

**Rappel**

- Qu'est-ce qu'une liaison ?
- Qu'est-ce qu'un assemblage mécanique ?
- Assemblage : Terminologie ?

**I.1 Liaison mécanique**

Dans un mécanisme, quand une pièce est en contact avec une autre, il y a entre ces deux pièces une liaison mécanique.

On dit que deux pièces sont en *liaison* si elles sont en *contact* par l'intermédiaire de surface(s) ou de point(s).

**I.2 Les liaisons simples**

Une liaison mécanique simple, est une liaison obtenue par un contact entre une surface simple unique d'une pièce avec celle, simple et aussi unique d'une autre pièce. En se limitant au cas des plans, cylindre et sphères, on obtient l'ensemble des cas suivants :

**I.2.1 Liaison ponctuelle ou Sphère/Plan**

La liaison ponctuelle décrit un contact entre deux solides qui se réduit à un point. Par obstacle, ce contact interdit le rapprochement des deux corps, et autorise la transmission d'une force dans la direction normale (perpendiculaire) au plan tangent commun aux deux surfaces en contact, voir la Figure 1.

## Les assemblages mécaniques



Cas d'une liaison ponctuelle en associant une sphère et un plan



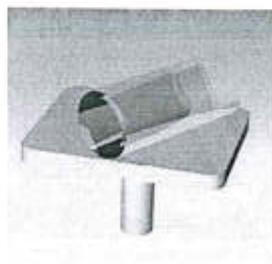
Autre cas simple d'un ponctuelle

Ponctuelle en A de normale Z				Liaisons : $T_z = 0$	Libertés : $T_x, T_y$ $R_x, R_y, R_z$
------------------------------	--	--	--	----------------------	--

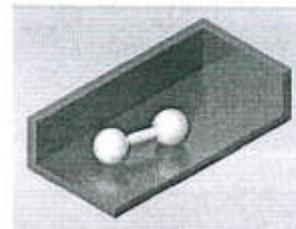
**Figure 1: Liaisons ponctuelle**

### I.2.2 Liaison linéaire rectiligne ou Cylindre/Plan

Cette liaison est obtenue lorsqu'elle présente un ensemble de points de contact alignés dont les normales sont toutes parallèles. Idéalement elle est l'association de 2 ponctuelles, voir la Figure 2. Elle présente 2 degrés de liaison : la translation perpendiculaire au plan tangent (soit suivant la direction des normales) et toute rotation d'axe perpendiculaire au plan des normales de contact.



Liaison linéaire par cylindre posé sur un plan



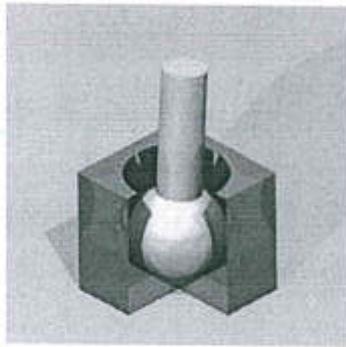
2 ponctuelles = rectiligne

Linéaire rectiligne de ligne (A,x) de normale Z				Liaisons : $T_z = Z$ $R_y = M$	Libertés : $T_x, T_y$ $R_x, R_z$
---	--	--	--	-----------------------------------	-------------------------------------

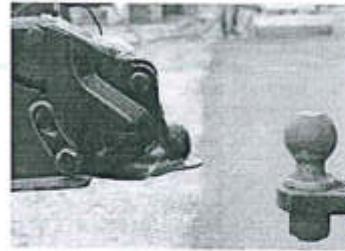
**Figure 2: Liaisons linéaire**

## 1.2.3 Liaison rotule ou Sphère/Sphère

La liaison rotule s'identifie facilement par ses degrés de libertés: elle lie complètement deux pièces en translation mais les laisse libres en rotation. Elle comporte donc 3 degrés de liaisons (les 3 translations) et 3 degrés de liberté (les 3 rotations), voir la Figure 3.



La liaison sphérique



Un attelage de caravane ou de remorque légère est modélisable par une liaison rotule

Rotule de centre A			Liaisons : $T_x = 0$ $T_y = 0$ $T_z = 0$	Libertés : $R_x, R_y, R_z$
-----------------------	--	--	--	-------------------------------

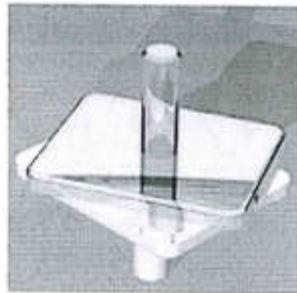
**Figure 3: Liaisons sphériques**

## 1.2.4 Liaison appui plan ou Plan/Plan

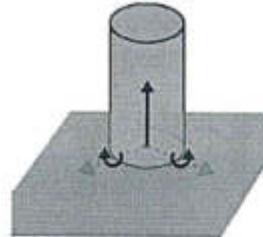
La liaison appui plan, appelée aussi liaison plane, présente 3 degrés de liaison. Ils forcent le mouvement à rester dans un plan. Les deux translations et la rotation dans ce plan sont libres. Cette liaison s'obtient naturellement en plaquant deux surfaces planes l'une sur l'autre.

## Les assemblages mécaniques

Plus généralement, il suffit que le contact entre deux solides s'effectue en au moins 3 points non alignés, comme le présente la Figure 4.



Deux faces planes en appui



Exemples d'appuis plan

Appui plan de normale Z				Liaisons : $T_z = 0$ $R_x = 0$ $R_y = 0$	Libertés : $T_x, T_y$ $R_z$
		<i>non normalisée</i>			

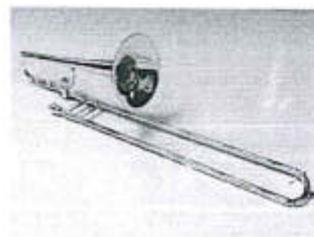
**Figure 4: Liaisons plane**

### 1.2.5 Liaison glissière

La liaison glissière assure 5 degrés de liaison en ne permettant que le mouvement de translation dans la direction de la liaison. La définition de cette liaison doit préciser cette direction, voir la Figure 5.



Deux faces planes en appui



La coulisse d'un trombone est liée au corps de l'instrument par une glissière.

Glissière de direction X				Liaisons : $T_y = 0$ $T_x = 0$ $R_x = 0$ $R_y = 0$ $R_z = 0$	Libertés : $T_x$
--------------------------	--	--	--	--	------------------------

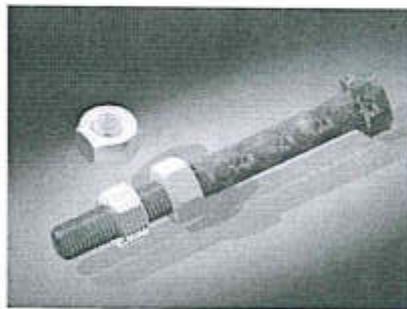
**Figure 5: Liaisons glissière**

### 1.2.6 Liaison hélicoïdale

Le coulisement d'un arbre cannelé se modélise par une liaison glissière. Si on enroule les cannelures autour de l'arbre, on se trouve en présence d'une vis dans son écrou. On parle alors de liaison hélicoïdale, comme le présente la Figure 6.

Ce qui caractérise cette liaison, c'est l'existence d'un mouvement combiné : la rotation est simultanée à la translation dans un rapport qu'on appelle le pas de vis, d'hélice ou de filet. De ce fait, il s'agit d'un seul et même degré de liberté.

La liaison dispose donc de 5 degrés de liaison, dont les 2 translations et les 2 rotations transversales. L'autre est dû au couplage de la translation et la rotation axiales par une relation hélicoïdale de type  $x = u \cdot \theta_x$ .



Une vis et plusieurs écrous

Hélicoïdale d'axe (A,X)				Liaisons : $x = u \cdot \theta_x$ $T_y = 0$ $T_z = 0$ $R_y = 0$ $R_z = 0$	Libertés : $\begin{pmatrix} u, \theta_x \\ 0 \\ 0 \\ \theta_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
----------------------------	--	--	--	---	---

**Figure.I.6: Liaisons hélicoïdale**

### 2. Assemblage mécanique des matériaux

Un assemblage mécanique est la liaison de différentes pièces d'un ensemble ou produits.

Le terme 'assemblage mécanique' est souvent utilisé pour des assemblages permanents entre deux ou plusieurs pièces via une déformation de l'une au moins des pièces, ou d'un accessoire intermédiaire. Jusqu'à présent, il n'existe aucune norme internationale reprenant la classification des différentes techniques existantes. La norme allemande DIN 8593-5 classifie les techniques d'assemblages par transformation' suivant le type de pièces à assembler. Les techniques sont alors subdivisées en procédés avec et sans moyen d'assemblage (Voir le chapitre I).

### 3. Assemblage : Terminologie

Assemblage complet ou partiel

Assemblage démontable ou non démontable (permanent)

Assemblage élastique ou rigide

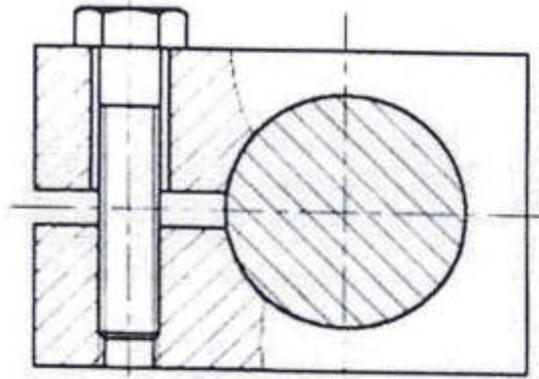
Assemblage réglable ou non réglable

Assemblage par obstacle ou par adhérence

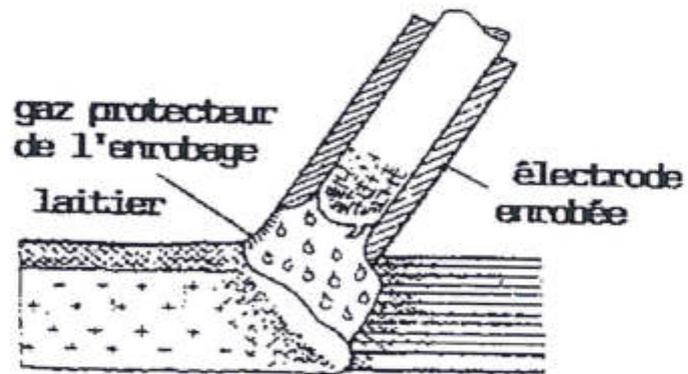
Assemblage direct ou indirect

### 4. Objectifs

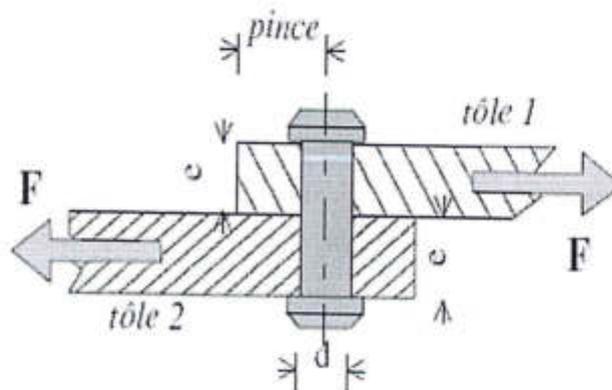
- Maitriser les techniques d'assemblage mécanique des matériaux (métaux, céramiques et verres).
- Analyser le comportement mécanique des assemblages mécanique aux différentes sollicitations de cisaillement, flexion et torsion



**Assemblage par Adhérence**



**Assemblage par soudage à l'arc électrique enrobé**



**Assemblage par Rivetage**

**Chapitre I: Assemblage des métaux****I.1 Définition**

Pour réaliser ou fabriquer un produit, il faut assembler tous les éléments qui le composent. Ces éléments peuvent être de matériaux et de formes différentes nécessitant parfois des procédés d'assemblage différents. Dans le domaine industriel, il existe plusieurs techniques d'assemblage qui permettent de fixer les éléments d'un produit les uns aux autres : par organes filetés, par collage, par soudages, par rivetage ...

**II.2 Types d'assemblage**

Chaque moyen d'assemblage peut être défini par cinq critères :

**II.2.1. Assemblage complet ou partiel****- Assemblage complet**

Aucun mouvement possible entre les pièces assemblées.

**- Assemblage partiel**

Mouvement(s) possible(s) entre les pièces assemblées.

**Exemples**

- Un piston dans un cylindre compose un assemblage partiel.
- Une culasse avec un bloc moteur composent un assemblage complet.

**II.2.2. Assemblage démontable ou non démontable (permanent)****-Assemblage démontable**

Il est possible de supprimer la liaison sans détériorer les pièces ou les éléments liés.

**- Assemblage non démontable (permanent)**

Impossible de supprimer la liaison sans provoquer la détérioration des pièces ou des éléments liés.

**Exemples :**

- Une culasse avec le bloc moteur composent un assemblage démontable.
- Les éléments du châssis d'une auto qui sont soudés composent un assemblage permanent (non démontable).

**II.2.3 Assemblage élastique ou rigide****- Assemblage élastique**

Un déplacement d'une pièce provoque la déformation d'un élément élastique (ressort, caoutchouc).

**- Assemblage rigide**

L'assemblage n'est élastique dans aucune direction de déplacement.

**Exemples :**

- Un silentbloc participe à la réalisation d'un assemblage élastique.
- Un assemblage par élément fileté (vis-écrou) est rigide.

**II.2.4 Assemblage par obstacle ou par adhérence****- Assemblage par obstacle**

Un élément fait obstacle au mouvement entre deux pièces.

**- Assemblage par adhérence**

L'assemblage est obtenu par le phénomène d'adhérence dû au frottement entre les pièces.

**Exemples :**

- Une clavette réalise un assemblage par obstacle (elle empêche la rotation entre un arbre et un moyeu)
- Lorsque deux pièces sont montées serrées, l'assemblage est par adhérence.

### II.2.5 Assemblage direct ou indirect

#### - Assemblage direct

Les pièces liées sont directement en contact. Il n'y a pas d'élément intermédiaire.

#### - Assemblage indirect

L'assemblage nécessite un ou des éléments intermédiaires.

#### Exemples :

- L'assemblage entre une poulie et un arbre à l'aide d'une clavette est un assemblage indirect.
- Un roulement à billes participe à un assemblage indirect.
- Deux pignons qui engrènent ensemble sont en contact direct.

### III. Moyens d'assemblage no démontables

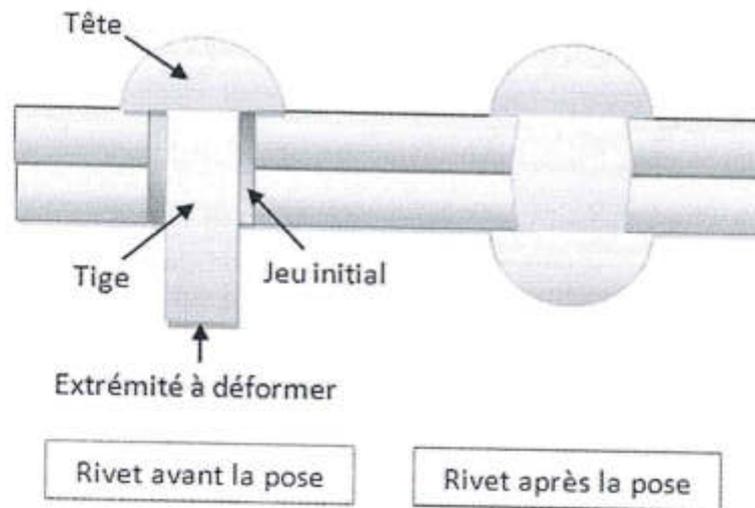
#### - Le rivetage

Le rivetage consiste à introduire une pièce de la forme d'un clou (Figure I.1) dans un alésage commun aux pièces à assembler.



**Figure I.1: Rivet plein avant la pose**

Cette pièce en question sera ensuite déformée plastiquement à l'aide de l'action d'un outil spécifique (bouterolle) sur son extrémité non déformée, et maintenue par une contre-bouterolle au niveau de sa tête jusqu'à ce que l'alésage soit totalement remplie, comme l'illustré la Figure I.2.

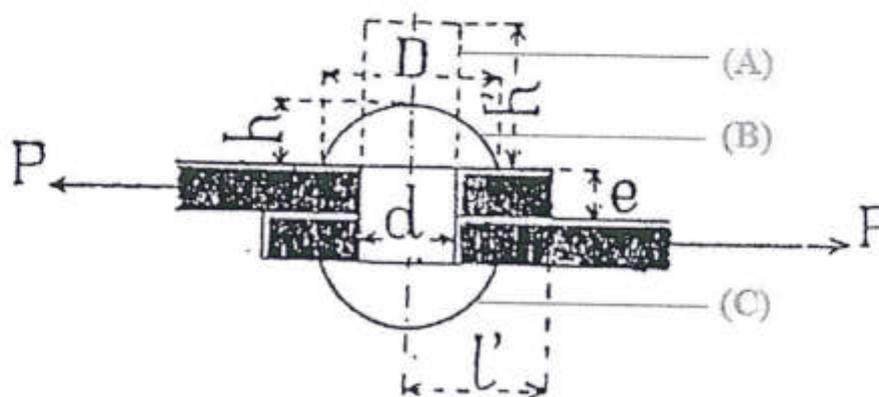


**Figure I.2: Procédé de rivetage**

Les formes utilisées les plus connues sont celles sphérique, cylindrique et conique.

#### - Types de rivets

Henri Deschamps [7, p. 126] – ingénieur belge et professeur à la Faculté Technique de l'Université de Liège – proposait la définition suivante en 1888 : « *Un rivet se compose d'un corps cylindrique et de deux têtes, ordinairement sphériques ; l'une de ces têtes est forgée avant la pose ; l'autre est façonnée quand le rivet est mis en place.* » (Figure I.3).



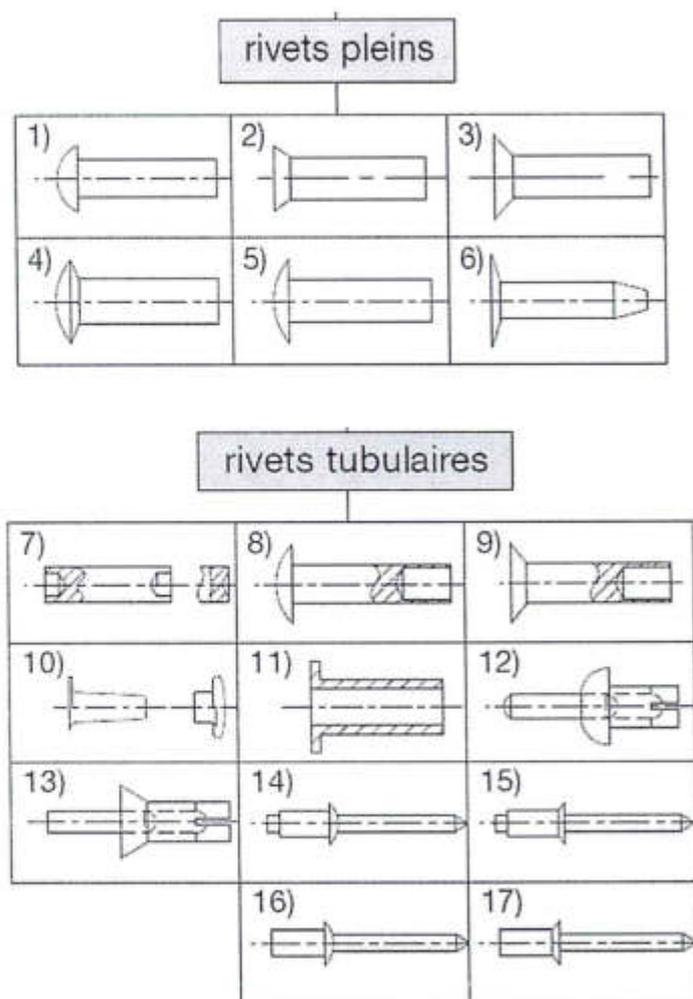
**Figure I.3: Assemblage riveté à simple recouvrement et présentation des trois constituants d'un rivet**

(A): la tige (dont une partie est réservée à la formation de la seconde tête),

(B): la seconde tête ou « tête fermante » .

(C): la première tête ou « tête de pose »

Différentes tailles (diamètre et longueur de tige) et formes (têtes de rivets) étaient disponibles et utilisées, en fonction des exigences techniques, fonctionnelles et structurelles (Figure I.4).



- 1- Rivet à tête demi-ronde (bombée) DIN 660 (jusqu'à 8 mm), DIN 124 (dès 10 mm);
- 2- Rivet à tête conique 75° DIN 661 (jusqu'à 8 mm), DIN 302 (dès 10 mm);
- 3- Rivet à tête conique 90° SN 213126;
- 4- Rivet à tête en goutte de suif DIN 662 ;
- 5- Rivet à tête bombée DIN 674 ;
- 6- Rivet à tête noyée DIN 675
- 7- Goupille à rivet DIN 7341
- 8- Rivet semi-creux à tête ronde DIN 6791
- 9- Rivet semi-creux à tête conique DIN 6792
- 10- Rivet creux en deux parties DIN 7331
- 11- Rivet tubulaire DIN 7339 + 7340
- 12- Rivet à expansion à tête ronde à percussion
- 13- Rivet à expansion à tête conique à percussion
- 14- Rivet à mandrin à tête demi-ronde
- 15- Rivet à mandrin à tête conique 120°
- 16- Rivet à mandrin fermé à tête bombée
- 17- Rivet à mandrin fermé à tête conique

**Figure I.4: Types des rivets**

### - Pratique de la rivure

Le rivet plein se présente avant pose comme une tige possédant une tête, la tige ayant une longueur suffisante pour pouvoir former la deuxième tête. Pour assembler des pièces d'acier dont la somme des épaisseurs est  $\Sigma t$ , la tige doit avoir une longueur  $\Sigma t + f$ , avec  $f = (1,5 \text{ à } 1,7) d$ . Le diamètre  $d$  du trou est supérieur au diamètre  $d_1$  du rivet, pour faciliter la pose, voir la Figure I.5.a la Figure I.5.b. Lorsque le modelage du rivet est parfait, le trou est entièrement rempli. Cependant, cette condition ne peut être vérifiée que si le rivet n'est pas trop long. Un rivet trop long peut en effet flamber lors du façonnage, ce qui rend le remplissage impossible, comme le présente la Figure I.5.c.

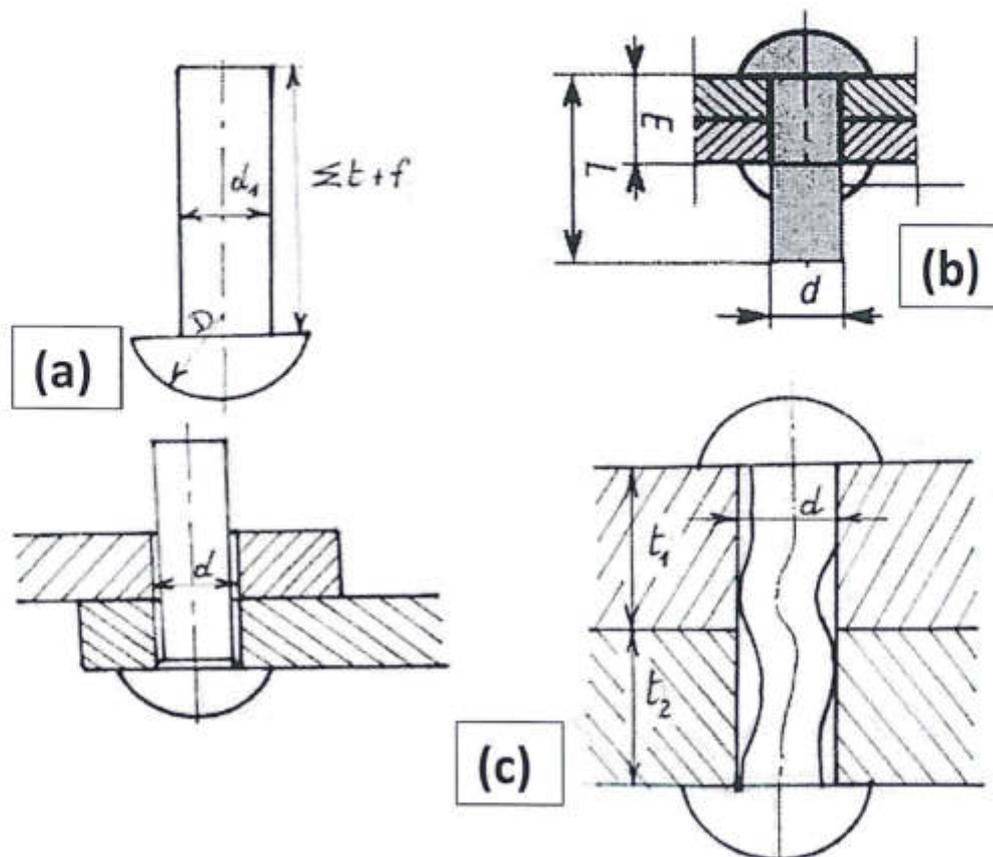


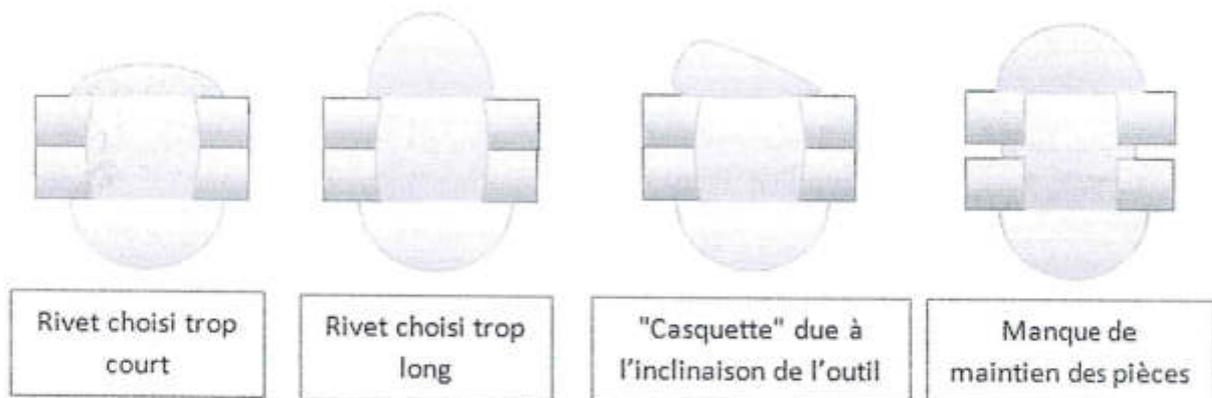
Figure I.5: Calcul des rivures

Le rivetage plein permet d'assembler des tôles de fortes épaisseurs, des pièces manufacturées (en acier, fonte ou aluminium) ou des matériaux différents.

La plupart des assemblages sont en acier mais il en existe en cuivre ou en laiton.

La principale caractéristique d'un assemblage riveté est sa bonne tenue mécanique en **cisaillement**.

Pour valider la mise en oeuvre d'un assemblage riveté, le tester mécaniquement jusqu'à la rupture est possible mais ce n'est pas utilisable dans le cadre d'une validation de production. Les critères de validation s'appuient alors sur une observation géométrique [Lan98] pour savoir si le rivet s'est bien formé a priori. Dans la Figure I.6 sont exposés des cas non recevables de rivetage.



**Figure I.6: Cas de rivetage non validé**

### - Les conditions de résistance

#### Conditions de non rupture au cisaillement du rivet

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} < R_{rg \text{ rivet}} \quad \text{Soit} \quad \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} < 0.6R_r$$

L'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $\frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = 0.6R_r$

#### Conditions de non matage du corps du rivet

$$P = \frac{F}{e \times d} < P_{adm} \quad \text{soit} \quad \frac{F}{e \times d} < R_r$$

L'effort transmissible maxi F peut s'exprimer :  $F = e \times d \times 1.5R_r$

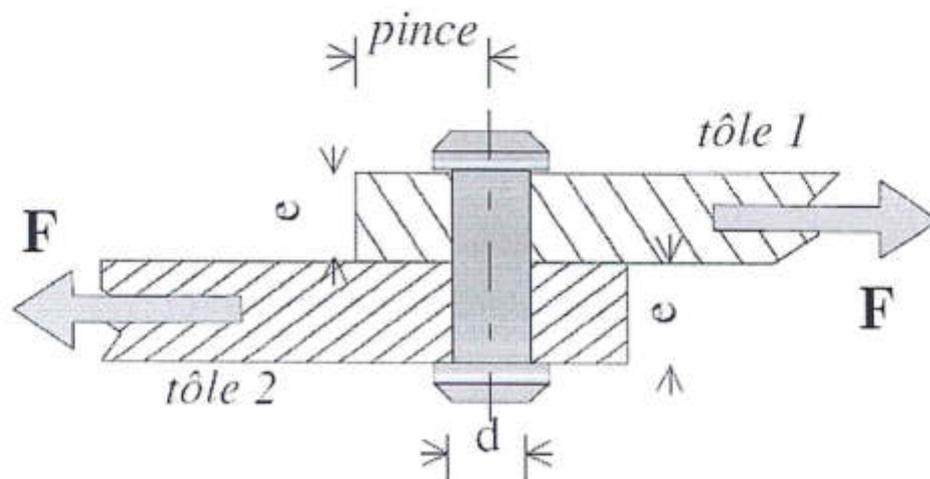
Où :

$R_r$ : résistance à la rupture à la traction du rivet

$R_{rg \text{ rivet}}$  : résistance à la rupture au cisaillement du rivet

$R_{rg \text{ tôle}}$ : résistance à la rupture à la traction de la tôle

$P_{adm}$ : pression de contact admissible au contact rivet- tôle



**Le matage**

Le matage est une déformation plastique localisée de la matière sous l'effet d'un choc ou d'une pression élevée. Pour déterminer la résistance au matage on calcul la pression de contact. Cette pression est ensuite comparée à la pression admissible qui dépend du matériau utilisé.

$$P_m \leq P_{adm}$$

Où :

$P_m$ : Pression de matage

$P_{adm}$ : pression de contact admissible au contact rivet- tôle

### Résumé

Lorsque l'on calcule au cisaillement d'un rivet, on suppose que la distribution des forces extérieures agissant sur le rivet d'une part, et la distribution des contraintes tangentielles dans la section d'autre part, se réalise de manière telle qu'elles soient réparties uniformément dans l'aire de la section de cisaillement.

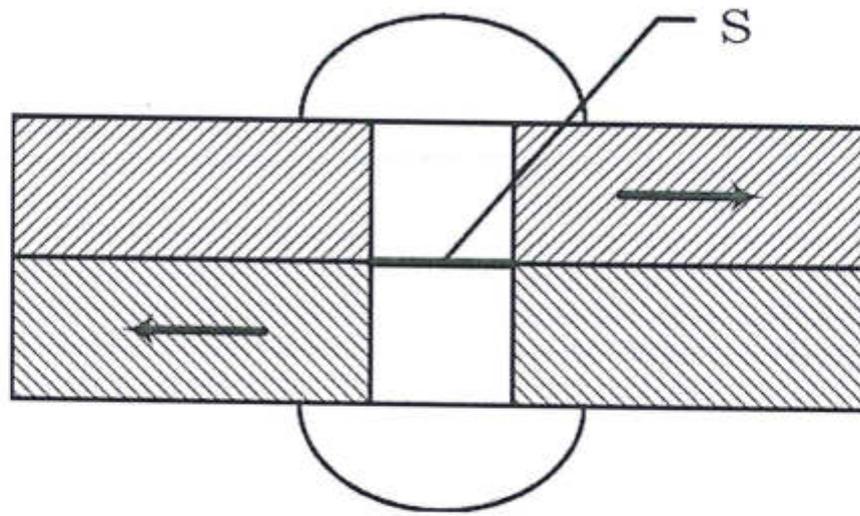


Figure 1 : Dimensionnement d'un rivet

### 1- Dimensionnement au cisaillement

La détermination du diamètre d'un rivet ou s'effectue d'après la condition de résistance au cisaillement. Elle s'écrit :

$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi \tau_{admi}}}$$

## 2- Dimensionnement au matage (pression diamétrale)

Une fois l'assemblage dimensionné, il convient, pour être complet, de vérifier si les pressions qui naissent entre les rivets et les tôles qui les entoure ne dépassent pas une valeur telle que les trous dans les plats ou les tôles s'ovalisent sous cette pression, ou que les rivets s'écrasent pour la même cause, voir la Figure 2.

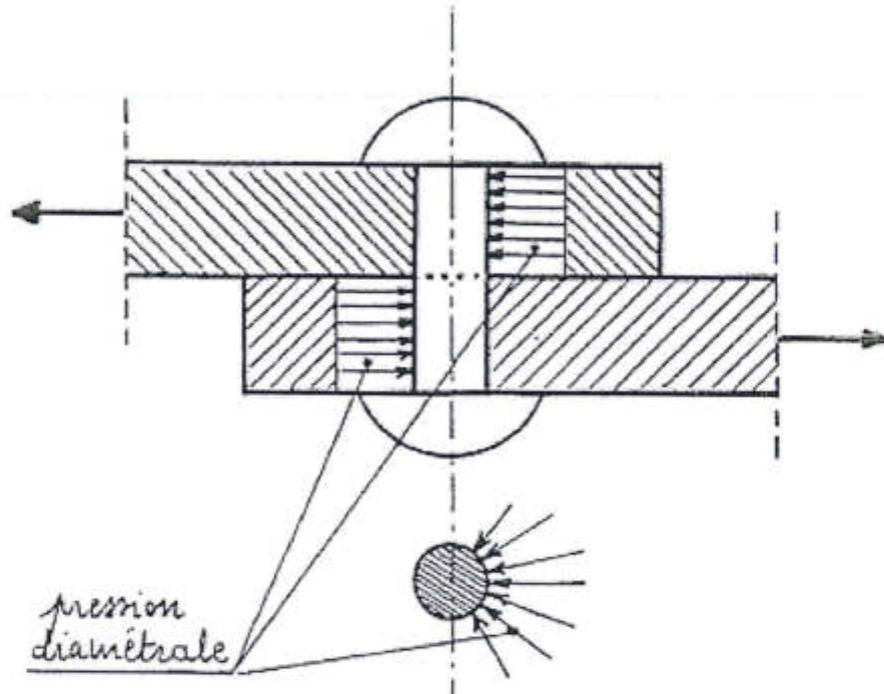


Figure 2 : Pression diamétrale - pression de matage.

Cette pression s'appelle pression diamétrale. Sa valeur moyenne  $P$  est à limiter comme suit :

$$P = \frac{F}{n d e} \leq P_{admi \text{ matage}}$$

### 3- Les contraintes normales agissant dans les tôles

Celles-ci ne peuvent dépasser la valeur admissible. En considérant que l'effort T doit être repris par la section nette  $S_{net}$ , on obtient :

$$\sigma_{tole} = \frac{F}{S_{net}} = \frac{F}{(l - n d)} \leq \sigma_{admi}$$

#### Notations

F: effort Normal.

S: section de rivet soumis au cisaillement.

d: diamètre d'un rivet.

$\tau_{adm rivet}$ : contrainte admissible de cisaillement du matériau de rivet

<i>Matière du rivet</i>	$\tau_{adm rivet}$ N/mm <sup>2</sup>
Acier	50...200
Z 12 N 05f	320
Cuivre rouge	150
Laiton	100
Aluminium	100

Tableau 1: Ordre de grandeur des contraintes admissibles de cisaillement pour un rivet.

n: nombre de rivets

$P_{adm mat}$ : pression admissible au matage que peut supporter la tôle

e: épaisseur de la tôle la plus mince assemblée.

l: largeur de la tôle.

$\sigma_{adm tole}$ : contrainte admissible de la tôle

## Chapitre I : Assemblage des métaux

### I.2 Assemblage par boulons

Les boulons sont composés d'une vis et d'un écrou, Figure 1. Ils sont utilisés lorsque l'on démonte ultérieurement les pièces ou que les autres types d'assemblages mécaniques ne correspondent pas aux performances souhaitées.

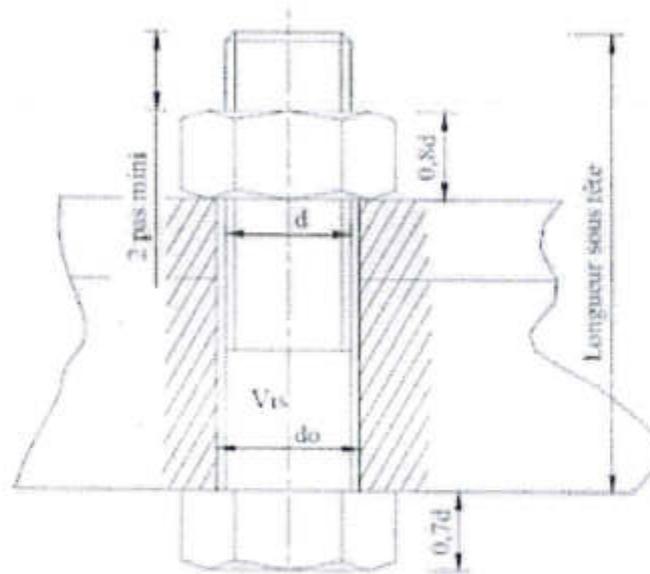


Figure 1 : Somatisation d'un boulon

Dans le cas de l'assemblage par boulons ordinaires, on empêche le déplacement relatif des éléments de l'assemblage en amenant ces éléments au contact du corps de la vis. C'est alors la résistance au cisaillement de la vis qui assure la tenue de l'assemblage, Figure 2.

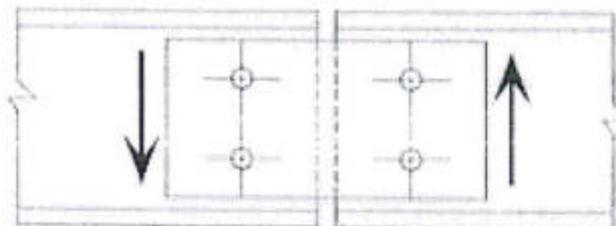


Figure 2 : Boulons opposés à la translation des 2 profils.

### I.2.1 Les Calculs au cisaillement

Le calcul au cisaillement se fait de la même manière que pour les rivets. De plus, lors de l'assemblage, le boulon doit vérifier :

- 1- Le serrage du boulon de sorte que le diamètre de la vis soit égale à celui du trou qui lui est destiné. Les trous sont en générale percés à un diamètre supérieure de 1 à 2 mm du diamètre nominal de la vis, Figure 1.
- 2- La résistance au glissement. En effet lors du serrage, la vis du boulon sera soumise à un effort de traction  $F$ , Figure 3. Cet effort provoquera un cisaillement dans la surface :

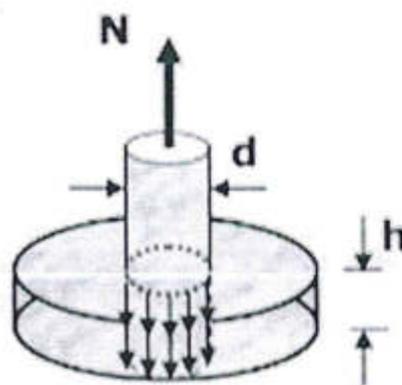
$$A_c = \pi d h$$

La condition de résistance au cisaillement sera donc :

$$\tau = \frac{F}{A_c} \leq \tau_{adm}$$

La condition de résistance à la traction est par conséquent :

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \leq \sigma_{adm}$$



Tête du boulon soumise au cisaillement

**Chapitre III: Assemblage des métaux****I.3. Assemblage par soudage****I.3.1 Définition**

Le soudage est un moyen d'assemblage de pièces de manière permanente. Une technique qui permet la continuité métallique entre les pièces soudées. Il existe 3 types de soudures :

- **La soudure homogène** : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- **La soudure hétérogène de type A** : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- **La soudure hétérogène de type B** : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différente. Selon les caractéristiques des matériaux à souder, l'énergie du soudage sera différente.

**I.3.2 Types de soudages****I.3.2.1 La soudure à l'arc électrique**

Le soudage à l'arc électrique est un procédé d'élévation de température au point de fusion obtenu grâce à l'utilisation d'un arc électrique, Figure 1.

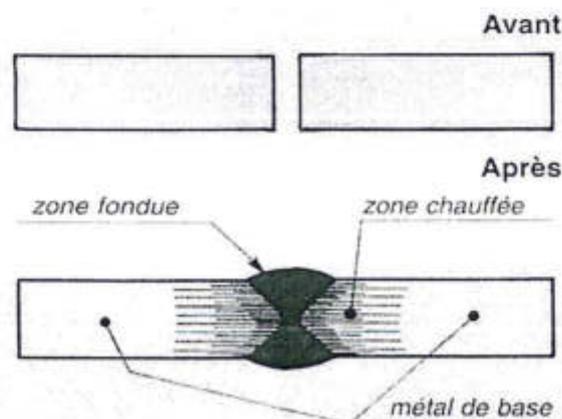


Figure 1: Soudage à l'arc électrique

### I.3.2.1.1 Principe de soudage à l'arc électrique

En approchant l'électrode de la pièce à souder, il se crée un court-circuit : l'arc électrique dégage une lumière intense et une forte chaleur, assure la fusion du métal des pièces à souder et celle de l'électrode qui dépose le métal d'apport, comme le montre la Figure 2.

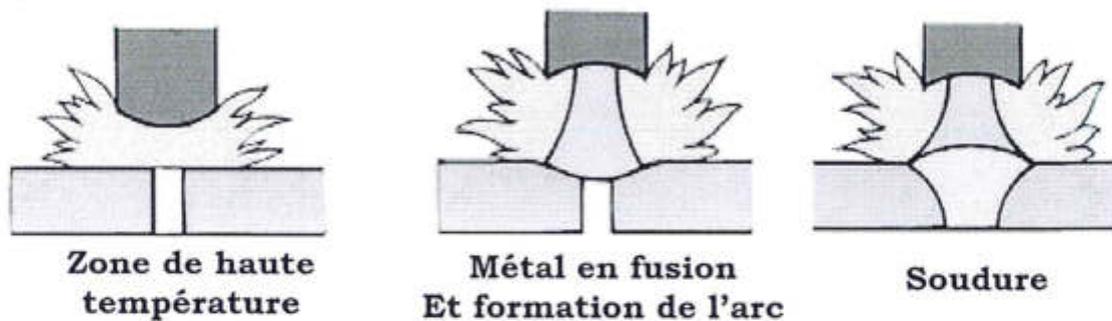


Figure 2: Principe de soudage à l'arc électrique

Le matériel de soudure à l'arc se compose de plusieurs éléments, le poste à souder (générateur électrique), le fil à souder ou conducteur pour le courant électrique et la baguette à souder, Figure 2.



Figure 2: Matériel de soudure à l'arc électrique

### I.3.2.1.2 Le poste à souder

Le poste à souder est un transformateur électrique alimenté par un réseau en courant 230 volts (ou 380 volts monophasé). Il fournit un courant de voltage plus faible (45 à 50 volts) mais avec une forte intensité (100 à 170 ampères), Figure 3.

L'une des bornes du poste est reliée à la pièce à souder par la pince de masse. L'autre est constituée d'une électrode fixée sur le porte-électrode.

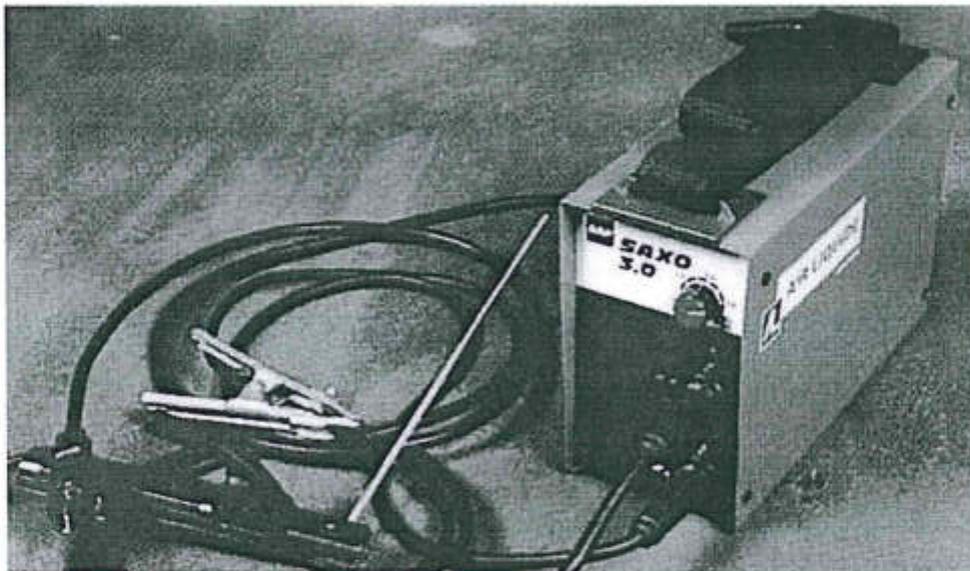


Figure 3 : Poste à souder.

### I.3.2.1.4 Les électrodes

Les électrodes sont composées d'une âme en fil métallique (le métal d'apport), de l'enrobage disposé comme une gaine autour de l'âme et jouant le rôle des décapants, Figure 4.

- 1- âme de l'électrode
- 2- enrobage de l'électrode
- 3- extrémité en fusion de l'âme
- 4- arc
- 5- goutte de métal de laitier passant dans l'arc

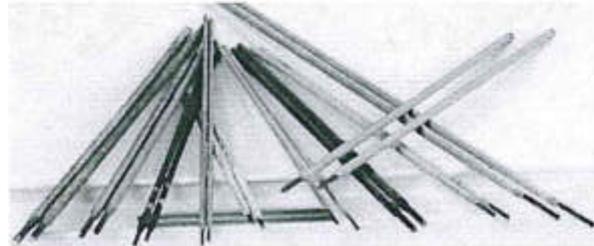
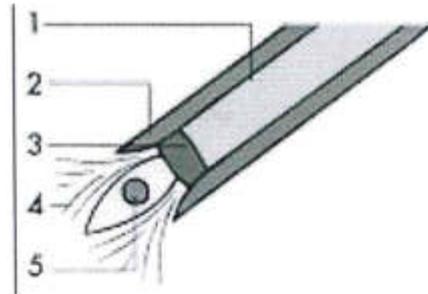


Figure 4 : Les composants d'une électrode

### I.3.2.1.5 Pratique de soudage

Les pièces à souder doivent être propres, débarrassées de trace de rouille. Nettoyer à la brosse métallique.

Protéger les yeux par un masque de soudeur, les mains par des gants, le corps par des vêtements épais et un tablier de soudeur. Prendre une position stable.

Choisir le diamètre d'électrode en fonction de l'épaisseur des pièces à souder, Tableau 1.

Epaisseur du métal	Diamètre de l'électrode	Intensité de l'arc en Ampère
1,5 à 2 mm	1,6 mm	35 à 52 A
2 à 2,5 mm	2mm	52 à 75 A
2,5 à 3,5 mm	2,5 mm	75 à 100 A
3,5 à 5 mm	3,15 mm	130 à 170 A
5 à 7 mm	4 mm	180 à 210 A

Tableau 1 Diamètres d'électrode et de l'intensité en fonction de l'épaisseur du métal à souder.

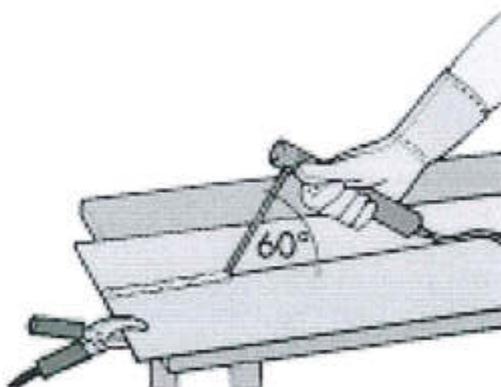
Engager la tête de l'électrode dans la tête de la pince porte électrode.

Vérifier que l'électrode est bien serrée dans la pince.

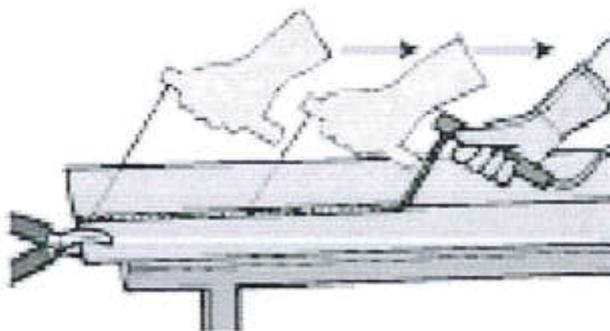
Régler l'intensité de soudage en fonction du diamètre de l'électrode utilisée en se référant au tableau indicatif figurant sur le poste à souder.

### **I.3.2.1.6 Les techniques de soudage**

- 1- Pendant le soudage en "tirant" l'électrode vers soi. Elle est penchée à  $60^\circ$  par rapport au plan de soudage.



- 2- Descendre la main au fur et à mesure de l'usure de l'électrode



- 3- Régler le déplacement de l'électrode afin d'obtenir une largeur de cordon égale de 1,5 à 2 fois au diamètre de l'électrode. Un bon cordon doit être légèrement bombé, d'une largeur uniforme et présenter des ondes régulières et assez serrées.

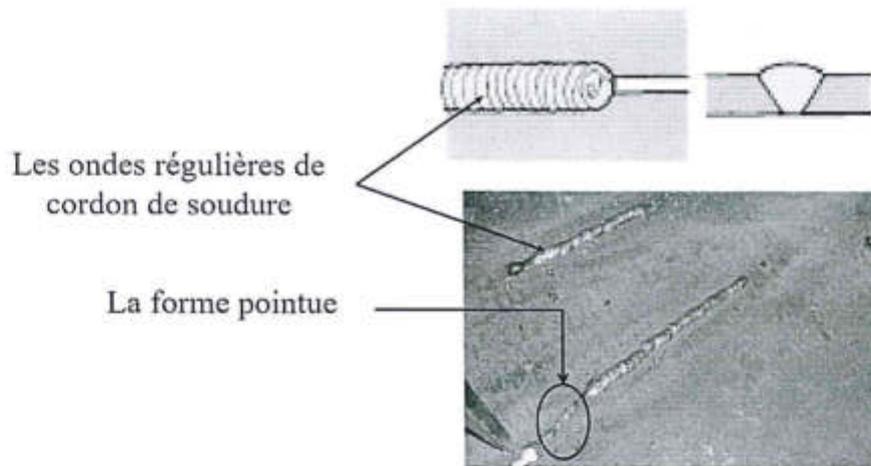


Figure 5: Forme de cordon de soudure.

- 4- Si l'avance de soudage est trop rapide, la forme du dépôt est étroite et pointue, l'aspect est irrégulier avec des caniveaux, la pénétration est faible, le cratère est allongé, Figure 5.
- 5- Si la baguette colle au métal, ne pas tirer sur l'électrode mais effectuer des mouvements rapides de gauche à droite ou couper l'alimentation du poste.

### I.3.2.1.7 Calcul d'assemblages soudés au cisaillement

En calcul d'assemblages soudés, on distingue deux types :

#### a) Les assemblages bout-à-bout

Caractérisés par la continuité physique de toute la section d'une au moins des pièces assemblées. Dans ce cas, l'assemblage de pièces épaisses (Tôles et tubes) par opération de soudage nécessite de pouvoir réaliser une soudure sur la totalité de l'épaisseur pour assurer une continuité mécanique de l'assemblage. Pour cela, un assemblage est réalisé en bout des éléments à assembler en amont de l'opération de soudage, Figure 6.

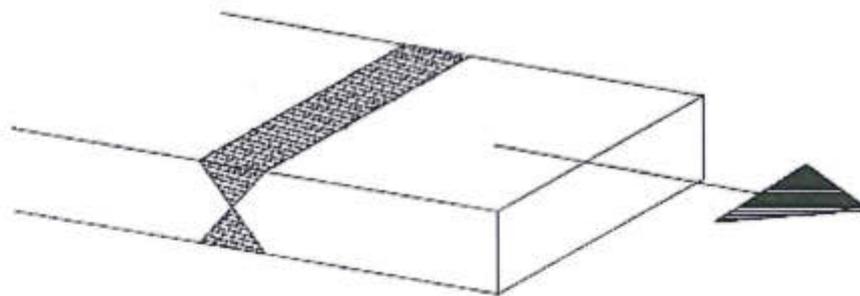


Figure 6 : Assemblage bout-à-bout

**b) Les assemblages par cordons d'angle**

Caractérisés par un “manque de pénétration” voulu à la conception. Le cordon de soudure se trouve comme le nom l'indique dans l'angle des pièces à assembler, Figure 7.

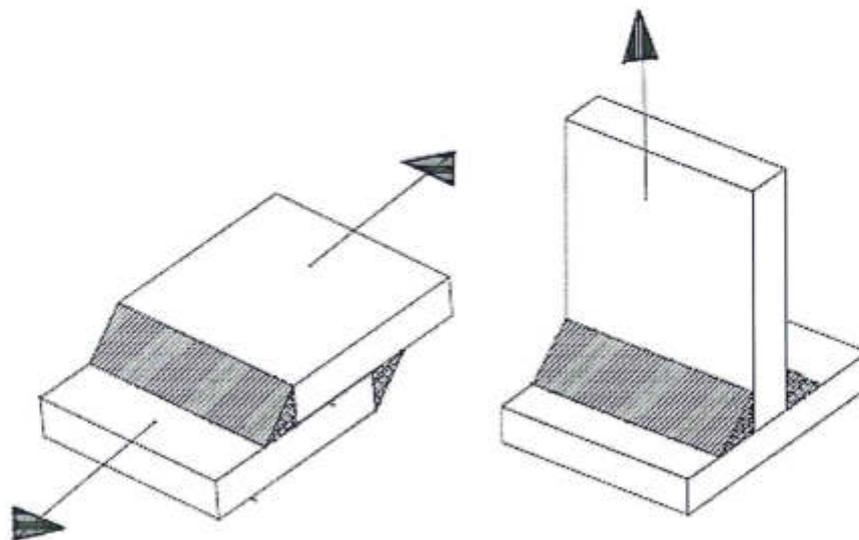


Figure 7 : Assemblage par cordons d'angle

### c) Hypothèses

Sans entrer dans de grandes considérations nous pouvons dire :

1) A défauts de connaître l'état de contrainte (qui est très complexe) dans les cordons de soudure, on suppose les contraintes tangentielles  $\tau$  réparties uniformément.

2) Dans les calculs de joints soudés, on ne tient d'habitude pas compte des débordements tout en supposant que la section de la soudure à la forme d'un triangle isocèle (Figure 8) de hauteur  $hg=a$  (hauteur de gorge). La longueur de la soudure sera notée  $ls$  et la hauteur du cordon sera notée  $hc$ .

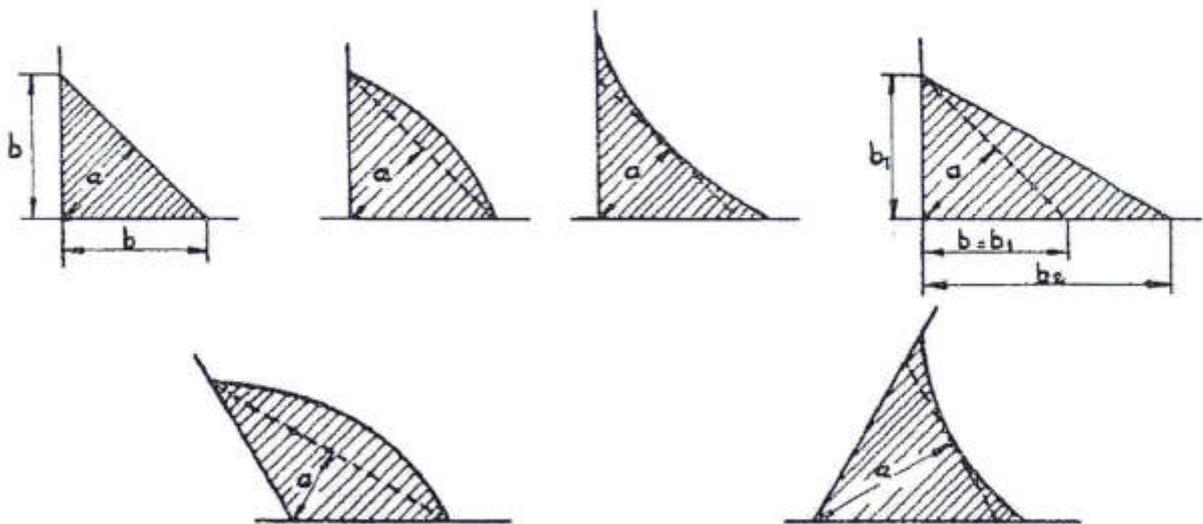


Figure 8 :  $a = hg$  ;  $b = hs$

On appelle "gorge" du cordon la dimension  $a$ , hauteur du triangle inscrit dans la section du cordon.

### I.3.2.1.8 Calcul des assemblages bout-à-bout

Dans les calculs d'assemblages bout-à-bout on peut admettre que l'assemblage possède la même résistance que la partie de la section de la pièce en contact avec les cordons de soudure. C'est pourquoi les cordons de soudures de ce type d'assemblage ne nécessitent aucune vérification.

### I.3.2.1.9 Calcul des assemblages par cordons d'angle

#### a) Calcul de soudures latérales

Les cordons de soudures se trouvent parallèles à la direction de l'effort.

Les soudures latérales sont les plus utilisées dans la pratique. Ces soudures sont moins rigides que les soudures frontales ; ceci est dû à une plus grande étendue de métal dans le sens de l'action de l'effort. Les soudures latérales sont toujours réalisées par couples, sur les deux côtés.

On considère (Figure 9) le cas élémentaire de deux plats, d'épaisseur  $e$ , en acier liés par deux cordons de soudure latéraux.

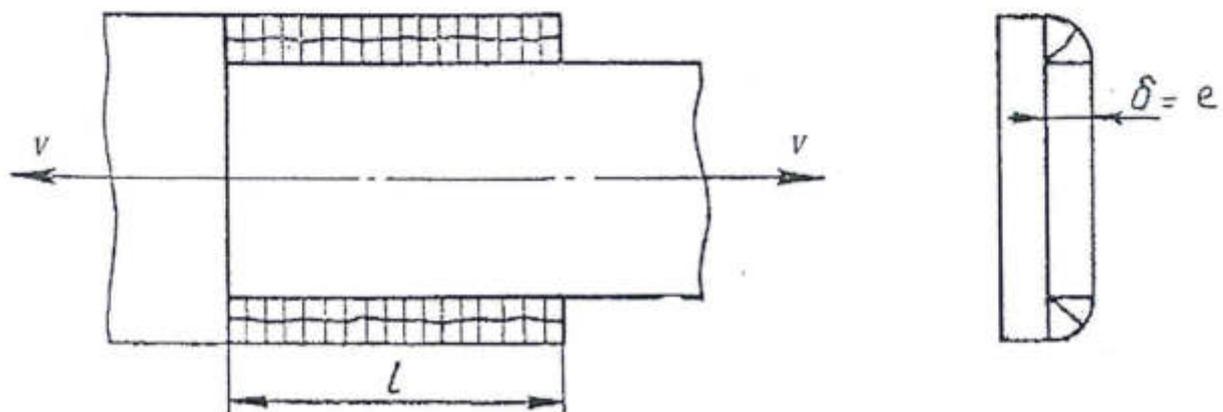


Figure 9 : Cordons de soudure latéraux

La section de cisaillement maximal correspond à la section d'aire minimale. Cette section est située dans le métal de base, infiniment près d'un des plans de séparation entre le cordon et les pièces.

L'aire de la section transversale soumise à cisaillement  $S_{cis}$  de longueur  $l_s$  (avec  $l_s$  la longueur d'une seule soudure) sera (sachant qu'il existe 2 cordons de soudure) :  $S_{cis} = 2(L_s h_c)$

La condition de résistance au cisaillement s'écrit :

$$\tau_{moyen} = \frac{F}{S_{cis}} \Rightarrow \tau_{moyen} = \frac{F}{2(L_s h_c)} \leq \tau_{adm MB} \quad (1)$$

$\tau_{adm MB}$  : la contrainte tangentielle admissible dans  $N/mm^2$  le métal de base

### b) Calcul de soudures frontales

Les cordons de soudures se trouvent perpendiculaires à la direction de l'effort, Figure 10.

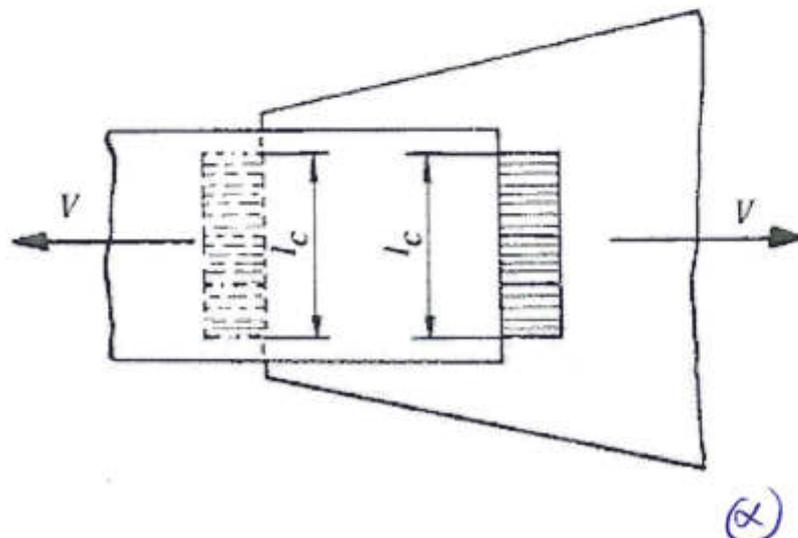


Figure 10 : Cordons de soudure frontaux

De même que pour les cordons latéraux la section de cisaillement maximal est située dans le métal de base, infiniment près d'un des plans de séparation entre le cordon et les pièces.

Lors du calcul des soudures frontales dans les assemblages à recouvrement on tient compte des deux soudures : supérieure et inférieure. Leur surface totale  $S_{cis} = 2(L_s h_c)$ .

La condition de résistance au cisaillement s'écrit :

$$\tau_{moyen} = \frac{F}{S_{cis}} \Rightarrow \tau_{moyen} = \frac{F}{2(L_s h_c)} \leq \tau_{adm MB} \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) étant les mêmes, nous pouvons généraliser la formule pour la rendre applicable au dimensionnement de tous les types d'assemblage faisant intervenir des cordons frontaux, latéraux et obliques. En appliquant l'effort  $F$  total auquel est soumis l'ensemble des cordons et  $\sum(L_s h_c)$ , la somme des sections de gorge de ces cordons, on a :

$$\frac{F}{\sum(L_s h_c)} \leq \tau_{adm MB} \quad (3).$$

### c) Longueur des soudures

Considérant que sur les deux extrémités de la soudure, il y a une pénétration incomplète (cratère), la longueur réelle à donner au cordon de soudure est de **(2 × hc)** supérieure à la longueur théorique calculée par les formules ci-dessus.

### I.3.2.1.10 Le soudage par résistance

Le soudage par points sert à assembler localement deux tôles, en utilisant l'effet Joule. A cet effet, on comprime ces tôles à l'aide d'une paire d'électrodes, généralement en alliage de cuivre, et l'on fait passer par ces mêmes électrodes un courant électrique de forte intensité, Figure 11. La chaleur engendrée par ce courant à l'interface tôle-tôle fait fondre localement le métal, ce qui crée, après solidification, un point de soudure.

#### a) Principe du soudage par points

- 1- Les deux tôles sont prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'ensemble en contact.
- 2- Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui crée un noyau fondu au niveau de l'interface tôle-tôle.
- 3- En refroidissant, ce noyau fondu fixe localement les deux tôles entre elles, Figure 11.

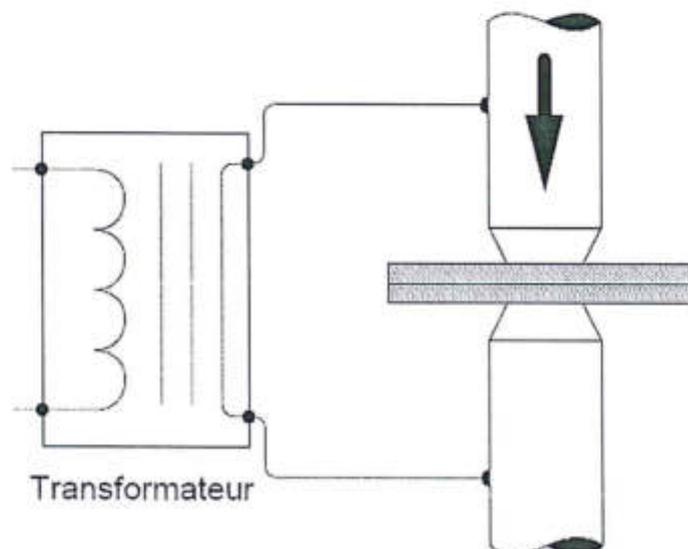


Figure 11 : Principe du soudage par points

### b) Déroulement du cycle de soudage

Le soudage par point est effectué suivant les étapes suivantes :

**L'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder, à l'endroit prévu et sous un effort donné.

**Le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse.

**Le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné.

**La remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point, Figure 12.

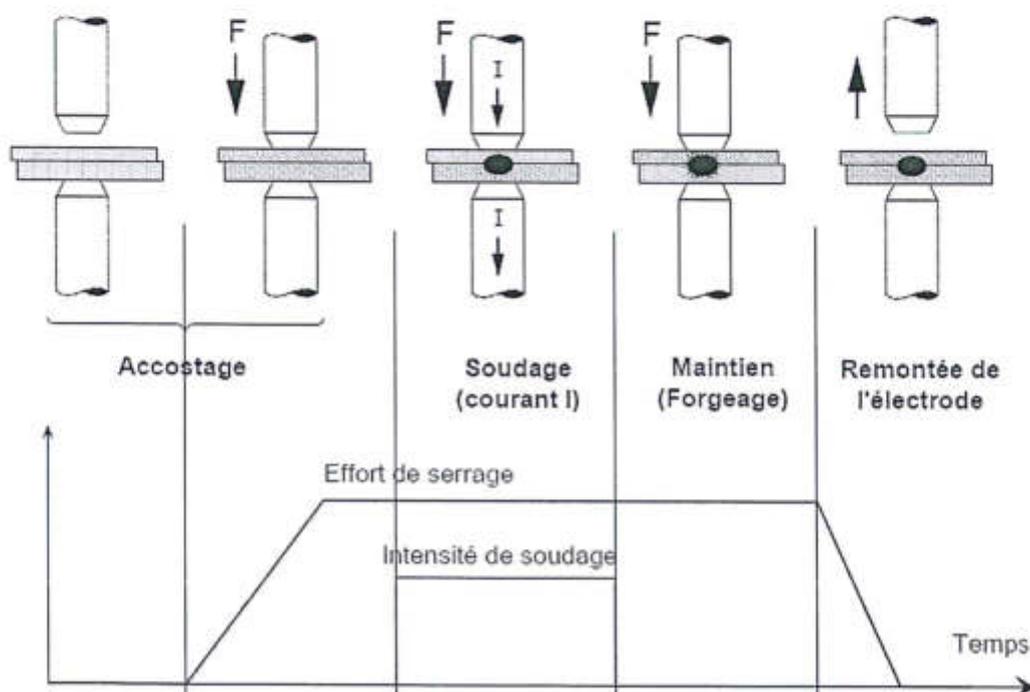


Figure 12 : Les différentes phases d'un cycle de soudage par point

### c) Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre le matériau métallique au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée  $t$  en fonction de **l'intensité du courant** et de la **résistance électrique** traversée est donnée par la relation :

$$Q = 0.24I^2Rt \quad (3)$$

$I$  : Intensité du courant en ampère.

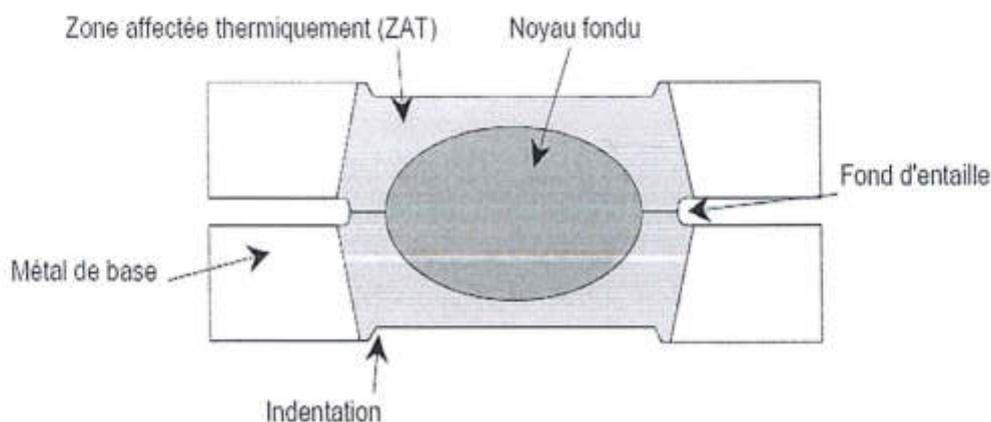
$R$  : Résistance du circuit à l'endroit du contact des pièces en Ohms

$t$  : Temps de l'action du courant en seconde

### Géométrie d'un point soudé

La géométrie d'un point soudé présente deux particularités :

- Présence d'une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitations mécaniques.
- Indentation, par pénétration de l'électrode, des faces externes de l'assemblage, Figure 13.



### I.3.2.1.11 Le soudage au gaz ou soudage oxyacétylénique

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène - $C_2H_2$  avec un gaz comburant d'oxygène - $O_2$ . La température de la flamme peut atteindre les  $3200\text{ }^\circ\text{C}$ .

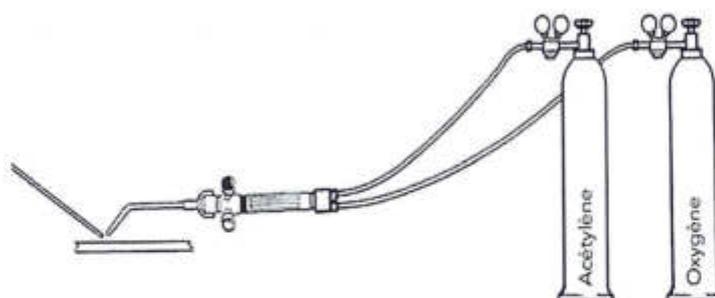


Figure 13 : Matériel de soudage au gaz.

### I.3.2.1.12 La soudure TIG

(Tungstène Inert Gaz : soudure à l'arc avec électrode non fusible). Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode non fusible et la pièce à souder sous la protection d'un gaz inerte (Argon, Hélium, ou mélange Argon- Hélium).

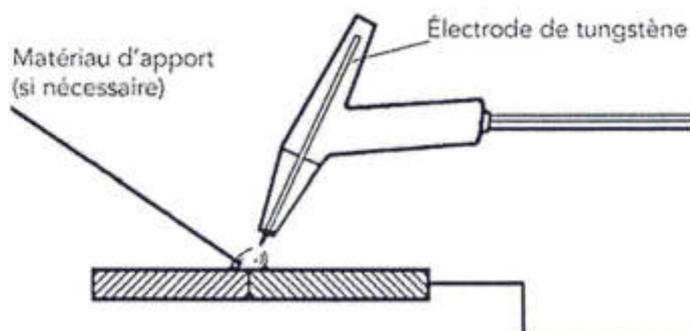


Figure 14 : Schéma de principe du soudage TIG.

### I.3.2.1.13 La soudure MIG

(Métal Inert Gas : Soudage à l'arc avec fils électrode fusible ou soudage semi-automatique). Un arc électrique est établi entre l'extrémité d'une électrode consommable et la pièce à souder sous la protection d'un mélange gazeux.

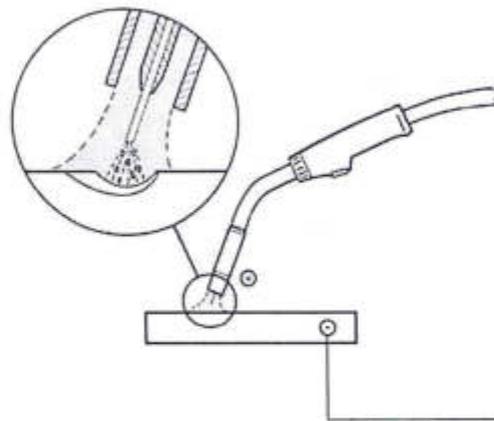


Figure 15 : Schéma de principe du soudage MIG.

### I.3.2.1.14 Soudage au plasma

Basé sur l'évolution de la soudure TIG et de la soudure MIG, la soudure plasma nécessite un gaz supplémentaire qui, mélangé au gaz principal, élève notablement la température de soudage jusqu'à l'effet plasmatique.

En conséquence, si le soudage plasma utilise une électrode en tungstène non fusible comme pour le soudage TIG, ou un fil fusible continu comme pour la soudure MIG, celle-ci est protégée par une buse en cuivre qui est en permanence refroidie à l'eau pour éviter sa fusion.

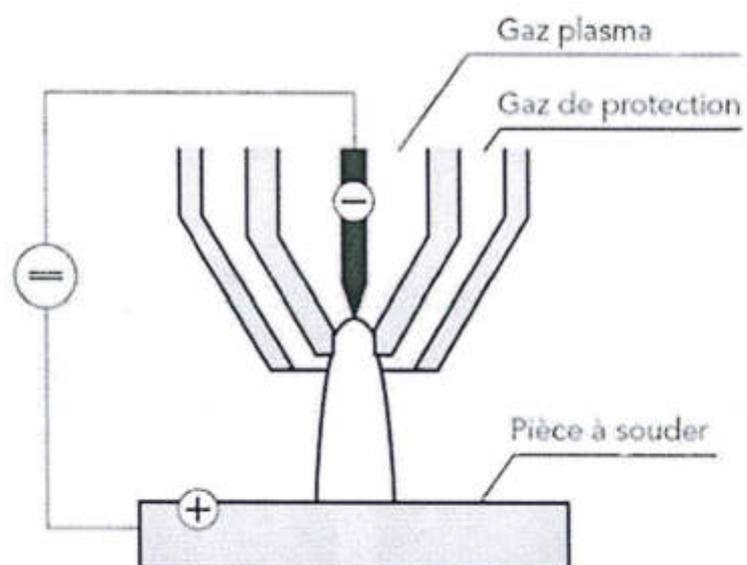
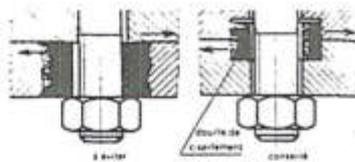


Figure 16 : Schéma de principe du soudage au plasma



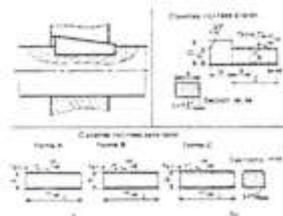
- Permanents :

- Tension de pose
- Mesure des efforts dans les boulons :
  - mesure du couple, par clé dynamométrique
  - mesure des allongements (jauges, dilatomètres, etc).

## Procédés d'assemblages démontables par cales, clavettes et frettage

### Cales et clavettes

Beaucoup d'assemblages par clavettes sont basés sur "l'effet de coin", permettant une liaison entre 2 pièces à solidariser



## Procédé d'asse

Un assemblage fileté en vue de les immobiliser d'assurer une étanchéité

**Vis** : pièce constituée d'un filetage avec ou sans tête, mais destinée à immobiliser.

**Ecrou** : pièce taraudée conique destinée à être vissée.

**Boulon** : ensemble constitué d'un filetage et d'une tête destinée à assurer un serrage en

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- avec électrode réfractaire</li> <li>- avec électrode fusible</li> <li>Sous flux solide</li> <li>Par plasma d'arc</li> <li>Avec fil fourré</li> </ul>
	- par résistance	<ul style="list-style-type: none"> <li>Par points</li> <li>A la molette</li> <li>Par étincelage en bout</li> </ul>
- Mécanique		<ul style="list-style-type: none"> <li>Par friction</li> <li>Par ultra-sons</li> </ul>
- Rayonnement focalisé		<ul style="list-style-type: none"> <li>Par bombardement électronique</li> <li>Par faisceau laser</li> </ul>

Le métal de base formatures différentes.

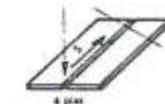
Le métal d'apport, id intervenir dans l'élab

Le métal du joint, cor sont dilués; certains é adjacentes. De plus, a peut être thermiquem structure.

## Soudage oxyacétylénique

### Principe

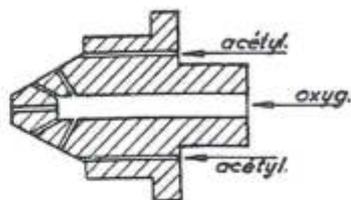
Un chalumeau permet de créer la combustion d'un mélange d'oxygène et d'acétylène ( $C_2H_2$ ) pour fondre les bords des pièces à réunir, ainsi que la baguette de métal d'apport.



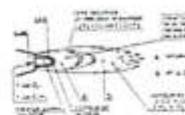
## Positions

Les soudures pour angle

des épaisseurs très différentes, il suffira de changer uniquement le bec.



réductrices et de de l'H<sub>2</sub> formés.

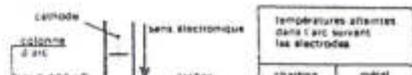


## Soudage manuel à l'arc électrique, avec électrodes enrobées

### Principe

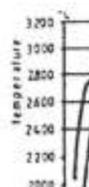
L'arc électrique est une forme de passage du courant à travers une atmosphère gazeuse non ou peu conductrice. L'arc est donc une colonne gazeuse, formée d'air et de gaz (issus du métal et de l'enrobage), devenue conductrice.

L'arc s'établit entre la pièce à souder et l'extrémité de l'électrode reliée à un générateur, dès que l'on applique une différence de potentiel suffisante.

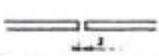
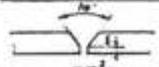


### Moda

L'acétylène co  
disponibilité d'  
gaz naturel, l'h  
température de



On prévoit des chanfreins de diverses formes, telles que le V, l'X, la tulipe, le Y.

	$2 < e < 4$ $J = e/2$
	Chanfrein en V $4 \leq e < 25$ $1 < J < 2$ $2 < m < 4$
	Chanfrein en Tulipe $25 \leq e < 50$ $2 < J < 4$ $2 < m < 4$
	Chanfrein en X $9 < e < 30$ $2 < J < 3$ $2 < m < 4$



## Soudage électrique sous atmosphère gazeuse

### Principe

Une torche supporte l'électrode et dirige un jet de gaz inerte (Argon Ar, Helium He, ...) ou actif ( $\text{CO}_2$ ) sur le bain en fusion, le protégeant ainsi de l'oxydation et de la nitruration.

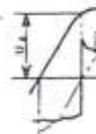
#### Modalités de réalisation

Soudage sous gaz inerte, avec électrode de tungstène

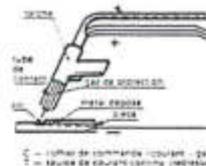
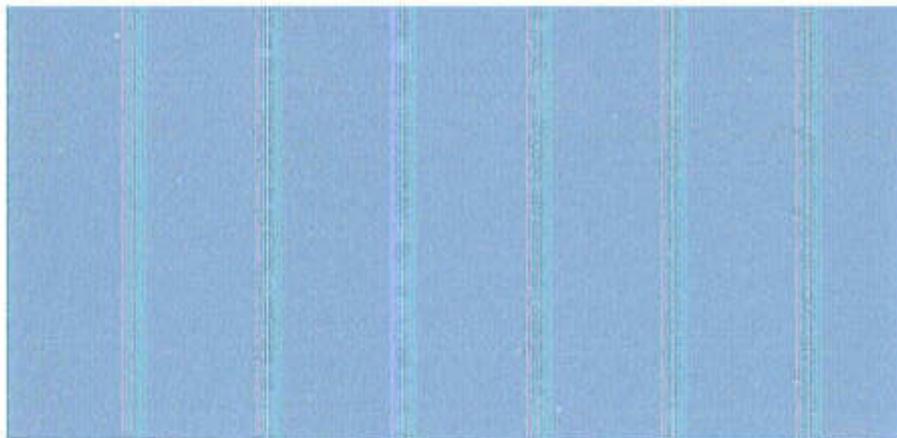
La torche dirige un jet de gaz inerte sur le bain, elle est refroidie par l'air et le gaz en circulation. Pour des courants supérieurs à +/- 150 ampères, elle est refroidie par circulation d'eau. C'est le procédé **TIG** (Tungstène Inert Gas).



En courant alternatif :



L'arc électrique p plus de  $3000^\circ\text{C}$ , s l'électrode consti pièces à souder, fi

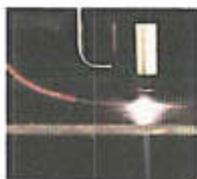
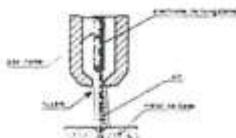


On n'utilise que le co  
bombardement élect  
accroît la vitesse de f  
La régulation du cour  
du fil.

## Le soudage à l'arc au plasma

### Principe

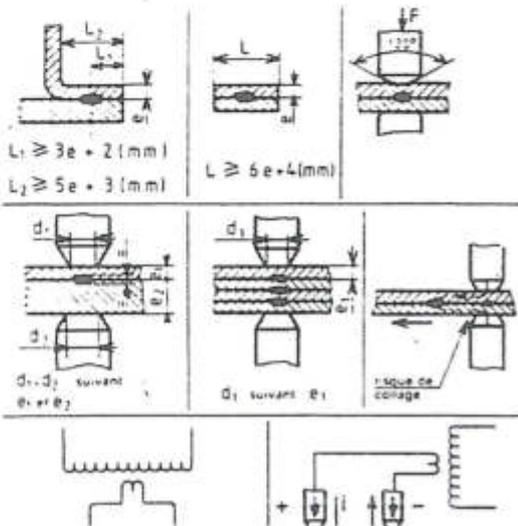
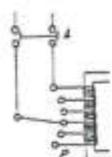
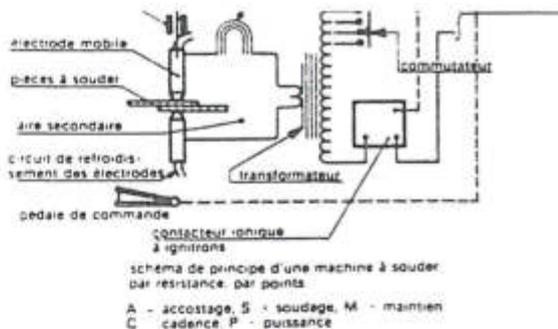
Il s'agit d'un soudage du genre TIG dans lequel l'arc est confiné dans une tuyère. L'étranglement de l'arc permet d'obtenir des températures très élevées de 8000 à 30000°C, avec une bonne stabilité de l'arc, à faible intensité.



L'arc provoque dans le gaz, la naissance d'ions et d'électrons libres, le tout formant un plasma à haute température. Cette grande concentration d'énergie permet d'assurer de bonnes pénétrations avec une préparation simplifiée du joint.



généralement par circuit  
et les maintient applic

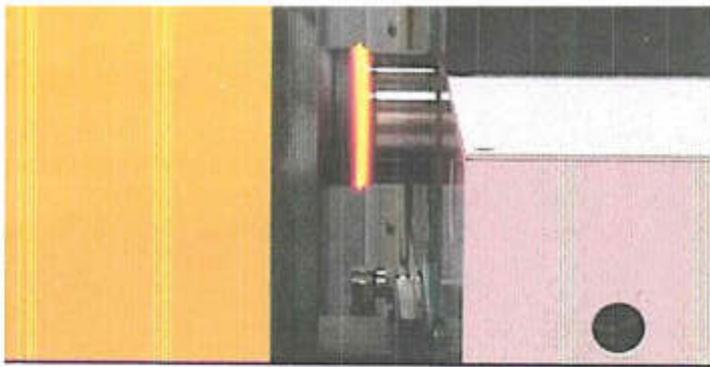


## Mo

Le cycle de réalisation d'un

- le accostage : applicat
- le soudage : passage
- le maintien de l'effor
- le fin de cycle : le méta s'écartent et reprenne nouveau point.





## Le soudage aux ultra-sons

Une installation permet de transformer un courant alternatif à haute fréquence en énergie vibratoire. L'énergie vibratoire est introduite dans les métaux, au voisinage de la zone de soudage.

On peut, de la sorte, introduire des vibrations dans un matériau de soudage ou de brasage liquéfié, ceci provoque de la cavitation (formation de bulles gazeuses locales, par suite des variations de pression au passage de l'onde ultrasonore).

La technique ultrasonore est utilisée dans le soudage des non-ferreux.

minuscules, et par co  
Ce phénomène contri  
les 2 faces à souder. l  
d'une forte pression p

Le :

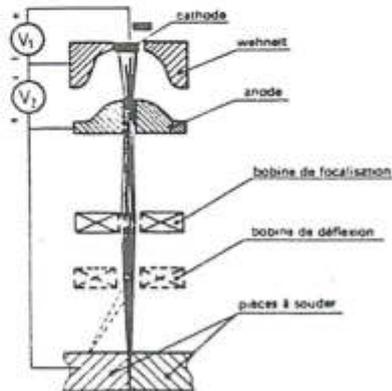
L'effet thermiq  
métaux à soude  
conjointement :  
compression.

On peut souder  
tournant en sen  
compression d'  
A noter que l'oi

Procédé de soudage	Densité de puissance (kW/cm <sup>2</sup> )
Chalumeau oxyacétylénique	0,9
Arc électrique	10
Arc plasma	100
E.B.W.	2000...3000
LASER CO <sub>2</sub>	2000...5000

par un bombardement.  
L'impact des électrons provoque :

- la liquéfaction des métaux localement,
- la vaporisation intense des métaux à haute température,
- l'apparition sur le métal du bombardement d'un plasma.



Un canon à électrons, tube cathodique sous vide dont l'anode accélératrice est à un potentiel élevé (par exemple 150 kV) vis-à-vis de la cathode émettrice. Le faisceau électronique émis est focalisé par une

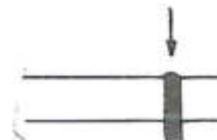


Préparation du joint	Simple nettoyage	$e \geq 1,8 \text{ mm} \rightarrow$ Bords en U ou J	$0,05 < e \leq 150 \text{ mm} \rightarrow$ directe en bout
Protection du bain	Aucune, sauf pression électrodes	gaz inerte	Enceinte sous vide
Métaux soudables	Al - Acier inox - inox doux	Al - aciers : inox, doux, faiblement alliés	Al-aciers, (inox, marteusiques), alliages réfractaires, métaux différents
Métaux d'apport	Aucun	Fil d'apport	Aucun, parfois clinquant pour propriétés spéciales
Épaisseurs soudables	$e$ max 25 mm acier et 12 mm alu	$e$ max 125 mm Al Fonction : préparation - nombre de passes	$e$ max 150 mm Al, 60 mm acier, 1 seule passe
Coût	Investissement élevé, coût proportionnel faible	Investissement faible, coût proportionnel élevé (gaz + métal d'apport)	Investissement élevé, coût proportionnel faible (peu de préparation, peu de déformation)
Limitations	Profondeur bras machine	Fonction des outillages seulement	Dimension enceinte sous vide

## Soudage par rayonnement laser



Procédé	Non
TIG	
MIG	
Arc Plasma	
EBW	

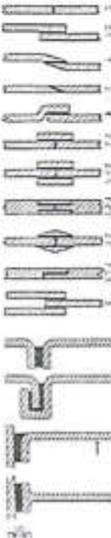


- la capacité de :
  - reconnaissance de pièces
  - détection d'obstacles dans les déplacements
  - la prise de décisions rapides dans les situations réelles rencontrées.

Des cellules flexibles d'assemblage robotisé fonctionnent dans l'industrie pour :

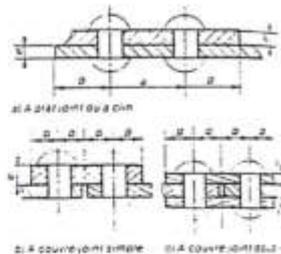
- l'assemblage de petits équipements électromécaniques : relais, contacteurs, etc.
- l'insertion automatique de composants électroniques et circuits intégrés sur circuits imprimés, les petits appareils électroménagers,
- les emballages de pièces et sous-ensembles, etc.

- d'alléger les stru
- d'éviter les mod
- des matériaux à
- de former un joi
- problèmes d'éta
- de répartir unifo



risquerait de déformer.

On peut utiliser des rivures à simple ou double recouvrement.



On peut :

- soit chauffer la pièce, puis l'échauffement, puis en serrant la pièce
- soit refroidir la pièce (par exemple) dont le métal se contracte en se refroidissant, pressant ainsi l'assemblage
- soit forcer mécaniquement la pièce intérieure de l'extérieur

## Les procédés de soudage

### Principes

La soudure est un assemblage permanent de 2 pièces métalliques, caractérisé par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler.

La soudure peut s'effectuer :

- sans pression extérieure, les bords étant portés à la température de fusion, et nécessitant le plus souvent l'introduction dans le joint d'un complément de métal (métal d'apport) déposé en une ou plusieurs passes.

C'est un procédé d'assemblage permanent de 2 pièces métalliques. Le rivet, placé à chaud, presse ainsi les 2 pièces soumises à une tension. Certains rivets sont peints.

