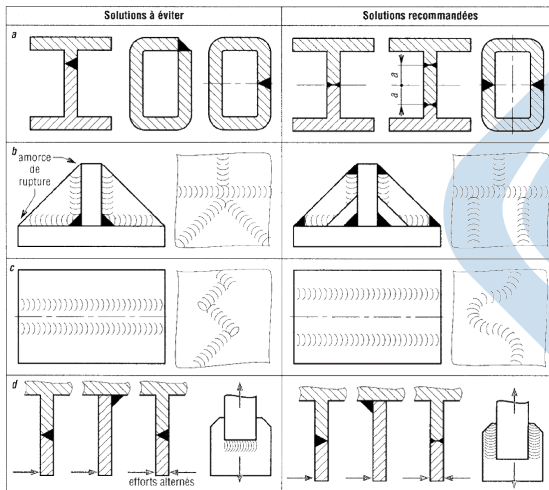
Les alliages sans durcissement structural (aluminium pur, Al + Mg, Al + Mn, Al + Si) ont une bonne soudabilité (TIG ou MIG).

Les alliages à durcissement structural (Al + Mg + Si, Al + Cu, Al + Zn + Mg) sont un peu plus difficiles à souder (MIG) et nécessitent plus de précautions.

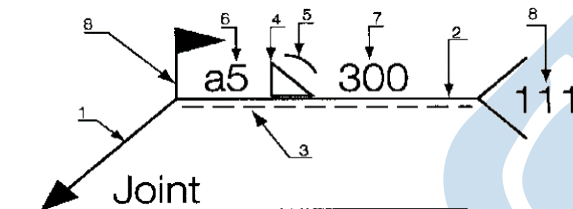
### Les matières plastiques

L'assemblage des polymères se fait par des moyens spécifiques tels que les lasers à diodes ou les ultrasons.

## Les formes de joints



## La représentation des joints

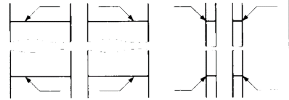



Numéro	Désignation
1	Ligne de repère
2	Ligne de référence
3	Ligne d'identification
4	Symbole de soudure
5	Symbole supplémentaire
6	Cotes principales relatives à la section transversale du cordon de soudure
7	Cotes relatives aux dimensions longitudinales du cordon de soudure
8	Indications complémentaires



## La représentation des joints

### La ligne de repère (1)

<b>Représentation :</b> Inclinée et terminée par une fleche qui touche la ligne de joint.		
<b>Position</b>		
		Cas général : position quelconque
<b>Soudures</b> V Y U 		Cas de soudure en : - demi V - demi Y - demi U position dirigée vers la tôle qui est préparée.

### La ligne de référence et d'identification (2) et (3)

Représentation: Elles doivent être tracées de préférence parallèles au bord inférieur du dessin. La ligne d'identification (trait interrompu) peut être tracée au dessus ou au dessous de la ligne de référence (trait continu).







# La représentation des joints

## Le symbole de soudure (4)





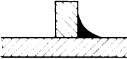





Designation	Représentation simplifiée	Symbole	Designation	Représentation simplifiée	Symbole
Soudure sur joints relevés complètement fondus			Soudure par points		
Soudure sur bords droits			Soudure en ligne continue avec recouvrement		
Soudure en V			Soudure en V à flancs droits		
Soudure en demi V			Soudure en demi V à flancs droits		
Soudure en Y			Soudure sur chant		
Soudure en demi Y			Soudure par rechargement		
Soudure en U (ou en U peu)			Assemblage de surface		
Soudure en demi U			Assemblage oblique		
Haïse à l'entour			Assemblage raboté		
Soudure d'angle					
Soudure en entailles en bouchon					

## La représentation des joints

### Le symbole supplémentaire (5)

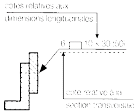
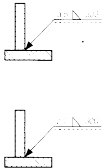


<b>But :</b> Ils peuvent compléter les symboles élémentaires pour caractériser la forme de la surface extérieure de la soudure.			
Forme de la surface de la soudure	Symbole	Forme de la surface de la soudure	Symbole
Plate		Les bords du cordon doivent être convenablement mouillés	
Convexe		Support à l'envers subsistant	
Concave		Support à l'envers enlevable	

## Exemples de symboles





Désignation	Représentation simplifiée	Symbole
Soudure en V plate		
Soudure en double V (ou en X) convexe		
Soudure d'angle concave		
Soudure en V plate avec reprise à l'envers plate		
Soudure d'angle avec bords de cordon de soudure convenablement mouillés		

## La représentation des joints

### La cotation des soudures (6) et (7)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>À gauche du symbole les cotes principales relatives à la section transversale.</b></li> <li>• <b>À droite du symbole les cotes relatives aux dimensions longitudinales.</b> L'absence d'indication après le symbole indique que la soudure est continue sur toute la longueur des éléments soudés.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Cas des soudures d'angle</b> Il existe <b>deux méthodes</b> pour définir la section du cordon :             <ul style="list-style-type: none"> <li>- avec la valeur de la gorge du cordon. Placer la <b>lettre a</b> devant la valeur de la gorge du cordon.</li> <li>- avec la valeur du côté du cordon. Placer la <b>lettre z</b> devant la valeur du côté du cordon.</li> </ul> </li> </ul> <p>Nota : <math>z = a \sqrt{2}</math></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;"> <p>gorge</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>côté</p>  </div> </div>

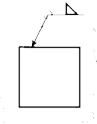
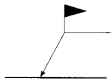
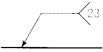
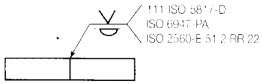
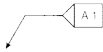
## La représentation des joints

Désignation	Représentation	Inscription	Exemple
Soudure sur bords relevés non complètement pénétrée			3
Soudure bout à bout		V	V
			3
		Y	3Y

## La représentation des joints

Désignation	Représentation	Inscription	Exemple
Soudure d'angle continue			
Soudure d'angle discontinue			
Soudure d'angle discontinue à éléments alternés			
Soudure en entailles			
Soudure en ligne			
Soudure en boucles			
Soudure par points			

## La représentation des joints

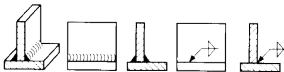
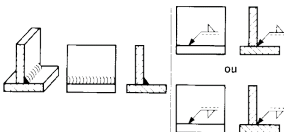
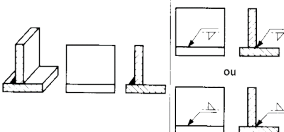

<p><b>INDICATIONS COMPLÉMENTAIRES</b></p>	 <p>Soudures périphériques</p>  <p>Soudures faites sur chantier</p>  <p>Indication du procédé de soudage</p>  <p>Renseignements sur le joint</p>  <p>Reference à une feuille séparée</p>	<p>Des indications complémentaires peuvent être nécessaires pour fournir des précisions sur la soudure.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> <b>Soudures périphériques</b>            Lorsque la soudure doit être exécutée sur tout le pourtour d'une pièce, ajouter un symbole circulaire.         </li> <li> <b>Soudures faites sur chantier</b>            Lorsque la soudure doit être exécutée sur le chantier, ajouter un drapeau.         </li> <li> <b>Indication du procédé de soudage</b>            Lorsqu'il est nécessaire d'indiquer le procédé de soudage, ajouter un nombre inscrit entre deux branches d'une fourche terminant la ligne de référence.         </li> <li> <b>Renseignements</b>            Lorsqu'il est nécessaire d'indiquer des renseignements sur le joint et ses dimensions, ajouter dans la fourche (séparés par une barre oblique) dans l'ordre suivant : procédé, niveau de réception, position de travail, métal d'apport, ou faire référence à une feuille séparée.         </li> </ul>
---	---	---



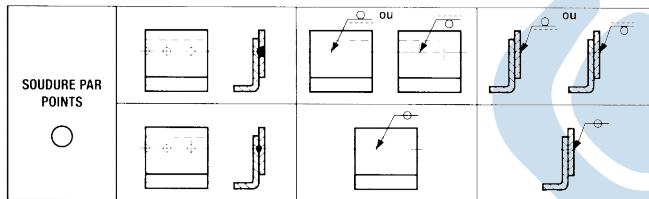
## La représentation des joints

<b>PROCÉDÉS DE SOUDAGE</b> Extrait ISO 4063	<b>1 Soudage électrique à l'arc ; soudage à l'arc</b>	<b>135 Soudage MAG : sou-</b> dage à l'arc sous pro- tection de gaz actif avec fil-électrode fusible	<b>3 Soudage aux gaz</b>
	11 Soudage à l'arc avec électrode fusible sans protection gazeuse  111 Soudage à l'arc avec électrode enrobée  12 Soudage à l'arc sous flux en poudre : soudage à l'arc sous flux  121 Soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil- électrode  13 Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil-électrode fusible  131 soudage MIG : soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil- électrode fusible	136 Soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fourré  141 Soudage TIG : soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène  15 Soudage au plasma  <b>2 Soudage par résistance</b>  21 Soudage par points (par résistance)  22 Soudage à la molette  23 Soudage par bossages	311 Soudage oxyacétylé- nique  <b>4 Soudage par pression ; soudage à l'état solide</b>  41 Soudage par ultrasons  42 Soudage par friction  <b>7 Autres procédés de soudage</b>  751 Soudage au laser  76 Soudage par faisceau d'électrons  <b>9 Brasage</b>  91 Brasage fort  94 Brasage tendre  97 Soudobrasage

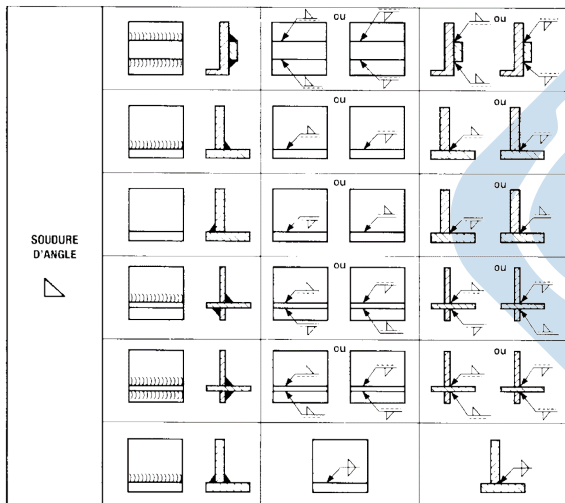
## La représentation des joints

Représentation	Position de la soudure
	<p>Pour les soudures symétriques, les symboles sont placés des deux côtés de la ligne de référence (trait continu). Dans ce cas la ligne d'identification (trait interrompu) doit être omise.</p>
	<p>Le symbole est placé du côté de la ligne de référence (trait continu) si la face extérieure de la soudure est du côté de la ligne de repère.</p>
	<p>Le symbole est placé du côté de la ligne d'identification (trait interrompu) si la face extérieure de la soudure est du côté opposé à la ligne de repère.</p>
	<p>Dans le cas des soudures faites dans le plan du joint, le symbole se trouve « à cheval » sur la ligne de référence (trait continu). Dans ce cas la ligne d'identification (trait interrompu) doit être omise.</p>

## La représentation des joints



## La représentation des joints



## Conclusion

### Savoir

Vous êtes capables :

- de concevoir une pièce mécano-soudée,
- de représenter des joints de soudure.

### Problématique

Vous devez être capables :

- de concevoir une pièce moulée.