



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Batna 2 Mostefa BENBOULAIID  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

# **Support de Cours Technologie de Base.**

**Destiné aux étudiants L2 Génie Mécanique et Aéronautique**

**Dr. A. BOUSSAHA**

## **Préface**

Le support de cours est un élément indispensable à un bon enseignement de n'importe quelle unité (Fondamentale, Transversale ou Découverte). Il soutient et illustre le discours de l'enseignant pendant son cours.

Ce cours est dédié aux étudiants du parcours L2 Génie Mécanique et Aéronautique dont le but de :

- Etudier les différentes techniques de fabrications traditionnelles afin de réaliser les pièces mécaniques en adéquation avec leur conception
- Donner un aperçu des techniques de fabrication avancées dans le domaine industriel, afin d'organiser les choix de procédés et des paramètres de fabrication
- Acquérir des connaissances sur les techniques d'assemblages des pièces mécaniques

Conscient du manque à ajouter à ce support, je tiens à remercier tous ceux qui me feront part de leurs remarques et suggestions dans le but d'améliorer son contenu.

Je tiens à remercier vivement les enseignants désignés par le C.S.D pour expertiser ce support de cours.

Dr.A.BOUSSAHA

## Table des Matières

### Préface

### Chapitre I Matériaux

I.1 Définition.....	1
I.2 Désignation des aciers (NF EN 10027).....	2
I.2.1 Désignation symbolique des aciers (NF EN 10027-1).....	2
I.3 Aciers d'usage général.....	4
I.3.1 Aciers de base.....	4
I.3.2 Aciers de qualité.....	4
I.3.3 Aciers spéciaux.....	4
I.4 Classement des produits.....	5
I.4.1 Produits plats.....	5
I.5 Rappel de données métallurgique de base.....	6
I.5.1 acier à structure ferrito-perlitique.....	6
I.5.2 autres éléments constitutifs.....	6
I.6 Applications.....	10
I.7 Aciers spéciaux de construction mécanique.....	11
I.7.1 Principe du durcissement des aciers.....	11
I.8 Définitions, notions de base et classification des fontes .....	11
I.8.1 Définition métallurgique des fontes .....	11
I.8.2 Composition chimique.....	12
I.8.3 Classification industrielle.....	12
- Fontes grises à graphite lamellaire .....	12
- Fonte à graphite sphéroïdal (FGS) .....	13
- Fonte à graphite vermiculaire .....	13
- Fontes blanches et fontes trempées.....	13
- Fontes malléables.....	13
- Les fontes spéciales alliées.....	13
I.9 Désignation rationnelle d'une fonte.....	14
I.10 Normalisation des fontes.....	15
I.10.1 Symbolisation normalisée des fontes.....	15
I.11 Métaux et alliage non ferreux.....	16
I.11.1 Aluminium et alliage d'aluminium.....	16

I.11.2 Désignation des alliages d'aluminium.....	16
I.11.2.1 Désignation des alliages corroyés.....	17
I.11.2.2 Etat de livraison.....	17
I.12 Les métaux précieux et leurs alliages.....	19
I.12.1 Notions de base.....	19
I.12.1.1 Désignation.....	19
I.13 Alliage à mémoire de forme.....	19
I.14 Matières plastiques (Polymères).....	19
I.14.1 Définitions.....	19
I.14.2 Structure des polymères.....	20
I.14.2.1 Polymères linéaires.....	20
I.14.2.2 Polymères ramifiés.....	21
I.14.2.3 Polymères amorphes et polymères cristallisés.....	21
I.14.5 Propriétés des polymères.....	22
I.14.6 Polymères thermoplastiques, thermodurcissables.....	22
I.15 Matériaux composites.....	22
I.15.1 Quelques définitions.....	23
- Renfort.....	23
- Matrice.....	23
- Charges et additifs.....	23
- Fibre de verre.....	23
- Fibre de carbone.....	24
- Fibre de Kevlar.....	24
I.16 Quelques procédés de fabrication de structures composites.....	24
I.16.1 Moulage au contact.....	24
I.16.2 Moulage par projection.....	25
I.16.3 Moulage sous vide ou «au sac » .....	25
I.16.4 Enroulement filamentaire.....	25
I.16.5 RTM (Resin Transfer Moulding) : Moulage par transfert de résine.....	26
<b>Chapitre II Procédés d'Obtention des Pièces sans Enlèvement de Matière.....</b>	<b>27</b>
II.1 Le moulage ou fonderie : Principe.....	28
II.2 Méthodes de moulage.....	28
II.2.1 Moulage en sable (manuel ou mécanique).....	28

II.2.2 Moulage métallique ou moulage en coquille : Principe	28
II.2.2.1 Moulage par gravité	28
II.2.2.2 Moulage sous pression	29
II.2.3 Moulage en cire perdue : Principe	29
II.3 Le forgeage	30
II.3.1 Forgeage à la main (travail du forgeron)	30
II.3.2 Forgeage mécanique ou industriel	31
II.3.3 Critères de choix du procédé	31
II.3.4 Intérêt du forgeage	31
II.4 Forge libre	31
II.5 Emboutissage	32
II.5.1 Conception générale d'un outil d'emboutissage	32
II.5.2 Méthode de formage : rôle du serre-flan	33
II.5.3 Principe d'emboutissage	33
II.5.4 Effort d'emboutissage	33
II.6 Estampage-matriçage	34
II.6.1 Définitions	34
II.6.2 Principe du procédé	34
II.7 Le laminage	34
II.7.1 Laminage à froid et Laminage à chaud	35
<b>CHAPITRE III Procédés d'Obtention des Pièces par Enlèvement de Matière</b>	<b>36</b>
III.1 Introduction	37
III.2 Le tournage	38
III.2.1 Définition du procédé	38
III.2.2 La vitesse de coupe : $V_c$ [m/min]	40
III.2.3 La vitesse d'avance en tournage : $F$ [mm/min]	40
III.3 Le fraisage	41
III.3.1 Définition du procédé	41
III.3.2 Les principales opérations de fraisage	41
III.3.3 La vitesse de coupe en fraisage ( $V_c$ : m/min)	42
III.3.4 La vitesse d'avance en fraisage	42
III.4 Le perçage	42
III.4.1 Choix de l'avance : (en mm/tr)	44

<b>Chapitre IV Techniques d'Assemblage</b>	45
IV.1 Introduction	46
- Assemblage complet ou partiel	46
- Assemblage démontable ou non démontable	46
- Assemblage élastique ou rigide	46
- Assemblage par obstacle ou par adhérence	46
- Assemblage direct ou indirect	47
IV.2 Assemblage par soudage	47
IV.2.1 Introduction	47
IV.2.2 Procédés de soudage	48
IV.2.2.1 Classification	48
IV.2.3 Choix des procédés de soudage	49
IV.2.4 Soudage à la flemme	49
IV.2.4.1 Propriétés chimiques des flemmes	49
IV.2.4.2 Mode opératoire	50
IV.2.4.3 Différents types de soudures	51
IV.2.4.4 Le chalumeau	51
IV.2.5 soudage par résistance	52
IV.2.5.1 principe	52
IV.2.5.2 Paramètres du soudage par points	55
- Les électrodes	55
- L'effort	56
- Le courant	56
Temps de passage du courant	56
IV.2.5.3 caractéristiques des soudures par points	56
- Dimensionnelle	56
Mécanique	57
Métallurgique	57
Défauts des soudures	57
IV.2.6 Soudage à l'électrode enrobée	58
IV.2.6.1 Caractéristiques de l'électrode	58
IV.2.6 Soudage à l'électrode enrobée	59
<b>Bibliographie</b>	60

# *Chapitre I*

## *Matériaux*

## I.1 Définition

Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du **carbone** comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les **aciers** titrent moins de **2%** de carbone ; les **fontes**, au contraire, contiennent plus de **2%** de carbone. Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste le plus important.

Dans un souci de clarté destiné à faciliter le choix des utilisateurs, les différentes familles d'aciers ont été classées en fonction de deux critères, l'un de composition et l'autre de niveau de qualité. Ainsi, on distingue :

- Selon l'**analyse chimique** : les aciers **non alliés** ( $\leq 1\%$  d'alliage), **faiblement alliés** (teneur de chaque élément d'alliage  $\leq 5\%$ ) ; et **fortement alliés** (cette dernière distinction n'est pas normalisée).
- Selon le **niveau de précision et de sévérité**, apporté aux garanties des propriétés d'usage : les aciers de **qualité** et **spéciaux**.

Les **aciers spéciaux** sont constitués de quatre familles suivantes :

- Les **aciers de construction** utilisés en particulier en construction mécanique, pour la réalisation de machines ou de mécanismes très variés ; ils peuvent être alliés ou non alliés ; à cette famille ont été associés les aciers pour appareils à pression.
- Les **aciers à outils** choisis pour la fabrication de tous les outillages : usinage, mise en forme, .... ils sont non alliés ou alliés.
- Les **aciers inoxydables** résistant à la corrosion et toujours très alliés ; leur ont été associés les aciers réfractaires ;
- Les aciers spéciaux divers.

Les fontes sont classées uniquement selon leur structure micrographique et plus précisément celle du carbone ou des carbures précipités : Fonte à graphite lamellaire, à graphite sphéroïdal, fontes blanches etc.



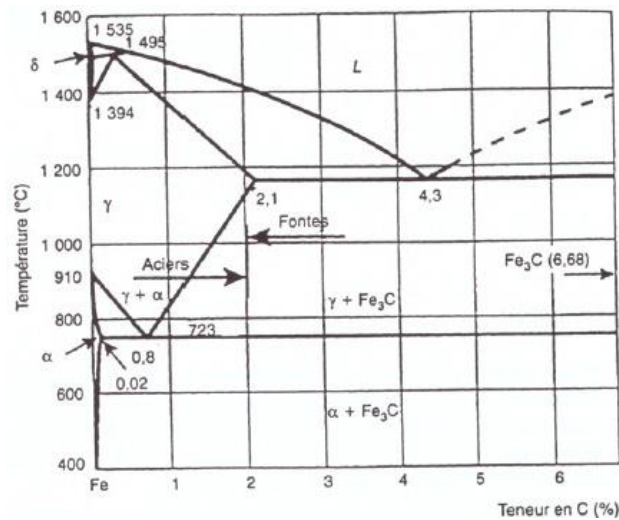


Figure I.1 : Diagramme Fer-Carbone

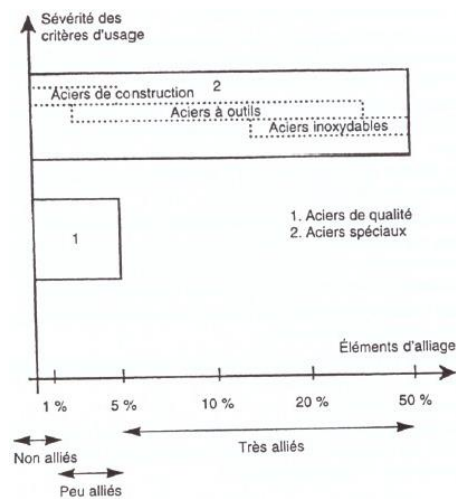


Figure I.2 : Principales classes d'acier

## I.2 Désignation des aciers (NF EN 10027)

Les aciers sont désignés selon deux systèmes équivalents.

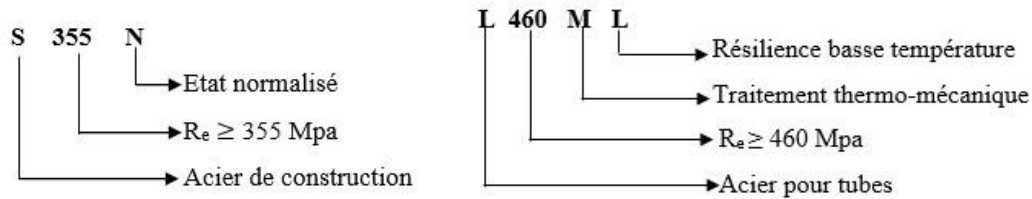
### I.2.1 Désignation symbolique des aciers (NF EN 10027-1)

#### a. Aciers désignés à partir de leurs applications et de leurs caractéristiques mécaniques

- Une lettre précise le domaine d'application ;
  - S = acier de construction
  - P = pour appareils de pression ;
  - L = acier pour tubes ;
  - E = acier de construction mécanique ;
  - Etc.
- Une valeur numérique indique soit la limite d'élasticité, soit une propriété physique garantie.

- Eventuellement d'autres symboles donnent d'autres propriétés ou les conditions de fabrication.

### Exemples



### Remarque

L'ancienne désignation française (NFA 02.025) utilisait des symboles précisant eux aussi, selon les cas, les domaines d'utilisation et/ou les principales caractéristiques du produit :

S355N, ancienne désignation : E355R

P235GH, ancienne désignation : A37FP

### b. Aciers désignés selon composition

- **Aciers non alliés avec Mn < 1% ou aciers peu alliés dont aucun élément n'est supérieur à 5%**
  - Un premier chiffre précise la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres qui suivent, selon les abréviations chimiques, indiquent dans l'ordre de concentration les principaux éléments d'alliage. Le ou les chiffres suivants donnent leur teneur multipliée par 4 ou 10, etc..., selon les familles précisées au tableau I.1

Norme	Elément d'alliage	Coefficient multiplicateur
EN Ex NF A	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W C, K, M, N, S, W	4
EN Ex NF A	Al, Be, Cu, Mo, Nb, PB, Ta, TI, V, Zr A, Be, U, D, Nb, Pb, Ta, T, V	10
EN	N, S, P, Ce	100
EN	B	1000

Tableau I.1 : Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage pour les aciers peu alliés

### Exemple

- **10 Cr. Mo 9-10** : Acier peu ou non allié titrant 0,10% de carbone,  $\frac{9}{4}$  soit 2,25% de chrome et  $\frac{10}{10}$  soit 1% de molybdène.
- **100 Cr 6** = acier peu ou non allié titrant 1% de carbone et 1,5% de chrome.

### c. Aciers très alliés dont au moins un élément a une teneur supérieure à 5%

Une première lettre X est suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres suivantes précisent les principaux éléments d'alliage suivis de leurs teneurs en pourcentage.

**Exemple**

X 6 Cr Ni 18.9 = acier fortement allié titrant 0,06% de carbone, 18% de chrome et 9% de nickel.

**d. Aciers rapides**

Les aciers rapides sont désignés par le symbole HS suivi de trois ou quatre chiffres donnant dans l'ordre les concentrations en pourcentage des éléments W, Mo, V, Co.

**Exemple**

HS 6-5-2 = acier rapide contenant 6% de tungstène, 5% de molybdène, 2% de vanadium, 0% de cobalt.

**I.3 Aciers d'usage général****I.3.1 Aciers de base**

Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Il n'y a pas de prescription concernant la qualité ;
- Aucun traitement thermique n'est prescrit, à l'exception du recuit (détente, adoucissement ou normalisation) ;
- La résistance minimale est  $\leq 600$  Mpa ;
- La résilience Kv en long à + 20°C est  $\geq 27$  J ;
- Les teneurs maximales en soufre et en phosphore sont  $\leq 0,045\%$  ;
- La teneur maximale en carbone est  $\leq 0,10\%$  ;
- Il n'existe pas de prescription concernant les éléments d'alliage.

**I.3.2 Aciers de qualité**

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Aucun traitement thermique n'est prescrit, à l'exception du recuit (détente, adoucissement ou normalisation) ;
- Il n'y a pas de prescription concernant la pureté inclusionnaire ;
- Il y a possibilité de prescriptions particulières quant à la résistance à la rupture fragile, l'aptitude à la déformation ;
- Lorsqu'ils sont alliés, ces aciers de qualité peuvent comporter des additions d'éléments d'alliage dans les limites suivantes :

$Mn \leq 1\%$   $Cr \leq 0,5\%$   $Ni \leq 0,5\%$   $Mo \leq 0,1\%$   $Cu \leq 0,5\%$   $Nb \leq 0,08\%$   $V \leq 0,12\%$

**I.3.3 Aciers spéciaux**

Ils ont les caractéristiques suivantes :

- Généralement, ils apportent une réponse régulière aux traitements thermiques ;

- Il existe avec eux des possibilités de prescription particulières quant à ;
  - L'état inclusionnaire ;
  - Les teneurs maximales en soufre et en phosphore ;
  - La résistance à la rupture fragile ;
  - La soudabilité ;
  - La formabilité à froid : emboutissage, frappe, extrusion, tréfilage ...

En fin, on peut dire que les aciers d'usage général sont des aciers qui possèdent leurs caractéristiques d'emploi à la sortie de l'usine du producteur.

#### **I.4 Classement des produits**

Les aciers d'usage général, étant livrés près à l'emploi, le sont donc sous de formes géométriques correspondant aux besoins des utilisateurs et que l'on peut définir comme suit, selon la norme NF EN 10079, laquelle a remplacé la norme NF A 40-01.

##### **I.4.1 Produits plats**

Leur section droite est presque rectangulaire, la largeur étant très supérieure à l'épaisseur. Parmi eux, on distingue :

###### **A. Les produits plats laminés à chaud non revêtus** comportant :

- Les tôles minces (épaisseur  $< 3$  mm) ;
- Les tôles fortes (épaisseur  $\geq 3$  mm) ;
- Les larges plats (épaisseur  $> 4$  mm, largeur  $> 150$ mm, livrés à plat) ;
- Les bandes livrées en bobines (large bande à chaud si la largeur est  $\geq 600$  mm, feuillard à chaud si la largeur est  $< 600$  mm).

###### **B. Les produits plats laminés à froid non revêtus** (obtenus par réduction de section supérieure à 25% réalisée par laminage à froid de produits préalablement laminés à chaud) comportant :

- Les tôles (largeur  $> 600$  mm) ;
- Les bandes livrées en bobines (large bande à froid si la largeur est  $\geq 600$  mm, feuillard à froid si la largeur est  $< 600$  mm).

###### **C. Produits longs laminés à chaud** ce sont les produits suivants :

- Les fils machine, produits de dimension nominale supérieure à 5 mm enroulés à chaud en couronnes à spires non jointives ;
- Les barres : ronds, carrés, hexagones, octogones, plats ;
- Les profilés laminés à chaud : rails, palplanches, pieux, poutrelles, et autres profilés (cornières, U, T, plats à boudin) ;
- Les profilés soudés ;

- Les profilés longs formés à froid ;
- Les produits tubulaires.

**D. Produits spéciaux** : Ils sont destinés à des emplois particuliers ou à subir des transformations ultérieures. Ils comportent :

- Les armatures passives pour le béton : barres droites ou couronnes à surface lisse ;
- Les palplanches : laminées à chaud ou profilées à froid ;
- Le matériel de voies ferrées : rails, traverses, éclisses, etc... ;
- Les profilés à froid formés par pliage ou en continu de produits plats ;
- Le fil machine : produit à section droite, circulaire, ovale, rectangulaire, hexagonal ou autre.

## I.5 Rappel de données métallurgique de base

### I.5.1 acier à structure ferrito-perlitique

La très grande majorité des aciers d'usage général est livrée et employée à l'état ferrito-perlitique. Ceci signifie qu'ils sont constitués de grains de ferrite juxtaposés avec des pseudo-grains de perlite- agrégat constitué lui-même de particules de ferrite et de particules de carbure de fer  $Fe_3C$ .

#### ✓ Ferrite

La ferrite est constituée essentiellement de **fer  $\alpha$**  qui ne peut contenir en **solution solide d'insertion** qu'au maximum **0,02 % de carbone**, vers  $725^\circ C$ .

#### ✓ Perlite

La perlite contient pratiquement tout le carbone de ces aciers sous forme de carbures précipités. L'agrégat perlitique est ainsi constitué d'une **juxtaposition de petites particules de ferrite et de carbure**.

### I.5.2 autres éléments constitutifs

Les aciers d'usage général sont des aciers au carbone ; ils contiennent toutefois quelques éléments autres, présents pour différentes raisons tel que le soufre, le manganèse, l'azote, le soufre, le phosphore. Comme ils peuvent recevoir dans certains cas des additions particulières d'éléments tel que le nickel, le chrome et molybdène, le niobium et vanadium, le cuivre.

Norme	Nuances	Observations
NF EN 10025, Décembre 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés.	S235, S275 et S355	Acier au C-Mn
NF EN 10113-1 et 2, Juin 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins.	S275 N, S355 N, S420 N et S460 N	Aciers micro-alliés normalisés

NF EN 10113-1 et 3, Juin 1993 : Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins.	S275 M, S355 M, S420 M et S460 M	Aciers micro-alliés thermomécaniques
NF EN 10137, Décembre 1995 : Tôles et larges plats en aciers de construction à haute limite d'élasticité à l'état trempé ou revenu ou durci par précipitation (Ancienne norme NF A 36-204) Partie 2 : Aciers à l'état trempé et revenu.  Partie 3 : Aciers durcis par précipitation.	S460 Q, S500 Q S550 Q, S620 Q S690 Q, S890 Q et S960 Q  S500 A, S550 A, S620 A et S960 A	Aciers traités
NF EN 10162, Octobre 1977 : Profilés formés à froid d'usage courant en acier.	S235, S275, S255 (NF EN 10025) 1C, 3C, 3CT (NF A 36-301) C01RR à C10RR (NF A 36-102) FeP01 à FeP06 (NF ENN 10130)	Aciers au C et C-Mn (s'appliquent aussi à des aciers galvanisés)

Tableau I.2 : Normes générales des aciers d'usage général

Norme	Nuances	Observations
Tôles NF EN 10149, Décembre 1995 : Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid.	S315 MC, S355 MC, S420 MC, S460 MC, S500 MC, S550 MC, S600 MC, S650 MC, S700 MC, S260 NC, S315 NC, S355NC, S420 NC,	Aciers micro-alliés
NF EN 10268, Juin 1992 : Produits plats laminés à froid en aciers micro-alliés soudables à haute limite d'élasticité pour formage à froid.	H240 M, H260 M, H280 M, H315 M, H355 M,	Aciers micro-alliés
NF EN 10111, Juin 1992 : Tôles et bandes laminées à chaud en continu, en aciers pour emboutissage ou pliage à froid.	1C, 3C, 3CT	Aciers non alliés à bas C

NF EN 10130, Juillet 1991 : Produits plats laminés à froid, en aciers doux pour emboutissage ou pliage à froid.	FeP01 à FeP06	Aciers non alliés à bas C
Bandes et Feuillards  NF A 36-102, Septembre 1993 : Bandes laminées à chaud en continu en aciers non alliés et alliés pour relaminage à froid.  NF EN 10139, Décembre 1997 : Feuillards non revêtus laminés à froid en acier doux pour formage à froid (remplace NF A 37-501)	C01RR à C125RR  DC01, DC03, DC04, DC05, DC06,	Aciers non alliés  Aciers non alliés
Barres et fils NF A 35-049, décembre 1984 : Barres et fils machine en acier d'usage général destiné à l'étirage.  NF EN 10016, Aout 1995 : destiné au tréfilage et au laminage à froid.  NF A 35-053, Juin 1984 : Fils machine en acier non allié pour fabrication réalisée par formage à chaud ou à froid.	E28, E36, A37, A50, A60, A70  C4D à C92D : 30 nuances  FB5 à FB18	Aciers au C-Mn  Aciers au C-Mn  Aciers au C-Mn

Tableau I.3 : Aciers d'usage général pour transformation

Norme	Nuances	Observations
Tôles <ul style="list-style-type: none"> <li>Bouteilles à gaz</li> </ul> NF EN 10120, Avril 1997 : Tôles et bandes pour bouteilles à gaz soudées en acier (remplace NF A 36-211). <ul style="list-style-type: none"> <li>Chaudières et appareils à pression</li> </ul> NF EN 10207, Mars 1992 : Aciers pour appareils à pression simple <ul style="list-style-type: none"> <li>Conditions techniques de livraison des tôles, bandes et barres.</li> </ul> NF EN 10028-1 et 2, Décembre 1992 :	P245 NB, P265 NB, P310 NB, P355 NB  SPH 235, SPH 265, SPH 275,  P235 GH, P265 GH, P295 GH, P355 GH,	Aciers non alliés  Aciers non alliés  Aciers non alliés

<p>Produits plats en acier pour appareils à pression - Aciers non alliés et alliés avec caractéristiques spécifiques à température élevées.</p> <p>NF EN 10028-1 et 3, Décembre 1992 :</p> <p>Produits plats en acier pour appareils à pression - Aciers soudables à grains fins normalisés.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Constructions marines NF EN 102225, Juillet 1985 : Tôles destinées à la fabrication d'éléments de plates-formes et de structures marines.</li> </ul>	<p>P275 N, P275 NH, P275 NL1, P275 NL2, P355 N, P355 NH, P355 NL1, P355 NL2, P460 N, P460 NH, P460 NL1, P460 NL2</p> <p>PF24, PF28, PF36,</p>	<p>Aciers micro-alliés</p> <p>Aciers au C-Mn ou micro-alliés</p>
<p>Fils et barres</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Armatures pour béton armé</li> </ul> <p>NF A 35-016, Octobre 1996 : Armatures pour béton armé - Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FeE500- Treillis soudés constitués de ces armatures.</p> <p>NF A 35-019, Octobre 1996 : Armatures pour béton armé – armatures constituées de fils soudables à empreintes. (remplace avec NF A 35-016 d'octobre 1996, la norme NF A 35-019 de Juillet 1984). Partie 1 : Barres et couronnes Partie 2 : Treillis soudés.</p>	<p>FeE500</p> <p>FeE500-2</p>	<p>Aciers non alliés</p> <p>Aciers non alliés</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ressorts</li> </ul> <p>NF A 35-057, Décembre 1979 : Fils machine en acier non allié destiné à la fabrication des fils pour ressorts mécaniques à haute endurance formés à froid.</p> <p>NF A 47-301, Mars 1976 : Fils ronds en aciers durs non alliés patentés, tréfilés pour ressorts.</p>	<p>FMR62 à FMR86 : 10 nuances</p> <p>Voir NF A 35-051</p>	<p>Acier au C</p> <p>Acier au C</p>

Tableau I.4 : Aciers d'usage général pour emploi particuliers



Norme	Nuances	Observations
NF EN 10155, Septembre 1993 : Acier de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique.	S235...W, S355...WP, S355...W,	Aciers faiblement alliés au Cr, Cu et éventuellement Ni et/ou P.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produits revêtus</li> </ul> Voir les normes des produits revêtus de : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zinc (NF EN 10142, NF EN 10147, NF EN 10152)</li> <li>- Plomb (NF A 36-330)</li> <li>- Aluminium (NF A 36-345)</li> <li>- Aluminium + Silicium (NF EN 10154)</li> <li>- Aluminium + Zinc (NF EN 10215)</li> <li>- Zinc + Aluminium (NF EN 10214)</li> <li>- Fer chromé (NF EN 10202)</li> <li>- Etain (NF EN 10203)</li> <li>- Matières organiques (NF EN 10169)</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection provisoire</li> </ul> NF EN 10238, Décembre 1996 : Produits en aciers de construction grenillés et prépeints par traitement automatique.	Aciers des normes NF EN 10025 et NF EN 10113-2	Doivent être peints après mise en œuvre
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une situation particulière</li> </ul> NF A 36-250, Juin 1987 : Tôles plaquées.	Aciers des normes NF EN 10028	Placage en aciers inoxydables ou réfractaires

Tableau I.5 : Aciers d'usage général pour emploi face à la corrosion

## I.6 Applications

Les aciers d'usage général sont tout d'abord employés pour la construction métallique et notamment pour la réalisation des structures suivantes :

- Charpentes ;
- Ponts ;
- Pylônes ;
- Réservoirs et appareils à pression ;
- Charpentes pour appareils de levage et manutention ;
- Trémies et silos

Ils sont également utilisés pour divers autres usages tels que les ouvrages d'art et plateformes marines et peuvent aussi constituer des éléments de structures mobiles dans le matériel ferroviaire roulant, l'automobile, le machinisme agricole, ainsi que des ensembles supports (bâtis) de construction mécanique.

### **I.7 Aciers spéciaux de construction mécanique**

Selon la norme européenne NF EN 10020, un acier spécial est, la plupart du temps, destiné à un traitement thermique (trempe et revenu, trempe superficielle, etc...). De ce fait, il se caractérise par une réponse régulière à ce traitement. Sa composition, ajustée dans le cadre d'une élaboration particulière, lui confère une bonne propriété inclusionnaire, des facilités de façonnage et des aptitudes particulières à l'emploi. Il peut être allié ou non.

Selon la même norme, un acier a généralement une teneur en carbone inférieure à 2 %, cette valeur marquant la limite courante entre les aciers et les fontes.

En utilisant les traitements thermiques industriels de durcissement pour les aciers spéciaux de construction, on garantit un compromis judicieux entre les caractéristiques de résistance et celles de ductilité.

#### **I.7.1 Principe du durcissement des aciers**

Au voisinage de la température ambiante, le fer présente des caractéristiques de résistance assez faibles ( $R_e$  de l'ordre de 110 N/mm<sup>2</sup> à 120 N/mm<sup>2</sup>). Pour les augmenter, il faut leur apporter des durcissements tels que le durcissement par écrouissage, durcissement par les éléments en solution solide, durcissement par les joints de grains, durcissement par des précipités.

### **I.8 Définitions, notions de base et classification des fontes**

Les alliages de fonderie constituent un ensemble de matériaux métalliques permettant la réalisation de pièces par moulage.

Les propriétés des pièces qui en résultent dépendent étroitement des facteurs suivants :

- L'élaboration et le traitement du métal liquide ;
- La solidification et le refroidissement dans le moule ;
- Les conditions de démoulage et de refroidissement ;
- Les traitements thermiques complémentaires éventuels.

Parmi les alliages de fonderie, les fontes ont une grande importance, elles forment une famille de matériaux ferreux.

#### **I.8.1 Définition métallurgique des fontes**

Une fonte, qu'elle soit produite dans une usine sidérurgique pour être transformée en acier ou qu'elle soit élaborée dans une fonderie, afin de couler des pièces dans des moules, peut

se définir comme un alliage à **base de fer et de carbone**, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1100 et 1350 °C.

### I.8.2 Composition chimique

En dehors du fer et du carbone, quatre autres éléments entrent principalement dans la composition des fontes non alliées :

- Le silicium (1 à 3 %) ;
- Le manganèse (0,1 à 1 %) ;
- Le soufre (jusqu'à 0,15 %) ;
- Le phosphore (jusqu'à 0,15 %) (jusqu'à 1,3 %)

Toute fonte industrielle contient aussi, parfois volontairement ajoutés, des éléments à l'état de **traces** utiles, eu égard à la qualité recherchée.

Les propriétés peuvent être améliorées ou ajustées en vue de certaines applications grâce à des éléments d'alliage, les principaux sont les suivants :

- Le nickel (jusqu'à 35 %) ;
- Le chrome (jusqu'à 30 %) ;
- Le molybdène (jusqu'à 3 %) ;
- Le cuivre, l'étain, le vanadium, l'aluminium, ....

### I.8.3 Classification industrielle

Selon les considérations métallurgiques, les fontes sont classées en six grandes familles :

#### 1. Fontes grises à graphite lamellaire

Ces alliages sont connus sous le nom de fontes ordinaires car ce sont les plus anciennes utilisées en construction mécanique. Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- La résistance à la traction ne dépasse jamais 400 Mpa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;
- Leur dureté est modérée (200-280 HB) ;
- Elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure ;
- Elles amortissent bien les vibrations ;
- Elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur ;
- Elles peuvent recevoir couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage,

En revanche, elles cassent sans déformation plastique apparente, ce qui les fait considérer comme **fragiles**.

## 2. Fonte à graphite sphéroïdal (FGS)

Dites aussi parfois fontes ductiles, sont obtenues par un **traitement spécifique du métal liquide** qui provoque au moment de la solidification un graphite non pas en lamelle mais sous forme de particules quasi sphériques (10 à 100 µm de diamètre).

## 3. Fonte à graphite vermiculaire

C'est une variété de fontes qui se développe lentement dans un champ d'application limité où l'on a besoin de propriétés combinant celles de fontes grises et celles de fontes graphite sphéroïdal. Les microstructures dites « vermiculaire » ou « compacte » du graphite composé de particules non sphériques, de forme allongée, mais beaucoup moins ramifiées que les lamelles des fontes grises, est obtenue par un traitement sur métal liquide dérivé de celui des fontes à graphite sphéroïdal.

## 4. Fontes blanches et fontes trempées

### - Fontes blanches

Les fontes blanches sont caractérisées par l'**absence complète du graphite** car le carbone, en excès, est combiné au fer sous forme de carbures métastables.

Les fontes blanches sont dures mais sont fragiles, résistent à l'usure abrasive mais elles ne sont pas usinables à l'outil coupant.

### - Fontes trempées

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule ou toute autre partie, ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche sous l'effet d'une **trempe primaire**, tandis que le cœur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou à graphite sphéroïdal.

## 5. Fontes malléables

Par un recuit approprié, on peut industriellement décomposer les carbures primaires d'une fonte blanche suivant la réaction :  $\text{Fe}_3\text{C} \longrightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$  (graphite)

Ici le graphite précipite, alors que la matrice, à l'état solide est sous forme de particules non sphériques. Parmi ce type de fonte, il existe les fontes malléables à « cœur noir », les fontes à « cœur blanc ».

## 6. Les fontes spéciales alliées

La métallurgie de fontes permet d'améliorer leurs propriétés en vue d'application définies et selon les mêmes principes que la métallurgie des aciers : apport d'éléments

d'alliage, traitements thermiques. Ainsi, malgré les spécificités des fontes, on retrouve le type de classification : Fontes peu alliées et modérément alliées.

### I.9 Désignation rationnelle d'une fonte

Dans les relations industrielles et commerciales, il convient évidemment d'utiliser, en priorité, quand elles existent, les définitions et classifications normalisées.

La norme **NF EN 1560** précise la désignation des différentes familles de fontes. Cette désignation symbolique est constituée des six indications suivantes :

- **Indication n°1 obligatoire** : les lettres EN précisent qu'il s'agit d'une nuance normalisée :
- **Indication n°2 obligatoire** : les lettres G (produit moulé) et J (fonte) ;
- **Indication n°3 optionnelle** : une lettre précisant, si nécessaire, la structure du graphite selon les correspondances suivantes :

L = lamellaire                  S = sphéroïdal                  M = malléable  
 V = vermiculaire              N = sans graphite              Y = structure spéciale

- **Indication n°4 optionnelle** : une lettre précisant, si nécessaire, la structure micro - ou macrographique selon les correspondances suivantes :

A = austénite      F = ferrite      P = perlite      M = martensite  
 L = ledéburite      Q = trempe      T = trempe et revenu      B = cœur noir      W = cœur blanc

- **Indication n°5 obligatoire en a ou b** :

**a.** Si elles sont classées selon leurs propriétés mécaniques :

- La résistance à la traction en Mpa, l'allongement en %, la résilience. On peut préciser le style d'échantillonnage par une des lettres S (coulée séparément), V (essai attenant), ou C (prélevé sur pièce) ;

Exemple : EN GJS-400-18S.

**b.** Si elles sont classées selon leurs compositions chimiques, la lettre X est suivie des principaux éléments d'alliage et de leurs teneurs en %.

Exemple : EN GJL-XNi Mn 13-7

- **Indication n°6 optionnelle** : des exigences complémentaires peuvent être préconisées :

D = brute de fonderie      H = ayant subi un traitement thermique, etc...

Symboles	Anciens symboles français	Classifications	
EN GJL...	FGL	Fontes grises à graphites lamellaires	Non alliées
EN GJS...	FGS	Fontes à graphite sphéroïdal – ou ductiles ou fontes GS -	Non alliées
EN GJV...	FGV	Fontes à graphite vermiculaire	Non alliées
EN GJN...	FBC	Fontes blanches – carburiques sans graphite -	Non alliées
EN GJMB...	FMN	Fontes malléables à cœur noir – avec graphite en nodules -	Non alliées
EN GJMW...	FMB	Fontes malléables à cœur blanc – décarburées sur quelques millimètres – Fontes spéciales alliées – nickel, chrome, molybdène, vanadium, étain, silicium, aluminium, ...	Non alliées Modérément ou fortement alliées

Tableau I.6 : Classification des fontes

Matrice Graphite	Matrice					
	Perlite	Perlite + Ferrite	Ferrite	Austénite	Martensite	Bainite, constituants de trempe et revenu,...
Lamellaire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Sphéroïdal ou vermiculaire	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
En nodules de recuit	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Pas de graphite - Carbures -	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau I.7 : Structures possibles des fontes industrielles normales

### I.10 normalisation des fontes

Un long et important effort a été conduit par l'AFNOR et le bureau de normalisation de la fonderie BNIF de développer et tenir à jour les normes de fonderie, particulièrement celles qui permettent de définir et de classer en « nuances ou en « qualités » les matériaux constituant les pièces moulées en fonte.

#### I.10.1 Symbolisation normalisée des fontes

La norme NF EN 1560 (mai 1989) : Produits de fonderie - Désignation conventionnelle des fontes de toutes catégories peut être résumée en ce qui suit :

Les **symboles** des principales familles de fontes sont les suivants :

Nouvelle symbolisation Française	Type de fonte	Nouvelle symbolisation Française
EN GJL	Fonte grise à graphite lamellaire	EN FGL
EN GJS	Fonte à graphite sphéroïdal	EN FGS
EN GJV	Fonte à graphite vermiculaire	EN FGV
EN GJMB	Fonte malléable à cœur noir (graphite nodulaire)	EN FMN
EN GJMW	V Fonte malléable à cœur blanc	EN FMB
EN GJN	Fonte blanche (carbure)	EN FBC
EN GJF	Fonte blanche spéciale à matrice ferritique	EN FBF

Tableau I.8 : Symboles des principales familles de fontes

Ces lettres sont suivies de chiffres précisant la valeur minimale de la résistance à la traction  $R_m$  (en Mpa) et, le cas échéant, de l'allongement de rupture ou une valeur nominale de dureté ; dans ce dernier cas, le nombre est précédé de HB. Des indications sur les teneurs en éléments d'alliages - composition normalisée ou non – figurent à la suite s'il y a lieu.

## I.11 Métaux et alliage non ferreux

### I.11.1 Aluminium et alliage d'aluminium

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854 et il est actuellement le premier métal non ferreux en tonnage.

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolite fondue à environ 1000 °C.

Pour obtenir une tonne d'aluminium, il faut :

- 1900 kg d'alumine ;
- 380 kg de coke ;
- 100 kg de brai ;
- 15 kg de produits cryolithiques
- 13000 kWh d'énergie électrique.

### I.11.2 Désignation des alliages d'aluminium

L'aluminium liquide, éventuellement allié avec différents éléments d'addition, afin d'obtenir l'alliage désiré, est coulé par les procédés suivants :

- Coulée semi-continue sous forme de plaques pour laminage ou de billettes pour filage ou forgeage.

- Coulée et laminage continu sous forme de fil machine de diamètre de 7 à 25 mm.
- Directement dans des lingotières afin d'obtenir des lingots en aluminium ou alliage de moulage.

L'aluminium et ses alliages se prêtent particulièrement bien aux différents modes de transformation.

On distingue les deux grandes classes d'alliages d'aluminium suivants :

- 1- Les **alliages corroyés**, produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le
- 2- Filage, le laminage ;
- 3- Les **alliages de moulage**, obtenus directement par fonderie.

La désignation de ces alliages est faite suivant des règles très précises.

#### I.11.2.1 Désignation des alliages corroyés

La désignation conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dont le premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium (tableau I.9)

Eléments d'alliage	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et Silicium	6000
Zinc (et cuivre)	7000

Tableau I.10 : Familles d'alliages d'aluminium corroyés

#### Remarque

La lettre A (ou B) peut suivre les quatre chiffres de la désignation numérique, par exemple 2017A.

#### I.11.2.2 Etat de livraison

Ils sont conformes à la norme Afnor NF EN 515 qui désigne :

- L'état métallurgique de base par une lettre F, O, H ou T (tableau I.11)
- Le **moyen principal d'obtention** par un ou plusieurs **chiffres** complémentaires.



Symbole	Etat métallurgique
F	Brute de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui et éventuellement restauré ou stabilisé
T	Durci par traitement thermique

I.11 : Désignation des états métallurgique de base

Les états F et O ne comprennent pas de subdivision. Les états H et S comprennent les subdivisions suivantes :

➤ Subdivision de l'état H :

- Le premier chiffre indique le moyen principal d'obtention du produit.

H1 : Ecrouissage ;

H2 : Ecrouissage puis restauration ;

H3 : Ecrouissage puis stabilisation.

- Le second chiffre indique le niveau de dureté du métal.

2 : Etat quart dur ;

4 : Etat demi dur

6 : trois quart dur ;

8 : Etat dur ;

9 : Etat extra dur

➤ Subdivision de l'état T

Traitements généraux (processus de base)		Symbole	
Traité thermiquement avec mise en solution séparée	Sans écrouissage complémentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mûri</li> <li>- Revenu</li> <li>- Sur-revenu</li> </ul>	TT4 T6 T7
	Avec écrouissage complémentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ecroui puis mûri</li> <li>- Ecroui puis revenu</li> <li>- Revenu puis écroui</li> </ul>	T3 T8 T9
Traité thermiquement sans mise en solution séparée	Sans écrouissage Complémentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mûri</li> <li>- Revenu</li> </ul>	T1 T5
	Avec écrouissage complémentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ecroui puis mûri</li> <li>- Ecroui puis revenu</li> </ul>	T2 T10
Traitements particuliers et complémentaires		Symbole	
Revenu	Revenu « doux »	T51-T61	
	Revenu « dur »	T56-T66	
	Sur-revenu	T7	
Relaxation	Par traction	Tx51	
	Par compression	Tx52	
	Par traction et compression	Tx54	

Tableau I.12 : Tableau simplifié des traitements thermiques et/ou mécaniques courants avec leurs symboles respectifs

## I.12 Les métaux précieux et leurs alliages

### I.12.1 Notions de base

#### I.12.1.1 Désignation

Le terme « métaux précieux » s'applique à des métaux qui se distinguent par des propriétés exceptionnelles. On désigne traditionnellement par « métaux précieux » l'or (Au), l'argent (Ag) et le platine (Pt). Il faut y ajouter l'ensemble des métaux dits de « la mine de platine », c'est-à-dire le palladium (Pd), le rhodium (Rh), l'iridium (Ir) ; le ruthénium (Ru) et l'osmium (Os) qui, avec le platine forment la famille des six platinoïdes.

Métal	Origine	Pays producteurs
Argent	Sous-produits des mines de cuivre, plomb, zinc	Mexique, Pérou, Amérique du nord, Australie, Chili
Or	Mines d'or	Afrique du sud, Australie, Amérique du nord, chine
Platine	Mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Palladium	Mine de nickel, mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Rhodium	Mine de platine	Afrique du sud, Russie, Amérique du nord
Iridium	Mine de platine	Afrique du sud
Ruthénium	Mine de platine	Afrique du sud
Osmium	Mine de platine	Afrique du sud

Tableau I.13 : Ressources minières

## I.13 Alliage à mémoire de forme

La dénomination **alliages à mémoire de forme** (AMF) regroupe un ensemble d'alliages métalliques présentant la particularité de reprendre leur forme initiale après avoir été déformés au-delà du domaine élastique usuel.

## I.14 Matières plastiques (Polymères)

### I.14.1 Définitions

On appelle **polymère** une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées **monomères** (ou motifs monomères) reliées par des **liaisons covalentes**. Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire. Le terme macromolécule est souvent utilisé à la place de polymère. La polymérisation est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules. Les noyaux des

monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés). Un homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques. Un copolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou d'origine synthétique. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines... Les macromolécules synthétiques sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC, le PTFE, les polyesters, les polycarbonates, les polysiloxanes, les polyimides...

### I.14.2 Structure des polymères

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement, cristallisés.

#### I.14.2.1 Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse. La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. La figure I.3 donne différents exemples de polymères linéaires.

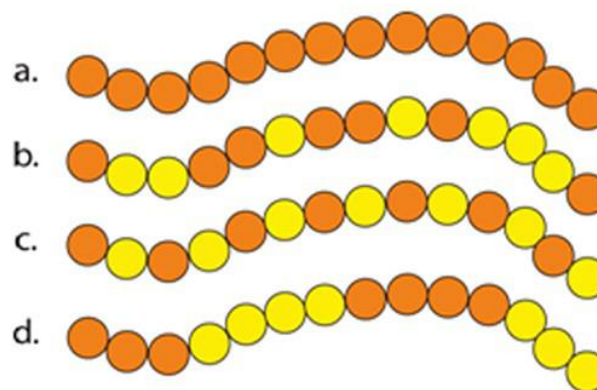


Figure I.3 : polymères linéaires

(a.: homopolymère, b. : copolymère statistique, c. : copolymère alterné, d. : copolymère séquencé)

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.

### I.14.2.2 Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.

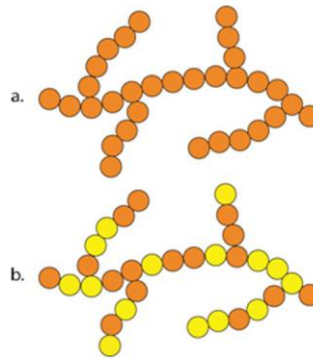


Figure I.4 : Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

### I.14.2.3 Polymères amorphes et polymères cristallisés

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituent ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé », sans ordre moléculaire à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles.

Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

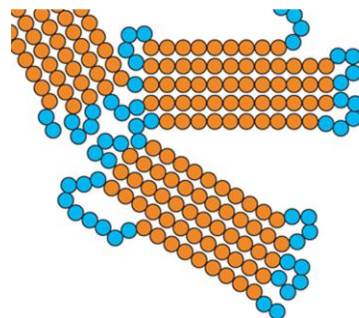


Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

### I.14.5 Propriétés des polymères

Les polymères présentent des caractéristiques mécaniques propres. Ils présentent un comportement vitreux lorsqu'ils sont amorphes, des caractéristiques de fibres lorsqu'ils sont cristallisés mais également un comportement visco-élastique (voir chapitre propriétés physiques, rhéologie).

Ces différents états dépendent principalement de la nature chimique du polymère et de la température. La nature chimique des macromolécules est liée à leur origine qui est soit naturelle, soit synthétique.

Leur structure, leur masse moléculaire, leur caractère linéaire ramifié ou non, réticulé ou non déterminent fortement leurs propriétés physico-chimiques. Le paradoxe des macromolécules est que des chaînes très différentes par leur composition chimique peuvent avoir des propriétés physiques analogues. Certains polyesters ou silicones présentent des propriétés viscoélastiques analogues à certains hydrocarbures insaturés. À l'inverse, des polymères à chaînes chimiquement identiques peuvent avoir des propriétés physiques totalement différentes. Un même composé peut être hautement élastique ou complètement amorphe en fonction de la température et de l'arrangement macromoléculaire.

### I.14.6 Polymères thermoplastiques, thermodurcissables

Dans le cadre des résines constituées de macromolécules pour réaliser des matières plastiques, deux types de comportement très différents sont décrits en fonction de la nature et de la structure des polymères les constituant :

- Une **résine thermoplastique** est constituée de chaînes linéaires ou ramifiées à liaisons covalentes. Ces chaînes sont liées entre elles par des liaisons faibles de type Van der Waals et hydrogène par exemple. Les thermoplastiques peuvent être dissous dans certains solvants et se ramollissent à la chaleur d'où le terme « thermoplastique ».
- Une **résine thermodurcissable** est constituée de chaînes linéaires réticulées entre elles. Les chaînes sont liées dans l'espace par des liaisons fortes de type covalent. Nous sommes donc en présence d'un réseau tridimensionnel insoluble et infusible

### I.15 Matériaux composites

Un matériau composite est un assemblage entre deux composants complémentaires : une matrice de résine et des fibres de renfort. Parfois, des additifs ou des charges y sont ajoutés pour modifier certaines caractéristiques du matériau.

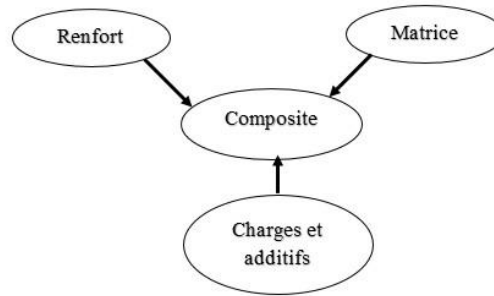


Figure I.6 : Principe d'un matériau composite

### I.15.1 Quelques définitions

- ✓ **Renfort** : Phase discontinue et souvent filamentaire à très hautes caractéristiques mécaniques qui assure le principal des contraintes mécaniques du composite (résistance, rigidité, tenue aux chocs ...)
- ✓ **Matrice** : Phase continue qui assure la cohésion, transfère et répartit les contraintes, protège des agressions extérieures les renforts et commande la mise en œuvre.

La matrice peut être constituée de :

- Résines thermodurcissables
  - Durcissement définitif lors du cycle de polymérisation : transformation irréversible ;
  - Résines époxy notamment les résines thermoplastiques sous forme de polymères mis en forme par chauffage et durcissement au cours du refroidissement : Transformation réversible.
  - Autres matrices : Métalliques, Céramiques.

La plus utilisée est la résine en polyuréthane ; très demandée dans l'industrie du transport, plus précisément dans le secteur ferroviaire, le polyuréthane est utilisé comme résine pour obtenir un matériau composite plus léger qui permet une réduction de coûts conséquente. En effet, le polyuréthane permet aux industries de réduire fortement leur consommation de carburant et les émissions de CO<sub>2</sub>. Le polyuréthane est également un excellent isolant thermique et un matériau des plus durables.

- ✓ **Charges et additifs** : Adhérence fibre/matrice, pigments de coloration agents anti-UV.

Plusieurs familles de composites sont produites et chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés.

Le composant le plus important dans la fabrication des matériaux composites est le renfort qui se trouve sous forme de fibres de :

#### 1- Fibre de verre

Très populaire, la fibre de verre est fréquemment utilisée dans l'industrie du transport. Généralement associée avec les polymères, la fibre de verre est un matériau composite très

léger qui est particulièrement apprécié pour la réduction de poids qu'il apporte sans aucune perte de performance, bien au contraire. De plus, la fibre de verre contient des propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation très élevées.

Remplaçant l'acier et réduisant considérablement le poids des matériaux, la fibre de verre est un choix de prédilection pour toutes les industries qui souhaitent obtenir un matériau plus performant aux propriétés inégalées à un coût moins dispendieux.

## 2- Fibre de carbone

Très fines, les fibres de carbone constituent de nombreux matériaux composites dans l'industrie aéronautique, aérospatiale et automobile. La fibre de carbone détient d'excellentes propriétés mécaniques, tout en étant légère et flexible. Les industries bénéficient ainsi d'un matériau composite résistant à la traction et la compression, offrant une bonne conductivité électrique et thermique et étant rigide.

Ces caractéristiques font de ce matériau composite une excellente option pour les industries à la recherche d'un matériau très léger et performant, mais reste une solution plus dispendieuse que la fibre de verre.

## 3- Fibre de Kevlar

La fibre d'aramide, aussi appelée la fibre de Kevlar, est également un matériau composite utilisé dans l'industrie du transport, aéronautique et aérospatiale. Détenant une forte résistance à la chaleur, une bonne absorption des vibrations et faisant preuve d'une haute performance mécanique, la fibre de Kevlar est un matériau très apprécié des industries malgré un coût plus élevé.

### I.16 Quelques procédés de fabrication de structures composites

#### I.16.1 Moulage au contact

Le procédé consiste à déposer sur la forme :

- une couche de surface (gel coat) ;
- des couches successives de renforts imprégnées au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante

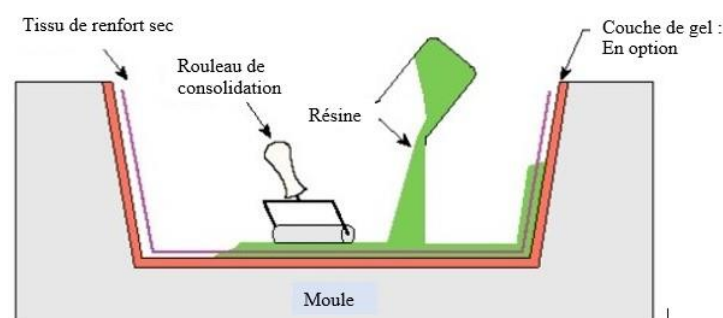


Figure I.7 : Moulage au contact des composites

### I.16.2 Moulage par projection

La résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme.

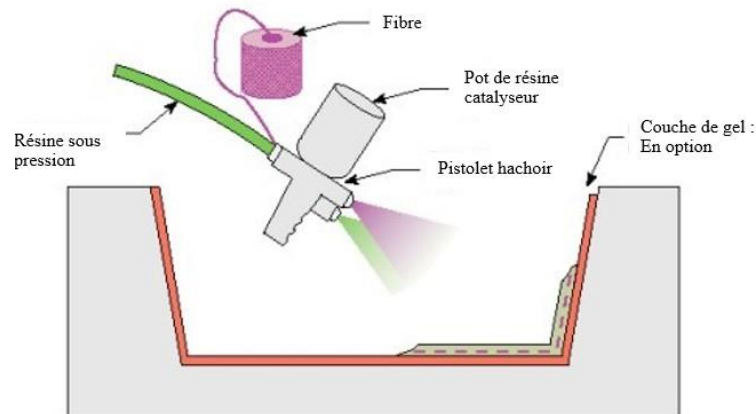


Figure I.8 : Moulage par projection des composites

### I.16.3 Moulage sous vide ou «au sac »

**Principe :**

- Dépose des tissus ou nappes pré-imprégnés (phase de drapage) ;
- Couverture de l'ensemble par une membrane souple et étanche ;
- 1 bar (vide), 7 bars ou plus en autoclave.

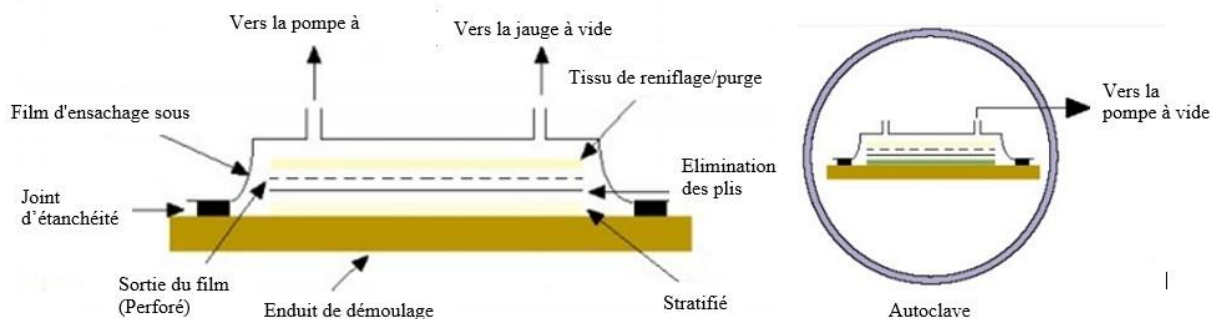


Figure I.9 : Moulage sous vide ou «au sac »

### I.16.4 Enroulement filamentaire

- Adapté aux pièces de révolution ;
- Consiste à enrouler un renfort continu imprégné de résine sur un mandrin tournant ;
- taux fibres jusqu'à 85% en volume ;

**Applications :** Mâts, cannes à pêches, shafts de golf.



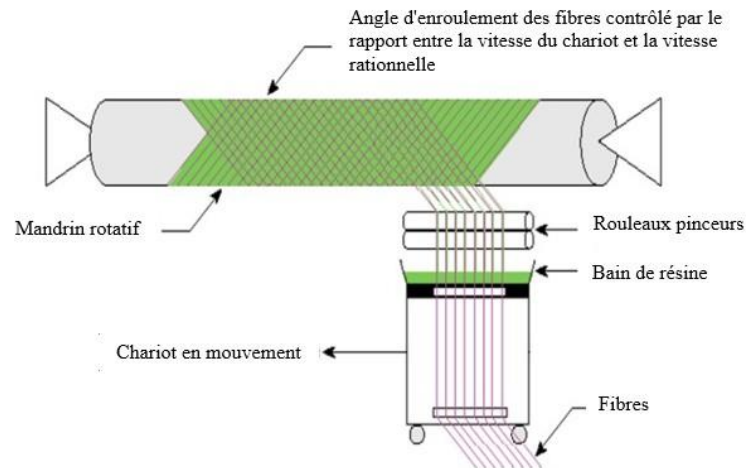


Figure I.10 : Enroulement filamentaire

### I.16.5 RTM (Resin Transfer Moulding) : Moulage par transfert de résine

- Taux de fibres élevés ;
- Environnement « santé » (procédé en moule fermé, pas de dégagement de vapeurs nocives) ;
- Moules mâle et femelle : deux faces « propres » ;
- Devrait se développer grâce à l'amélioration des méthodes de simulation de l'injection de résine.

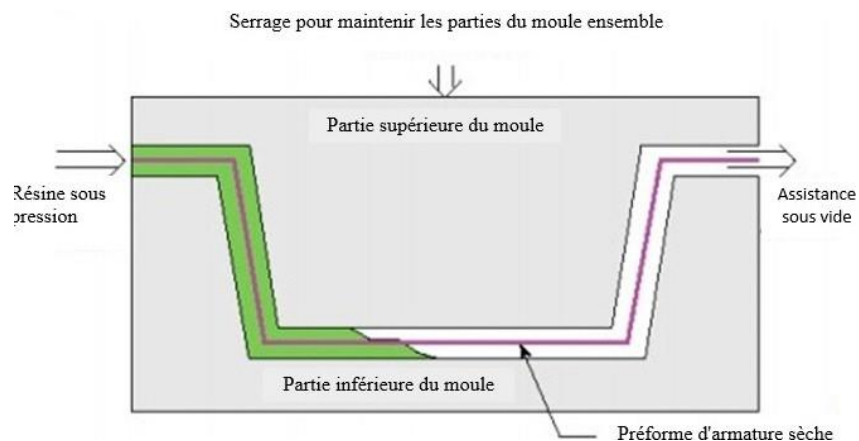


Figure I.11 : Moulage par transfert de résine

## ***Chapitre II***

# ***Procédés d'Obtention des Pièces sans Enlèvement de Matière***

## II.1 Le moulage ou fonderie : Principe

La fonderie a pour principe de porter le métal ou l'alliage à température de fusion, afin de le rendre liquide pour le verser dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) selon les dimensions souhaitées.

## II.2 Méthodes de moulage

### II.2.1 Moulage en sable (manuel ou mécanique)

Le moulage en sable silico-argileux est l'un des procédés les plus courants. Il reste le plus économique du fait de la simplicité de la régénération du sable. L'agglomérant utilisé pour la confection du moule est une argile, de type bentonite le plus souvent.

Le moulage en sable à vert utilise un modèle généralement permanent et un moule non permanent. Un moule non permanent est un moule qui ne sert qu'une seule fois pour réaliser une pièce.

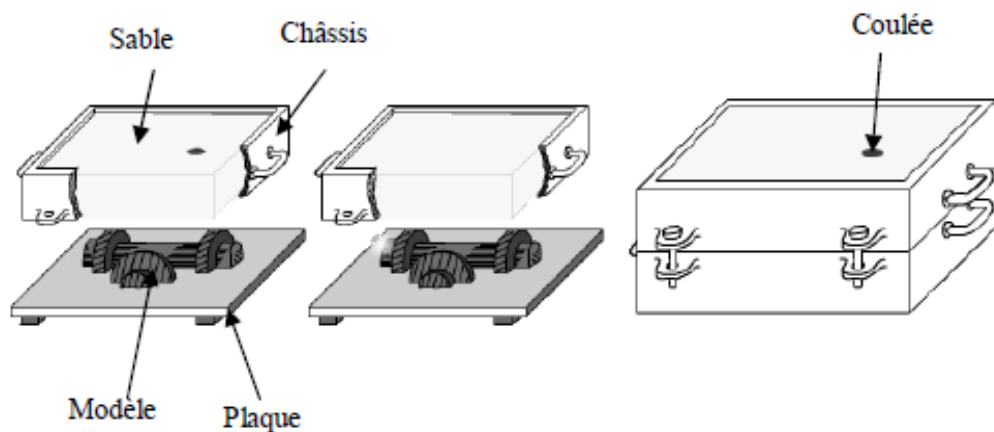


Figure II.1 : Moule en sable

- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1 . Serrage châssis inférieur | 7 . Élaboration du métal liquide |
| 2 . Retournement              | 8 . Coulée                       |
| 3 . Noyautage                 | 9 . Tunnel de refroidissement    |
| 4 . Remoulage noyau           | 10 . Déchargement puis décochage |
| 5 . Serrage châssis supérieur | 11 . Retour châssis              |
| 6 . Fermeture du moule        |                                  |

### II.2.2 Moulage métallique ou moulage en coquille : Principe

Le métal fondu, est coulé dans un moule métallique nommé "coquille" soit par gravité soit sous pression.

#### II.2.2.1 Moulage par gravité

Le moule métallique est composé de parties assemblées (en fonte ou en acier) positionnées par des goujons, un canal de coulée, des événements, des tirées d'air, des extracteurs pour l'éjection de la pièce et un ou plusieurs noyaux.

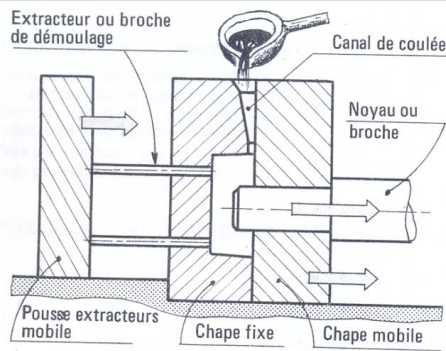


Figure II.2 : Moule fermé

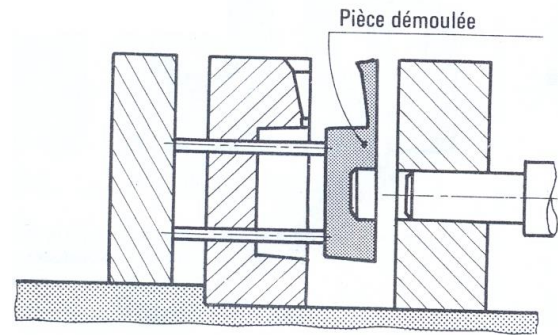


Figure II.3 : Moule ouvert

### II.2.2.2 Moulage sous pression

Durant ce procédé, le métal liquide est injecté dans le moule sous pression (30 à 100 N/mm<sup>2</sup>) en utilisant des presses à forte pression.

Le moulage sous pression est utilisé pour réaliser des grandes séries de pièces ayant une configuration compliquée et des dimensions précises. L'état de surface obtenu après ce type de moulage permet dans de nombreux cas, d'utiliser les pièces moulées sans reprise ultérieure.

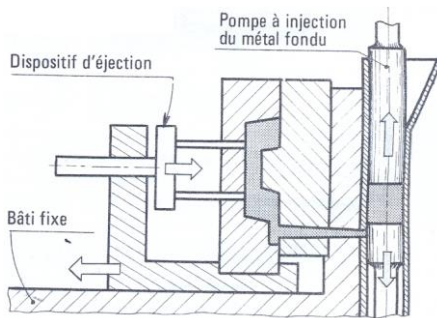


Figure II.4: Moule fermé

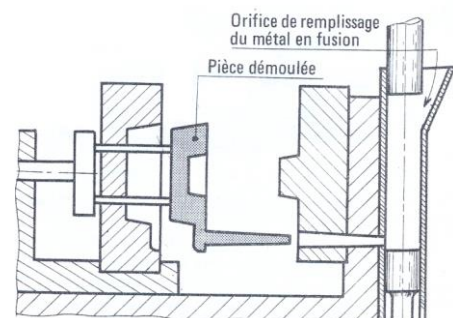


Figure II.5 : Moule ouvert

### II.2.3 Moulage en cire perdue : Principe

La première étape consiste à injecter de la cire sur un emporte-pièce en aluminium. Cela permet de créer un modèle de cire un peu plus grand que la véritable pièce, on l'utilisera par la suite pour fabriquer un moule en céramique lui aussi sera plus grand que la pièce car le métal rapetisse en refroidissant. Des composants de cire sont joints au moule permettant de créer un système de passage du métal à l'intérieur des cavités du moule. Cet assemblage de cire sera trempé dans une solution de céramique appelée barbotine.

Pour durcir la barbotine, on l'enduit de sable de zirconium fin puis on la laisse sécher. Le moule obtenu sera traité avec du sable à gros grain jusqu'à obtention d'une coquille de 7 mm d'épaisseur. L'assemblage de cire recouvert de céramique est envoyé dans un autoclave durant 5 à 10 min pour le décirage. Ce traitement fait disparaître la cire et crée un moule en céramique dont la cavité représente la forme de la pièce. Dès que ce moule est sec, on peut commencer à mouler la pièce. Mais on le place, tout d'abord, dans un four qui le chauffera pendant deux ou trois heures :

une opération essentielle pour prévenir le craquement du moule qui peut survenir en contact du métal fondu.

Après la coulée et le refroidissement, le moule en céramique sera brisé à l'aide d'un marteau vibrant pour extraire la pièce.

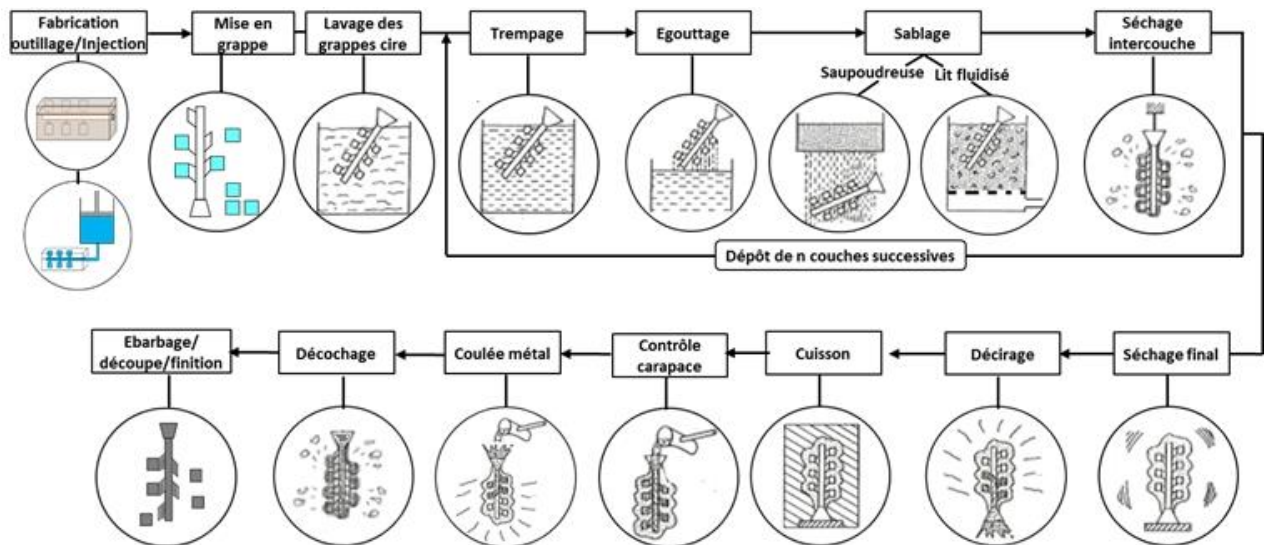


Figure II.6 : Principe du moulage en cire perdue

### II.3 Le forgeage

Dans son sens général, le forgeage est l'opération de mise en forme d'un métal malléable. Cette opération est basée sur une propriété fondamentale des alliages métalliques solides : la plasticité.

Le paramètre fondamental du procédé est la température de forgeage qui doit être supérieure à 0.5 fois la température de fusion du métal à travailler.

Un autre paramètre important est la force de mise en forme qui est fonction aussi de  $T_f$ . Ces paramètres dépendent des caractéristiques et de la qualité du produit à fabriquer, par exemple : tolérances dimensionnelles, état de surface, structure métallurgique etc....

#### II.3.1 Forgeage à la main (travail du forgeron)

Le forgeage à la main est un art qui nécessite un long et difficile apprentissage. L'équipement de base est constitué de :

- Feu de forge
- Enclume, sa table est trempée et est prolongée par deux appendices appelés bigornes
  - Différents marteaux
  - Différents pinces de forgeron
  - Outils accessoires : poinçon etc.
  - Instruments de mesure pour travaux de forgeage
  - Habillement (tablier en cuir, chaussures, gants, lunettes etc.)



Figure II.7 : Equipements de base du forgeron

### II.3.2 Forgeage mécanique ou industriel

Les différentes techniques de forgeage se ramènent toutes à la compression d'un matériau entre des outillages au moyen d'un engin qui fournit l'énergie nécessaire à l'opération.

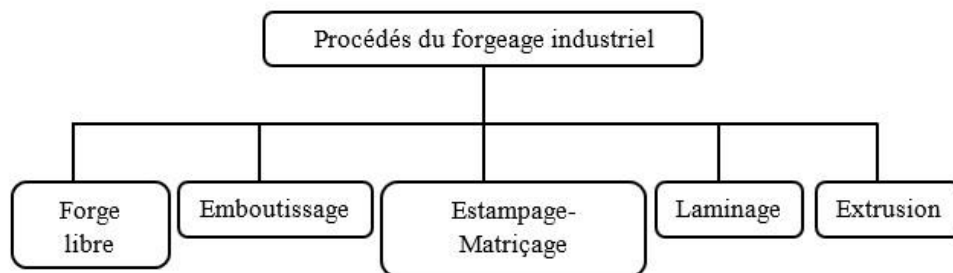


Figure II.8 : Procédés du forgeage industriel

### II.3.3 Critères de choix du procédé

- Matériau : Ferreux, non ferreux
- Type de pièce à réaliser : poids, complexité, précision
- Importance de la série à produire : grande, petite ou moyenne
- Machines à utiliser : presses (mécaniques, hydrauliques ou à vis), laminoirs, etc.

**II.3.4 Intérêt du forgeage** : génération d'un fibrage qui améliore les performances mécaniques.

### II.4 Forge libre

Permet d'obtenir à chaud, sans outillages spécifiques, avec des délais courts, des pièces unitaires ou de très petites séries. Le métal, préalablement chauffé, est travaillé sous forme d'un lopin métallique à l'aide d'une presse hydraulique voire d'un marteau-pilon.

Le forgeage est dit «libre» car, lors du forgeage, le métal est libre de se déplacer dans plusieurs directions, contrairement à l'estampage ou forgeage en matrice où le métal est enfermé dans une forme prédéfinie et n'est pas libre. Le métal sera donc écrasé entre deux outils :

- Le Tas(ou sous-étampe), fixe et de forme plate,
- La Frappe(ou étampe), mobile.

Le résultat obtenu est dépendant du savoir-faire du forgeron.

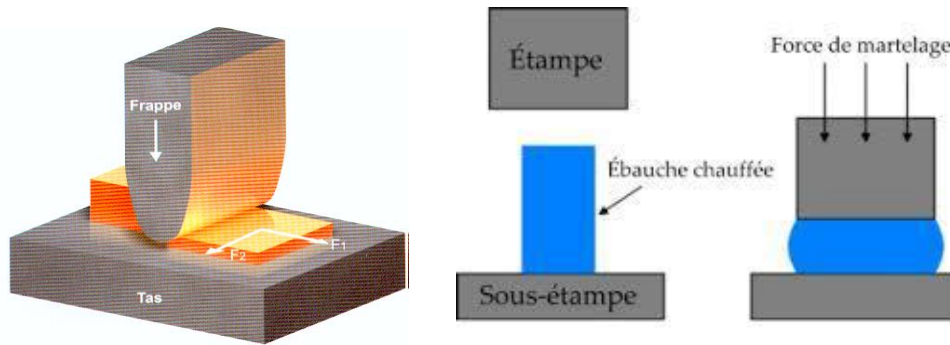


Figure II.9 : Principe de la forge libre

## II.5 Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme très utilisé dans l'industrie, permettant d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince, montées sur presse. La tôle appelée « flan », est la matière brute qui n'a pas encore été emboutie. L'opération peut être réalisée avec ou sans serre flan pour maintenir le flan contre la matrice pendant que le poinçon déforme la feuille.

### II.5.1 Conception générale d'un outil d'emboutissage :

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux dont la configuration détermine l'effet obtenu sur le flan :

- **Outils à simple effet** : configuration la plus simple, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon.
- **Outils double effet** : comprend en plus de l'outil simple effet, un serre-flan. L'outillage utilisé en emboutissage comprend donc :
  - ✓ Une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce ;
  - ✓ Un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle ;
  - ✓ Un serre-flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon, évite le plissement de la tôle et contrôle son écoulement le long du poinçon.

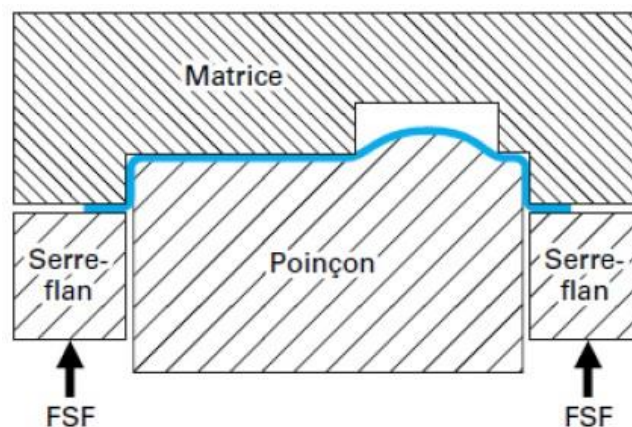


Figure II.10 : Conception générale d'un outil d'emboutissage (FSF représente la force sur le sert-flan)

**II.5.2 Méthode de formage : rôle du serre-flan.**

On classe les méthodes de formage selon le mode d'action du serre-flan. Elle est dite « Par expansion », lorsque le métal situé entre la matrice et le serre-flan est bloqué, et « Par rétreint », lorsqu'il s'écoule pour alimenter la hauteur de la pièce.

**II.5.3 Principe d'emboutissage**

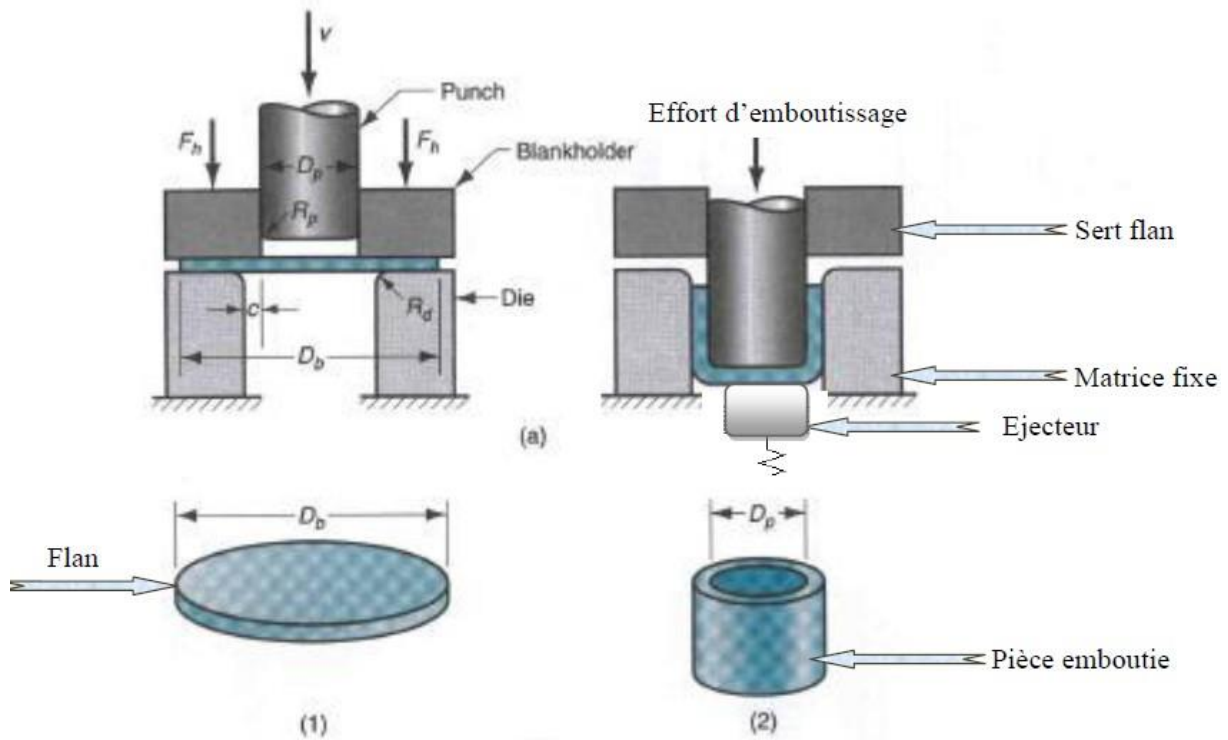


Figure II.11 : Principe d'emboutissage

**II.5.4 Effort d'emboutissage : Cas des pièces cylindriques**

**1- Pièces cylindriques sans serre-flan :**

$$F_e = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot k \text{ avec :}$$

- **F<sub>e</sub>** : Effort d'emboutissage (daN) ;
- **d** : Diamètre du poinçon (mm) ;
- **e** : épaisseur de la tôle à emboutir (mm) ;
- **R<sub>m</sub>** : Résistance pratique à la rupture par traction de la tôle (daN/mm<sup>2</sup>) ;
- **k** : Coefficient fonction du rapport  $\frac{d}{D}$  ; avec D = diamètre du flan (mm).

$\frac{d}{D}$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
<b>k</b>	1,0	0,86	0,72	0,60	0,50	0,40

Tableau II.1 : Tableau 1 : Valeurs de **k** en fonction de  $\frac{d}{D}$

**II.5.5 Effort sur le serre-flan : (Pièce cylindrique avec serre-flan).**

$$F_s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot P \text{ où :}$$



- $F_s$  : effort sur le serre-flan (daN) ;
- $P$  : Pression spécifique sur le serre-flan ( $N/mm^2$ ), en fonction du matériau.

**Remarque :** Lorsque l'emboutissage est fait avec un serre-flan, l'effort sur serre-flan est ajouté à l'effort d'emboutissage, donc, l'effort d'emboutissage devient dans ce cas :

$$F_e = \pi . d . e . R_m . k + F_s$$

## II.6 Estampage-matriçage

### II.6.1 Définitions :

Les deux termes sont synonymes cependant :

- ✓ L'estampage est un procédé de forgeage dédié au travail des aciers tandis que :
- ✓ Le matriçage est réservé aux alliages non ferreux.

### II.6.2 Principe du procédé

Le procédé consiste à mettre en forme un lopin porté à la température adéquate dans les gravures d'un jeu de matrices reproduisant en creux les formes de la pièce à réaliser. Le principe consiste à rapprocher les deux matrices ce qui force le métal à épouser les formes des gravures. Généralement, afin de remplir complètement les cavités, le métal a la possibilité de déborder des gravures ce qui génère une bavure et une opération d'ébavurage.

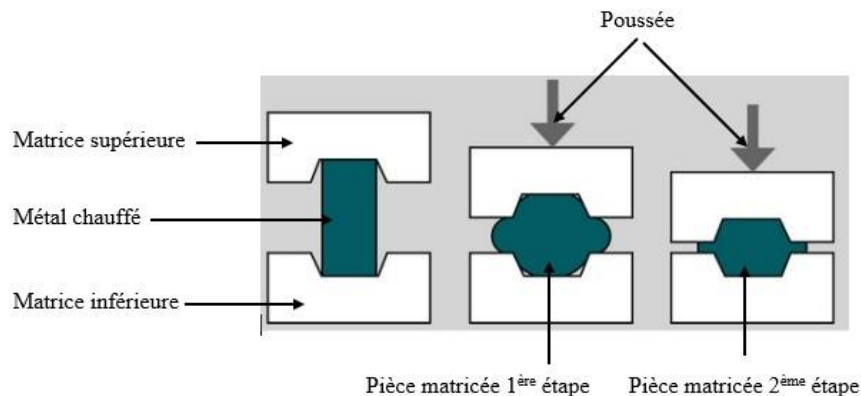


Figure II.12 : Principe de l'estampage-matriçage

Le succès du matriçage vient de trois avantages majeurs :

1. Propriétés métallurgiques : excellent compromis entre résistance, élasticité, rupture, fatigue, corrosion, résilience,
2. Gain sur le rapport tenue mécanique / masse de la pièce,
3. Réduction des coûts des usinages.

## II.7 Le laminage

Parmi les techniques de formage les plus répandues dans l'industrie on trouve le laminage. Cette opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur par compression, s'effectue par passage de celui-ci entre deux ou plusieurs cylindres appelés laminoirs tournant autour de leurs axes : c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

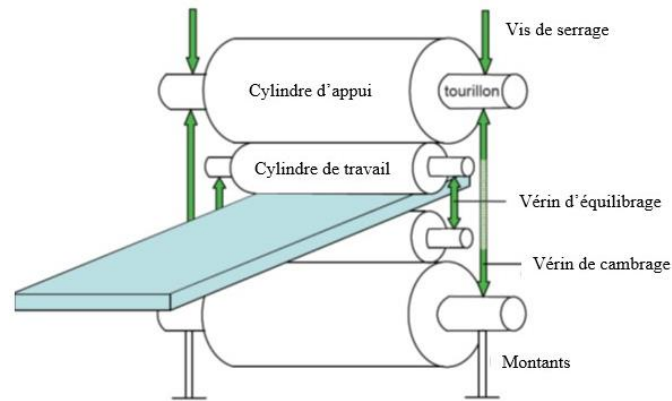


Figure II.13 : Principe du laminage

### II.7.1 Laminage à froid et Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales : La première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température.

La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recristallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet.

Nous pouvons voir schématiquement les divers phénomènes apparaissant lors de la mise en forme par déformation plastique.

# ***CHAPITRE III***

## ***Procédés d'Obtention des Pièces par Enlèvement de Matière***

### III.1 Introduction

La mise en œuvre des opérations d'usinage pour réaliser une pièce ou une famille de pièces est un problème complexe du fait de la multiplicité des procédés disponibles et de la grande variété des spécifications des pièces et des propriétés des matériaux constitutifs.

L'usinage par enlèvement de matière regroupe l'ensemble des techniques de fabrication de pièces mécaniques. A partir d'une pièce brute ou semi-finie, on enlève de la matière afin d'obtenir la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. L'avantage de ce procédé par rapport à la plupart des procédés de fabrication est qu'il permet une grande précision quant à la géométrie obtenue.

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante :

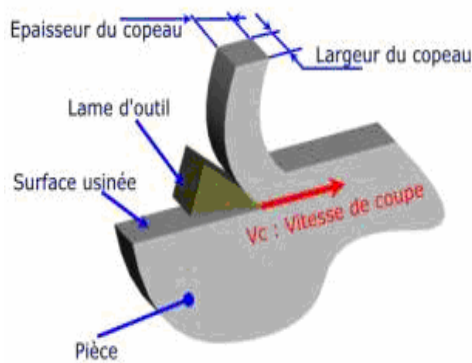


Figure III.1 : Configuration d'usinage

Une lame d'outil pénètre dans la matière constituant la pièce généralement en mouvement et enlève un copeau.

L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit définir les paramètres de coupe relatifs au type d'usinage à faire.

Il y a plusieurs critères permettant de définir les paramètres de coupe, notamment :

- a. Le type de machine (tournage, fraisage, perçage...);
- b. La puissance de la machine;
- c. La matière usinée (acier, aluminium...);
- d. La matière de l'outil (ARS, carbure);
- e. Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques :

1. La vitesse de coupe :  $V_c$  ;
2. La vitesse d'avance :  $F$  ;
3. La profondeur de passe :  $a$ .

En résumé, nous avons la configuration suivante :

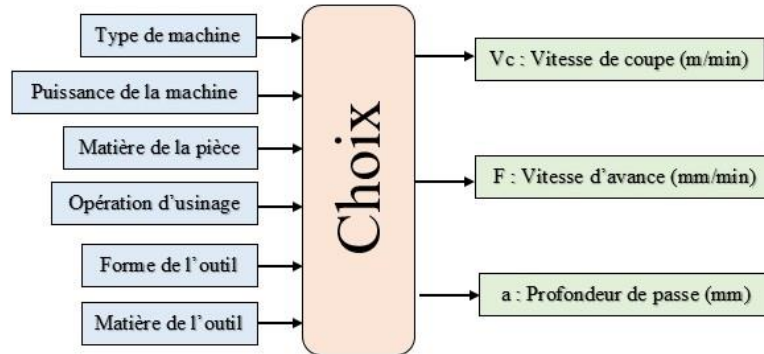


Figure III.2 : Critères définissant les paramètres de coupe

Parmi les techniques (procédés) de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière :

## III.2 Le tournage

### III.2.1 Définition du procédé

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) réalisé sur une machine outils appelée **tour** (figure III.4) mettant en jeu des outils à arête unique.

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (figure III.3).

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation rectiligne appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

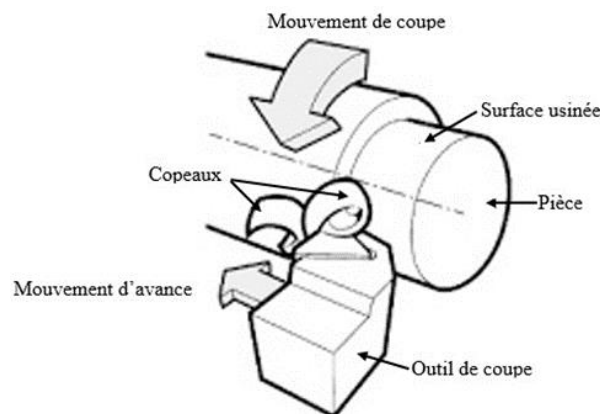


Figure III.3 : Mouvements en tournage

La combinaison de ces deux mouvements, associés à un mouvement de pénétration définissant la quantité de matière à enlever (profondeur de passe), ainsi que la forme de la partie

active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes)

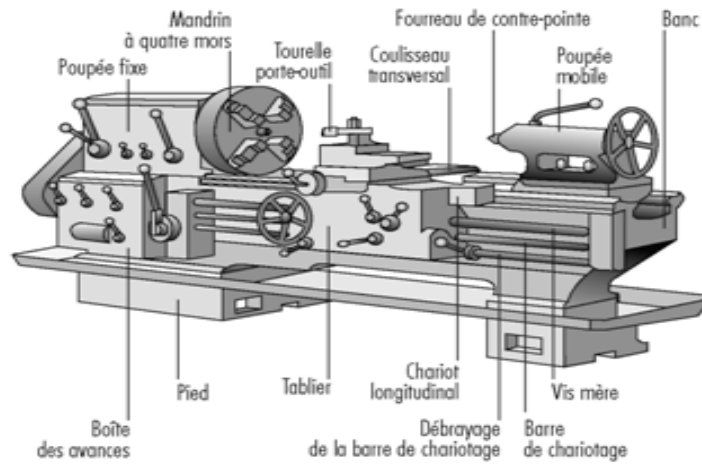


Figure III.4 : Principaux organes d'un tour conventionnel.

Sur un tour parallèle conventionnel on peut réaliser deux grandes classes d'opérations :

1. Usinage externe regroupant les opérations de dressage de face, chariotage, filetage extérieur, gorgeage, chanfreinage, moletage, tronçonnage, etc...
2. Usinage intérieur regroupant les opérations de perçage, alésage, dressage intérieur, filetage intérieur, chambrage, etc...

En général, chaque opération de tournage lui est associé un outil spécifique.

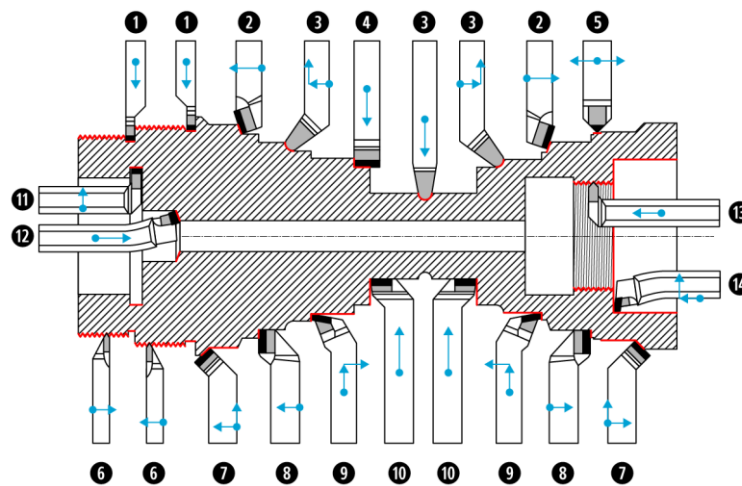


Figure III.5 : Principales opérations de tournage et outils associés.

- |                            |                               |   |
|----------------------------|-------------------------------|---|
| 1- Outil à saigner         | 6- Outil à fileter extérieur  | 11- Outil à chambrer                      |
| 2- Outil à charioter droit | 7- Outil à charioter coudé    | 12- Outil à aléser                        |
| 3- Outil de gorge ronde    | 8- Outil couteau              | 13- Outil à fileter intérieur             |
| 4- Outil pelle             | 9- Outil à dresser d'angle    | 14- Outil à aléser et à dresser intérieur |
| 5- Outil à retoucher       | 10- Outil à dresser les faces |   |

### III.2.2 La vitesse de coupe : $V_c$ [m/min]

La vitesse de coupe correspond au déplacement, suivant une trajectoire, de l'arête de coupe de l'outil par rapport à la pièce.

**Important :** Il ne faut pas confondre  $V_c$  (vitesse de coupe) et  $F$  (vitesse d'avance).

Unité :  $V_c$  en m/min.

Dans tout problème d'usinage, il est nécessaire pour des raisons technologiques et économiques de déterminer la valeur de  $V_c$  la mieux adaptée au travail à réaliser.

Les valeurs des vitesses de coupes correspondant aux différents matériaux à usiner ont été déterminées expérimentalement par des laboratoires spécialisés dans les essais de coupe. Le choix de la vitesse de coupe dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont :

- a. La durée de l'outil entre deux affûtages ;
- b. La nature et l'état du métal à usiner ;
- c. La nature de l'outil ;
- d. La lubrification ;
- e. Le mode de travail de l'outil,
- f. La section du copeau ( $S \text{ (mm}^2\text{)} = f \text{ (mm)} \times a \text{ (mm)}$ ).
- g. La profondeur de passe  $a$  (mm) ;
- h. L'avance  $f$  (mm/tr).

La vitesse de coupe est exprimée par la relation :  $V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$  ; avec :

- $N$  : fréquence de rotation de la pièce en tr/min ;
- $D$  : diamètre de la pièce à usiner en mm

**Remarque :** Le diamètre  $D$  correspond à la position de la pointe de l'outil. Il y a 2 cas de figure :

1. On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre (cas du chariotage) ;  $D =$  diamètre du cylindre ;
2. On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan (cas du dressage de face) ;  $D = 2/3$  diamètre maxi du plan circulaire.
- 3.

### III.2.3 La vitesse d'avance en tournage : $F$ [mm/min]

Elle correspond à la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée.

$$F \text{ (mm/min)} = f \cdot N$$

L'avance  $f$  est choisie en fonction du type d'usinage (ébauche, finition ou demi-finition).

### III.3 Le fraisage

#### III.3.1 Définition du procédé

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière réalisé sur une machine-outil appelée **fraiseuse** (figure III.7) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil appelé **fraise** à plusieurs arêtes (Mouvement de coupe) et l'avance rectiligne de la pièce à usiner (Mouvement d'avance) (figure III.6). Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des rainures, contournage, etc...(Figure III.8).

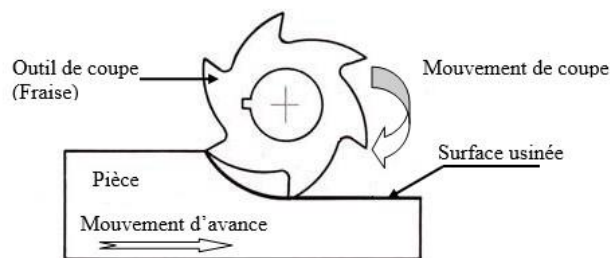


Figure III.6 : Mouvements en Fraisage

L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux.

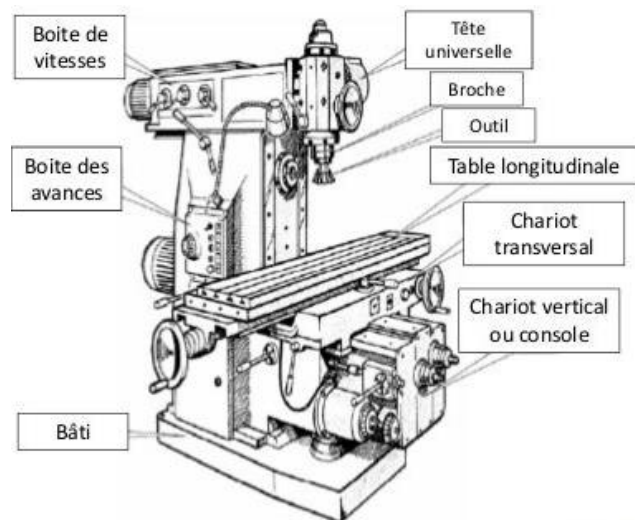


Figure II.7 : Principaux organes d'une fraiseuse

#### III.3.2 Les principales opérations de fraisage

En fraisage les outils comportent plusieurs arêtes tranchantes. Par rapport au tournage le déplacement selon les axes principaux de la machine (trois directions de travail) n'est plus réalisé par l'outil mais par la pièce qui est fixée dans un porte-pièce appelé étau. Le mouvement de coupe  $M_c$  est réalisé par l'outil.



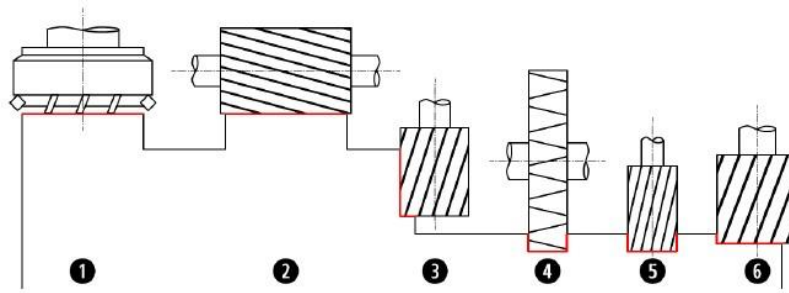


Figure III.8 : Principales opérations de fraisage et outils associés.

- 1- Surfaçage de face    2- Surfaçage de profil    3- Surfaçage –dressage prédominant profil  
 4- Rainurage 3 tailles    5- Rainurage 2 tailles    6- Surfaçage –dressage prédominant face

### III.3.3 La vitesse de coupe en fraisage ( $V_c$ : m/min)

Elle indique la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe.

— La fréquence de rotation de la broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad \text{Et} \quad N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} \quad \text{Avec}$$

- $V_c$  : vitesse de coupe en m/min ;
- $D$  : diamètre de la fraise en mm ;
- $N$  : fréquence de rotation de la fraise en tr/min

### III.3.4 La vitesse d'avance en fraisage

L'avance s'exprime par le déplacement de la pièce en millimètres pour :

- ✓ Une dent, c'est l'avance par dent,  $f_z$  ;
- ✓ Un tour, c'est l'avance par tour,  $f$  ;
- ✓ Une minute, c'est l'avance par minute,  $F$  ;

$$F = f_z \cdot Z \cdot N \quad (\text{mm/tr. dent}),$$

$Z$  : nombre de dents de la fraise ;     $N$  : fréquence de rotation de la fraise en tr/min

### III.4 Le perçage

Le perçage est une opération d'usinage consistant à faire un trou dans une pièce. Ce trou peut traverser la pièce de part en part, on l'appelle trou débouchant ; ou bien ne pas la traverser, c'est alors un trou borgne.

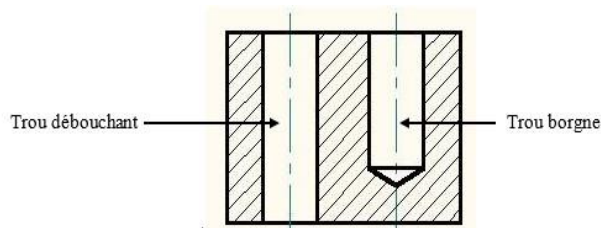


Figure III.9 : le perçage

Ce trou peut être effectué par un foret, par découpe à l'aide d'un poinçon, par électroérosion, par laser, par brochage, etc. Ce trou peut servir à faire passer une pièce ou un fluide, il peut être lisse pour recevoir un rivet ou taraudé pour recevoir une vis d'assemblage.

La machine-outil la plus utilisée pour le perçage est la perceuse. Les perceuses peuvent être classées selon plusieurs types :

- Les perceuses sensibles ou d'établi
- Les perceuses à colonne
- Les perceuses radiales
- Les machines portatives à air comprimé ou électriques.

L'outil de coupe est appelé **Foret**. Pour réaliser un perçage sur une perceuse, deux mouvements relatifs sont nécessaires :

1. Un mouvement de coupe ( $M_c$ ) : Rotation du foret ;
2. Un mouvement d'avance ( $M_f$ ) : Mouvement rectiligne et parallèle à l'axe de l'outil.



Figure III.10 : Mouvements de perçage

Ces deux mouvements sont caractérisés par :

- ✓ la vitesse de rotation du foret, exprimée en tours par minute et notée  $N$ , à la périphérie du foret elle correspond à une vitesse ;

$$V_c(m/min) = \frac{\pi \cdot D(mm) \cdot N(tr/min)}{1000}$$

- ✓ l'avance exprimée en mm par tour et notée  $f$  (mm/ tr), elle correspond à une vitesse d'avance.

$$V_f(m/min) = f(mm/tr) \times N(tr/min) \times 1000$$

Comme le foret possède deux arêtes principales de coupe, l'avance par arête est alors  $f/2$ . Le choix des conditions de coupe (fréquence de rotation et avance) dépend du foret (de sa géométrie et des matériaux le constituant), de la matière à usiner et l'utilisation ou non de la lubrification.

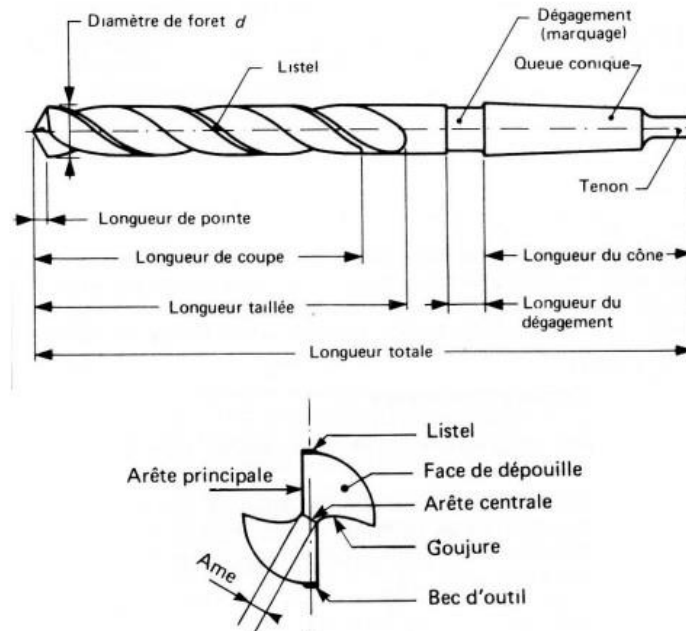


Figure III.11 : Foret à queues conique

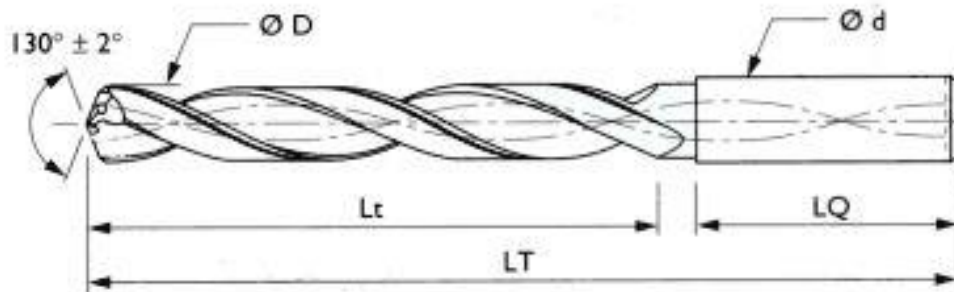


Figure III.12 : Foret à queues cylindrique

D : Diamètre du foret      d : diamètre de la queue      LQ : longueur de la queue  
 Lt : longueur taillée      LT : longueur totale

#### III.4.1 Choix de l'avance : (en mm/tr)

L'avance en perçage ( $f$  en mm/tr) est fonction du diamètre du foret :

- Foret hélicoïdal en ARS :  $f = 0,01 \times \varnothing$  du foret ;
- Foret à plaquettes en carbure métalliques :  $f = 0,02 \times \varnothing$  du foret.

La fréquence de rotation du foret en perçage est déterminée par calcul ou à partir des abaques reliant la vitesse de coupe et le diamètre de l'outil de coupe.

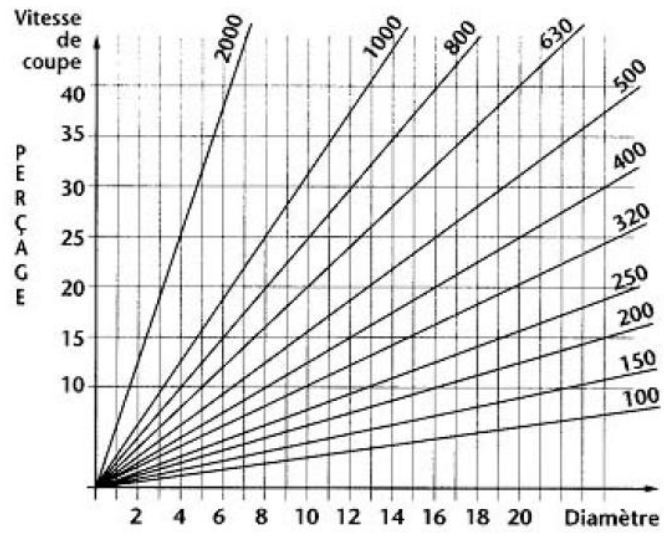


Figure II.13 : Abaque reliant la vitesse de coupe et le diamètre de l'outil de coupe

# *Chapitre IV*

## *Techniques d'Assemblage*

## IV.1 Introduction

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

### A. 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 composent un assemblage partiel ;
- Une culasse avec un bloc moteur composent un assemblage complet.

### B. Assemblage démontable ou non démontable :

- **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'un véhicule qui sont soudés composent un assemblage permanent (non démontable).

### C. 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 éléments filetés (vis-écrou) est rigide.

### D. 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.

**E. 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 plusieurs 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.

**IV.2 Assemblage par soudage****IV.2.1 Introduction**

Le soudage est une des techniques d'assemblage des matériaux métalliques les plus employés. Il permet d'obtenir par exemple des capacités étanches, de transmettre des efforts au sein d'un ensemble de pièces unitaires. En bref, le soudage assure la continuité entre les parties à assembler.

Dans un premier temps, il convient de définir les termes les plus usuels du vocabulaire utilisés en soudage.

- **Soudure** : C'est le résultat de l'opération de soudage ;
- **Brasage** : Opération consistant à assembler des surfaces métalliques à l'aide d'un métal ou alliage d'apport à l'état liquide, ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces à réunir ;
- **Joint brasé** : c'est le résultat de l'opération de brasage ;
- **Soudobrasage** : procédé de « **brasage fort** » dans lequel le joint soudobrasé est obtenu de proche en proche, par une technique opératoire analogue à celle du soudage par fusion, mais sans action capillaire comme dans le brasage, ni fusion intentionnelle du métal de base. La température de fusion du métal ou de l'alliage d'apport est inférieure à celle du métal de base, mais supérieure à 450°C.

IV.2.2 Procédés de soudage

IV.2.2.1 Classification

Plusieurs critères peuvent être retenus pour classer les procédés de soudage : la nature de l'énergie utilisée, le type de protection du bain métallique, l'origine de la formation de la continuité métallique (phase liquide ou phase solide), la performance du procédé ....

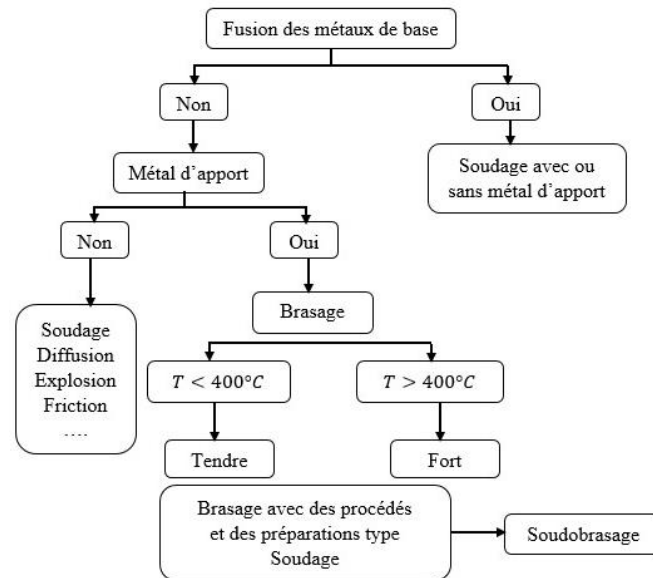


Figure IV.1 : Classification des procédés de soudage selon un critère métallurgique de la liaison

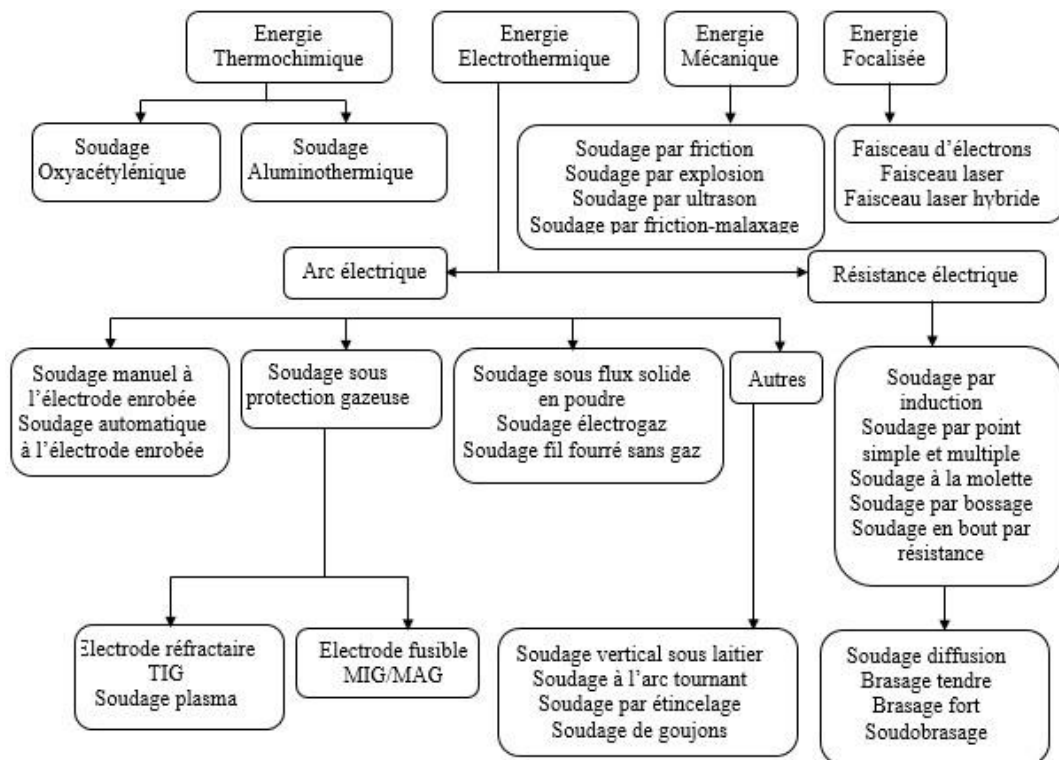


Figure IV.2 : Classification des procédés de soudage selon la nature de l'énergie utilisée pour réaliser l'assemblage



### IV.2.3 Choix des procédés de soudage

Ce choix est fonction d'un certain nombre de critères dont les principaux sont :

- Matériaux à souder ;
- Epaisseur soudable à atteindre ;
- Position de soudage ;
- Soudage en atelier ou sur chantier ;
- Aspect économique ;
- Main d'œuvre qualifiée et automatisation.

### IV.2.4 Soudage à la flemme

Ce type de soudage utilisant un chalumeau générant des températures élevées nécessaires au soudage des métaux (acier notamment) et qui ne peuvent être atteintes que lorsque l'on dispose industriellement d'oxygène comme carburant et d'acétylène comme combustible.

Pour pouvoir réaliser ce type de soudure dans de bonnes conditions, le chalumeau doit délivrer, en le dirigeant vers la pièce, un flux gazeux à température la plus élevée possible ayant une concentration maximale sur la surface la plus réduite possible.

L'oxygène intervient soit pur, soit en mélange avec l'azote. Le combustible est toujours un carbure d'hydrogène de formule générale  $C_xH_y$  ; les plus courants sont :

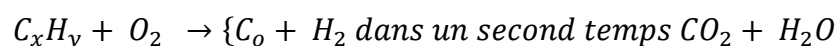
- L'acétylène  $C_{x2}H_2$  ;
- Le propane  $C_3H_{y8}$  ;
- Le butane  $C_4H_{10}$  ;
- Les gaz dits de synthèse qui sont des mélanges de propane, propadiène, éthylène, méthyl acétylène, propylène, etc...
- Le gaz naturel (peu utilisé).

Une flamme oxy-gaz se compose d'un dard et d'un panache (figure IV.4), l'un et l'autre sont le siège de réactions différentes.

La température la plus élevée se situe à 1 ou 2 mm de la pointe du dard et, selon la nature du gaz combustible choisi, elle varie de 2700 à 3200 °C.

#### IV.2.4.1 Propriétés chimiques des flemmes

Les réactions de combustion sont de type :



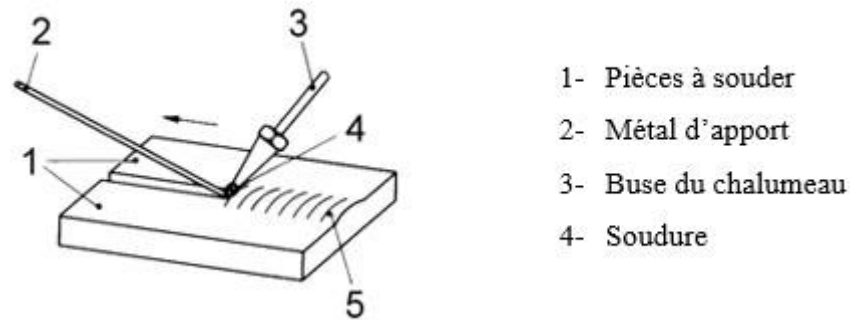


Figure IV.3 : Exécution d'une soudure au chalumeau

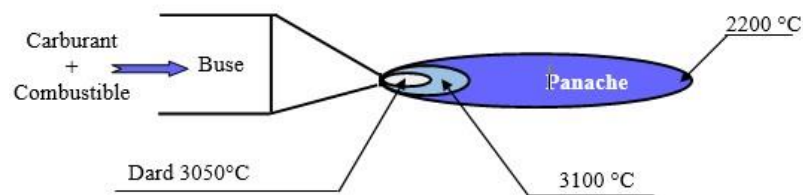


Figure IV.4 : Flamme du chalumeau

#### IV.2.4.2 Mode opératoire

A partir du moment où le métal est porté à fusion, les phénomènes de capillarités vont devenir primordiaux. Dans la pluparts des cas des différents types de soudage, l'opérateur n'a accès visuel qu'à un seul côté des pièces à assembler. Il faut donc maintenir en équilibre un bain de soudure liquide qui soit :

- Suffisamment profond pour que la totalité de l'épaisseur soit atteinte ;
- Pas trop large pour ne pas outrepasser les possibilités de la tension superficielle qui agit comme une membrane soutenant le bain liquide entre les points A et B (figure IV.5) ;

L'équilibre judicieux entre ces deux impératifs est délicat à maintenir, il faut donc mettre en jeu un bon temps d'entraînement pour maîtriser le processus opératoire. La figure IV.6 explicite bien le phénomène en question :

- En a l'aspect des pièces brutes avant soudage ;
- En b une soudure correctement exécutée ;
- En c une soudure pénétrant insuffisamment et défectueuse par résistance et effet d'entaille ;
- En d une soudure trop large provoquant des effondrements de bain en cours de soudage : en pratique, la largeur du cordon de pénétration sous la soudure (distance d sur la figure IV.5) peut difficilement dépasser 3 à 4 mm.

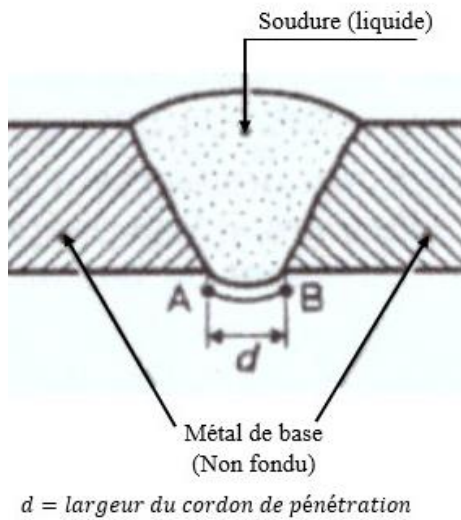


Figure IV.5 : coupe transversale d'une soudure

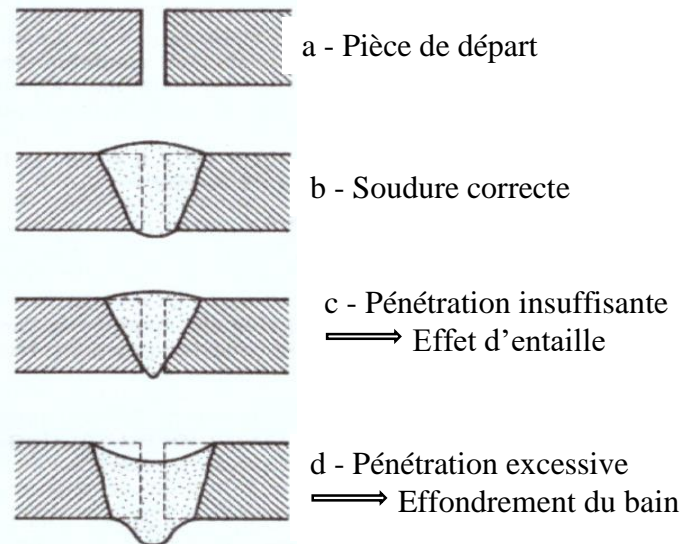


Figure IV.6 : Défauts des soudures

#### IV.2.4.3 Différents types de soudures

Selon la configuration des pièces, on peut rencontrer plusieurs types des soudures qui peuvent être exécutées au chalumeau :

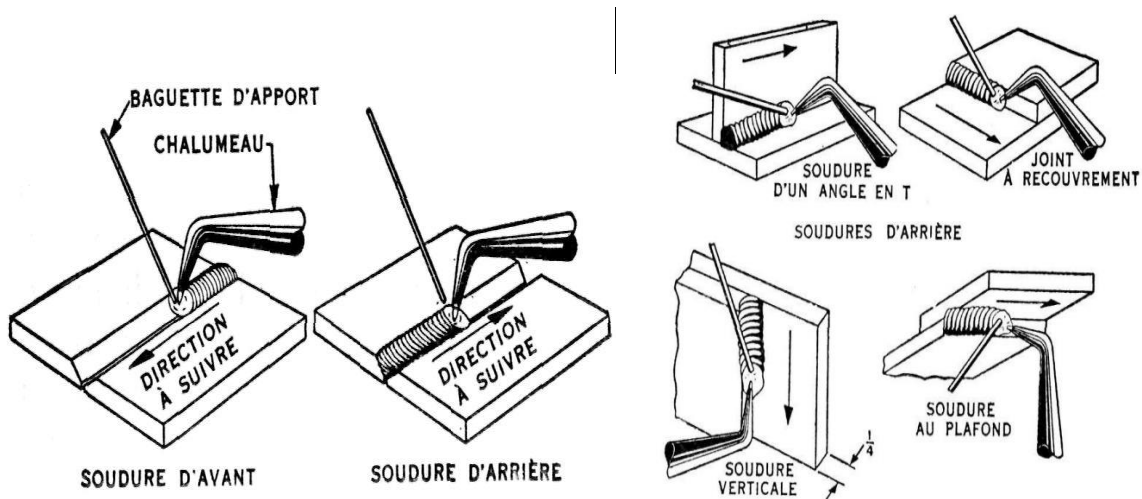


Figure IV.7 : types de soudures exécutées au chalumeau

#### IV.2.4.4 Le chalumeau

Un chalumeau de soudage doit être en mesure de stabiliser une flamme à l'extrémité de sa buse, en interdisant les rentrées ou retour de flammes internes. En outre, l'opérateur doit pouvoir faire varier la puissance calorifique délivrée pour s'adapter aux divers travaux à exécuter.

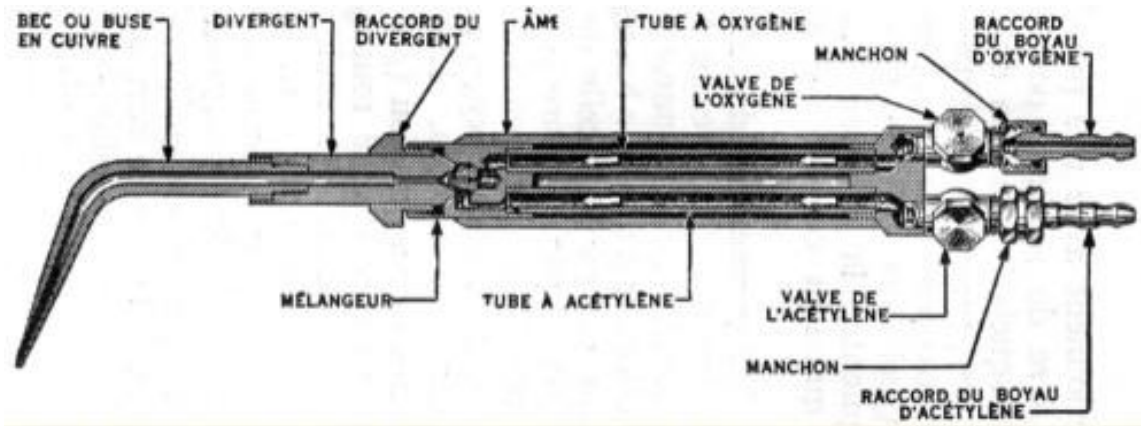


Figure IV.9 : Parties constitutives du chalumeau

### IV.2.5 soudage par résistance

#### IV.2.5.1 principe

Le procédé de soudage par résistance met en œuvre l'effet joule d'un courant électrique de forte intensité traversant les pièces à assembler, mise au contact l'une de l'autre.

La chaleur produite  $Q$  s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T RI^2 dt$$

Avec  $R$  résistance électrique rencontrée par le courant ;

$I$  intensité du courant ;

$T$  durée du phénomène ;

$t$  variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la fusion des matériaux métalliques usuels.

Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

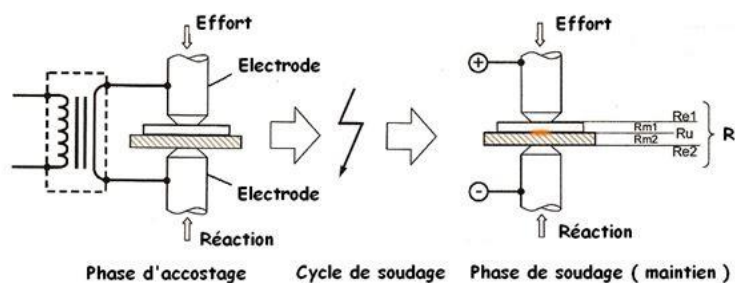


Figure IV.10 : Soudure par points

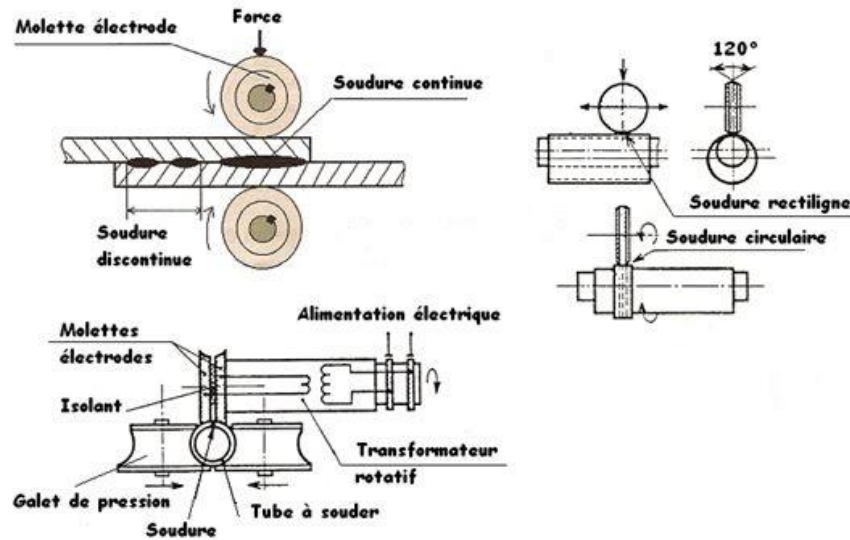


Figure IV.11 : Soudure à la molette

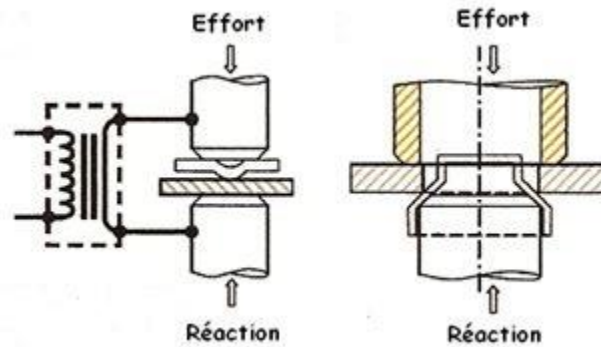


Figure IV.12 : Soudure par bossage

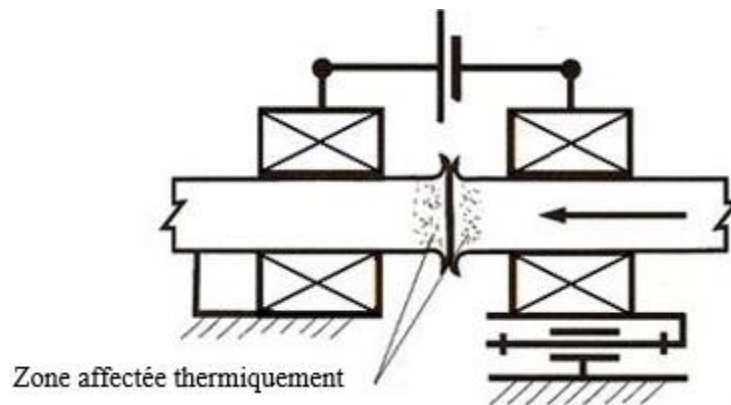


Figure IV.13 : Soudure par point en bout

Le soudage par point est un assemblage continu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'acier doux, alliés, inoxydables, d'aluminium, etc., d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

Durant l'opération de soudage par points, les deux pièces à souder sont placées et maintenues dans leurs positions respectives d'assemblage, puis introduites dans les bras de la

machine. L'action d'une pédale pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes (figure IV.14) :

- L'**accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné ;
- Le **soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du circuit de puissance (contacteur) ;
- Le **forgeage** : on maintient d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement. L'ensemble de ces phases représentent un cycle de soudage (figure IV.15) dont la représentation graphique est fonction des matériaux à souder.

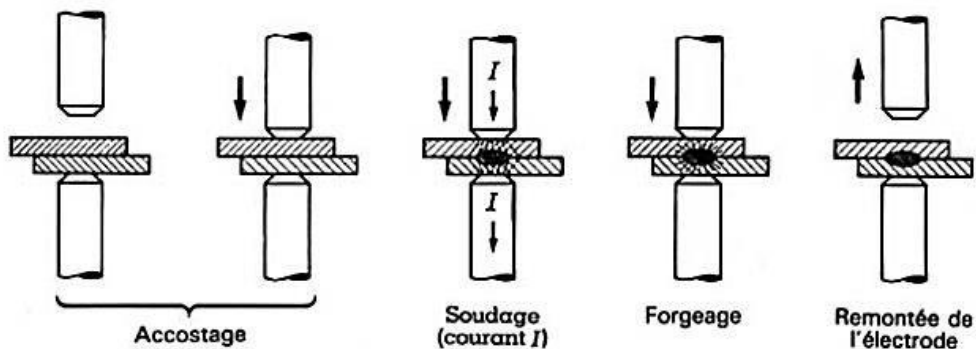


Figure IV.14 : phases de l'opération de soudage par points

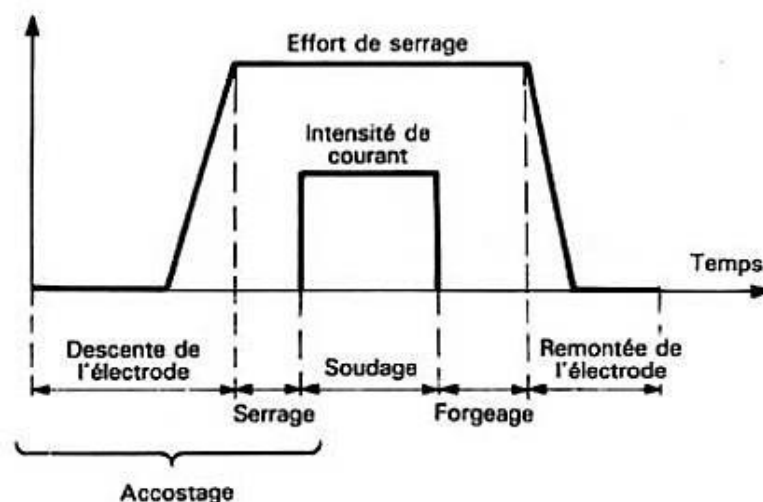


Figure IV.15 : Représentation conventionnelle d'un cycle de soudage par points

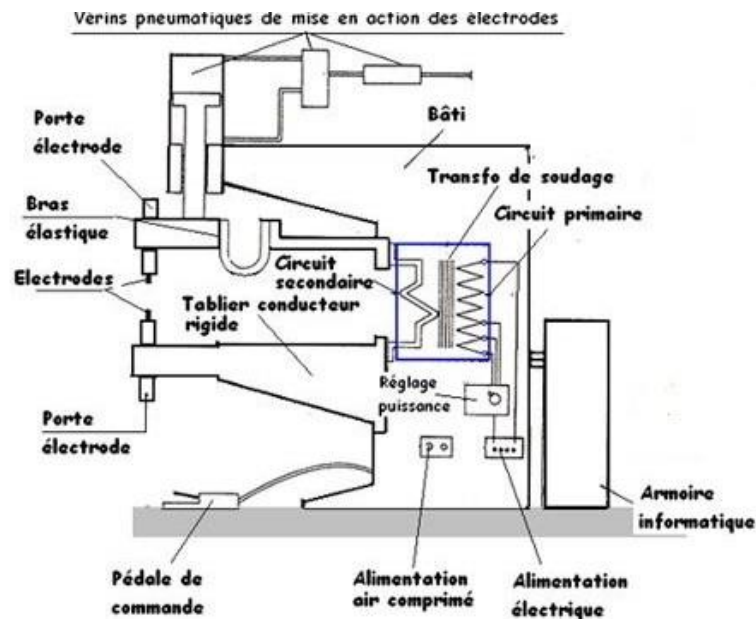


Figure IV.16 : Représentation schématique d'une machine à souder par points

#### IV.2.5.2 Paramètres du soudage par points

Les paramètres du soudage par points sont essentiellement :

- Le diamètre de l'électrode ;
- L'effort de serrage et de forgeage ;
- L'intensité du courant ;
- La durée de passage du courant et celle du forgeage.

##### A. Les électrodes

Les électrodes sont des pièces en cuivre ou en alliage de cuivre (figure IV.17) qui sont emmanchées dans les portes électrodes fixés à l'extrémité des bras de la soudeuse par points et qui viennent en contact avec les pièces à souder. Elles ont un rôle électrique, mécanique et thermique. Elles sont définies par leurs diamètres et leurs formes (tronconique, sphérique ou en dôme) en fonction des épaisseurs à souder.

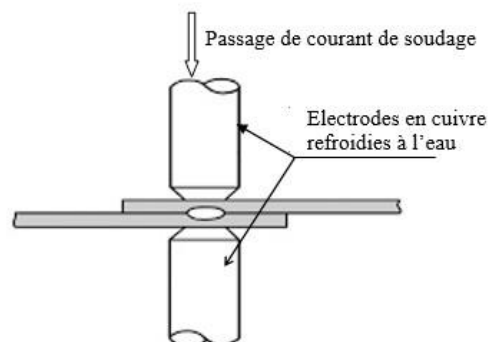


Figure IV.17 : Soudage par point : Les électrodes

**B. L'effort**

L'action de l'effort s'exerce durant tout le cycle de soudage, c'est-à-dire avant pendant et après le passage du courant.

- Avant le passage du courant, l'effort établit l'**accostage** des électrodes sur les pièces et des pièces entre elles. Il doit être suffisant pour vaincre la raideur des tôles afin d'assurer la localisation du courant par déformation élastique.
- Pendant le passage du courant, les électrodes ont un rôle électrique et un rôle thermique décrit par une loi générale :  $R = f\left(\frac{1}{E}\right)$  ;

**R** : Résistance thermique ou électrique ; **E** : Effort de serrage

- Après le passage du courant, l'effort appliqué effectue le forgeage de la soudure afin de lui conférer ses qualités mécaniques.

**C. Le courant**

L'intensité du courant dépend de la nature des matériaux à souder (par leur résistivité), des épaisseurs et de l'effort appliqué.

**D. Temps de passage du courant**

Il intervient physiquement par le biais de la notion d'énergie, c'est-à-dire, il conditionne l'énergie de soudage. Pratiquement, on utilise deux types de programmation du temporisateur, soit un cycle de soudage lent mettant en œuvre plusieurs pulsations, soit un soudage rapide (cycle court), pulsation parfois comprise entre 90 et 300 ms, qui donne des résultats plus constants et de meilleures qualités que le cycle lent en évitant la fonte des résistances de contact.

**IV.2.5.3 caractéristiques des soudures par points**

Elles sont de nature :

**a. Dimensionnelle**

- Diamètre du lingot (figure IV.18) : il est en relation avec la nature des matériaux et des épaisseurs ;
- La pénétration : elle est de l'ordre de 60 à 80% de l'épaisseur de la tôle. Elle conditionne, avec le diamètre, les propriétés mécaniques du lingot ;
- L'empreinte : elle ne doit pas dépasser 10% de l'épaisseur de la tôle ;
- La séparation des tôles : elle doit être négligeable si non elle dégrade la tenue mécanique ;
- L'écartement des points, leur position par rapport à la lisière de l'une des tôles, etc. sont également des critères intervenant dans la tenue globale de l'assemblage.



**b. Mécanique**

- Résistance au cisaillement par traction ;
- Résistance à l'arrachement ;
- Résistance à la torsion.

Reliées à la position et à l'écartement des points (Figure IV.19).

**c. Métallurgique**

- Structure des différentes zones affectées ;
- Dureté.

**d. Défauts des soudures**

En dehors des défauts géométriques, ce sont :

- Des défauts de structure (manque de compacité) ;
- Des criques ;
- Des porosités.

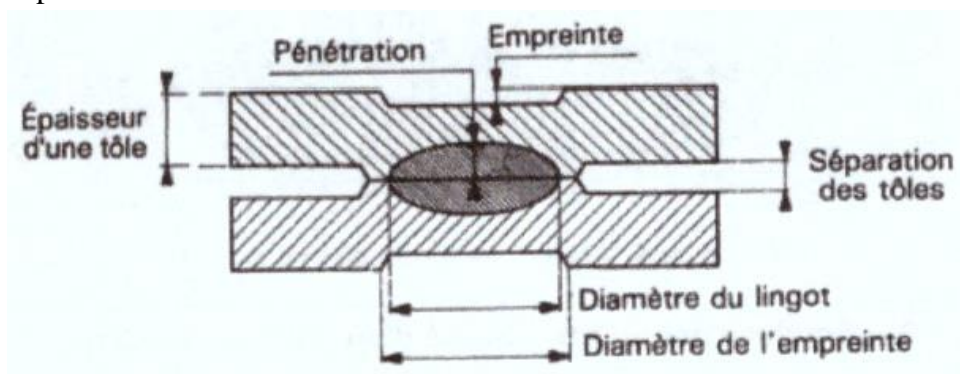


Figure IV.18 : Soudage par points : caractéristiques dimensionnelles d'un point de soudure

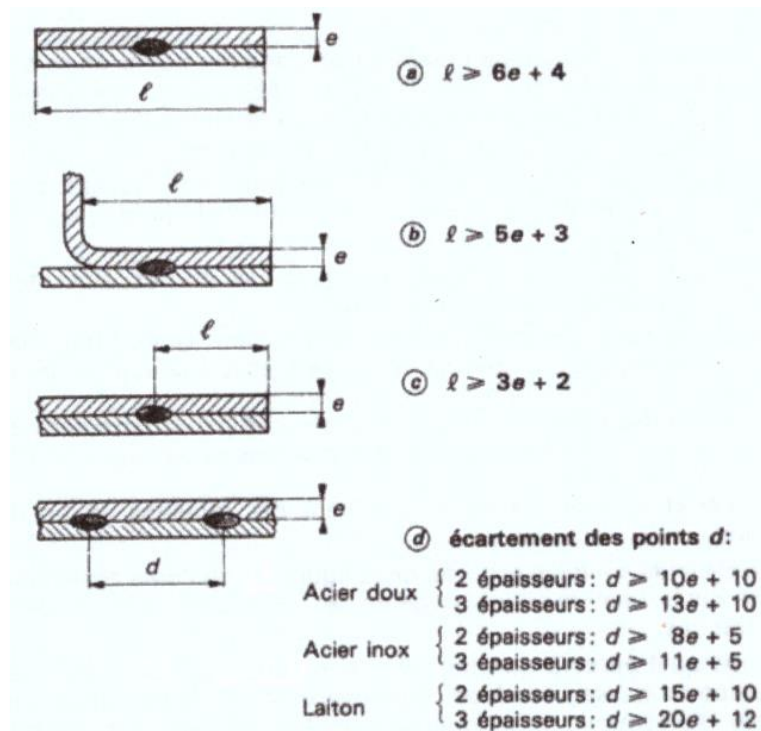


Figure IV.19 : Soudage par points : position des points de soudure (dimensions au mm)

### IV.2.6 Soudage à l'électrode enrobée

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée s'exécute avec un appareillage comportant une source d'énergie (courant continu ou alternatif), une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et câble de masse (figure IV.20).

- L'**électrode** : est une tige métallique ou baguette de longueur limitée formant le métal d'apport ;
- **Protection** : vapeur provenant d'un enrobage de l'électrode.

L'électrode enrobée constitue le paramètre essentiel du procédé. Elle est fabriquée en fonction du matériau à souder. Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblage en acier au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre.

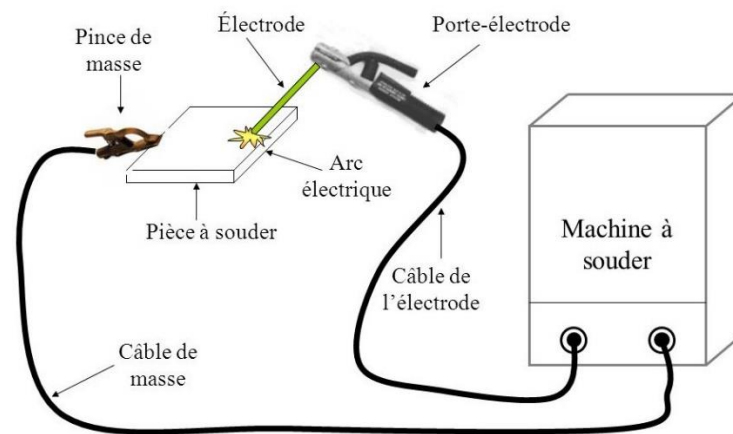


Figure IV.20 : Principe du soudage à l'électrode enrobée

#### IV.2.6.1 Caractéristiques de l'électrode

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette comportant une âme métalliques conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur. Une électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métalliques et m mécaniques que l'on désire les soudures.

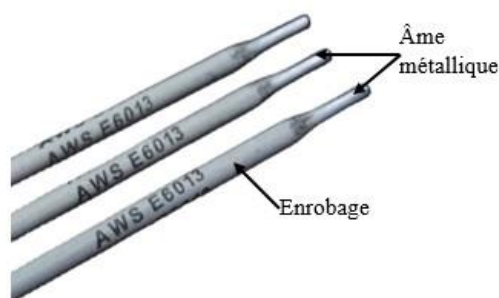


Figure IV.21 : Electrode enrobée

#### **IV.2.6.1.1 Âme métallique**

L'âme métallique conduit le courant, apporte le métal, forme le cordon et comporte des éléments d'alliage devant assurer une grande part des caractéristiques désirée de la soudure.

Le métal de l'âme est en général très proche du métal de base à souder. La section est choisie en fonction du taux du dépôt désiré, lui-même fonction des épaisseurs en présence et de l'assemblage à réaliser. Elle détermine par la suite le courant de soudage à utiliser.

#### **IV.2.6.1.2 Enrobage**

L'enrobage est constitué d'un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Les éléments les plus employés dans la composition de l'enrobage sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux et poudres, graphites, etc.

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, il existe cinq grandes classes d'enrobage : enrobage acide, enrobage basique, enrobage cellulosique, enrobage rutile et enrobage oxydant.

**Références bibliographiques du support de cours**

- 1- Claude BARLIER, Industrialisation & Mécanique - Usinage des matériaux métalliques, Editeur : CASTEILLA, Collection : Mémotech plus, 2006.
- 2- Aouici, Hamdi, Yaltese, Mohamed Athmane, Coupe des métaux, Edition(s) : Kartonierte Einband (Kt), 2014.
- 3- Claude Barlier, Mémotech plus - Usinage des matériaux métalliques, Editeur(s) : Casteilla, Collection : Mémotech, 2010.
- 4- Souhir Gara, Procédés d'usinage, tournage fraisage perçage rectification, Editeur(s) : Ellipses, Collection : Technosup, 2014.
- 5- James A. Harvey, Michel Gauthier, Usinage - Les secrets du métier, Editeur(s) : Reynald Goulet, Tec et Doc - Lavoisier, Hermès - Lavoisier, 2006.
- 6- Jean-Pierre Cordebois, Fabrication par usinage, Editeur(s) : Dunod, L'Usine Nouvelle, Collection : Technique et ingénierie - Mécanique et matériaux, 2013.
- 7- Louis Rimbaud, Gérard Layes, Joseph Moulin, Guide pratique de l'usinage - Volume 1 (Fraisage), Editeur(s) : Hachette, Collection : Guides pratiques industriels, 2006.
- 8- Joseph Jacob, Y. Malesson, D. Ricque, Guide pratique de l'usinage - Volume 2 (Tournage), Editeur(s) : Hachette, Collection : Guide pratique, 2006.
- 9- Mise en forme des métaux et alliages  
Bernard Baudalet, École d'été de métallurgie physique et Centre national de la recherche scientifique. Edité par Éditions du C.N.R.S., 1976  
ISBN 10: 2222019176 / ISBN 13: 9782222019176
- 10- Michaël Ste-marie- « étude et modélisation du frittage de pièces moulées par injection de poudres métalliques d'acier inoxydable et de superalliages de nickel »- mémoire pour obtenir le Diplôme de maîtrise ès sciences appliquées école polytechnique de Montréal du (génie métallurgique) Septembre 2009.
- 11- Foad Naïmi (2015) - Approches scientifiques et technologiques du frittage et de l'assemblage de matériaux métalliques par SPS-thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne.
- 12- Technologie des fabrications mécaniques-Document de l'école nationale supérieure de l'électricité et de la mécanique - Université Hassan II Ain chouk Casablanca
- 13- Usinage par enlèvement De matière : Fraisage- Document de l'académie de Lyon
- 14- techniques de l'ingénieur - Mise en forme des matériaux par usinage  
Edition T.I(2012) -249, rue de Crimée – 75925 Paris cedex 19.

## *Références bibliographiques*

---

- 15- techniques de l'ingénieur - Outillage et machine-outil pour le travail de matériaux  
Edition T.I(2012) -249, rue de Crimée – 75925 Paris cedex 19
- 16- techniques de l'ingénieur - Procédés d'usinage  
Edition T.I(2012) -249, rue de Crimée – 75925 Paris cedex 19
- 17- Hélène HORSIN MOLINARO - Karine LAVERNHE – Yann QUINSAT - Le procédé d'obtention de bruts par matriçage - Université Paris-Saclay- Edité le 05/02/2016
- 18- S.Adima –Technologie des Fabrications Mécaniques - Deuxième partie - ENSEM de Casablanca -Version 2015
- 19- Philippe DEPEYRE - Fabrication mécanique- Année 2004-2005- Université de la réunion
- 20- GARA Souhir - Cours interactif : Le tournage - Ingénieur de l'ENIT &Technologue l'ISSET de Nabeul) -Année universitaire 2015/2016
- 20- GARA Souhir - Procédés d'usinage, tournage fraisage perçage rectification- Collection Technosup - Edition ellipse 2014
- 21- Guide des fabrications mécaniques PADELLA.P –Ed. Dunod
- 22- Outillage et machines-outils pour le travail des matériaux –Techniques de l'ingénieur
- 23- assemblage des matériaux par soudage - Techniques de l'ingénieur