

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة مصطفى اسطمبولي معسكر

UNIVERSITÉ MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Cours de Technologie de Base

2^{ème} Année ST Génie Mécanique

Elaboré par :

Mokhtar Khaldi

Docteur en Génie Mécanique - Maître de Conférences B

PREFACE

Le cours de technologie de base, destiné aux étudiants de 2^{ème} année Licence Génie Mécanique, constitue un élément fondamental pour ceux qui veulent comprendre, apprendre et acquérir des connaissances sur les matériaux, leurs désignations, leurs procédés d'obtention, et les différentes techniques de leurs assemblages. Il permet aussi de fournir aux étudiants une formation scientifique et technologique dans le domaine du génie mécanique. Le contenu de ce cours est largement inspiré des documents et sources citées dans les références bibliographiques.

Il convient de noter que les cours de technologie ne sont pas des cours purement théoriques, mais plutôt des cours théoriques-pratiques en même temps.

En conséquence, ces cours doivent être suivis d'applications en atelier et en laboratoire afin de consolider les informations d'une part et d'autre part pour donner à l'étudiant le goût de la conduite et de la gestion des machines et lui faire s'affranchir du complexe de confusion et de l'hésitation face à la machine.

En fin, ce cours respecte bien l'intégralité du programme d'enseignement imposé par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique et il est structuré selon le programme des enseignements du socle commun du 3^{ème} semestre ST, définit par l'arrêté 562 du 23 Juillet 2014.

Sommaire

Chapitre 1 : Matériaux	1
1. Introduction.	1
2. Propriétés des matériaux.	1
3. Métaux et alliages.	1
3.1 Métal pur.	1
3.2 Alliage.	1
3.3 Les métaux ferreux et leurs alliages.	1
3.3.1 L'alliage fer-carbone.	1
Les éléments d'addition.	3
3.3.2 Les aciers.	4
3.3.3 Les fontes.	7
4. Les alliages non ferreux.	10
4.1 Aluminium et ses Alliages.	10
4.2 Alliages d'aluminium.	10
4.2.1 Désignation des alliages d'aluminium.	10
4.2.1.1 Les alliages de moulage.	10
4.2.1.2 Les alliages corroyés.	11
4.3 Alliages de cuivre.	12
4.3.1 Désignations.	12
4.4 Les alliages de Zinc.	13
4.4.1 Le zamak.	13
5. Les polymères.	14
5.1 Généralités.	14
5.2 Polymères naturels.	14
5.3 Polymères synthétiques.	15
5.4 Classement des polymères.	15
5.4.1- Par nombre de monomères.	15
5.4.2- Par architecture (structure).	16
5.4.3- Par propriétés.	16
5.4.3.1 Polymères thermoplastiques.	16
5.4.3.2 Polymères thermodurcissables.	17
6. Matériaux composites	18
6.1 Introduction.	18
6.2 Définition.	18
6.3 Constituants des matériaux composites.	18
6.3.1 Le renfort.	18
6.3.1.1 Fibres de verre.	19
6.3.1.2 Fibres de carbone.	19
6.3.1.3 Fibres céramiques.	19
6.3.2 La matrice.	19

6.3.2.1 Résines thermodurcissables.	20
6.3.2.2 Résines thermoplastiques.	21
6.4 Principe de fonctionnement.	21
6.5 Caractéristiques mécaniques d'un matériau composite .	22
6.6 Avantages.	23
6.7 Inconvénients.	24
Références bibliographiques	24
Chapitre 2: Procédés d'obtention des pièces sans enlèvement de matière	25
1. Introduction.	25
2. Moulage.	25
2.1 Définition.	25
2.2 Procédés à moule non permanent .	25
2.3 Procédés à moule permanent.	25
2.4 Moulage en sable.	26
2.4.1 Définition.	26
2.4.2 Confection du modèle.	26
2.4.3 Sable utilisé.	27
2.4.4 Application.	27
2.4.4.1 Introduction.	27
2.4.4.2 Réalisation du noyau.	27
2.4.4.3 Réalisation du moule.	27
2.4.4.3.1 Préparation du sable à vert.	27
2.4.4.3.2 Elaboration d'un demi-moule.	27
2.4.4.3.3 Réalisation des événements et du trou de coulée.	31
2.4.4.3.4 Assemblage du moule.	31
2.4.4.5 Coulée.	32
2.4.4.6 Obtention de la pièce.	32
2.5 Moulage en carapace.	34
2.5.1 Principe du procédé.	34
2.5.2 Application.	34
2.5.3 Avantages et inconvénients du procédé.	36
2.6 Moulage à la cire perdue.	36
2.6.1 Introduction	36
2.6.2 Principe du procédé	37
2.6.3 Application.	37
2.5.3 Avantages et inconvénients du procédé.	37
3. Forgeage.	39
3.1 Définition.	39
3.2 Forgeage libre.	39
3.2.1 Avantages.	39
3.2.2 Inconvénients.	39
3.3 Forgeage à froid ou par extrusion.	40
3.3.1 Avantages.	40

3.4 Estampage.	40
3.4.1 Principe.	41
3.4.2 Avantages.	41
3.4.3 Inconvénients.	41
3.5 Forge par matriçage.	41
3.6 Forge par laminage.	42
3.6.1 Principe.	42
3.7 Extrusion ou filage.	43
3.7.1 Avantages.	44
3.7.2 Inconvénients.	44
3.8 Le tréfilage.	44
3.8.1 Géométrie de la filière.	44
3.8.2 Application.	45
3.9 Pliage.	45
3.10 Cintrage.	46
3.11 Profilage à froid.	46
3.11.1 Avantages.	46
3.12 Emboutissage.	46
3.12.1 L'emboutissage à froid.	47
3.12.2 L'emboutissage à chaud.	47
3.12.3 Les applications de l'emboutissage dans l'industrie.	48
3.12.3.1 L'emballage et le conditionnement.	48
3.12.3.2 Les applications de l'emboutissage dans d'autres secteurs Industriels.	49
3.12.4 Avantages.	49
3.12.5 Inconvénients de l'emboutissage.	49
3.13 Frittage.	49
3.13.1 Principe.	49
3.13.2 Applications.	49
3.13.3 Avantages.	50
3.13.4 Inconvénients.	50
Références bibliographiques.	50
Chapitre3: Procédés d'obtention des pièces par enlèvement de matière.	51
1. Introduction.	51
2. Tournage.	51
2.1 Généralités.	51
2.2 Mouvements relatifs entre pièce et outil.	52
2.2.1 Le mouvement de coupe (Mc).	52
2.2.2 Le mouvement d'avance (Ma).	52
2.2.3 Le mouvement de pénétration.	52
2.3 Le tour.	52
2.3.1 Les tours parallèles.	52
2.3.2 Les tours à copier.	53
2.3.3 Les tours semi-automatiques.	53

2.3.4 Les tours automatiques.	53
2.3.5 Les tours à commande numérique.	53
2.4 Outils.	53
2.4.1 Composition.	54
2.4.2 Matériaux des outils de coupe.	54
2.4.3 Qualification des outils de tournage.	55
2.5 Les différentes opérations de tournage.	55
2.5.1 Le tournage extérieur.	55
2.5.2 Le tournage intérieur.	55
2.6 Montage des pièces sur un tour.	57
2.6.1 Montade en l'air.	58
2.6.2 Montage mixte.	58
2.6.3 Montage entre-pointes.	59
2.6.4 Lunette et mandrin de montage	59
3. Fraisage.	60
3.1 Introduction.	60
3.2 La machine.	60
3.3 Différents types de fraisage.	60
3.3.1 Le fraisage en bout ou fraisage de face.	60
3.3.2 Le fraisage en roulant ou fraisage de profil.	60
3.3.3 Fraisage en opposition.	61
3.3.4 Fraisage en avalant ou en concordance.	61
3.4 Principales opérations de fraisage.	62
3.5 Les outils de fraisage.	63
3.5.1 Les fraises à surfacer.	63
3.5.2 Les fraises cylindriques 2 tailles.	64
3.5.3 Les fraises à rainurer.	64
3.6 Montage des fraises.	65
3.6.1 Le montage des fraises à entraînement par clavette.	65
3.6.2 Le montage des fraises à entraînement par tenon.	65
4. Le perçage.	66
4.1 Généralités.	66
4.2 La classification des forets de parçage.	67
5 Conditions de coupe en usinage.	68
5.1 Définition.	68
5.1.1 Vitesse de coupe V_c .	68
5.1.2 Paramètres influant sur la vitesse de coupe.	69
5.2 Avance.	69
5.2.1 Principaux critères de choix de l'avance.	69
5.3 Vitesse d'avance.	69
5.3.1 Définition.	69
Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min) en Tournage.	70
Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min) en fraisage.	70

Tableau de valeurs indicatives moyennes en perçage.	71
Références bibliographiques.	72
Chapitre 4 : TECHNIQUES D'ASSEMBLAGES	73
4.1 LE BOULONNAGE	73
4.1.1 Les boulons traditionnels	73
4.1.2 Les boulons ordinaires	74
4.1.3 Transmission des efforts	75
4.1.4 Les boulons à haute résistance (HR)	75
4.1.5 Comparaisons entre boulons ordinaires et boulons précontraints	75
4.2 LE RIVETAGE	76
4.2.1 Principe	76
4.2.2 Classification des rivets	76
4.3 ASSEMBLAGES SOUDES	77
4.3.1 Généralités	77
4.3.2 Classification des procédés de soudage	78
4.3.3 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée	79
4.3.4 Soudage MIG, MAG (Metal Inert, Activ Gaz)	80
4.3.5 Soudage TIG (Tungsten Inert Gaz)	81
4.3.6 Soudage par la résistance	81
4.3.6.1 Soudage par points	82
4.3.6.2 Soudage à la molette	83
4.3.6.3 Soudage par bossages	83
4.3.7 Soudage oxyacétylénique	84
4.3.7.1 Principe	84
4.3.7.2 Métal d'apport	85
4.3.7.3 Domaine d'application	85
4.3.7.4 Caractéristique chimique de la flamme oxyacétylénique	86
4.3.7.4.1 Température de la flamme	86
4.3.7.4.2 Mélange oxyacétylénique	86
4.3.8 Le soudage par friction-malaxage « Friction Stir Welding »	86
4.3.9 Le soudage par faisceau laser	87
4.4 Types de soudure	87
4.4.1 Soudures en bout	87
4.4.2 Soudure d'angle	88
4.4.3 Soudure en entaille	88
4.4.4 Soudures en bouchon	88
4.4 Préparation des bords des pièces à souder	89
Références bibliographique	90

Chapitre 1 : Matériaux

1. Introduction

L'utilisation directe des matériaux ou matières premières naturelles (pierre, bois, bronze et fer) a été connue par l'homme au cours de l'histoire, pour fabriquer ces outils et ces armes. Cette utilisation s'est progressivement étendue à des matériaux de plus en plus perfectionnés, comme le choix des aciers pour la construction mécanique ou le choix du silicium pour la fabrication des circuits intégrés [1].

L'Ère du silicium dans la deuxième moitié du vingtième siècle par la technologie du silicium en électronique, les polymères et matériaux légers et économiques, devrait marquer cette période comme l'ère du silicium [1].

2. Propriétés des matériaux

Elles caractérisent la réaction d'un matériau à une sollicitation extérieure, nous distinguons trois types de propriétés [2].

- **Les propriétés mécaniques** reflètent le comportement des matériaux soumis à des systèmes de charges ou forces.
- **Les propriétés physiques** mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques, ou de la lumière.
- **Les propriétés chimiques** caractérisent le comportement des matériaux soumis à un environnement chimique plus ou moins agressif.

3. Métaux et alliages

3.1 Métal pur

Un métal pur est constitué d'une seule espèce ne contenant aucune impureté. Cela n'existe pas dans la nature, uniquement dans le cas du cuivre, l'argent et l'or.

3.2 Alliage

Un alliage est constitué d'un métal pur auquel on ajoute un ou plusieurs éléments d'addition. Il peut renfermer deux, trois ou quatre éléments d'addition.

On distingue :

- Les alliages ferreux
- Les alliages non ferreux

3.3 Les métaux ferreux et leurs alliages

3.3.1 L'alliage fer-carbone :

C'est un alliage constitué de fer et de carbone. Le métal de base est le **fer**, c'est le métal le moins cher. Il fond à 1538°C. L'élément d'addition est le carbone. Il fond à 3500°C et il se trouve suivant trois variétés allotropiques qui sont : le graphite, le diamant, et le noir de fumée. Il est le composant essentiel des aciers et des fontes [3].

Le fer pur existe sous deux formes allotropiques (figure 1) :

La première forme est de structure CC (cubique centrée) tandis que la deuxième est de structure CFC (cubique face centrée).

Dans la première forme allotropique nous trouvons :

- Le fer α : de structure CC pour $-273^{\circ}\text{C} < T < 912^{\circ}\text{C}$
- Le fer δ : de structure CC pour $1394^{\circ}\text{C} < T < 1538^{\circ}\text{C}$

Dans la deuxième forme allotropique nous trouvons :

- Le fer γ : de structure CFC pour $912^{\circ}\text{C} < T < 1394^{\circ}\text{C}$ (voir figure 1).

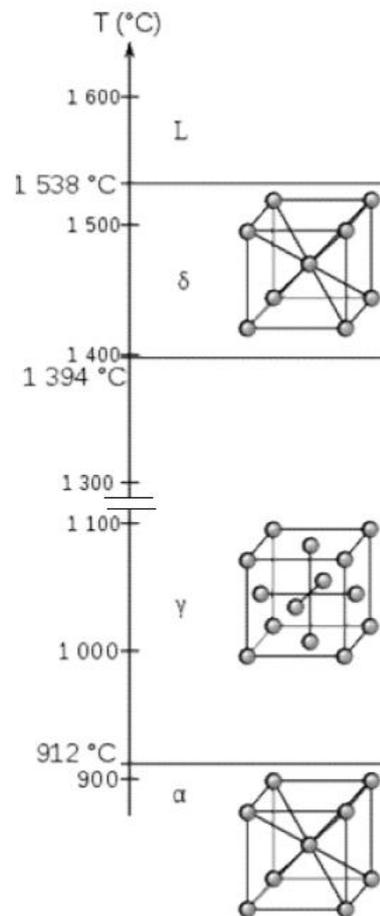


Figure 1 : Formes allotropique du fer.

Fer : % C < 0,008%, phase α .

- Aciers : % C < 2,14%, phase α et Fe₃C.

En pratique : % C < 1 %.

- Fontes : 2,14 % < % C < 6,70 %, phase α et Fe₃C.

En général : 2,14 % < % C < 4,5 %.

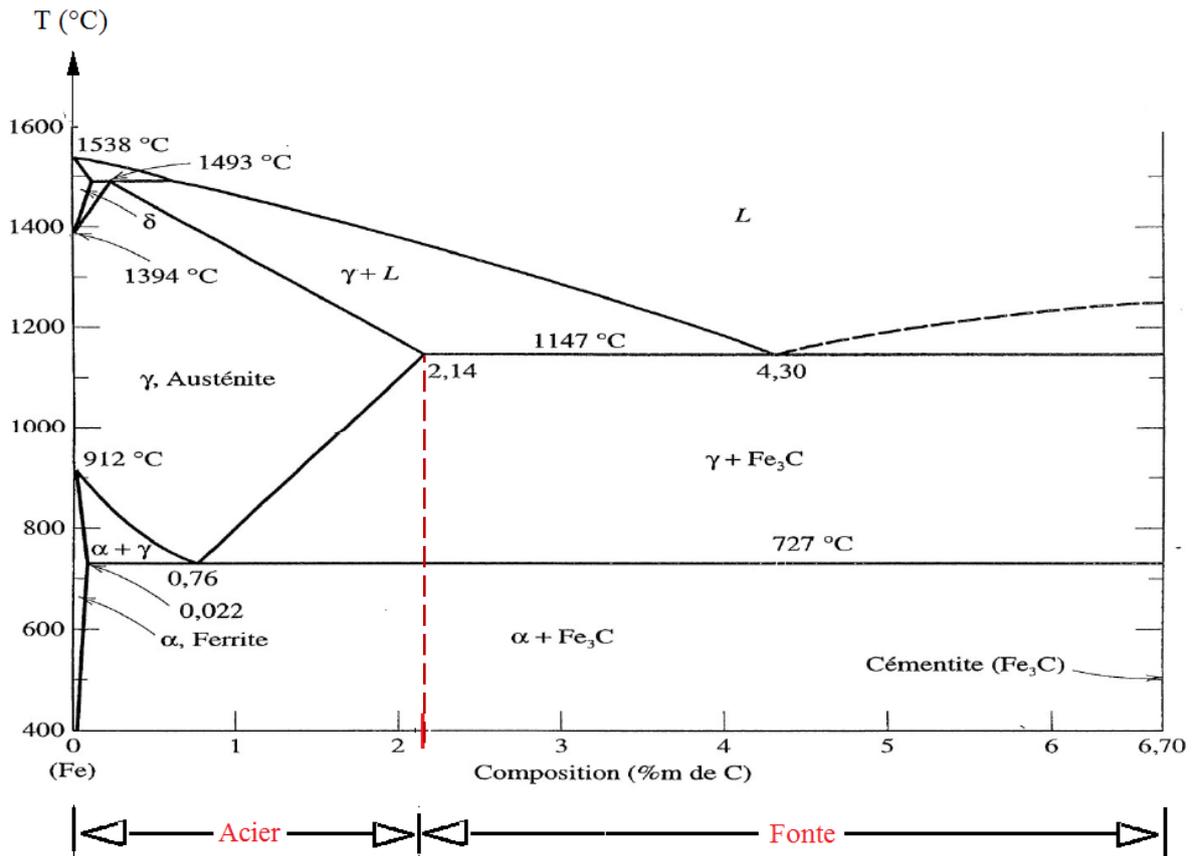


Figure 2 : Diagramme fer – carbone.

Les éléments d'addition

Les éléments d'addition ont pour objectif la modification des caractéristiques d'un alliage fer-carbone. Ces modifications dépendent des éléments ajoutés et de leurs pourcentages.

Exemple : le Nickel (**Ni**), le manganèse (**Mn**), le molybdène (**Mo**), le cobalt (**Co**), le chrome (**Cr**), le silicium (**Si**), le phosphore (**P**), le tungstène (**W**), le titane (**Ti**), le vanadium (**V**)...etc.

Le **chrome** augmente la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

L'**aluminium (Al)** augmente légèrement la trempe.

Le **plomb (Pb)** améliore l'usinabilité, tandis que le soufre est considéré comme impureté.

Le **Manganèse (Mn)** augmente la limite élastique, la trempabilité et la résistance à l'abrasion.

Le **Nickel (Ni)** augmente la résistance aux chocs et à la corrosion.

Le **Silicium (Si)**: augmente la limite élastique.

Le **Tungstène (W)**: augmente la résistance à l'usure et à la chaleur.

Le **Molybdène (Mo)**: augmente la résistance à l'usure et à la chaleur.

Le **Vanadium (V)**: augmente la résistance à l'usure et aux déformations.

Les métaux et les alliages sont de bons conducteurs de la chaleur et d'électricité. Ils sont

durs, rigides, déformables. Leur température de fusion est élevée.

- Les aciers par leur grande diversité et par leur prix relativement faible, constituent le matériau de base des industries mécaniques.
- L'aluminium et les alliages légers pour l'industrie aéronautique.
- Le nickel et les alliages résistant à haute température pour les moteurs.

3.3.2 Les aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition. Les aciers présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques. L'augmentation du pourcentage de carbone améliore la dureté, la résistance à la rupture, la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et la trempabilité, mais elle diminue la malléabilité, la résilience et la soudabilité.

Concernant la soudabilité de l'acier, il est à noter que cette dernière augmente avec la baisse du pourcentage en carbone. Il faut donc trouver le juste milieu.

Ses inconvénients:

Mauvaise résistance à la corrosion.

Désignation :

Pour des raisons industrielles, la norme (NF-EN10027-1) a retenu deux groupes de désignations [4-6].

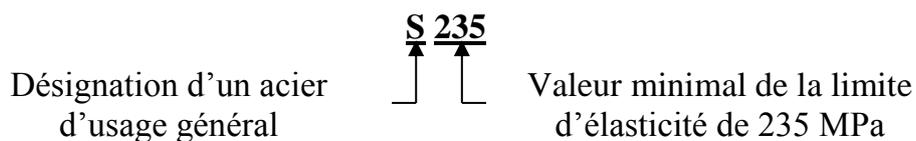
Groupe 1 :

Les aciers **S** et **E** (anciennement A) d'usage général et de construction mécanique.

- Pour les aciers d'usage général, la désignation commence par la lettre **S**, le nombre qui suit indique la valeur minimale de la limite d'élasticité en mégapascals (MPa).

Exemples :

Désignation d'un acier d'usage général **S 235** Valeur minimal de la limite d'élasticité de 235 MPa



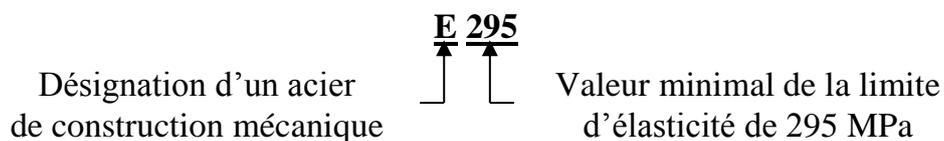
S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre **G**.

Exemple : GS 355.

- Pour le cas des aciers de construction mécanique, la désignation commence par la lettre **E**, le nombre qui suit indique la valeur minimale de la limite d'élasticité en mégapascals (MPa).

Exemples :

Désignation d'un acier de construction mécanique **E 295** Valeur minimal de la limite d'élasticité de 295 MPa



La désignation est précédée de la lettre **G** lorsque l'acier est spécifique sous forme d'une pièce moulée (exemple : GE 335).

Emplois :

Les aciers **S** et **E** sont employés dans les constructions mécaniques et métalliques générales, assemblées ou soudées.

Ces aciers ne conviennent pas aux traitements thermiques.

Groupe 2 :

Nous distinguerons 3 cas :

- **Les aciers non alliés C** : (anciennement XC)

Désignation : Leur désignation comprend :

La lettre C (anciennement XC) + le pourcentage de carbone multiplié par 100.

Exemple : C 35 : acier non allié contenant 0,35% de carbone.

Acier non allié $\xrightarrow{\text{C } 32}$ 0,32 % de carbone
Pour traitements thermiques

Un acier moulé sera précédé par la lettre G.

Exemple : GC 32 (0,32 % de carbone).

Les principaux aciers moulés : GC22 - GC25 - GC30 - GC35 - GC40.

Les principaux aciers de forgeage : C22 - C25 - C30 - C35 - C40-C45 - C50 - C55.

- **Les aciers faiblement alliés** : Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse **5%** en masse [9-11].

Désignation : Leur désignation comprend :

- Un **nombre** égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les **symboles chimiques** des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les **teneurs** des principaux éléments d'addition (multipliées par 4, 10, 100, ou 1000 Cf Tableau 1) [11].

Eventuellement des **indications supplémentaires** concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou la déformation à froid (DF).

Exemple : 32 Cr Mo 4-2 (la valeur 32 représente le pourcentage de carbone multiplié par 100,

Le chrome (Cr) et le molybdène (Mo) sont des symboles chimiques des éléments d'addition placés dans l'ordre décroissant.

Les valeurs 4-2 indiquent la teneur (% en masse) des éléments d'addition depuis le premier symbole, cette valeur étant multiplier par un facteur donné (Voir tableau 1).

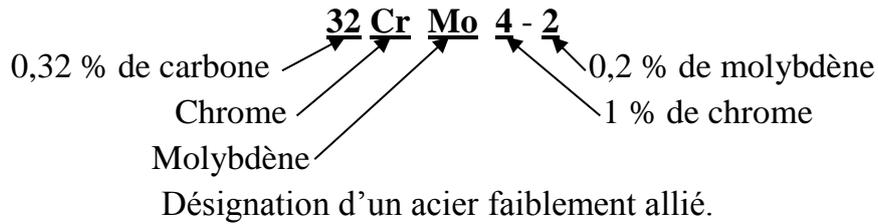


Tableau 1 : Facteurs de multiplication des différents éléments d'addition [11].

Eléments d'addition	Facteur de multiplication
Cr, Co, Mn, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Utilisation : Les aciers faiblement alliés sont largement utilisés dans la fabrication de tuyaux, la carrosserie automobile et aérospatiale, les lignes de chemin de fer.

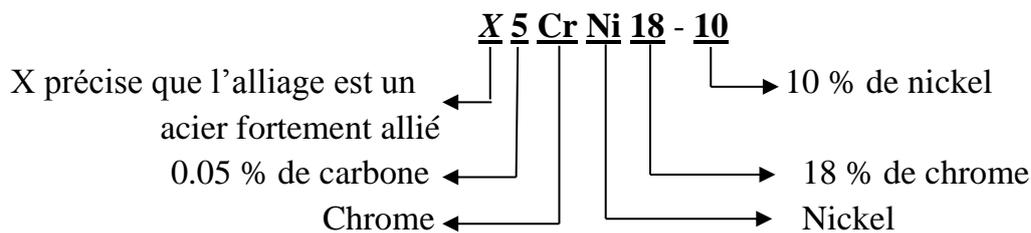
- **Les aciers fortement alliés** : Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse, (cette catégorie comporte deux sous-groupes : aciers fortement alliés et les aciers à coupe rapide).

Utilisation : Ce sont des aciers réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui n'est autre qu'un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%) [4-6].

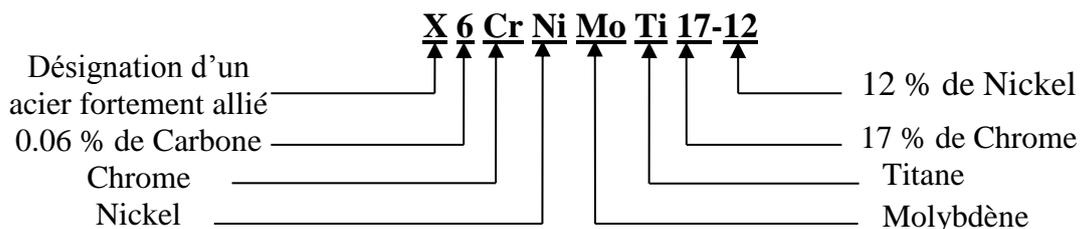
Désignation : On écrit successivement :

- La lettre **X**.
- Un *nombre* égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les *symboles chimiques* des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les *teneurs* des principaux éléments.

Exemple 1 : X 5 Cr Ni 18-10



Exemple 2 : X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12



Les aciers rapides (High Speed Steel, HSS) font partie de cette famille.

Les aciers rapides, ou HSS, servent principalement à la fabrication d'outils de coupe de fraisage et tournage.

Ils sont fortement alliés, en carbone, en chrome, en molybdène, en tungstène et/ou en vanadium, voire en cobalt s'ils doivent répondre à des contraintes thermiques spécifiques.

Propriétés

Les aciers rapides se distinguent par :

- Une très haute résistance à l'usure.
- Une très haute résistance à la chaleur.
- Une dureté Rockwell (HRC) d'utilisation de 62-65 HRC,
- Les « HSS » supportent une vitesse de coupe dix fois plus élevée que la plupart des autres aciers.

Utilisations des aciers rapides

La haute ténacité et la résistance à la compression de ces aciers spéciaux les rendent indispensables pour la fabrication d'outils d'usinage et de coupe de précision, des lames rotatives, lames d'engrenages, poinçons, forets hélicoïdaux.

Nuances

Les aciers rapides présentent une désignation symbolique commençant par les lettres HS ou HSS suivie par la teneur en tungstène, molybdène, vanadium et éventuellement cobalt est ensuite indiquée. Parmi les nuances courantes, on trouve les aciers HS6-5-2, HS6-5-2-2 et HS6.7.6.10.

Exemple : HSS 7-4-2-5 (HSS précise que l'alliage est un acier à coupe rapide, sept (7) valeur correspond au pourcentage de tungstène, quatre (4) est le pourcentage de molybdène, deux (2) est le pourcentage de vanadium, cinq (5) est le pourcentage de cobalt).

3.3.3 Les fontes

Les fontes sont des matériaux ferreux riche en carbone de 2,14 à 6,67 %, leur température de fusion dépend de la teneur en carbone qu'elles contiennent, elle varie de 1135 °C à 1350 °C. L'élaboration de la fonte se fait dans un grand four appelé haut fourneau.

Les fontes possèdent une excellente coulabilité. Cette particularité permet d'obtenir des pièces moulées de formes complexes. Elles ont une bonne usinabilité, elles sont difficilement soudables, elles sont cassantes et assez fragiles [4-6, 9-12].

3.3.3.1 Désignation et classification des fontes

La norme européenne EN 156012 indique [13] :

- le préfixe EN-GJ, indiquant qu'il s'agit de fonte ;
- la famille de fonte :
 - L : fonte à graphite lamellaire,

- **S** : fonte à graphite sphéroïdal,
- **MB** : fonte à cœur noir, fonte noire malléable,
- **MW** : fonte à cœur blanc, fonte blanche malléable,
- la résistance à la rupture R_m , en MPa ;
- éventuellement l'allongement à la rupture A%.

L'ancienne norme française NF A 02-001 indiquait [14] :

- La nature de la fonte :
 - **FB** : fonte blanche,
 - **FGL** : fonte à graphite lamellaire, ou fonte grise à graphite lamellaire,
 - **FGS** : fonte à graphite sphéroïdal, ou fonte grise à graphite sphéroïdal,
 - **MB** : fonte malléable à cœur blanc,
 - **MN** : fonte malléable à cœur noir ;
- La résistance à la rupture R_m en MPa ;
- L'allongement à la rupture A en %.

a) Les fontes à graphite lamellaire (**GJL**) (anciennement **FGL**)

Dans ce type de fontes, le graphite se trouve sous forme de lamelles.

Les principales qualités sont :

- Une facilité d'usinage ;
- Une très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud ;
- Une très bonne absorption des vibrations ;
- Une stabilité dimensionnelle ;
- Une excellente coulabilité.

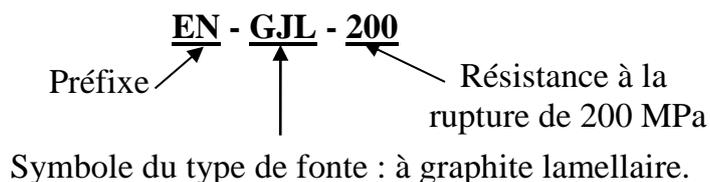
Les principaux défauts :

- Un prix du métal peu élevé ;
- Elles sont relativement fragile comparé aux aciers et aux fontes à graphite sphéroïdale.

Domaines d'utilisation :

- Bâtis de machines-outils.
- Blocs de moteurs.
- Tuyaux et canalisations.
- Carters.
- Les collecteurs d'échappement.
- La fabrication de disques de freins.

Exemple de désignation symbolique :



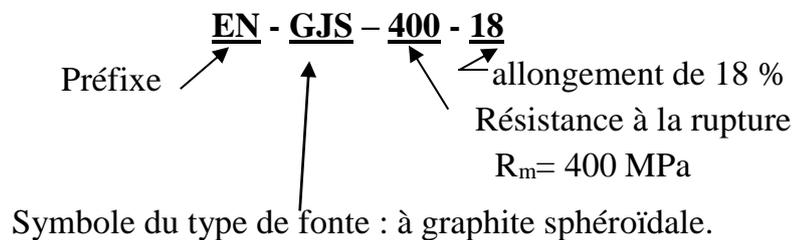
b) Les fontes à graphite sphéroïdale GJS (anciennement FGS)

Dans ce type de fonte, le graphite se trouve sous forme de nodules (sphéroïdes). Cette microstructure lui donne des caractéristiques mécaniques proches de l'acier. Ces fontes sont légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises, dont elles gardent les mêmes propriétés [9-12].

Utilisation : Les fontes à graphite sphéroïdale sont très utilisées par l'industrie automobile pour la fabrication des arbres à came, étriers et chapes de freins à disque, des tambours de freins, des culbuteurs et des vilebrequins. Elles sont aussi utilisées dans la fabrication des tuyauteries soumises à hautes pressions.

Désignation : Après le préfixe **EN**, les fontes sont désignées par le symbole (**GJS**) suivi de la valeur en méga pascals de la résistance minimale à la rupture par extension (R_m) et du pourcentage de l'allongement après rupture en %.

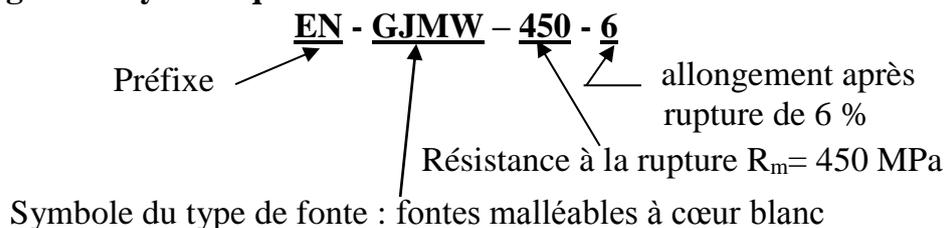
Exemple : **EN-GJS-400-18**



c) Fontes malléables

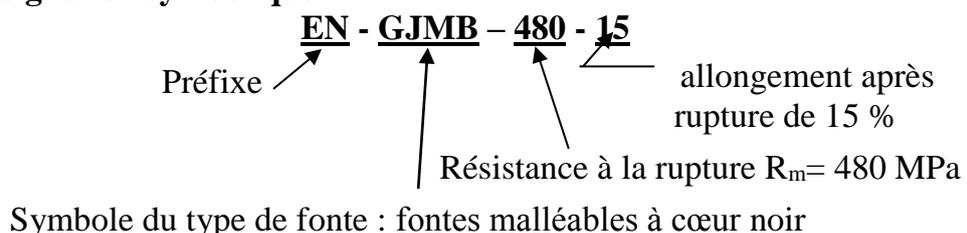
Les fontes malléables à cœur blanc : Le carbone se trouve sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Cette fonte possède une bonne coulabilité, et un aspect blanc brillant, elle est utilisée dans les pièces sollicitées à l'usure (telles que les pointes de socs) et la fonderie d'art. La présence de carbure la rend très résistante à l'usure et à l'abrasion, mais la rend aussi très difficilement usinable [4-6,9-12].

Exemple de désignation symbolique :



Les fontes malléables à cœur noir : leurs propriétés sont proches de celles de GJMW et de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables. Elles sont utilisées dans la fabrication des carters, boîtiers, etc....

Exemple de désignation symbolique :



4 Les alliages non ferreux.

4.1 Aluminium et ces alliages.

L'aluminium est l'élément chimique de symbole Al extrait d'un minerai appelé bauxite. C'est un métal argenté.

Sa Production

On extrait l'alumine (Al_2O_3) de la bauxite :

- 1) La bauxite est traitée par solution de soude.
- 2) On obtient de l'Al (OH)₃, qui donne de l'alumine par chauffage.
- 3) L'aluminium est extrait par électrolyse.

Il faut 4 à 5 tonnes de bauxite pour extraire une tonne d'aluminium.

L'aluminium possède une excellente recyclabilité, il suffit de le fondre. Cela consomme 95% d'énergie en moins que le cycle de production et permet d'économiser 4 à 5 tonnes de bauxite pour chaque tonne d'aluminium traitée.

Ses avantages

- Bonne résistance à l'oxydation.
- Oxydable à l'air → formation d'une couche protectrice imperméable d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)
- Faible densité (2,7), environ trois fois plus faible que celle de l'acier.
- Métal ductile.
- Bon conducteur de la chaleur et de l'électricité
- Point de fusion: 658 °C.
- Module d'élasticité (Young) = 70 – 72 GPa.
- Fort allongement à la rupture.

Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc+ magnésium + cuivre.

4.2. Alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont des alliages constitués principalement d'aluminium. Ils sont souvent nommés « alliages légers » du fait de leur faible masse volumique, ils sont largement utilisés dans le domaine de l'aéronautique. [4,5].

4.2.1 Désignation des alliages d'aluminium

On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium [4,5].

4.2.1.1 Les alliages de moulage : obtenus par fonderie seulement.

La désignation comporte les éléments suivants :

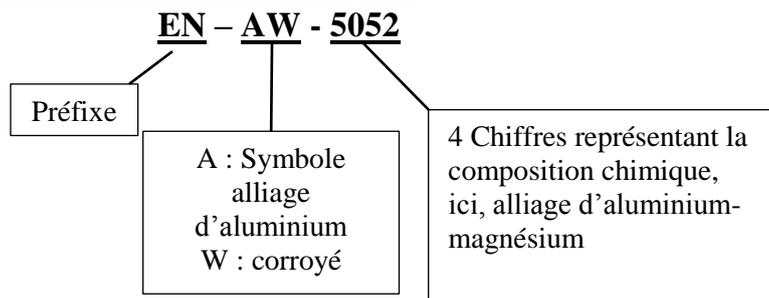
Le préfixe EN suivi d'un espace ;

La lettre A qui représente l'aluminium ;

La lettre B qui représente les produits moulés ;

Un tiret - Cinq chiffres représentant la composition chimique.

Exemple de désignation numérique :



Exemple de désignation symbolique,

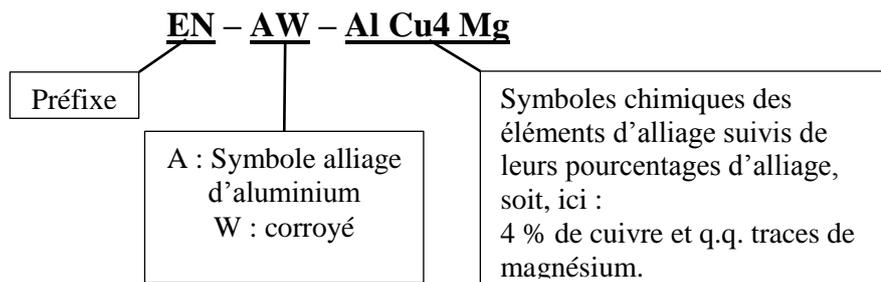


Tableau 2 : Exemples d'alliage d'Aluminium.

Alliage	Composition	Code numérique	Désignation symbolique	Propriétés
Alpax	Aluminium (Al) + Silicium (Si)	EN AB-44 200	Al Si 12	Bonne moulabilité
Duraluminium	Aluminium (Al) + Cuivre (Cu)	EN AW-2017	Al Cu 4 Mg Si	Bonne usinabilité
Duralinox	Aluminium (Al) + Magnésium (Mg)	EN AW-5086	Al Mg 4	Bonne soudabilité

4.3 Alliages de cuivre

Le cuivre est un métal de couleur rouge orangé possédant une haute conductibilité thermique et électrique ainsi qu'une bonne tenue aux corrosions courantes. Ce sont ses propriétés qui en font un métal employé pur ou faiblement allié dans la construction électrique, le transport d'électricité et le bâtiment.

En mécanique, le cuivre pur n'est pas ou peu employé. Ce sont des alliages de cuivre qui sont utilisés où la teneur en cuivre est majoritaire et qu'on appelle cupro-alliages [4].

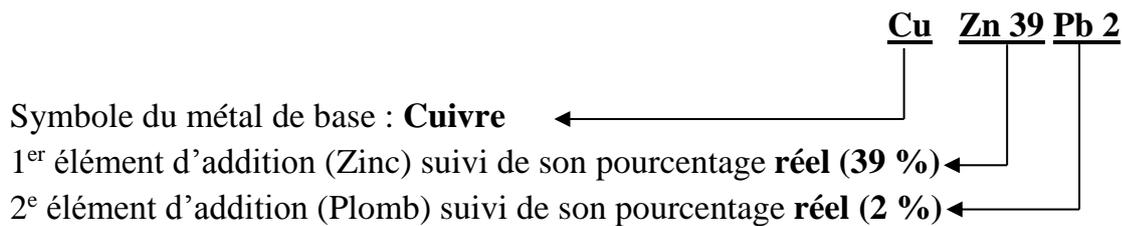
4.3.1 Désignation

Les alliages de cuivre sont désignés par le symbole chimique du cuivre Cu suivi des symboles chimiques des éléments d'addition suivis de leur teneur (exprimé en pourcentage). Les éléments d'addition sont classés dans l'ordre décroissant des teneurs.

Exemple 1 : Cu Sn 9 P

Cet alliage de cuivre (Cu) contient 9% d'étain (Sn 9) et des traces de phosphore (P).

Exemple 2 :



Les grandes familles de ces alliages sont :

Les laitons : cuivre-zinc (exemple : CW 612 N, appellation chimique : Cu Zn 39 Pb2) ;

Les bronzes : cuivre-étain (exemple : CW 460 K, appellation chimique : Cu Sn 8 Pb P).

Les cupro-aluminiums : cuivre-aluminium.

Les cupronickels : cuivre-nickel.

Les maillechorts : cuivre-nickel-zinc.

Les cuprosiliciums : cuivre-silicium.

Les cuproplombs : cuivre-plomb.

Les billons : cuivre-argent.

4.4 Les alliages de Zinc

Les alliages de zinc sont le plus souvent alliés à l'aluminium (de 4 à 30 %) et contiennent parfois de faibles additions de magnésium (de 0,012 à 0,06%) et de cuivre (jusqu'à 3%).

4.4.1 Le zamak : alliage de zinc-aluminium-magnésium-cuivre (où le cuivre est minoritaire) est le plus couramment utilisé (95% du marché). Sa coulabilité et sa bonne pénétration en font un alliage adapté à la coulée sous-pression qui permet d'obtenir des pièces minces et/ou de configuration compliquée.

Les propriétés du zamak :

- Point de fusion basse (394 °C) ;
- Caractéristiques mécaniques élevées ;
- Excellente coulabilité (formes complexes, faibles épaisseurs) ;
- Stabilité dimensionnelle (faible retrait) ;
- Résistance à la corrosion ;
- Cadences de production élevée.

5 Les Polymères

5.1 Généralités

Les polymères sont les macromolécules formées par la liaison d'un grand nombre de petites unités appelées monomères par des réactions chimiques. Le processus de formation de polymères est appelé polymérisation. Les propriétés chimiques et physiques d'un polymère dépendent principalement du type de monomère ou des monomères utilisés pour former le polymère.

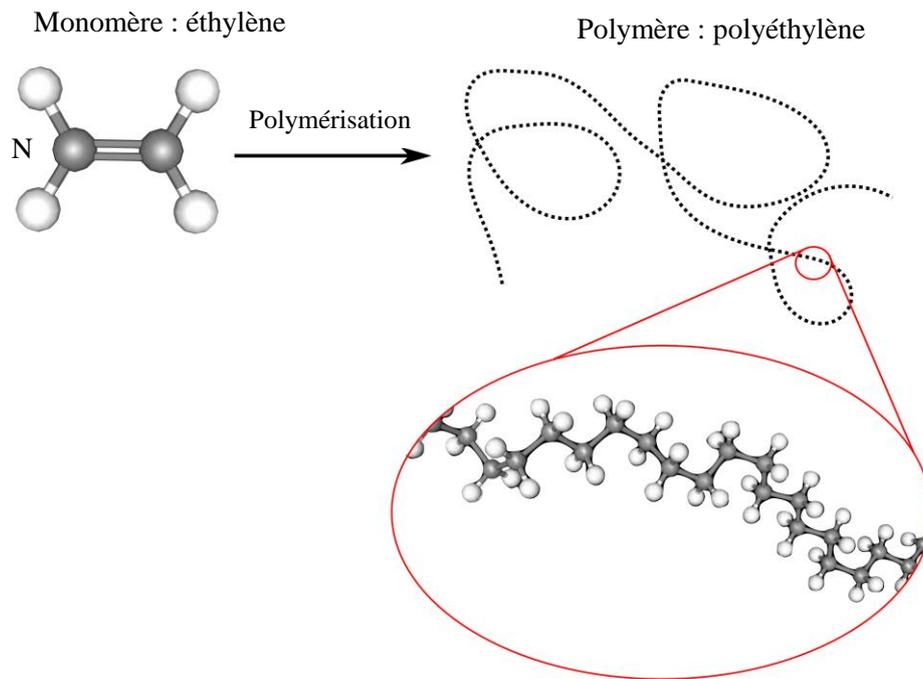


Figure 5.1 : Polymère de polyéthylène obtenu par polymérisation de N monomères d'éthylène. Le zoom permet d'identifier la répétition des monomères.

Le PE est obtenu par polymérisation de N monomères d'éthylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ suivant la formule :



Cette formule est illustrée en figure 5.1.

On peut citer d'autres exemples : le Polystyrène (PS), le Polyéthylène Téréphtalate (PET), etc. Certains polymères sont hydrosolubles quand d'autres sont hydrophiles et d'autres encore sont liposolubles. Les polymères ont des poids moléculaires élevés [7]. Il existe plusieurs types de polymères

5.2 Polymères naturels

Les polymères naturels sont la base de certains des premiers matériaux utilisés par l'homme : fibres de bois et de végétaux, cuir, tendons d'animaux, laine, soie et cellulose, etc. Ils ont été utilisés abondamment et ont été très importants à travers l'histoire, bien qu'il ait fallu beaucoup de temps pour connaître leur composition et la façon de les synthétiser artificiellement [7].

5.3 Polymères synthétiques

Les premiers polymères synthétiques obtenus à partir de la modification des polymères naturels ont commencé à apparaître au milieu du 19^e siècle afin d'améliorer leurs propriétés physiques et de pouvoir les utiliser. En 1839, Charles Goodyear [15] a modifié le caoutchouc en le chauffant avec du soufre, car il était cassant à basse température et collant à haute température. Le caoutchouc est devenu un caoutchouc vulcanisé, une substance résistante à une large gamme de températures.

Actuellement, les polymères (Polypropylène (PP), Polyéthylène (PET), Polychlorures de Vinyle (PVC)... etc.) sont utilisés dans beaucoup d'applications. On les retrouve partout dans la vie courante (figure 5.2- figure 5.5) [7].



Figure 5.2 : Boîtes d'emballage en PP



Figure 5.3 : Ballon basketball en PVC



Figure 5.4 : Chaise



Figure 5.5 : Pneumatique

5.4 Classement des polymères

Les polymères peuvent être classés par structure, par nombre de monomères, par propriétés mécaniques et thermiques...

5.4.1 Par nombre de monomères

Sur la base du nombre de types différents de monomères utilisés pour former une molécule de polymère, il existe deux types de polymères : les homopolymères et les copolymères.

- **Homopolymère** : Un homopolymère est un polymère issu d'une seule espèce de monomère. Tous les motifs de répétition d'un homopolymère sont de même nature chimique.

Exemple: A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A

- **Copolymères** : Un copolymère est un polymère issu de la copolymérisation d'au moins deux types de monomère, chimiquement différents, appelés comonomères. Il est donc

formé d'au moins deux motifs de répétition. Le terme copolymère s'oppose à homopolymère.

Example: A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A

5.4.2 Par architecture (structure)

L'architecture des polymères dans la science des polymères est liée à la manière dont la ramification conduit à un écart par rapport à une chaîne polymère strictement linéaire. Des ramifications peuvent se produire de manière aléatoire ou des réactions peuvent être conçues de manière à cibler des architectures spécifiques. C'est une caractéristique microstructurale importante. L'architecture d'un polymère affecte plusieurs de ses propriétés physiques, notamment la viscosité de la solution, la viscosité à l'état fondu, la solubilité dans divers solvants, la température de transition vitreuse.

Il existe trois types d'architectures ou structures de polymères (figure 5.6).

- Linéaires : représentés en figure 5.6a.
- Ramifiés : illustrés en figure 5.6b.
- Réticulés : illustrés en figure 5.6c.

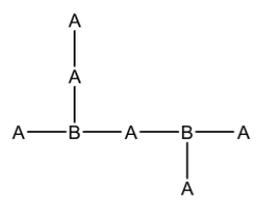
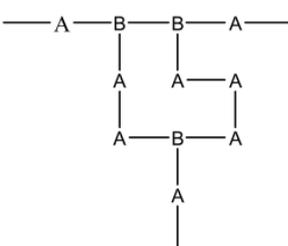
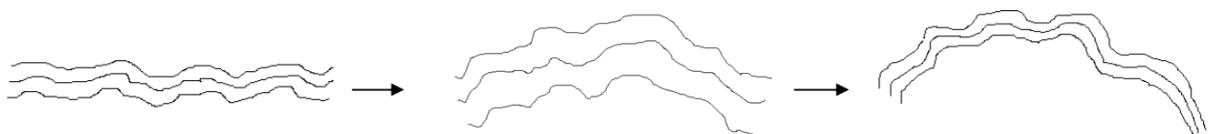
a)	A-A-A-A-A-A-A	Représentés :	
b)		Représentés :	
c)		Représentés :	

Figure 5.6 : Architectures des polymères

5.4.3 Par propriétés

5.4.3.1 Polymères thermoplastiques

Il passe de l'état rigide à l'état malléable en cas d'élévation de température. En se refroidissant, il durcit et conserve la forme donnée à chaud. Il s'agit de polymères de structure linéaire ou ramifiée (Figure 5.7).



Polymères froids et durs :
les chaînes sont proches
grâce aux interactions

Polymères chauds : les
chaînes sont éloignées : les
interactions

Polymères froids et durs :
les interactions
intermoléculaires se

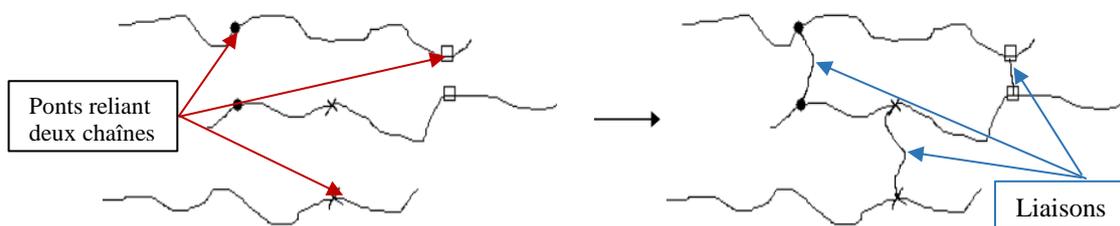
intermoléculaires

intermoléculaires se sont reforment, en conservant rompues sous l'effet de la la forme donnée à chaud. chaleur. On donne une nouvelle forme au polymère

Figure 5.7 : Structure d'un polymère thermoplastique.

5.4.3.2 Polymères thermodurcissables

Sous l'effet de la chaleur, il devient dur et ne peut plus fondre. Une nouvelle hausse de température mènerait à une destruction du polymère. La raison en est que ces polymères sont obtenus par réaction chimique au cours d'un chauffage. Lors de cette opération, des réticulations (liaisons) se forment. Celles-ci ne peuvent plus être rompues par la suite. Il s'agit d'un polymère de structure fortement réticulée (figure 5.8).



Avant chauffage les chaînes ne sont pas reliées entre elles.

Au cours du chauffage, des liaisons covalentes se forment par réaction chimique : les chaînes sont alors reliées entre elles.

Figure 5.8 : Structure d'un polymère thermodurcissable.

6 MATERIAUX COMPOSITES

6.1 Introduction

Les matériaux composites sont actuellement très utilisés dans l'industrie et particulièrement dans les domaines aérospatial et aéronautique, où les gains de masse sur structures sont stratégiques.

Bien que l'industrie aéronautique reste un acteur majeur du développement des structures hautes performances, les matériaux composites sont également très utilisés dans l'industrie automobile, dans le domaine éolien qui est le principal consommateur actuel de fibres de carbone et dans le domaine pétrolier. Comparée avec l'acier, l'utilisation des composites permet une plus grande liberté de conception, une résistance accrue à la corrosion et une réduction du nombre de pièces à assembler.

6.2 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope [17].

6.3 Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués :

■ D'une ossature appelée **renfort**, présentant diverses architectures. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.

■ d'une protection appelée **matrice**, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort [16]. Cette matrice est généralement un polymère (résine thermoplastique ou thermodurcissable).

Les matériaux composites à renfort fibre longue continue sont utilisés dans l'industrie nautique, automobile, aéronautique et spatiale.

6.3.1 Le renfort :

- se présente le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire
- assure l'essentiel des propriétés mécaniques.

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 6.1.

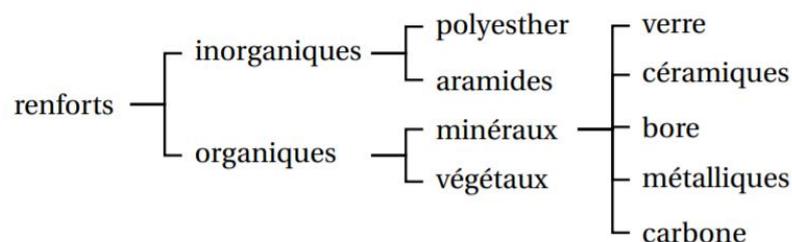


Figure 6.1 : Types de renfort.

6.3.1.1 Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Les fibres de verre sont fabriquées à partir d'un mélange à base de silice. En faisant varier la composition de ce mélange, différents types de verre peuvent être obtenus : le verre E, les verres S ou R pour des applications mécaniques plus sévères, le verre C pour des applications chimiques et le verre D pour des applications diélectriques. Les fibres de verre E constituent le principal renfort des produits composites de grande diffusion et sont utilisés dans plus de 95 % des matériaux composites.

6.3.1.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont traditionnellement considérées comme les renforts « phares » de composites « High-tech » couramment employés dans l'aéronautique et la voile de compétition. Ces fibres restent chères par rapport aux fibres de verre E mais sont très attractives pour produire des structures dont la rigidité est le principal critère de choix. Si on considère le coût spécifique (coût/densité) des fibres de carbone, il tombe à 7 fois celui des fibres de verre.

Il existe deux grandes sortes de fibres de carbone : les fibres HR (Haute Résistance) qui sont les plus utilisées et les fibres HM (Haut Module). Les fibres HM ont des modules d'Young très élevés qui peuvent être jusqu'à deux fois supérieur à ceux des fibres HR. Mais, elles comportent un allongement à rupture en traction 2 fois moins élevé ce qui a tendance à rendre les composites plus « fragiles ».

6.3.1.3 Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500 °C et 2000 °C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions.

Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium.
- fibres de Bore.
- fibres de Bore carbure de silicium.

6.3.2 La matrice

- maintient le renfort dans sa position initiale,
- assure le transfert de charges (transmission des efforts).
- assurer la cohésion et la protection des fibres.

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou

carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200 °C peuvent être atteintes.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 6.2.

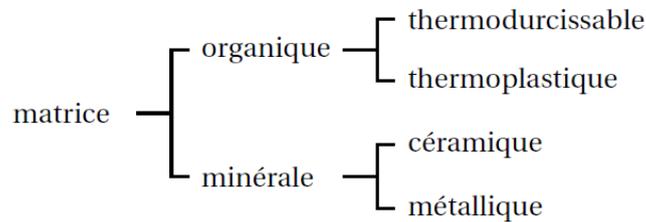


Figure 6.2 : Types de matrice.

6.3.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées et les résines époxy sont des résines thermodurcissables.

6.3.2.1.1 Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en oeuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat :

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en oeuvre.
- d'une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- d'une bonne stabilité dimensionnelle,
- d'une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- une inflammabilité.

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont illustrées dans le tableau 6.1.

6.3.2.1.2 Les résines époxydes

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [17].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu.
- une excellente résistance chimique,
- un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %),
- une très bonne mouillabilité des renforts,
- une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en oeuvre,
- une sensibilité à la fissuration.

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont illustrées dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : caractéristiques mécaniques générales des résines [17].

Caractéristiques mécaniques	Résine époxyde	Résine polyester
Masse volumique (kg/m ³)	1 100 à 1 500	1 200
Module d'élasticité en traction (GPa)	3 à 5	2.8 à 3.5
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	60 à 80	50 à 80
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	100 à 150	90 à 130
Allongement à la rupture (%)	2 à 5	2 à 5
Résistance au cisaillement (MPa)	30 à 50	10 à 20

6.3.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les Polychlorures de Vinyle (PVC), les Polyéthylènes, Polypropylène, Polystyrène, Polycarbonate Polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques.

6.4 Principe de fonctionnement

En traction : Les fibres travaillent efficacement [16].

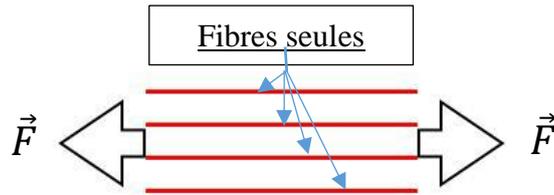


Figure 6.3 : Sollicitation des fibres seules en traction.

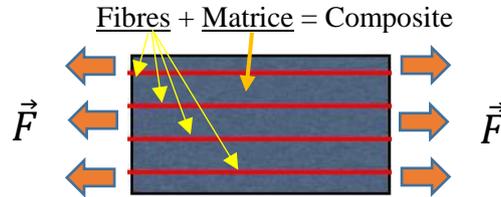


Figure 6.4 : Sollicitation du composite (fibres + matrice) en traction.

En compression : La matrice empêche les fibres de flamber (figure 6.5).

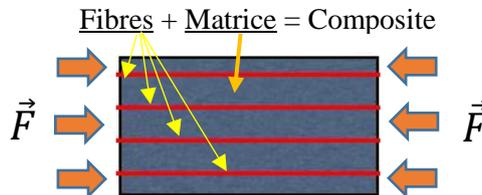


Figure 6.5 : Sollicitation du composite (fibres + matrice) en compression.

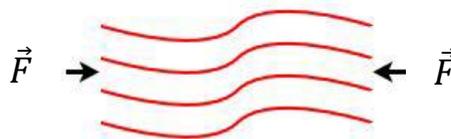


Figure 6.6 : Sollicitation des fibres seules en compression.

6.5 Caractéristiques mécaniques d'un matériau composite

De la même manière, chaque constituant du matériau composite comporte ses propres caractéristiques mécaniques :

E_f : Module d'Young des fibres.

E_m : Module d'Young de la matrice ;

V_f et V_m : fractions volumiques des fibres et de la matrice (respectivement), avec $V_f + V_m = 1$.

Dans le cas d'une traction dans le sens longitudinal (L) (sens des fibres) Figure 6.7.

Le module de Young longitudinal (E_L) du matériau composite est donné sous la forme :

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{Eq 6.1})$$



Figure 6.7 : traction dans le sens longitudinal (sens des fibres).

Dans le sens longitudinal (sens L ou sens des fibres), le composite travaille de façon optimale.

Dans le cas d'une traction dans le sens Transverse (T) (perpendiculaire au sens des fibres) illustrée en figure 6.8. Le module de Young transversal (E_T) du matériau composite est donné sous la forme :

$$E_T = \frac{E_f E_m}{f_m E_f + f_f E_m} \quad (\text{Eq 6.2})$$

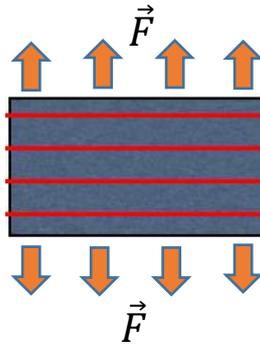


Figure 6.8 : Traction dans le sens transverse.

6.6 Avantages

Les matériaux composites possèdent des propriétés appréciables en industrie.

6.6.1 Absence de corrosion

La corrosion est un problème majeur en construction mécanique, notamment la construction navale. Elle génère des coûts de fabrication importants. L'oxydation des métaux engendre des problèmes de sécurité, et provoque des incidents dramatiques [13-14].

6.6.2 Résistance à la fatigue

Les composites à matrice organique présentent une grande résistance à la fatigue, elle est 3 fois supérieure à celle des alliages légers d'aluminium et 2 fois supérieure à celle des aciers à haute résistance et des alliages de titane.

6.6.3 Légèreté

Les matériaux composites permettent de réaliser des structures plus légères. Cet allègement des structures est sans conteste un des arguments majeurs pour l'emploi des composites. Il permet une réduction de consommation de carburant, (automobile, aéronautique, naval).

6.7 Inconvénients

6.7.1 Tenue au feu

Les matériaux composites sont constitués de matériaux organiques inflammables leur tenue au feu pose de sérieux problèmes. Les produits organiques en brûlant dégagent des fumées toxiques pour l'homme.

6.7.2 Sensibilité aux impacts

Les matériaux composites sont très sensibles à tous les impacts. Une petite faille peut engendrer de grosses déformations. .

- La détection de ces problèmes est difficile, ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur fabrication et leur assemblage.
- La mise en oeuvre des réparations est beaucoup plus complexe.

Références bibliographiques

- [1] M. N. Bensmaine. Cours Sciences des matériaux et environnement, Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes. 2015.
- [2] A. Alizée. Cours Propriétés générales des Matériaux, Chapitre 2. 2010.
- [3] H. Noble. Fabrication de l'acier. Dunod. 1905.
- [4] cours-examens.org/images/An-2018/Etudes-superieures/Mecanique/Fabrication-mecanique/Technologie-de-Base.pdf
- [5] A. Labed. Support de Cours Technologie de Base. Université Mohamed Kheider, Biskra.
- [6] www.aquaportail.com/definition-2464-polymere.html
- [7] S. SFARNI. Cours Technologie de base. Université de Béjaia.
- [8] [dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Fonte \(métallurgie\)/fr-fr/](http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Fonte_(metallurgie)/fr-fr/)
- [9] www.sciences-technologies.net/genie-mecanique/construction-mecanique/31-designation-des-matériaux.html
- [10] www.cours-et-exercices.com/2016/03/designation-normalisee-des-materiaux.html
- [11] www.lycee-ferry-versailles.fr/si-new/7_3_rdm/materiaux/designation_materiaux.
- [12] S. Gassas. Mémoire de Master intitulé : Préparation et caractérisation d'un matériau composite. Soutenu en 2016, Université Larbi Ben M'hidi (Oum El Bouaghi).
- [13] NF EN 1560 Avril 2011 Fonderie - Système de désignation de la fonte.
- [14] Norme Française NF A 02-001- Système de désignation de la fonte.
- [15] <https://www.aquaportail.com/definition-2464-polymere.html>.
- [16] L. Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008. cel-00470296v1
- [17] J. M. BERTHELOT. Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures. 5^e édition. Lavoisier. 2012.
- [18] B. Hamdi. Introduction aux matériaux composites enssmal.html

CHAPITRE 2: PROCEDES D'OBTENTION DES PIECES SANS ENLEVEMENT DE MATIERE

1. Introduction

Obtenir une pièce constituant un organe de machine et appareil, sans enlèvement de matière, nécessite souvent l'utilisation successive de différents procédés : Tel que l'obtention de la pièce brute par moulage, puis l'obtention de la pièce finale par déformation plastique jusqu'à obtention de la forme désirée.

2. Moulage

2.1 Définition

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir). Le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.

Le moulage est généralement très économique, permet aussi de produire des séries de pièces identiques et de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés). Mais les caractéristiques d'un alliage coulé sont plus faibles que celles du même alliage forgé. Les défauts de fonderie, fréquents dans les pièces moulées, diminuent leur résistance globale, certains de ces défauts sont dus aux gaz occlus ou à la contraction du métal au refroidissement.

Dans ce procédé, le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible).

2.2 Procédés à moule non permanent : un moule non permanent est utilisé une seule fois puis il est détruit pour faciliter l'extraction de la pièce moulée.

Le matériau constituant le moule est souvent du sable, du plâtre et matériaux semblables, auxquels on ajoute des liants.

2.3 Procédés à moule permanent : Le moule permanent peut être utilisé plusieurs fois pour produire plusieurs pièces. Il est fabriqué en métal ou dans certaines applications en céramique.

Le choix des procédés de moulage en dépend du métal à couler. En général la température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue les fonderies suivantes :

a. La nature des métaux et alliages :

- Fonderie de fonte
- Fonderie d'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre. Bronzes, laitons, etc.

b. Selon l'utilisation :

- Fonderie d'art.

- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

c. Selon le procédé de moulage

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.
- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

2.4 Moulage en sable

2.4.1 Définition

Dans ce type de procédé, le métal fondu est coulé dans un moule en sable, après l'élaboration de chaque pièce, le moule sera détruit pour faciliter son extraction. Ce dernier est fabriqué en une ou plusieurs parties : chacune d'elles dispose d'une empreinte donnant la forme de la pièce voulu. L'empreinte est réalisée par un modèle métallique ou en bois. Celui-ci est enterré dans le sable. Lorsque la pièce possède des formes intérieures, tel que des trous ou évidement, on insère dans la partie du moule un noyau en sable qui sera maintenu dans le moule puis détruit après le démoulage de la pièce (figure 1).

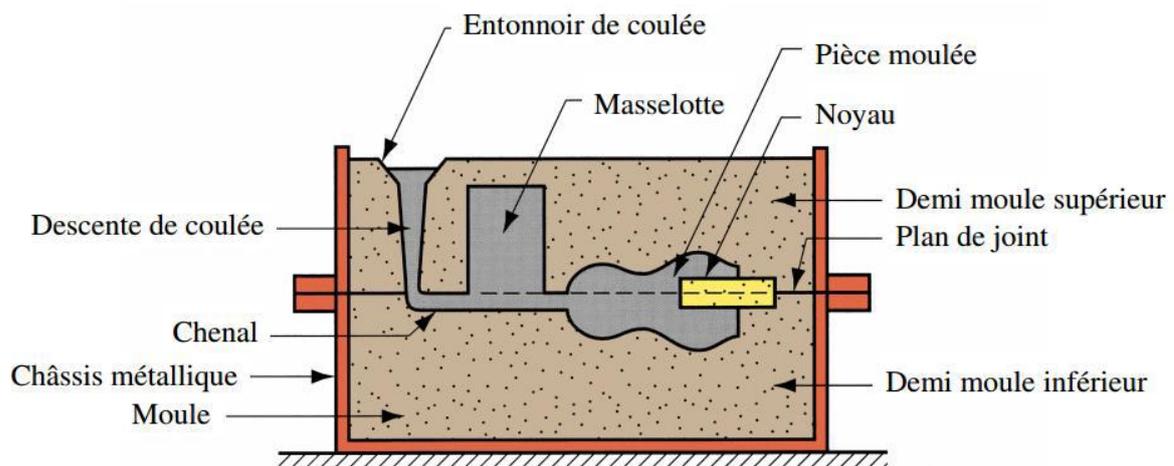


Figure 2.1 : Procédé du moulage en sable

2.4.2 Confection du modèle

Le moulage en sable à la main exige, au préalable, la confection d'un modèle qui donne la forme de la pièce à obtenir. Pour avoir des dimensions exactes, nous devons tenir en compte :

- **Du retrait** : au cours de passage de l'état liquide à l'état solide ou bien pendant le refroidissement il y a une contraction ou une variation (diminution) de volume, donc de dimensions, ce qui nous oblige à prévoir des dimensions supérieures à celles de la pièce voulue.
- **Des surépaisseurs d'usinages** : Réserves de matière nécessaires à l'usinage, elles sont fonction du nombre de passes effectuées et des copeaux minima (ébauche, semi-finition, finition).

- **De la dépouille** : Les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle, prises dans la position du moulage et suivant le sens du démoulage (cette inclinaison prend le nom de dépouille). Les surfaces et formes qui empêchent le démoulage et l'extraction sont dites en contre dépouille.
- **Des congés** : Arrondis de rayon variables qui permettent d'éviter les tensions internes et de faciliter le démoulage.
- **Des portées de noyau** : Parties rapportées au positif sur les modèles avec noyau pour maintenir, soutenir et positionner ces derniers.

2.4.3 Sable utilisé

Le sable de fonderie est transformé en une pâte malléable constituée de grains très fins de silice humidifiés. Il répond aux impératifs suivants :

- Avoir une surface aussi fine que possible
- Reproduire fidèlement la pièce modèle,
- Résister à la température de coulée élevée du métal (présenter une température de ramollissement supérieure à la température de fusion de l'alliage),
- Résister à l'érosion du métal liquide,
- Ne pas s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée,
- Récupérable : une économie de matériaux est assurée par recyclage des sables, après régénération et contrôle de ses caractéristiques. On en cite :
 - le sable auto-siccatif (mélange de silice + huile siccatif (tel que l'huile de lin)) qui durcit sous l'action de l'air
 - et le sable au silicate de soude qui durcit sous l'action du gaz carbonique (CO_2) et peut être utilisé pour la confection des noyaux. Sa composition est généralement de :
 - 70 à 80% de silice => support
 - 5 à 15% d'argile => agglutinant
 - 7 à 10% d'eau - 3 à 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.) Le fait de jouer sur ces pourcentages permet de faire varier les qualités demandées au sable.

2.4.4 Application

Soit à réaliser la pièce suivante :

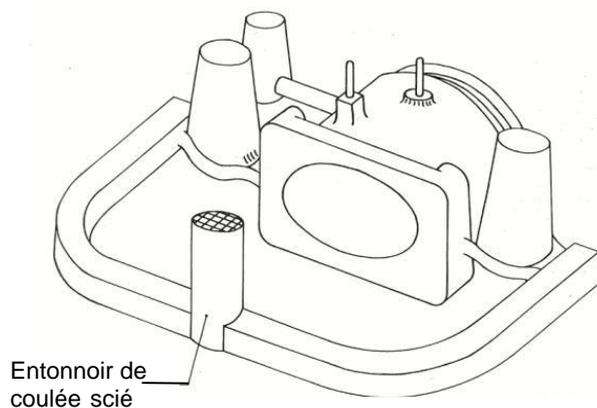


Figure 2.2 : Esquisse de la pièce brute de moulage.

2.4.4.1 Introduction

La pièce à mouler est un boîtier papillon réalisée en alliage d'aluminium dans un moule en sable. L'objet de cette ressource est de montrer les différentes phases du procédé de fonderie ; le modèle et la boîte à noyau sont réalisés par ailleurs (figure 2.3).

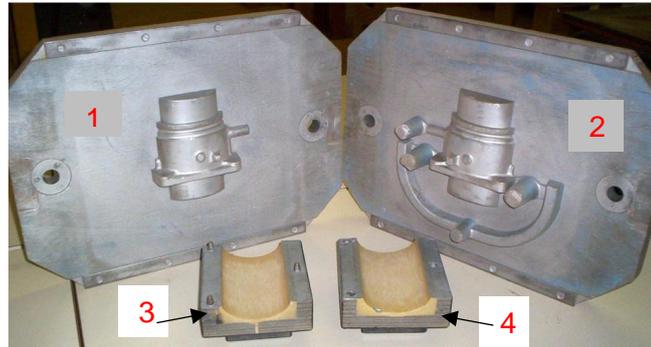


Figure 2.3 : Les plaques modèles (1-2) et la boîte à noyau (3-4).

2.4.4.2 Réalisation du noyau

Le noyau, de forme simple pour cette pièce, est réalisé à l'aide d'une boîte à noyau (figure 2.4) et avec du sable aggloméré, mélange de silice et de silicate de soude (3% en masse). La boîte à noyau montée est remplie du mélange, tassé de façon homogène. Le mélange est ensuite piqué à l'aide d'une aiguille afin de laisser circuler le durcisseur injecté (CO_2). Lorsque le noyau est durci, la boîte est démontée, le noyau délicatement sorti et ébavuré.



Figure 2.4 : Le noyau sorti de sa boîte.

2.4.4.3 Réalisation du moule

2.4.4.3.1 Préparation du sable à vert

Le sable utilisé est composé de silice et d'argile, il est de couleur brune/oranger, et noircit au contact du métal chaud. Il est cependant réutilisable à l'infini une fois remis en condition : tamisé, aéré et humidifié. L'argile humidifiée est le liant des grains de silice.

2.4.4.3.2 Elaboration d'un demi-moule

Les deux plaques modèles (figure 2.5) sont fixées successivement sur la machine à mouler. Une des deux plaques comporte le canal d'alimentation et les masselottes. Un châssis positionné sur la plaque à l'aide de deux goujons de centrage (figure 2.6) comporte à sa base deux barres qui reposent sur les chandelles de la machine.

Les plaques modèle doivent être nettoyées des précédentes utilisations et en parfait état, tout défaut sur la surface utile du moulage sera reproduit sur la surface de la future pièce. Il faut donc veiller à maintenir les plaques modèles en déposant du talc ou de l'agent démoulant pour éviter l'adhérence du sable sur la plaque modèle.

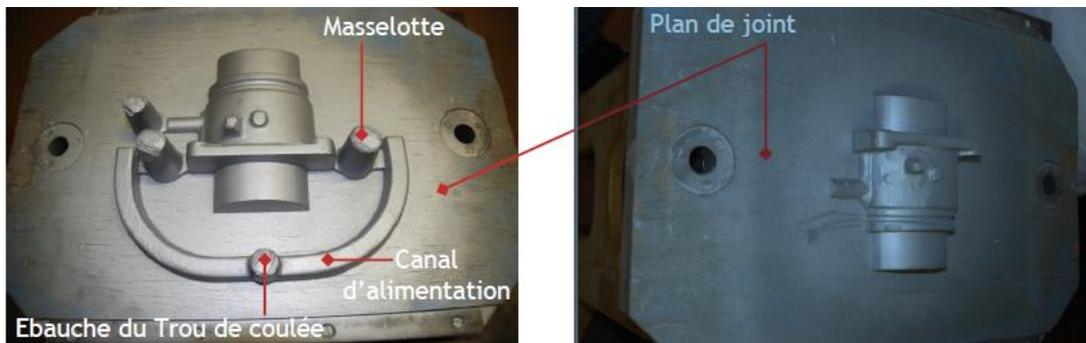


Figure 2.5 : Plaques modèle avec canaux d'alimentation, masselottes et trou de coulée.

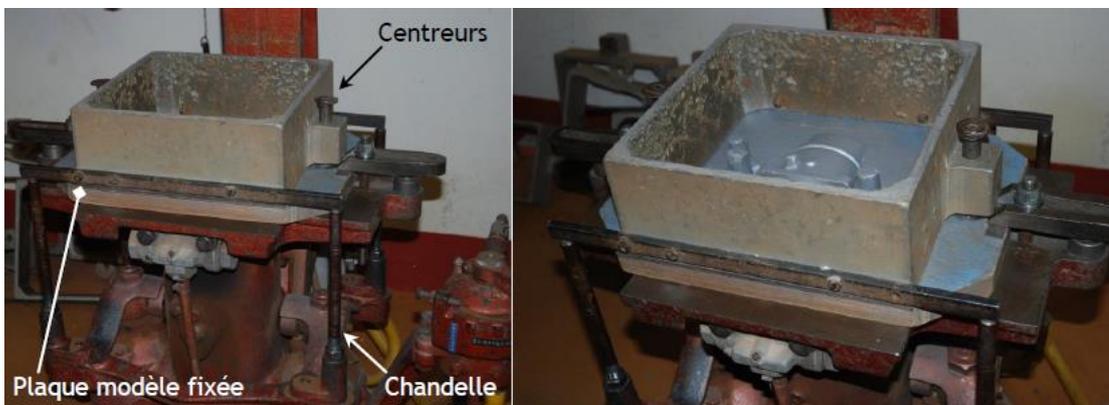


Figure 2.6 : Plaque modèle fixée sur la machine et le châssis positionné.

Le châssis est rempli de sable tamisé pour la partie en contact avec la forme de la pièce ; de la granulométrie du sable en contact avec le modèle dépendra la qualité de l'état de surface de la pièce. Le sable doit être réparti correctement particulièrement aux endroits sensibles, il est progressivement tassé à la main, puis à l'aide de fouloirs lorsque la hauteur est suffisante pour ne pas endommager le modèle (figure 2.7). Le niveau du sable doit dépasser le bord supérieur du châssis, la machine terminant le travail (figure 2.8).



Figure 2.7 : Remplissage du châssis avec le sable à vert.



Figure 2.8 : Tassement mécanique du sable à vert dans le châssis.

Le sable est arasé à hauteur de châssis afin d'obtenir une surface plane (figure 2.9), cette surface sert d'appui pour un des demi-moules lors de la phase de coulée. Puis par vibrations de la machine, le sable est décollé de la plaque modèle. Enfin le châssis est soulevé par les chandelles, la plaque modèle est libérée verticalement (figure 2.10) afin de ne pas abîmer l'empreinte déposée dans chaque demi-moule (figure 2.11).



Figure 2.9 : Arasement du sable.



Figure 2.10 : Montée du châssis, libération des plaques modèle.



Figures 2.11 : Empreintes dans les châssis, la couleur argentée est un résidu de l'agent démoulant.

2.4.4.3 Réalisation des événements et du trou de coulée

Les événements facilitent l'évacuation des gaz lors de la coulée, ils sont réalisés à l'aide d'aiguille (figure 2.12). Le trou de coulée a été ébauché par la plaque modèle, il s'agit maintenant de le rendre débouchant (figure 2.13).



Figure 2.12 : Réalisation des événements à l'aiguille.



Figure 2.13 : Prolongation du trou de coulée.

Le châssis est ensuite retourné, puis l'ouverture du trou coulée est agrandie. La forme pyramidale du trou de coulée (figure 2.14) facilite la visée lors du remplissage et évite la création de vortex, ce qui pourrait entraîner grains de sable et bulles d'air dans le métal et donc des défauts dans la pièce.



Figure 2.14 : Finition du trou de coulée.

2.4.4.3.4 Assemblage du moule

Le noyau préalablement réalisé est positionné délicatement dans l'empreinte du châssis inférieur (celui qui ne comporte pas le trou de coulée). Puis les deux châssis sont

superposés en veillant à leur bonne orientation l'un par rapport à l'autre. Les goujons assurent le bon positionnement et le maintien des deux châssis (figure 2.15 et 2.16).



Figure 2.15 : Positionnement du noyau.



Figure 2.16 : Assemblage des deux châssis.

2.4.4.5 Coulée

La coulée doit être faite rapidement en un seul geste (figure 2.17), il est nécessaire de prélever la bonne quantité à l'aide de la louche préalablement poteyée.



Figure 2.17 : Coulée et remplissage du moule.

2.3.4.6 Obtention de la pièce

La pièce se solidifie mais se refroidit que très peu, il est important de réaliser le démoulage avec précaution. La pièce est solidaire du châssis supérieur séparé en le soulevant du châssis inférieur, qui garde la trace de la pièce moulée, l'empreinte est noircie (figure 2.18).

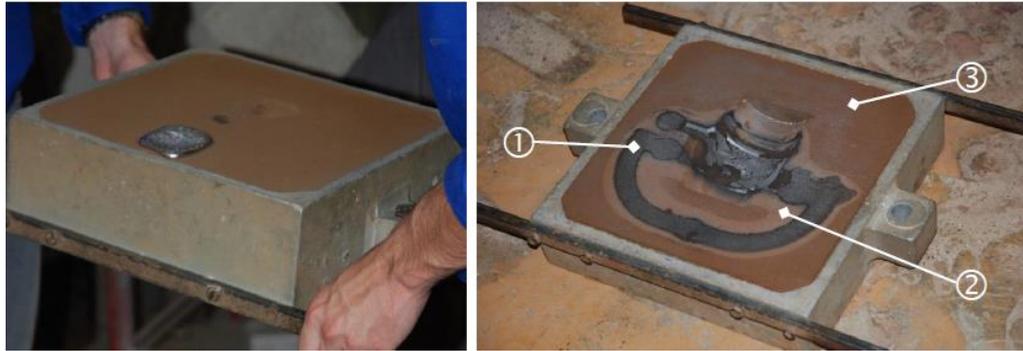


Figure 2.18 : Séparation des deux châssis. Les différentes couleurs du sable après extraction de la pièce : 1) partie brûlée, 2) partie chauffée jusqu'à environ 100°C (évaporation de l'eau), 3) partie non affectée thermiquement (importante isolation du moule en sable, le châssis reste à température ambiante).

Le noyau est inclus dans la pièce (figure 2.19), il est préférable de ne pas mélanger les deux sables ; il faut donc extraire dans un premier temps la pièce et son noyau (figure 2.20), puis éliminer ensuite le noyau (figure 2.21).



Figure 2.19 : La pièce et son noyau dans le châssis supérieur.



Figure 2.20 : Destruction du moule pour extraire la pièce brut de moulage et son noyau inclus.

La pièce brute de démoulage porte le canal d'alimentation et les masselottes qu'il faut par la suite éliminer. On remarque aussi la trace du plan de joint entre les deux châssis du moule (figure 2.21).



Figure 2.21 : La pièce brute de démoulage.

2.5 Moulage en carapace

2.5.1 Principe du procédé

Le métal en fusion, est coulé dans un moule composé de deux coquilles appelées carapaces ou masques. Le procédé est nommé moulage en carapace ou procédé croning: il s'agit d'un moulage à modèle permanent.

2.5.2 Application

Soit à préparer le moule correspondant à la pièce suivante (figure 2.22) :

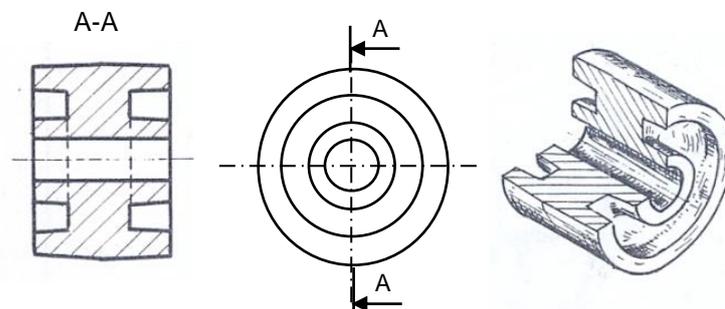


Figure 2.22 : pièce à réaliser.

Etape 1 : Exécution des carapaces (figure 2.23).

Pour l'exécution des carapaces, il faut :

- fabriquer une plaque (modèle métallique en bronze, en aluminium, en acier ou en fonte).
- chauffer la plaque modèle à environ 200 à 300°C.
- verser sur la plaque modèle chauffée un mélange de grains de silice (sable) et 5 à 10% de résine thermodurcissable (indéformable à la chaleur après solidification) : une partie de ce mélange fond au contact de la plaque modèle et forme ainsi en 15 secondes une carapace de 4 à 8mm d'épaisseur.

- Retourner la plaque modèle et mettre la carapace dans une étuve pendant 1 à 2 minutes à une température de 300°C : la carapace devient très dure et rigide.

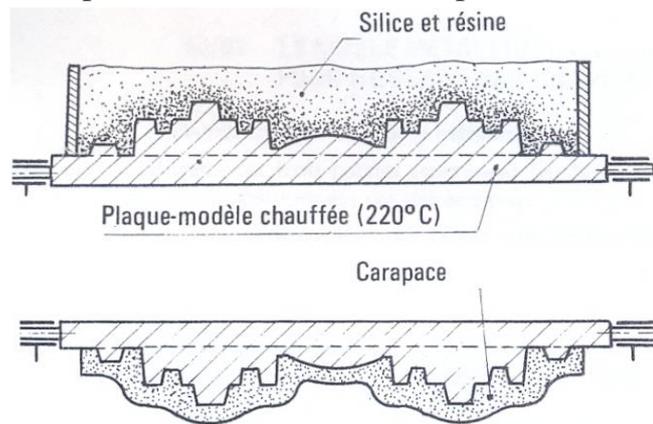


Figure 2.23 : Exécution des carapaces.

La surface intérieure en contact avec la plaque modèle est parfaitement lisse, ce qui va donner à la pièce moulée un état de surface meilleure que celui du moulage en sable.

Etape 2 : Exécution du moule (figure 2.24).

Les carapaces doivent être assemblées avec des noyaux et collées.

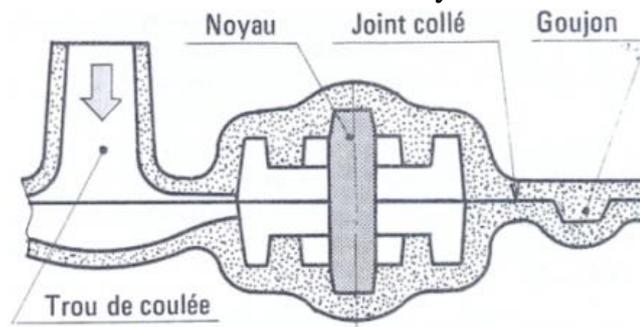


Figure 2.24 : Exécution du moule

Note : Deux types de moule à joint sont réalisables aux choix.

Moule à joint horizontal illustré en figure 2.25 ou Moule à joint vertical illustré en figure 2.26.

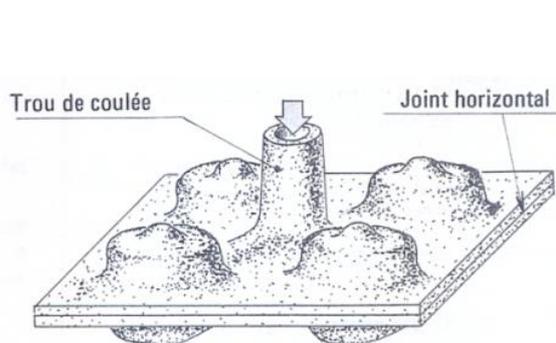


figure 2.25 : Moule à joint horizontal.

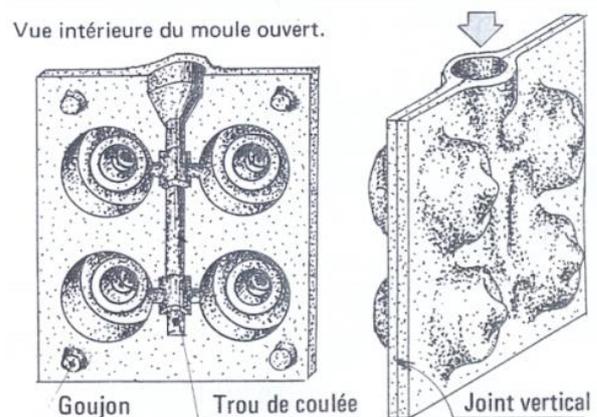


figure 2.26 : Moule à joint vertical.

Ensuite, les moules doivent être placés dans un châssis plein de sable ou de grenailles de fonte afin d'éviter l'ouverture des carapaces (figure 2.27).

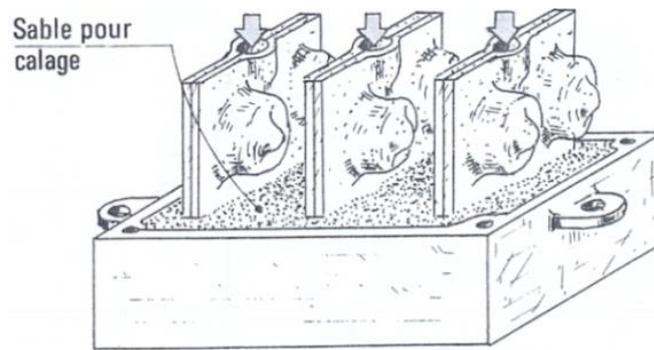


Figure 2.27 : moules placés dans un châssis plein de sable.

Etape 3 : Coulée + refroidissement du métal ensuite, ouverture du moule + décochage + ébarbage.

L'opération d'ouverture du moule se produit en brisant les carapaces.

2.5.3 Avantages et inconvénients du procédé

- Le procédé cironing favorise l'obtention des pièces brutes avec des tolérances dimensionnelles et de forme beaucoup plus faibles qu'avec le moulage en sable. Les frais d'usinage sont alors diminués.
- Le coût de fabrication élevé de la plaque modèle et le prix non négligeable de la résine font que ce procédé soit utilisé pour mouler des petites pièces en grande série.
- Les plaques modèles en fonte sont meilleures que celles en aluminium vue l'usure et la dilatation thermique de ces dernières, ce qui fait que l'aluminium est généralement recouvert d'une couche de chrome pour augmenter sa résistance à l'usure.
- Ce procédé favorise l'obtention des engrenages coniques.

2.6 Moulage à la cire perdue

2.6.1 Introduction

Ce mode de moulage est connu depuis la plus haute antiquité. Les chinois et les grecs l'utilisent pour la fonderie d'objet d'art, il s'est conservé à peu près intégralement pour la fonderie artistique et s'est perfectionné de nos jours pour la coulée de bijouterie et la fabrication de prothèses dentaires en or ou en acier inoxydable, exigeant une grande précision. Il s'est enfin étendu à la production de petites pièces mécaniques à partir de tous les alliages.

Ce procédé de moulage, s'applique à tous types de pièces mécaniques, des petites aux grandes dimensions, de quelques grammes à des pièces allant jusqu'à 25 Kg, de formes simples à des formes compliquées. Les caractéristiques techniques (dimensions, état de surface) sont plus précises que le procédé de moulage au sable. Ce procédé s'applique tout particulièrement à la fonderie des matériaux à haut point de fusion impossible dans des moules métalliques. Cette fonderie à haut point de fusion nécessite un moule en matériau réfractaire tel que la céramique. Avec ce procédé, on moule des pièces en cire que l'on assemble entre elles, ce qui permet d'obtenir des pièces monoblocs qui ne seraient pas réalisables autrement.

2.6.2 Principe du procédé

Le moule est construit autour d'un modèle en cire, lequel ensuite est éliminé par fusion pour libérer l'empreinte formée. L'obligation de détruire le modèle enfermé, impose de fabriquer, non seulement un moule par pièce, mais un modèle par moule. Il faut donc fabriquer en série des modèles fusibles. La gamme de fabrication d'une pièce par ce procédé est la suivante :

- a. Créer un modèle inerte généralement en bronze ou en laiton usiné avec une grande précision et parfaitement polis. Ses dimensions sont déterminées en tenant compte des retraits de la cire, du métal coulé et de la dilatation du revêtement réfractaire du moule.
- b. Confectionner une coquille à l'aide du modèle inerte ou confectionner une coquille de matrière reproduisant rigoureusement le modèle inerte.
- c. Injecter la cire sous pression dans la coquille pour obtenir successivement autant de modèles fusibles qu'on le désire. Aujourd'hui on remplace de plus en plus la cire par une résine thermoplastique telle que le polystyrène qui commence à fondre vers 150 à 200°C et brûle à 450°C et n'est pas récupérée. Les grappes de modèle sont obtenus directement par injection de polystyrène dans des moules métalliques portant les empreintes.
- d. La trempe et enveloppement du modèle s'effectue par projection d'une très fine couche (quelque dixième de mm) d'un enduit réfractaire très fin (silice et liant) ensuite séchage à l'air.
- e. Fusion du modèle perdu par élimination du modèle par chauffage à une température de 200°C.

f. Confection du moule et coulée du métal. Applications :

Tous les métaux ferreux et non ferreux peuvent être moulés par ce procédé. On peut classer les applications d'après la nature des alliages comme suit :

- Alliages réfractaires ou inoxydables.
- Alliages impossibles ou difficiles à forger et à usiner.
- Alliages faciles à usiner mais dont l'usinage ultérieur serait trop complexe.

2.6.3 Application

Ce procédé est utilisé pour fabriquer des pièces de grande précision pour l'industrie aérospatiale, de l'équipement médical (les prothèses dentaires), des pompes à gaz, des soupapes, des caméras, des cames, des objets d'art, des bijoux, des porte-outils de coupe, etc.

Ce procédé est utilisé pour façonner des matériaux difficiles à mouler et difficiles à usiner tel que les aciers inoxydables, les alliages de nickel et les alliages de cuivre.

2.6.4 Avantages et inconvénients du procédé

Le moulage à la cire perdue :

- permet une production en grande série de pièces complexes qui seraient difficiles ou impossibles à obtenir avec d'autres procédés de moulage ou par usinage.
- permet de reproduire des détails compliqués avec une grande précision et une rugosité faible.
- est utilisable pour des métaux disposant d'une très haute température de fusion.
- ne permet pas d'avoir des pièces massives.
- induit un coût d'outillage élevé pour des pièces de masses supérieures à 12 Kg [2].

3. FORGEAGE

3.1 Définition

Le forgeage est un procédé d'obtention de pièces, sans enlèvement de matière, par déformation. Il consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée. Il concerne l'ensemble des méthodes de mise en forme des matériaux par chocs ou par pression des métaux, à chaud ou à froid, afin de produire des pièces semi-finies de formes et dimensions choisies. Le forgeage regroupe plusieurs techniques, telles que le forgeage libre, le forgeage à froid (ou par extrusion), le forgeage par estampage, le forgeage par matriçage, et enfin le forgeage par laminage. Ces procédés existent pour certains d'entre eux, depuis plusieurs siècles (exemple du forgeage libre). Ils peuvent présenter de nombreux avantages, selon la fonction des pièces fabriquées. La forge compte plusieurs technologies de production.

3.2 Forgeage libre

Le forgeage libre est la plus ancienne technique : il s'effectue à chaud soit manuellement (figure 3.1), en frappant le métal posé sur une enclume avec un marteau ou un pilon, soit avec l'aide d'une presse hydraulique puissante. Ainsi, on obtient des ébauches ou des pièces mécaniques brutes, prêtes à être usinées, et dont la résistance est améliorée grâce au processus de forgeage. C'est une technique qui permet de produire des petites séries ou des pièces à l'unité car elle requiert peu d'outils. Le forgeage est dit « libre » car, lors du forgeage, le métal est libre de se déplacer dans plusieurs directions, contrairement au forgeage en matrice où le métal est enfermé dans une forme prédéfinie et n'est pas libre.



Figure 3.1 : forgeage manuel.

L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique.

La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

3.2.1 Avantages

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

3.2.2 Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;
- La précision est médiocre.

3.3 Forgeage à froid ou par extrusion

Le forgeage à froid est un procédé de déformation des métaux à froid, comme son nom l'indique. C'est la technique de forgeage la plus récente. L'extrusion à froid fait partie des procédés de forgeage à froid (figure 3.2).

Le développement important du forgeage à froid s'explique par les nombreux avantages économiques, directs ou indirects, révélés lors de la conception, de la réalisation et de l'utilisation des produits fabriqués. La conception d'une pièce formée à froid permet d'envisager, outre l'obtention de formes sans dépouille, celles de géométries complexes souvent irréalisables dans des conditions industrielles par d'autres procédés (par exemple des formes intérieures polygonales, cylindriques ou coniques, borgnes, sphériques, tronquées, etc.)

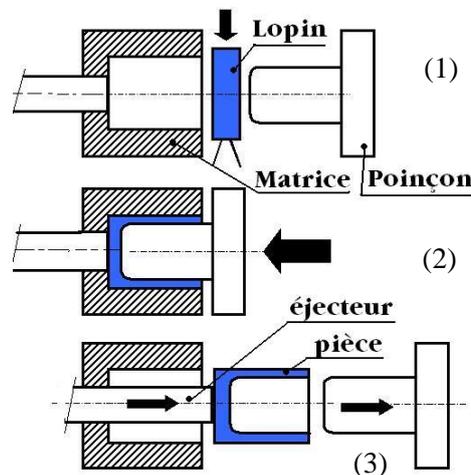


Figure 3.2 : Représentation schématique des différentes phases du forgeage par extrusion.

3.3.1 Avantages

La réalisation par forgeage à froid signifie :

- une cadence élevée de production, généralement comprise entre plusieurs centaines et plusieurs milliers de pièces par heure ;
- une économie de matière mise en œuvre par rapport à d'autres techniques telles que le forgeage à chaud ou l'usinage, la perte étant comprise entre 5 et 20 % ;
- l'obtention de tolérances précises (de quelques centièmes à quelques dixièmes de millimètre) et d'un bon état de surface (de 1 à 5 μm).

3.4 Estampage

Ce procédé consiste à chauffer puis presser la pièce brute entre les matrices, qui ont un creux à la forme de la pièce voulue. Cette technique est utilisée pour la production de grandes séries, étant donné qu'il faut des outils spécifiques (matrices qui ont la forme

du produit voulu par exemple). La forge par estampage est assez précise par rapport aux autres procédés.

L'estampage est le forgeage mécanique des aciers, tandis que le matriçage est le forgeage mécanique des métaux non ferreux (figure 3.3).

3.4.1 Principe

Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs (figure 3.4).

L'estampage et le matriçage sont adaptés à une production en série.



Figure 3.3 : Exemples de pièces et de matrices.

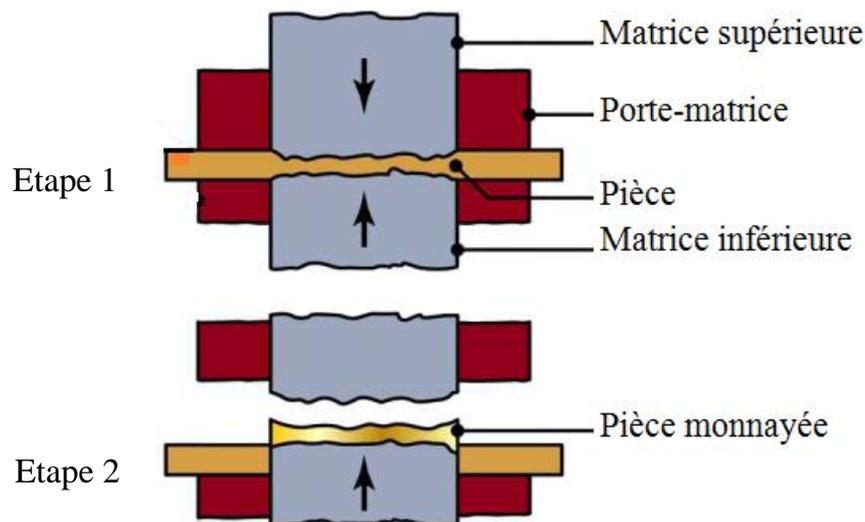


Figure 3.4 : Estampage ouvert.

3.4.2 Avantages

- Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision.

3.4.3 Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;

- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

3.5 Forge par matriçage

Le forgeage par matriçage s'apparente au forgeage par estampage (chauffage puis formage), mais concerne les alliages non ferreux, comme les alliages d'aluminium, de cuivre.... etc (figure 3.5).

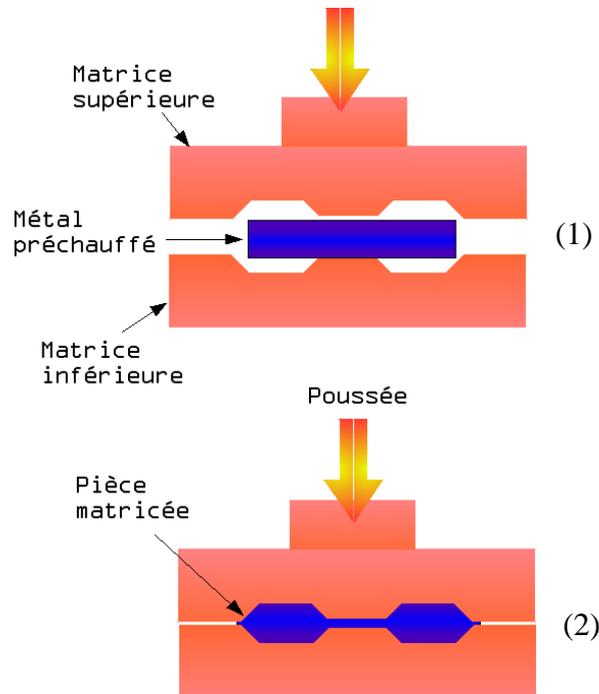


Figure 3.5 : Forge par matriçage.

3.6 Forge par laminage

La forge par laminage permet d'obtenir des couronnes rectilignes ou profilé, faites de n'importe quel matériau.

3.6.1 Principe

Le laminage est une opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils tournant autour de leur axe ; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement (figure 3.6).

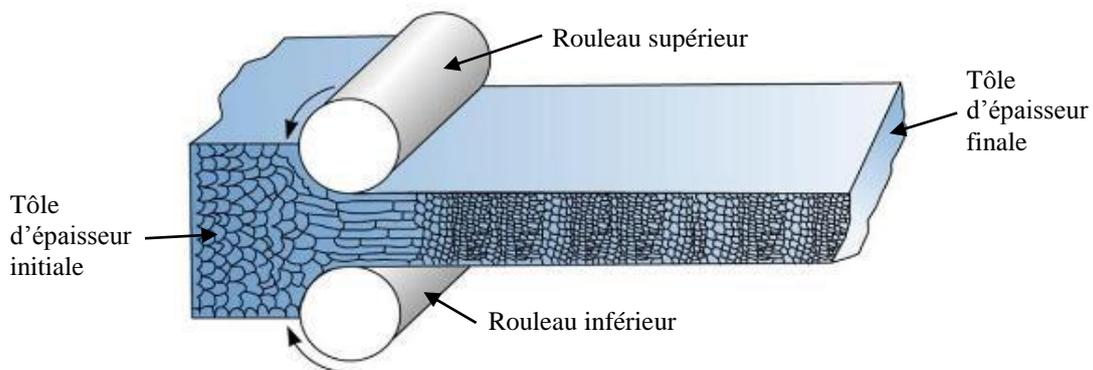


Figure 3.6 : Forge par laminage.

Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud. Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés.

La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.

3.7 Extrusion ou filage

Principe de l'extrusion (appelée aussi filage pour les métaux) :

L'extrusion est le procédé de transformation d'un matériau se trouvant sous des formes diverses, en un produit continu de section transversale bien définie. Cette section, généralement constante est obtenue en obligeant la matière à s'écouler dans un orifice de forme adaptée au profil final souhaité.

La filière dans laquelle le matériau est poussé peut avoir plusieurs formes, en fonction de la section que l'on veut obtenir.

L'extrusion est très utilisée pour l'aluminium. Dans ce cas, le matériau sous forme de billette est chauffé entre 450° et 500 °C avant d'être poussé dans l'orifice de la filière par le piston.

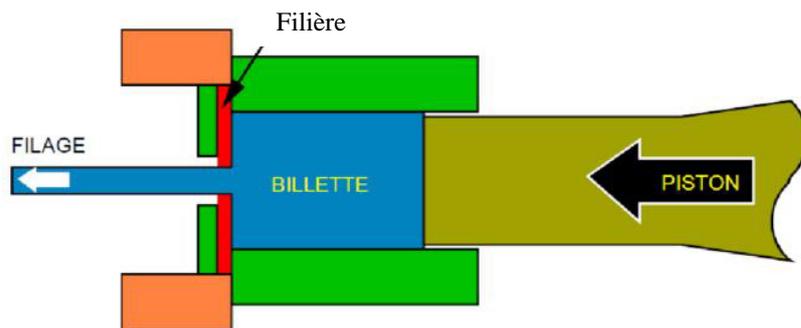


Figure 3.7 : Processus d'extrusion.



Figure 3.8 : Billette (produit de base).

- La réussite du procédé s'appuie en grande partie sur le contrôle des températures recherchées : celles des billettes et de la filière.
- La cadence de fabrication peut être importante à partir du moment où les billettes s'enchaînent rapidement dans la presse.
- La force appliquée par le piston peut varier de quelques centaines de tonnes à plus de 20000 tonnes.

Exemples :

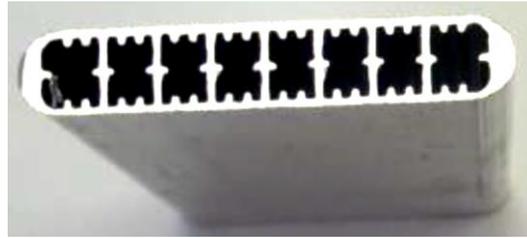


Figure 3.9 : Echangeur de chaleur.

3.7.1 Avantages

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

3.7.2 Inconvénients

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions »

3.8 Le tréfilage

Le tréfilage utilise l'aptitude à la déformation plastique du métal. Ce procédé de transformation à froid consiste à faire passer le métal à travers un orifice calibré, la **filière**, sous l'action d'une traction continue.

Un lubrifiant est utilisé afin de pouvoir réaliser l'opération plusieurs fois de suite et à grande vitesse.

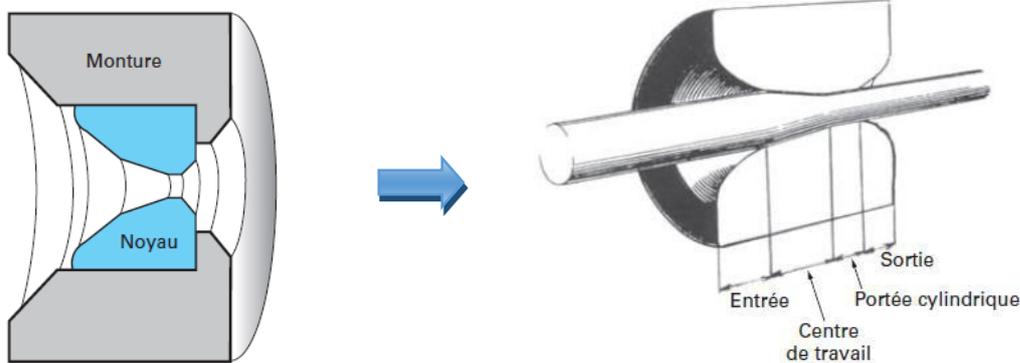


Figure 3.10 : Coupe transversale d'une filière

3.8.1 Géométrie de la filière

La filière possède une géométrie spécifique, calculée en fonction du matériau du fil, de l'aspect de surface que l'on veut lui donner et de l'effort de tréfilage appliqué (figure 3.11).

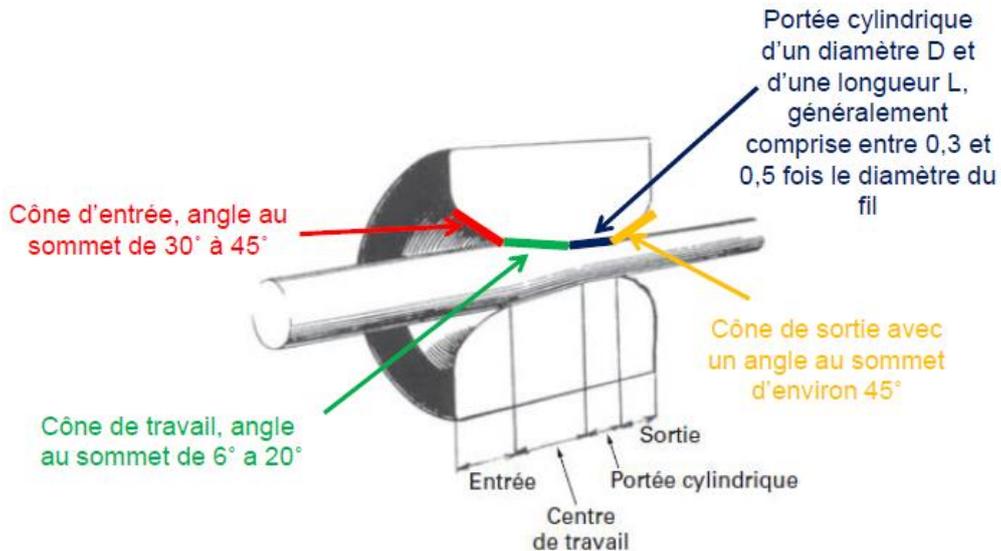


Figure 3.11 : Géométrie de la filière.

Les caractéristiques mécaniques prises en compte sur fil tréfilé sont, plus généralement, celles de traction et dans des cas particuliers, celles de dureté. Celles qui nous intéressent ici sont les propriétés en traction (voir figure 3.12), au fur et à mesure des passages dans la filière, le fil diminue de section, ses caractéristiques de limite élastique (R_e ou $R_{e0.2}$), de résistance (R_m) ou de dureté augmentent.

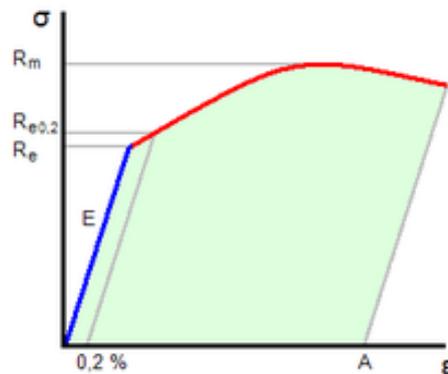


Figure 3.12 : Courbe de traction conventionnelle d'un matériau ductile.

– **La partie linéaire en bleu** définit le domaine de déformation élastique réversible. La contrainte est proportionnelle à la déformation : $\sigma_n = E \epsilon_n$. C'est la loi de Hooke ; E est appelé module d'élasticité (ou module de Young). Si l'on relâche la contrainte dans ce domaine, l'éprouvette revient à sa longueur initiale, sans déformation résiduelle ; la déformation est réversible.

La limite de la déformation élastique définit la limite d'élasticité R_e exprimée en MPa. Dans certains cas, cette limite de la partie linéaire est difficile à définir ; on utilise alors une valeur conventionnelle $R_{0.2}$ qui correspond à la contrainte entraînant une déformation plastique de 0,2 %.

On définit la résistance limite R_m correspondant à la force maximale.

3.8.2 Application

Le tréfilage est utilisé dans divers industries : construction (ponts à haubans) (figure 3.13), bâtiment ressorts industriels, câbles de manutention et de transport, industrie automobile (pneumatique...) (Figure 3.14). Etc.



Figure 3.13 : Ponts à haubans



Figure 3.14 : Armature métallique de pneumatique

3.9 Pliage

Le pliage consiste à exercer une force sur une pièce reposant sur un ou plusieurs appuis ou encastrée à une extrémité. Cette force est exercée par une presse (figure 3.15). La pièce se déforme au-delà de sa limite élastique et conserve donc sa forme.

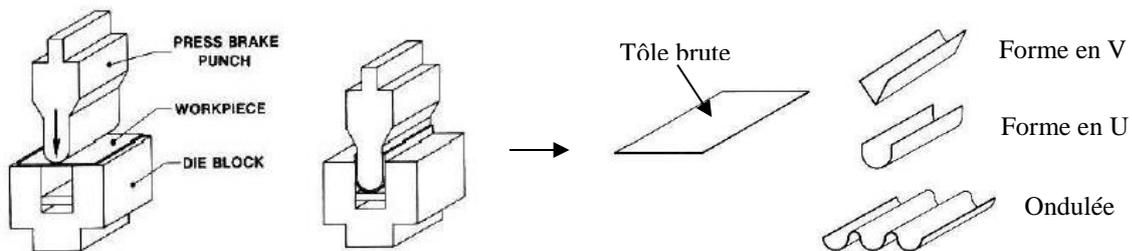


Figure 3.15 : Représentation schématique du pliage.

3.10 Cintrage

Le cintrage consiste à déformer à froid une barre ou un tube suivant un angle donné. L'opération du cintrage est effectuée avec une cintrouse.



Figure 3.16 : cintreuse à levier classique.

3.11 Profilage à froid

Ce procédé est adapté aux grandes séries. Il consiste à déformer progressivement des tôles planes qui sont introduites entre les galets de la machine à profiler jusqu'à l'obtention de la forme voulue sans modification de l'épaisseur initiale de la tôle.

3.11.1 Avantages

- Longueur de profilé non limitée ;
- Procédé rapide et productif.

3.12 Emboutissage

L'emboutissage est un procédé de mise en forme des tôles appelée « flan ». Il est très utilisé dans l'industrie automobile, pour concevoir certaines parties de la carrosserie, mais aussi dans l'électroménager et tout appareil grand public. Cette technique est efficace et peu coûteuse après investissement dans des outillages onéreux. L'emboutissage se pratique à l'aide d'une presse à emboutir de fortes puissances munies d'outillages spéciaux qui comportent généralement trois pièces : [3]

- une matrice, en creux qui 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 qui entoure le poinçon, il s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.

L'opération d'emboutissage peut être réalisée suivant deux techniques différentes.

3.12.1 L'emboutissage à froid : c'est une technique qui permet de former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage avec serre-flan et sur un outillage sans serre flan dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage. Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Toutefois, compte tenu de ses résultats très satisfaisants, l'emboutissage est une solution très fréquente en industrie pour les grandes séries, sachant que l'emboutissage à froid reste privilégié face à l'emboutissage à chaud, jugé plus contraignant.

Les matériaux concernés par ce type d'emboutissage sont :

- Acier doux et inoxydable,
- Aluminium,
- Cuivre, et laiton.

3.12.2 L'emboutissage à chaud : il est utilisé sur des presses hydrauliques simples ou double effet, le domaine d'application de ce procédé est le formage de fonds de réservoir en acier. Par chauffage du flan et de la matrice, la déformation du matériau devient facile et elle permet l'emboutissage de pièces profondes. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid. De plus, la qualité des pièces finies est moins bonne que celle obtenue par emboutissage à froid, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement.

L'opération d'emboutissage typique (double-effet) (voir figure 3.17).

Phase 1 : poinçon et serre-flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.

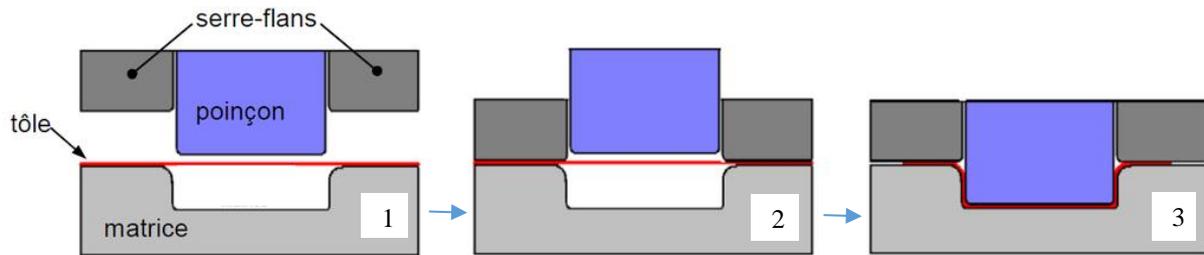


Figure 3.17 : Représentation schématique de l'emboutissage.

Phase 2 : le serre-flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de fluer.

Phase 3 : le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.

Phase 4 : le poinçon et le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

Phase 5 : on procède au «détourage» de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles (essentiellement les parties saisies par le serre-flan).

Selon la profondeur ou la forme de la pièce, plusieurs passes dans des outils différents peuvent être nécessaires.

3.12.3 Les applications de l'emboutissage dans l'industrie

Les principaux secteurs industriels qui utilisent le processus d'emboutissage sont :

- Industrie automobile (figure 3.18).
- Industrie de l'emballage et du conditionnement (figure 3.19).
- Electroménager, sanitaire, ... etc.



Portière de Chrysler [7].



Pot d'échappement [7].



Aile avant de Citroën Picasso [7].

Figure 3.18 : Les applications de l'emboutissage dans l'industrie automobile.

3.12.3.1 L'emballage et le conditionnement : boîtes de boisson, conserves,...

Exemple de pièce emboutie : la canette de boisson, illustrée sur la figure 3.19, est composée de deux pièces, un corps embouti et un couvercle serti. La réalisation se déroule suivant 13 étapes de fabrication (découpage, préformage, emboutissage, étirage, cisailage, nettoyage, impression, vernissage,...).



Figure 3.19 : exemple de pièce emboutie (canette de boisson).

3.12.3.2 Les applications de l'emboutissage dans d'autres secteurs industriels

Électroménager : radiateurs, machines à laver, ballon d'eau chaude.

Sanitaire : lavabos métalliques, bacs.

Autres : capsules rigides, filtres pour générateurs de gaz d'airbag, douilles d'injecteurs, pistons de pompes, gaines d'électrovannes.

3.12.4 Avantages

- Finitions et état de surface élevés. Avec un polissage moindre, on obtient une esthétique supérieure.
- Très rentable, l'emboutissage permet de réaliser jusqu'à 4 000 pièces par heure.

3.12.5 Inconvénients de l'emboutissage

Mise en place assez complexe, il faut préalablement bien régler le poinçon et la matrice. De plus, l'outillage pour réaliser des emboutissages représente un grand investissement, et nécessite d'employer des ouvriers qualifiés.

3.13 Frittage

3.13.1 Principe

Le frittage est un procédé de fabrication de pièces à partir de poudres métalliques intervenant sous plusieurs étapes. En général, il consiste en une compression préalable des poudres, puis au chauffage de celles-ci, ce qui forme la cohésion de la pièce sous l'effet de la chaleur.



Figure 3.20 : Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée.



Figure 3.21 : Plaquettes de frein.

3.13.2 Applications

Pour les applications dans le domaine du frottement et de l'usure.

- Outils abrasifs constitués d'une matrice métallique (bronze, cobalt, fer, nickel, tungstène...) et de grains de diamant ou de nitrure de bore cubique,
- Plaquettes de coupes : carbures métalliques (W, Ti...) avec cobalt, céramiques diverses (figure 3.20).
- Plaquettes de frein : bronze + graphite, fer + graphite (figure 3.21).

3.13.3 Avantages

- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, donc coûts de production compétitifs.
- Tolérance dimensionnelle appréciable ;
- Qualité de surface importante ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages (appelés dans ce cas « pseudo-alliages »).

3.13.4 Inconvénients

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple.
- Résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.
- Nécessite un matériel adapté permettant des mises en pression importantes et un contrôle de la densité
- Applicable à des pièces de grande série car nécessite la fabrication de matrices.

Références bibliographique

- [1] S. Gara, procédés de mise en forme par moulage. Cours de moulage en sable 2017.
- [2] C. Masclé ; W. Wygowski. Fabrication avancée et méthodes industrielles Tome 1. Presses internationales Polytechnique. 2012.
- [3] <https://www.sous-traiter.fr/emboutissage-avantages-inconvenients>.
- [4] <http://www.ball-europe.com>
- [5] http://archives.universcience.fr/francais/ala_cite/expo/tempo/aluminium/histoire/
- [6] S. Sfarni. Cours Technologie de base. Université Abdelkader Mira - Béjaia.
- [7] <https://www.cetim.fr/Technologies/Materiaux-Procédes>.

CHAPITRE3: PROCEDES D'OBTENTION DES PIECES PAR ENLEVEMENT DE MATIERE.

1. Introduction

L'usinage par enlèvement de copeaux se fait par opérations ou groupes d'opérations. Les principales techniques d'usinage traditionnel sont respectivement :

- le tournage,
- le fraisage,
- le perçage.

2 Tournage

2.1 Généralités

L'usinage par tournage consiste à réaliser des pièces de formes cylindriques ou coniques en enlevant de la matière. Comme son nom l'indique, ce procédé se fait grâce à une machine appelée « tour ». La pièce est fixée sur un dispositif appelé « mandrin » et le mouvement de coupe est obtenu par rotation de celui-ci. L'usinage de la pièce se fait grâce à la combinaison de deux mouvements [1].

- Un mouvement de coupe donné à la pièce.
- Un mouvement d'avance donné à l'outil.

L'intérêt du tournage est d'obtenir des pièces ayant une précision supérieure à celle de la fonderie et au du forgeage, d'avoir un meilleur état de surface et de pouvoir usiner certains détails avec précision, ce qui n'est pas réalisable en fonderie (figure 2.1).

La coupe des métaux par tournage est obtenue par engagement de l'arête tranchante de l'outil dans la matière. En fonction de la profondeur de passe on distingue :

- Le travail d'ébauche qui permet d'enlever le maximum de matière dans un minimum de temps.
- Le travail de finition permet d'obtenir un très bon état de surfaces usinées.

Il existe deux catégories d'opérations de tournage :

- Le tournage extérieur,
- Le tournage intérieur.

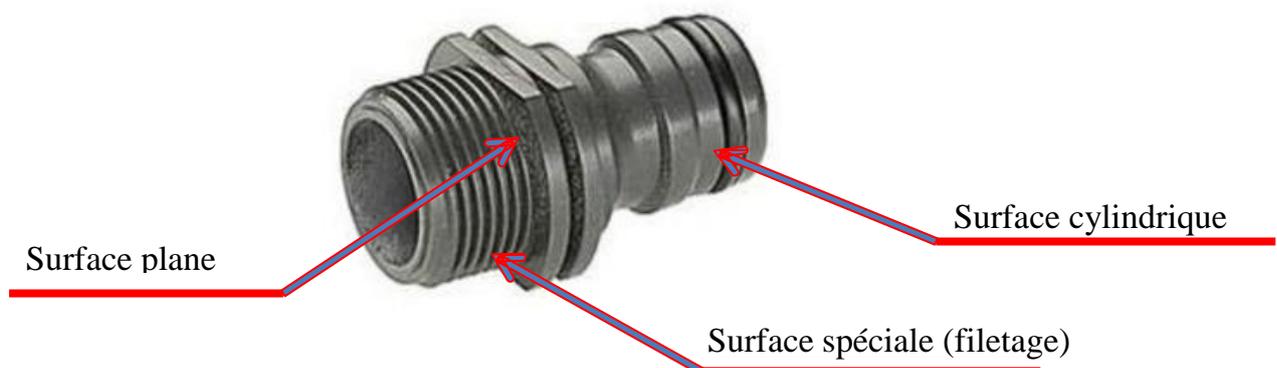


Figure 2.1 : Différentes surfaces réalisées par tournage.

2.2 Mouvements relatifs entre pièce et outil

Pour engendrer une surface de révolution sur un tour parallèle, il faut appliquer à la pièce et à l'outil deux mouvements conjugués, comme illustré sur la figure 2.2 [2] :

2.2.1 Le mouvement de coupe (M_c) [m/min.] est le mouvement de rotation de la broche. C'est ce mouvement qui permet l'élimination de la matière. Il représente le mouvement relatif entre la pièce et l'outil.

2.2.2 Le mouvement d'avance (M_a) [mm/min. ou mm/tr] correspond au déplacement de l'outil entre deux passes. C'est un mouvement indispensable pour générer les surfaces.

2.2.3 Le mouvement de pénétration [mm] donne la profondeur de passe d'usinage.

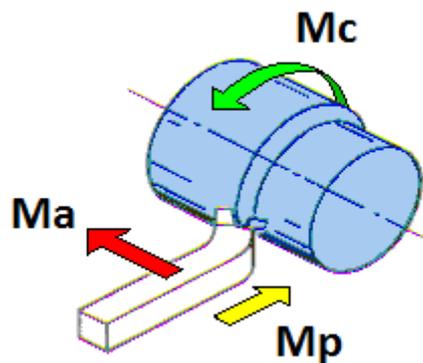


Figure 2.2 : Mouvements relatifs entre pièce et outil.

2.3 Le tour

Selon la cadence d'usinage, il existe plusieurs catégories de tour (figure 2.3 et 2.4).



Figure 2.3 : a) Tour parallèle. b) Tour à commande numérique.

2.3.1 Les tours parallèles : Ces machines sont réservées aux travaux unitaires et de petites séries [2]. sur des pièces très simples. Ces **tours** sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables sur ce type de machine [3].

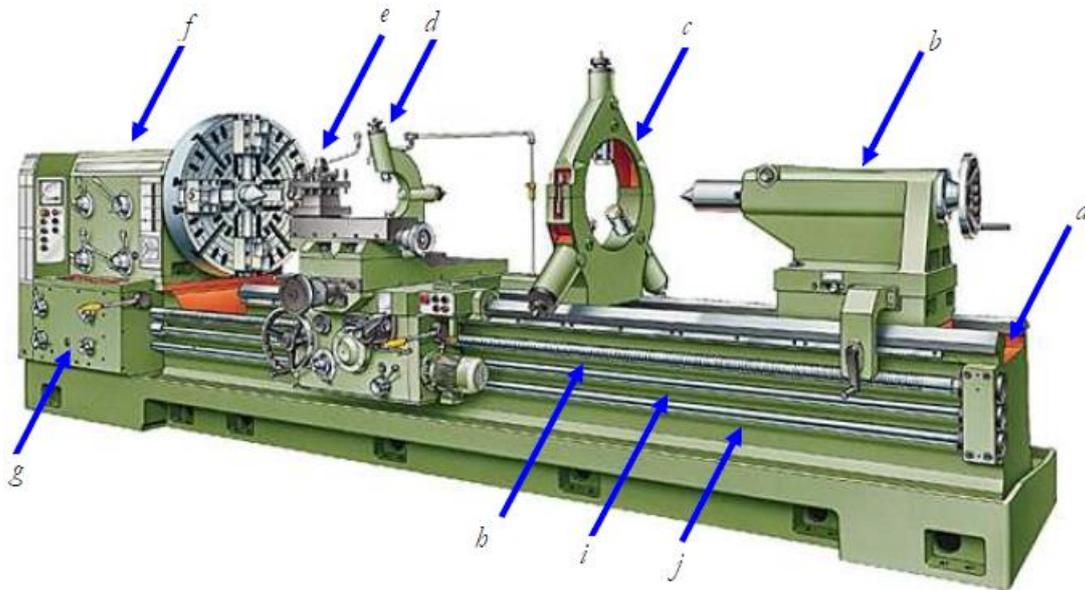


Figure 2.4 : Le tour parallèle (différents organes).

- | | | | |
|------------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------|
| a. banc du tour | b. poupée mobile | c. lunette fixe | d. lunette mobile |
| e. chariot porte-outil | f. poupée fixe | g. mécanisme de commande de l'avance | |
| h. barre de chariotage | i. vis-mère | j. barre de débrayage | |

2.3.2 Les tours à copier

Ces machines sont flexibles, elles peuvent convenir pour des travaux de petites et grandes séries. Elles permettent, à partir d'un gabarit, l'**usinage** par reproduction grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal.

2.3.3 Les tours semi-automatiques

Ce sont des **machines utilisées pour les travaux de moyenne série. Elles sont** équipées d'une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. La commande de ces **machines** peut être en partie automatique ou manuelle.

2.3.4 Les tours automatiques

Sur ces machines nous pouvons monter plusieurs **outils**. La vitesse d'avance et la course de chaque outil est contrôlée par des cames spécifiques à chaque opération de la pièce. Ces machines conviennent pour les très grandes séries.

2.3.5 Les tours à commande numérique

Sur ces machines, la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un ordinateur qui travaille à partir d'un programme spécifique à la pièce. **Ces machines sont** adaptées pour le travail unitaire et les petites séries répétitives ou la précision est demandée [3, 5,6].

2.4 Outils

Le choix d'un outil de tournage s'effectue à partir de la forme à obtenir. Il doit y avoir compatibilité entre les paramètres définissant la géométrie de la pièce (angles, distances)

et ceux de l'outil (forme de la plaquette, position de l'arête de coupe).

2.4.1 Composition

Un outil de coupe, illustré en figure 2.5, est composé d'un corps et d'une partie active. Le corps est la partie de l'outil qui porte les différents éléments coupants ou les plaquettes [2,4]. La partie active est constituée des différentes arêtes, de la face de coupe et des faces de dépouille. Elle intervient directement dans l'opération de coupe [2,4].

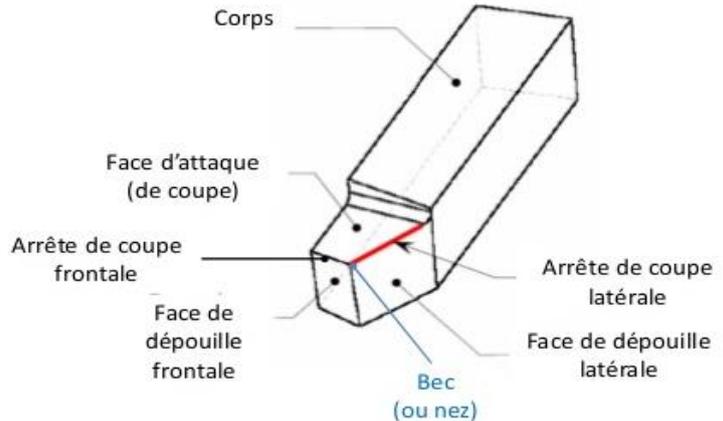


Figure 2.5 : Géométrie de l'outil de coupe de tournage.



Outil en acier rapide



Outil à plaquettes en carbure brasées



Outil à plaquettes en carbure amovibles

Figure 2.6 : Matériaux des outils de coupe de tournage.

2.4.2 Matériaux des outils de coupe

Acier rapide noté ARS : Par aciers "rapides" il faut entendre "aciers à coupe rapide". On effet, ces aciers comportent généralement une quantité importante de Tungstène (W) de cobalt (K) et de chrome (C) additionnée à l'alliage de base afin d'améliorer la dureté et la résistance à l'usure (acier comportant 0.9 à 1.5% de carbone). Ces outils peuvent travailler à une température de 500 °C sans que l'arête tranchante soit détériorée [5]. Ces outils conviennent à l'usinage des matériaux tel que l'aluminium, le laiton et le

plastique. Ils sont utilisés pour les travaux de petites séries et dans les usinages où les vibrations et les chocs sont relativement importants.

Les outils en carbure : Sont plus durs que les outils en acier rapide, ils résistent mieux à l'usure et aux températures élevées.

2.4.3 Qualification des outils de tournage

Trois cas se présentent et sont illustrés sur la figure 2.7.

- Si l'arête est à droite, l'outil est droit.
- Si l'arête est à gauche, l'outil est gauche.
- Si l'outil a deux arêtes symétriques ou une arête perpendiculaire à la direction de l'avance (exemple : outil pelle à plaquette triangulaire), l'outil est neutre [2].



Figure 2.7 : Qualification des outils de tournage.

2.5 Les différentes opérations de tournage

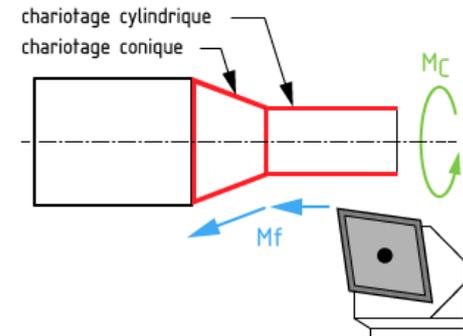
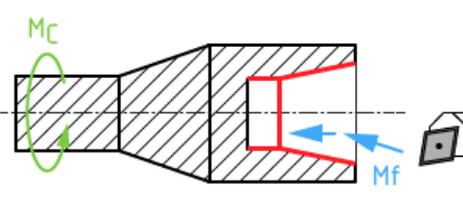
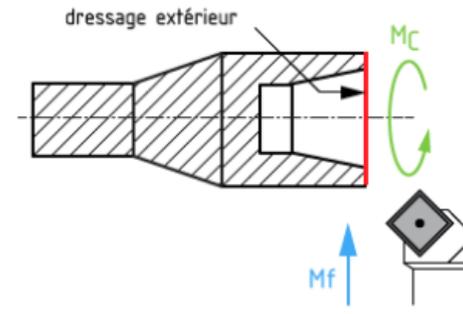
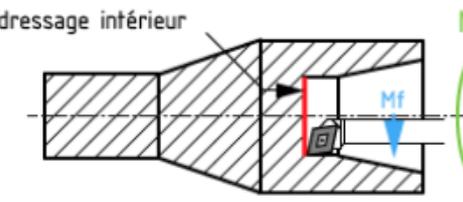
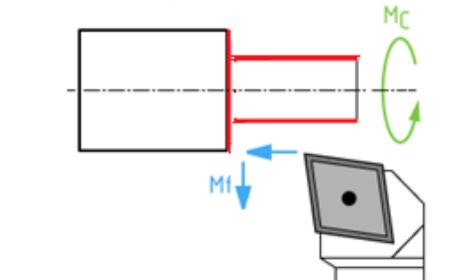
Selon la surface de la pièce à usiner, il existe principalement deux différents types d'opérations de tournage :

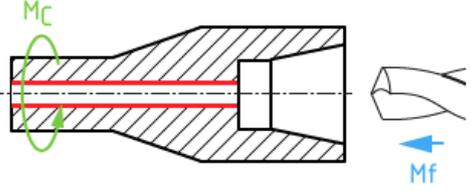
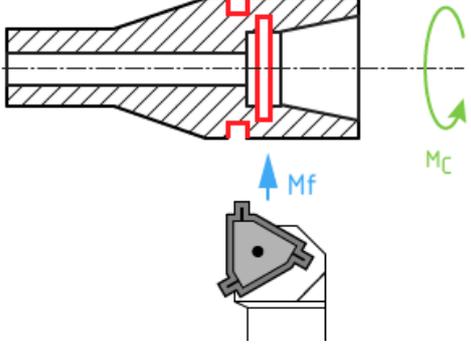
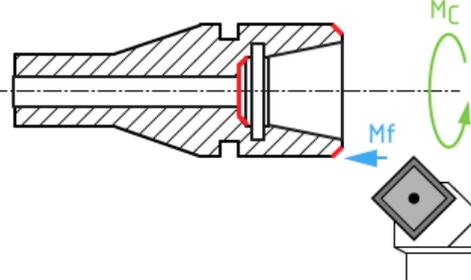
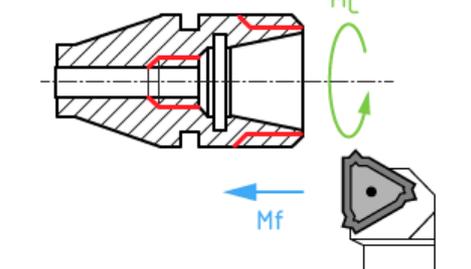
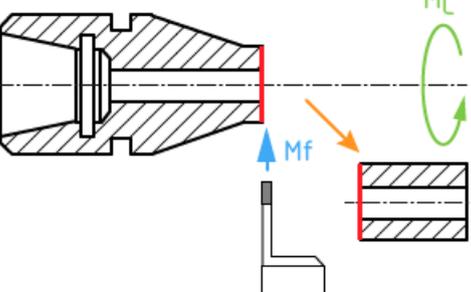
2.5.1 Le tournage extérieur : définit l'enlèvement de copeaux sur l'extérieur de la pièce. Tel que le dressage, le chariotage, le chanfreinage, le rainurage et le filetage.

2.5.2 Le tournage intérieur : Ce type d'usinage comprend les opérations de pointage, de centrage, l'alésage, le rainurage. Il consiste à usiner une pièce de l'intérieur.

Afin de réaliser avec succès l'usinage d'une pièce, il faut tenir en compte les critères suivants :

- Le type de machine : il faudra donc définir au préalable sur quelle machine il faut usiner les pièces (en fonction de la puissance de la machine, de la vitesse, ...).
- Le matériau de la pièce : une pièce en aluminium ne s'usinera pas comme une pièce en acier, en cuivre ou en bronze.
- Et enfin, le type d'opération comme expliqué ci-dessous [1].

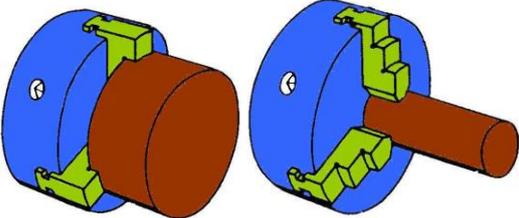
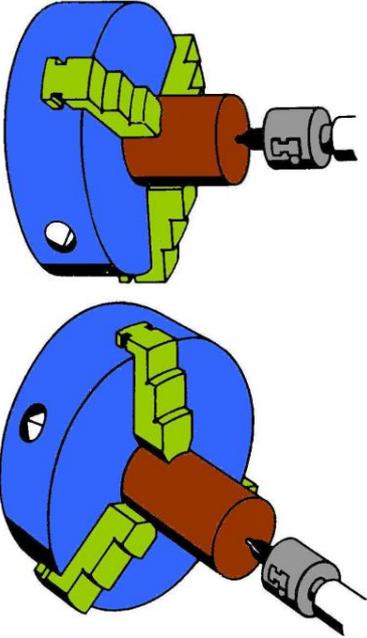
Type d'opération	Figure illustrative
<p style="text-align: center;">Chariotage</p> <p>Le chariotage est une opération qui consiste à réaliser un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil à charioter parallèlement à l'axe de rotation de la pièce.</p> <p>Le chariotage permet aussi d'usiner une surface conique extérieure [4].</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figure 2.8 : Le chariotage cylindrique et conique.</i></p>
<p style="text-align: center;">Alésage</p> <p>c'est une opération permettant d'usiner une surface cylindrique ou conique de qualité à l'intérieur d'une pièce [3,4,6].</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figure 2.9 : L'alésage cylindrique et conique.</i></p>
<p style="text-align: center;">Dressage</p> <p>Opération qui permet de réaliser une surface plane, extérieure ou intérieure, et perpendiculaire à l'axe de rotation la broche [3-5].</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figure 2.10 : Dressage extérieur.</i></p>
	 <p style="text-align: center;"><i>Figure 2.11 : Dressage intérieur.</i></p>
<p style="text-align: center;">L'épaulement</p> <p>L'épaulement est l'association d'un chariotage et d'un dressage.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figure 2.12 : Epaulement.</i></p>

<p>Le perçage Opération qui permet de réaliser un trou à l'aide d'une forêt. l'axe du trou est Souvent confondu avec l'axe de la pièce [3-6].</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece with a hole being drilled. A green arrow labeled 'Mc' indicates the rotation of the workpiece. A blue arrow labeled 'Mf' indicates the feed of the drill bit. A small inset shows the drill bit cutting into the workpiece.</p> <p><i>Figure 2.13 : Le perçage.</i></p>
<p>Le rainurage C'est une opération qui permet d'usiner, à l'intérieure ou l'extérieure d'une pièce, une rainure (association de 3 plans) pour le logement d'un circlips [3-6].</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece with a groove being cut. A green arrow labeled 'Mc' indicates the rotation of the workpiece. A blue arrow labeled 'Mf' indicates the feed of the groove cutting tool. A small inset shows the tool cutting the groove.</p> <p><i>Figure 2.14 : Le rainurage.</i></p>
<p>Le chanfreinage Opération qui permet de supprimer un angle vif en usinant un cône de petite dimension de façon à [3-6].</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece with a chamfer being cut. A green arrow labeled 'Mc' indicates the rotation of the workpiece. A blue arrow labeled 'Mf' indicates the feed of the chamfering tool. A small inset shows the tool cutting the chamfer.</p> <p><i>Figure 2.15 : Le chanfreinage.</i></p>
<p>Le filetage C'est opération de tournage qui permet de réaliser un filetage extérieur ou intérieur [3-6].</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece with a thread being cut. A green arrow labeled 'Mc' indicates the rotation of the workpiece. A blue arrow labeled 'Mf' indicates the feed of the threading tool. A small inset shows the tool cutting the thread.</p> <p><i>Figure 2.16 : le filetage.</i></p>
<p>Le tronçonnage Le tronçonnage est l'opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin de détacher un tronçon.</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece with a groove being cut through its diameter. A green arrow labeled 'Mc' indicates the rotation of the workpiece. A blue arrow labeled 'Mf' indicates the feed of the parting tool. A small inset shows the tool cutting the groove, and a red arrow points to the detached part.</p> <p><i>Figure 2.17 : Le tronçonnage.</i></p>

2.6 Montage des pièces sur un tour

Suivant le travail demandé, nous pouvons choisir différents types de montage ou de fixation de la pièce à usiner. Le choix du type de montage se fait en fonction des

dimensions de la pièce à usiner et de la précision de l'usinage.

Type de montage	Figure illustrative
<p>2.6.1 Montage en l'air</p> <p>La mise en position (situation de l'axe de révolution de la pièce) est assurée sur le mandrin universel (3 ou 4 mors) par une seule extrémité, afin d'assurer la fixation de la pièce et le maintien en position pendant toute la durée de l'usinage [3]. Ce genre de montage permet la réalisation de l'usinage de surfaces extérieures et intérieures [2,6].</p>	 <p><i>Figure 2.18 : Montage en l'air.</i></p>
<p>2.6.2 Montage mixte</p> <p>Ce type de montage offre une solution à la limitation en longueur donnée dans le cas précédent. Toutefois, la longueur de la pièce doit être inférieure à neuf fois son diamètre. Dans ce cas, le montage mixte assure à la pièce, déjà tenue en l'air à une extrémité, un soutien à l'aide de la contre-pointe à l'autre extrémité [2].</p> <p>Il permet, Pour l'usinage de pièces relativement longues, un entraînement et un maintien nettement meilleur que ceux obtenus par un montage entre pointes.</p> <p>Pour l'usinage de pièces courtes, la prise de fortes passes d'ébauches et donc un gain de temps.</p> <p>Le montage mixte ne permet que des travaux extérieurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autant que possible, le centrage doit être effectué en première opération sur le tour. <p>Le centrage s'effectue au moyen d'un foret centreur. Puis, sans démonter la pièce du mandrin, on la fixe à la contre-pointe via la poupée mobile et on peut alors effectuer les autres opérations de tournage.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chaque démontage et remontage entraînent une perte de précision. 	 <p><i>Figure 2.19 : Montage mixte.</i></p>

2.6.3 Montage entre-pointes

La mise en position est assurée par pointes qui se logent dans les centres de la pièce [2].

Ce montage est utilisé :

- en finition pour la reprise de pièces afin d'obtenir des conditions géométriques imposées (concentricité, parallélisme, perpendicularité)
- pour éviter les flexions des pièces, et surtout en fonction des formes et des qualités géométriques exigées.
- pour l'usinage de surfaces extérieures seulement.

Le mouvement de rotation du porte-broche est transmis à la pièce à usiner grâce à un plateau d'entraînement et un toc. Le plateau d'entraînement remplace le mandrin. Dans ce cas, on peut effectuer des opérations de démontage et de remontage sans perte de précision. Les longueurs des pièces doivent être inférieures à neuf fois le diamètre.

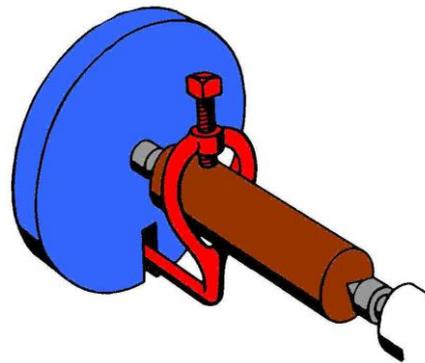


Figure 2.20 : Montage entre-pointes.

2.6.4 Lunette et mandrin de montage

Les pièces longues et minces ($l > 9d$) peuvent subir une flexion pendant le tournage ; et ainsi le diamètre devient imprécis ; de plus des marques de vibration peuvent apparaître à la surface de la pièce. Pour éviter la flexion, on utilise la lunette. Celle-ci possède des mâchoires glissantes réglables entre lesquelles tourne la pièce.

Il existe des lunettes fixes et mobiles : la lunette fixe est solidaire du banc du tour, la lunette mobile se fixe sur le chariot porte-outil (Figure 2.21).

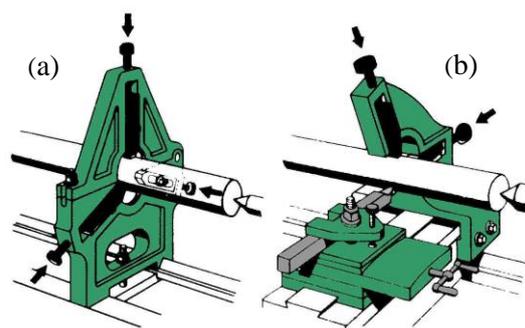


Figure 2.21 : Montage avec lunettes.

- a) Lunette fixe.
- b) Lunette mobile.

3 FRAISAGE

3.1 Introduction

Le fraisage est un procédé de fabrication faisant intervenir simultanément, le mouvement de rotation d'un outil possédant une ou plusieurs arêtes de coupe (mouvement de coupe) et la combinaison de translations rectilignes voire de rotations entre l'outil et la pièce (mouvement d'avance). L'outil de fraisage, appelé fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune retire une certaine quantité de matière sous forme de copeaux.

3.2 La machine

La machine utilisée dans l'usinage par fraisage est appelée fraiseuse (figure 3.1).

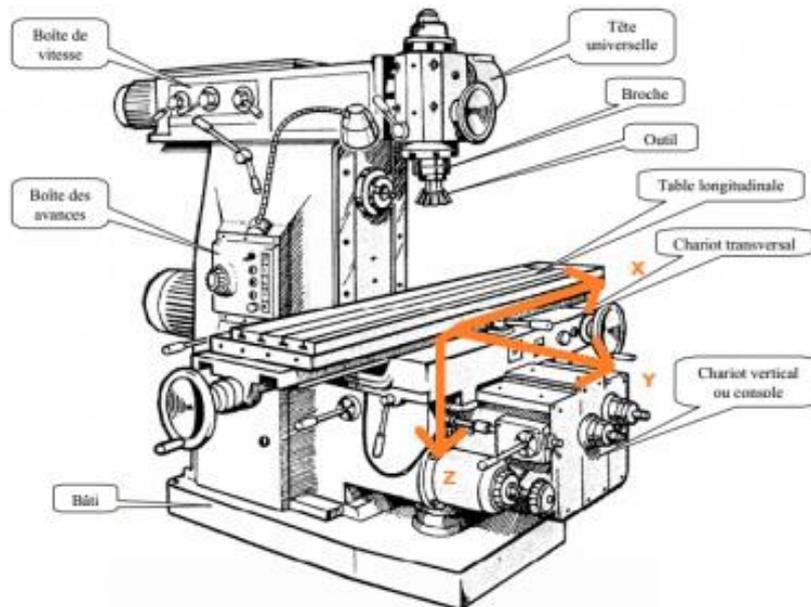


Figure 3.1 : Fraiseuse universelle.

3.3 Différents types de fraisage

Le choix du type de fraisage se fait en fonction de la planéité et de l'état de surface.

3.3.1 Le fraisage en bout ou fraisage de face

Ce mode d'usinage est réalisé avec le bout de fraise L'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (figure 3.2a), ce mode de fraisage est également appelé fraisage de face. Dans ce cas, la planéité est fonction de la perpendicularité de l'axe de la broche par rapport au mouvement d'avance M_f , l'état de surface est caractérisé par une série de courbes sécantes laissées par les dents de la fraise.

Dans ce type de fraisage, la surface usinée, est perpendiculaire à l'axe de la fraise.

3.3.2 Le fraisage de profil ou en roulant.

L'axe de la fraise est parallèle au plan fraisé. Ce type de fraisage est également appelé fraisage en roulant (figure3.2b).

Dans ce cas, la planéité dépend de la rectitude du profil de la fraise. L'état de surface présente une série d'ondulations laissée par les dents de la fraise.

Remarque : généralement, la surface obtenue possède une précision et un état de surface meilleure que celui obtenus en fraisage de profil.

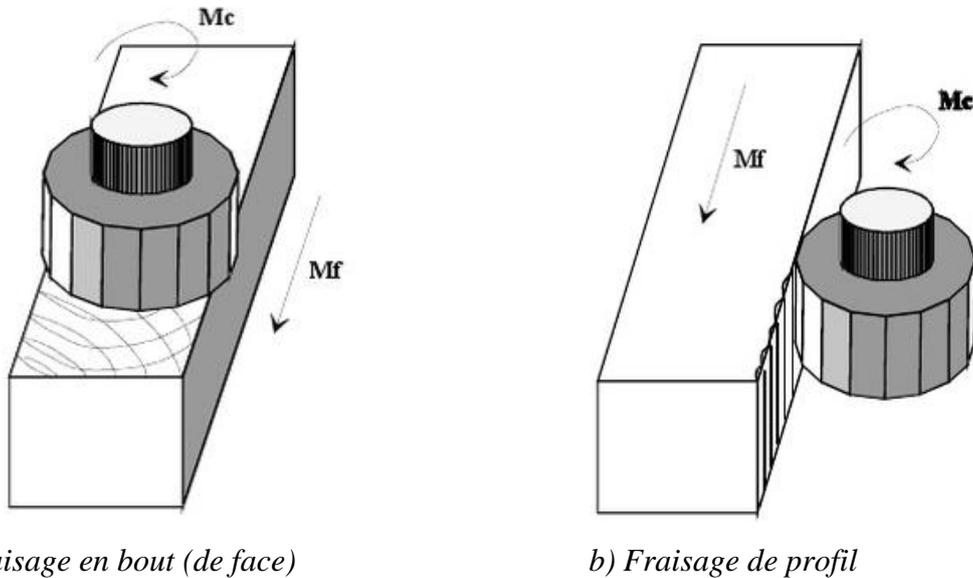


Figure 3.2 : Différents types de fraisage.

3.3.3 Fraisage en opposition

Dans le fraisage en opposition, la direction de l'avance est opposée au sens de rotation de l'outil (figure 3.3a). L'épaisseur des copeaux commence à zéro et augmente vers la fin de la coupe. L'arête de coupe doit entrer en coupe par la force, ce qui produit un effet de frottement ou de brunissage, élève la température et écrouit souvent la matière (que l'arête suivante devra couper) [7]. Ces différents facteurs réduisent la durée de vie de l'outil et provoquent l'usure prématurée de celui-ci.

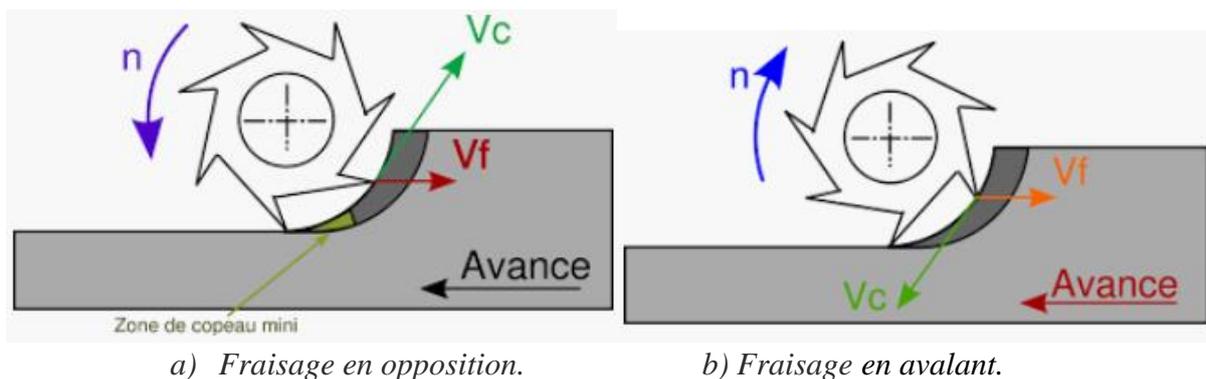


Figure 3.3 : Modes d'avance en fraisage.

3.3.4 Fraisage en avalant

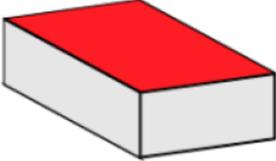
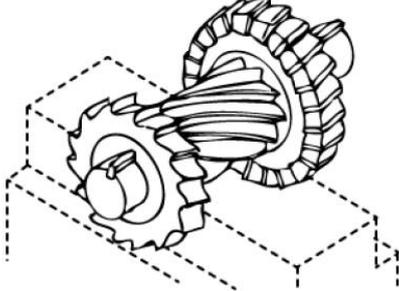
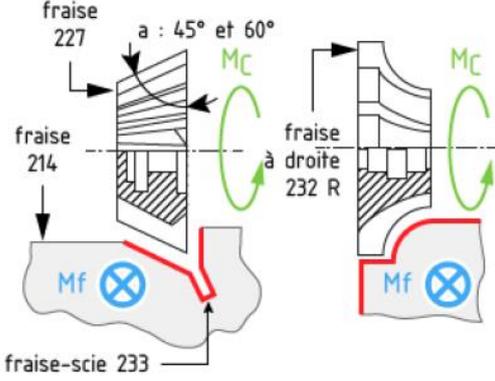
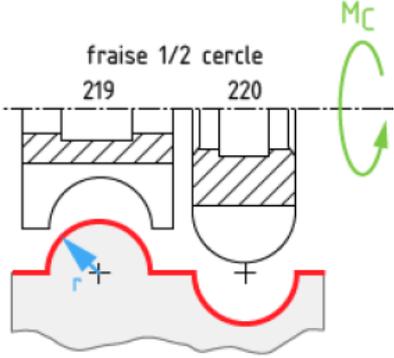
Dans le fraisage en avalant, l'outil avance dans le sens de sa rotation (figure 3.3b). Dans l'usinage en avalant, les copeaux sont plus épais en entrée qu'en sortie. Ceci permet d'empêcher l'arête de frotter contre la surface et de subir un brunissage avant de s'engager en coupe.

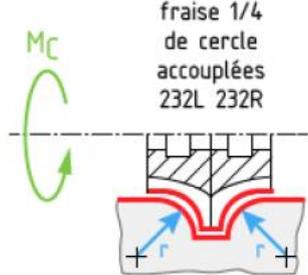
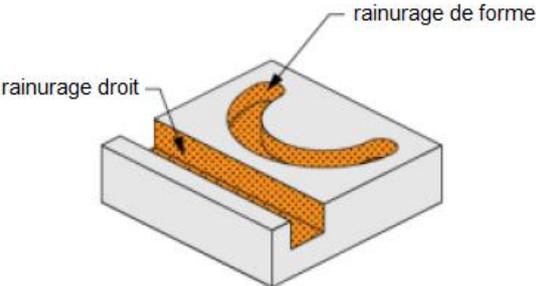
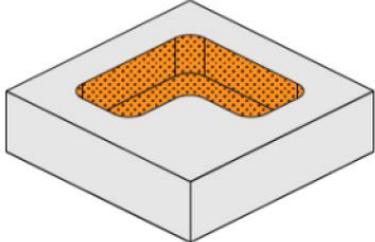
Le résultat de ce type d'usinage est un état de surface amélioré par rapport au fraisage en opposition.

Inconvénient :

Pour ce type de fraisage il y a risque d'apparition d'ondulations, en raison de la flexion et du faux rond de l'outil fraise [6].

3.4 Principales opérations de fraisage

Type d'opération	Figure illustrative
<p>3.4.1 Le surfacage C'est une opération qui permet de réaliser des surfaces planes [6].</p>	 <p>Figure 3.4 : Le surfacage.</p>
<p>3.4.2 Fraisage des surfaces planes adjacentes Cette opération est réalisée par l'utilisation d'un train de fraises. Les trains de fraises sont constitués par deux ou plusieurs fraises séparées par des bagues d'espacement [6].</p>	 <p>Figure 3.5 : Fraisage des surfaces planes adjacentes</p>
<p>3.4.3 Le profilage Les travaux de fraisage dit de profil les surfaces réalisées sont obtenues par la forme de la denture latérale de la fraise. on distingue deux profils [6] :</p> <ul style="list-style-type: none"> • profil composé de lignes droites, • profil composé de lignes courbes, 	 <p>Figure 3.6 : Fraisage de profil.</p>
<p>profils particuliers (fraises spéciales).</p>	 <p>Figure 3.7 : Fraisage de profils particuliers.</p>

<p>profils particuliers (fraises spéciales).</p>	 <p>Figure 3.8 : Fraisage de profils particuliers.</p>
<p>3.4.4 Le rainurage C'est une opération de fraisage qui consiste à usiner trois surfaces orthogonales entre elles. Cette opération peut se faire avec une fraise 2T ou 3T (ARS ou carbure) suivant la définition de la rainure. Les rainures peuvent être droites, de forme (ex : rainures à té, rainures en vé) et/ou pour clavettes [6].</p>	 <p>Figure 3.9 : Fraisage de rainures.</p>
<p>3.4.5 Usinage de poches Une poche est délimitée par des surfaces verticales ou avec dépouilles (cylindriques et planes) quelconques [6].</p>	 <p>Figure 3.10 : Fraisage de poches.</p>

3.5 Les outils de fraisage

Une fraise a la forme d'un solide de révolution portant plusieurs dents réparties sur la périphérie. Les fraises sont fabriquées en acier rapide (ARS) monobloc, à dents ou à lames amovibles (ARS ou carbure). On distingue, pour cette catégorie, les fraises à queue cylindrique (lisse ou à méplat) ou conique (cône Morse ou) et les fraises à trou (alésage cylindrique lisse, avec clavetage, avec filetage et centrage ou alésage conique) [6].

3.5.1 Les fraises à surfacer

Une fraise à surfacer permet de générer une surface plane perpendiculaire à l'axe de rotation de la fraise (figure 3.11).

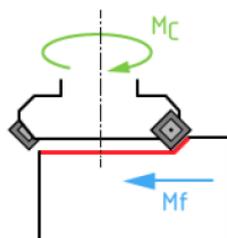
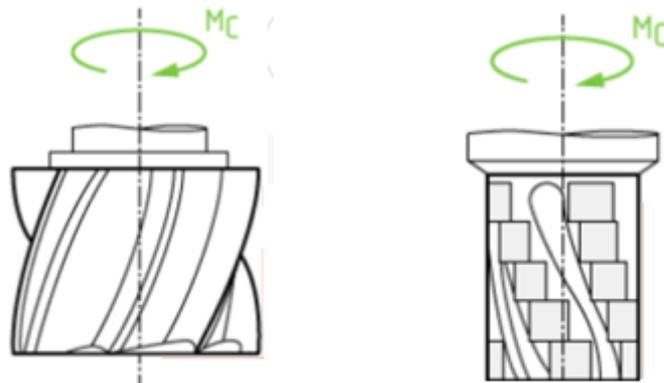


Figure 3.11 : Fraise à surfacer.

3.5.2 Les fraises cylindriques 2 tailles

Avec ce type de fraise on peut effectuer l'usinage d'épaulements, surfaçage de profil et/ou contournage.



a) Fraise 2T en ARS

b) Fraise en carbures

Figure 3.12 : fraises cylindriques 2 tailles.

3.5.3 Les fraises à rainurer

Ces outils permettent la génération de plans perpendiculaires entre eux. Plusieurs types de rainures peuvent être obtenus avec ce type d'outils :

- droites, à l'aide des fraises deux ou trois tailles, (figure 3.13).
- en T (figure 3.14).
- en queue d'aronde, (Figure 3.15).
- rainures pour clavettes (disque ou parallèle), (figure 3.16a, figure 3.16b).
- rainures traversantes.

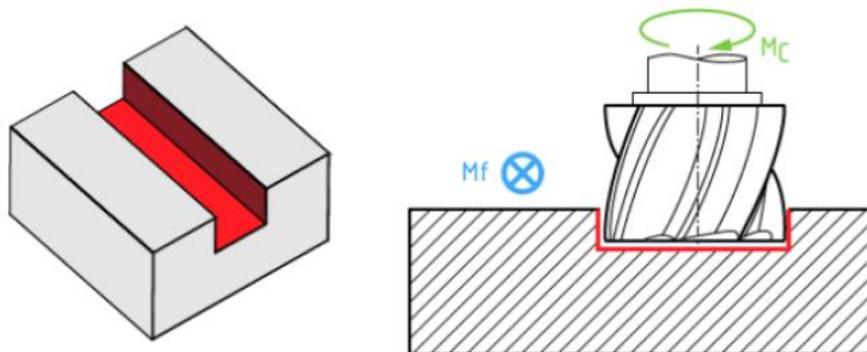


Figure 3.13 : Fraisage d'une rainure avec une fraise 2 tailles.

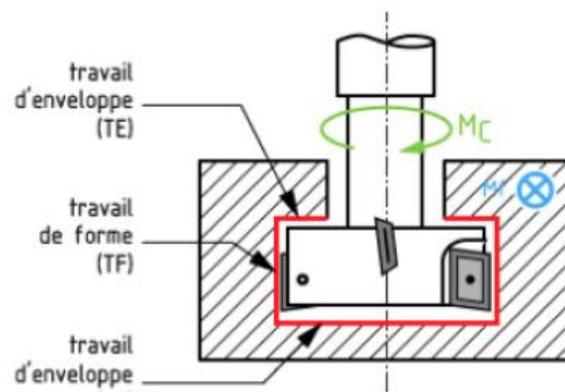


Figure 3.14 : Fraisage d'une rainure en T [6].

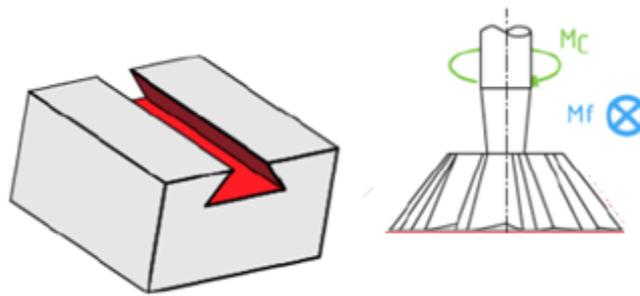


Figure 3.15 : Fraisage d'une rainure en queue d'aronde [6].

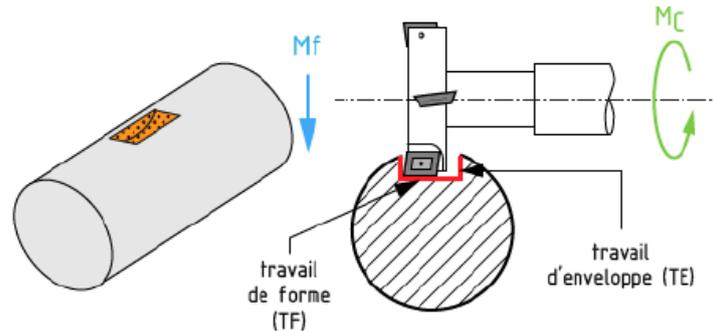


Figure 3.16 a: Fraisage d'une rainure pour clavette disque [6].

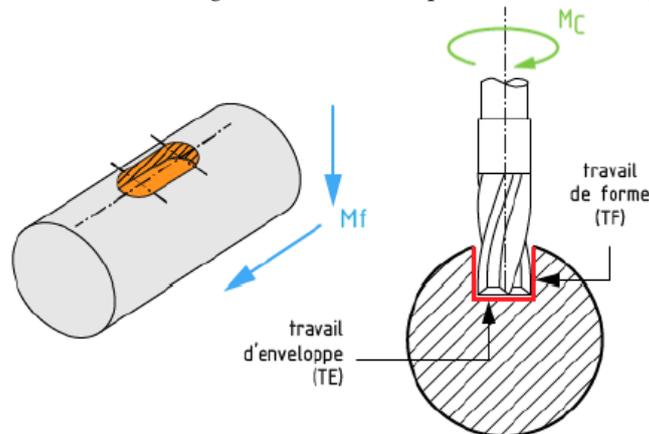


Figure 3.16 b : Fraisage d'une rainure pour clavette parallèle sur un arbre [6].

3.6 Montage des fraises

3.6.1 Le montage des fraises à entraînement par clavette

Les fraises à alésage cylindrique et à entraînement par clavette sont montées sur des arbres porte-fraises :

- au cône Morse,
- au cône.

3.6.2 Le montage des fraises à entraînement par tenon

Les fraises à alésage cylindrique et à entraînement par tenon sont montées sur un mandrin porte-fraise emmanché dans le nez de la broche de la machine.

L'emmanchement est au cône Morse ou au cône, les tenons d'entraînement pouvant être monoblocs et/ou rapportées.

La fixation de la fraise est assurée par une vis de blocage.

4 LE PERÇAGE

4.1 Généralités

Le perçage s'applique à l'ensemble des opérations qui permettent de réaliser des trous cylindriques borgnes ou débouchant [6]. La machine utilisée pour le perçage est appelé perceuse (Figure 4.1). L'outil utilisé est appelé foret.

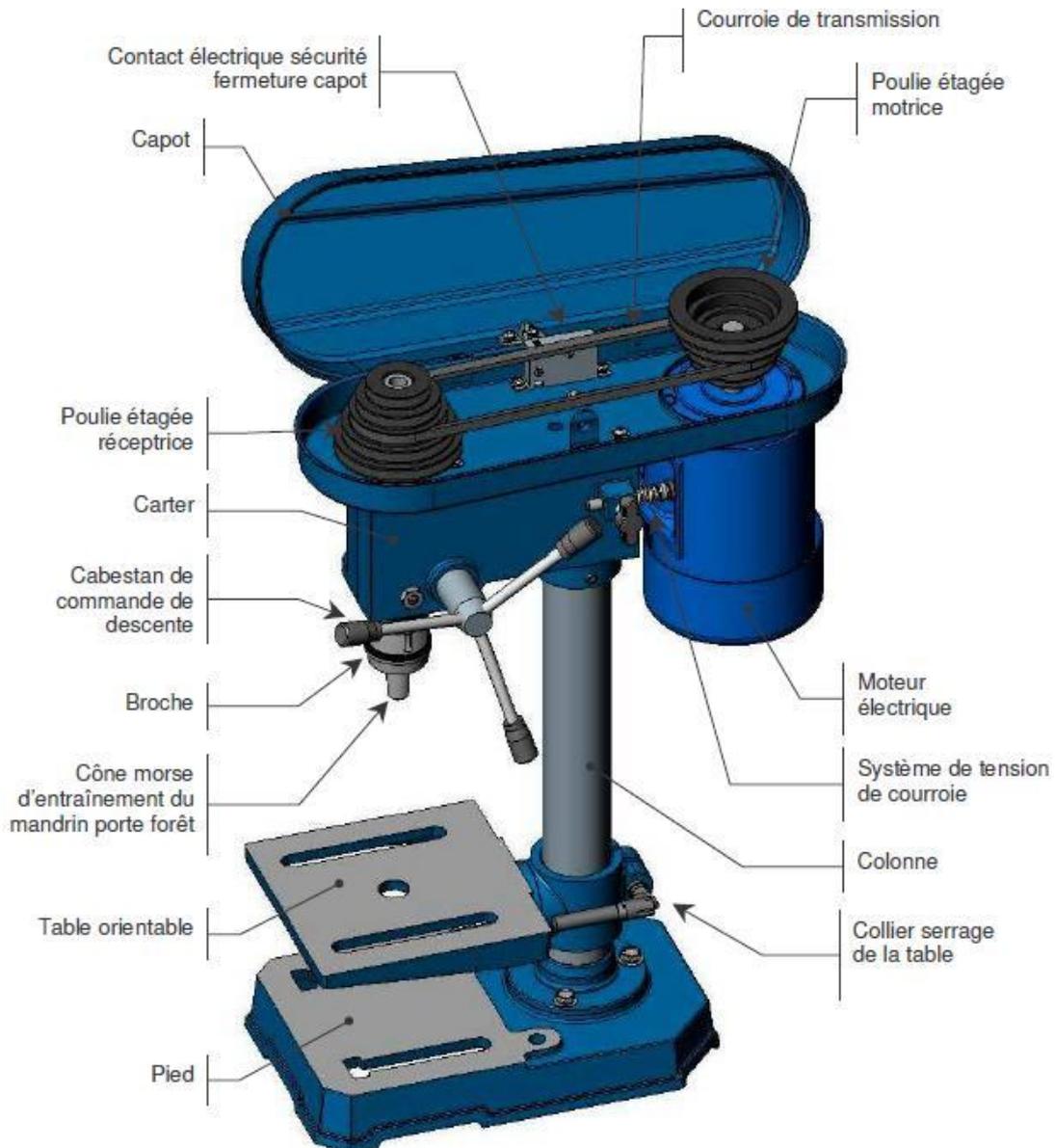


Figure 4.1 : Perceuse à colonne.

Le foret hélicoïdal (illustré sur la figure 4.2) comprend généralement

- un corps (diamètre d)
- deux listels de guidage
- deux goujures décroissantes,
- une pointe dont l'angle est variable (suivant la matière usinée),

- la queue (cylindrique ou conique morse).

En fabrication mécanique on utilise très souvent des forets en ARS. Les forets à plaquette carbure sont utilisés rarement, dans des situations particulières et pour des usinages spéciaux. Les forets carbures monoblocs revêtus ou non sont d'un usage courant.

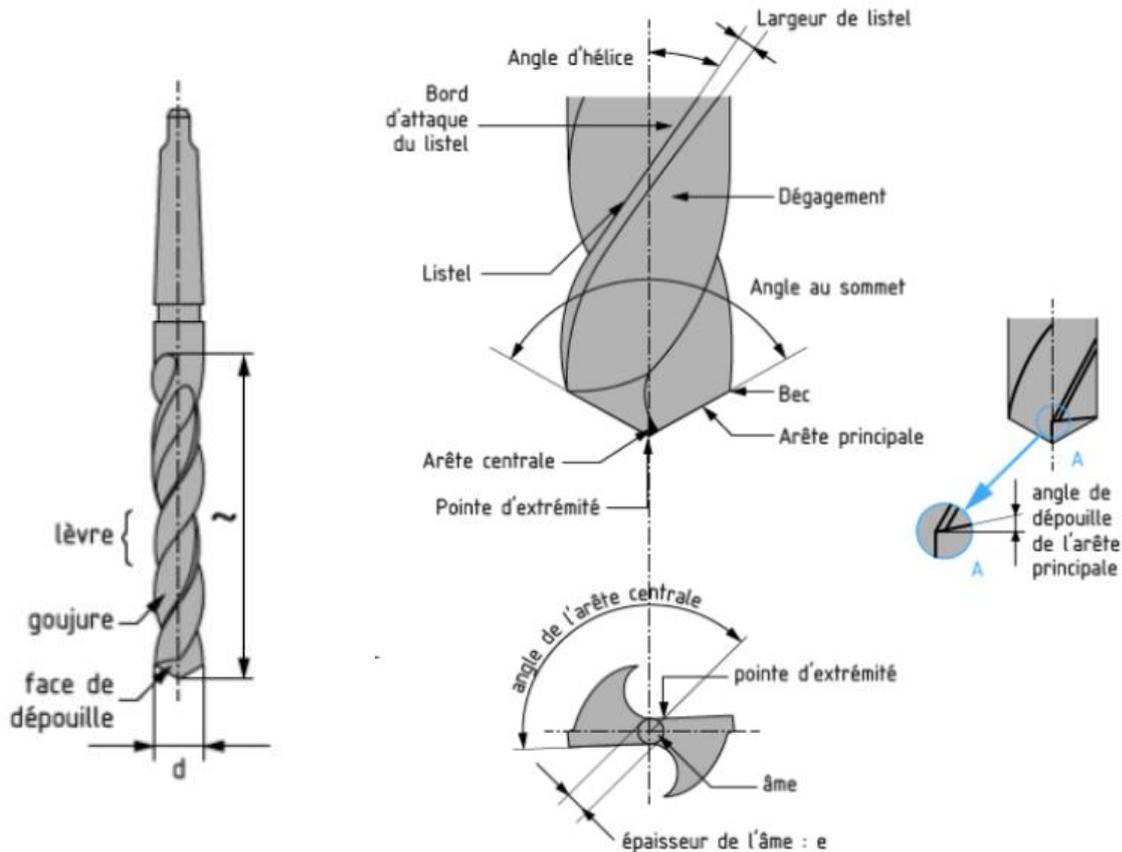


Figure 4.2 : Le foret hélicoïdal.

4.2 La classification des forets de parçage

Les forets sont classés suivant :

4.2.1. Leur forme, on distingue :

- les forets cylindriques : série extra-courte, courte, longue et extra-longue ;
- les forets à queue conique ou cône morse (utilisés pour le travail de série) : série longue, série courte et série extra-longue ;
- les forets aléseurs : à queue cylindrique et à queue conique.

4.2.2. Leur angle d'hélice, on classe les forets dans les catégories suivantes :

- à hélice normale - pour les perçages courants ;
- à hélice longue - pour les métaux à copeaux fragmentés ;
- à hélice courte - pour des métaux à copeaux continus.

4.3. Les forets à centrer

En raison des exigences liées soit à la qualité dimensionnelle des cotes à réaliser soit à la réduction des efforts de coupe en début d'un travail de perçage, on utilise couramment

des outils appelés forets à centrer. Le choix d'un foret à centrer dépend des dimensions de la pièce, des efforts supportées et de la précision du travail à réaliser [6].

Ces outils sont classés respectivement en :

- centre sans chanfrein de protection (type A), (figure 4.3).
- centre avec chanfrein de protection (type B), (figure 4.4).
- centre à profil curviligne (type R) pour travaux de grande précision (figure 4.5).

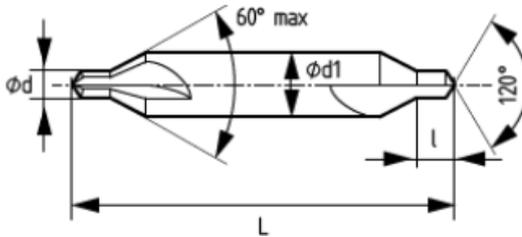


Figure 4.3 : Foret à centrer type A

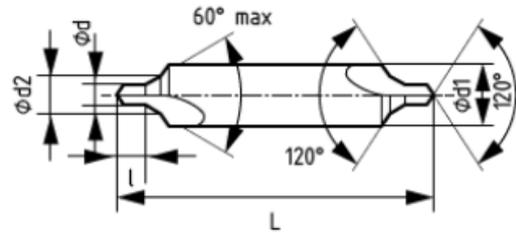


Figure 4.4 : Foret à centrer type B

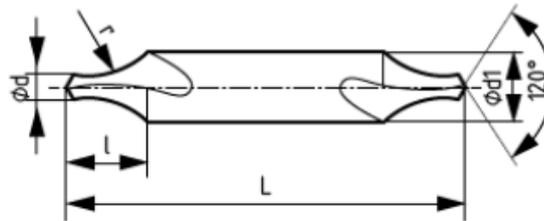


Figure 4.5 : Foret à centrer type R

4.4. Le foret à pointer

Pour préparer les perçages et pour éviter la déviation du foret au moment de l'attaque de la pièce, on utilise un foret court dont l'angle de pointe est de 90° et qui comporte une âme amincie. Cet outil s'appelle **foret à pointer** (figure 4.6).

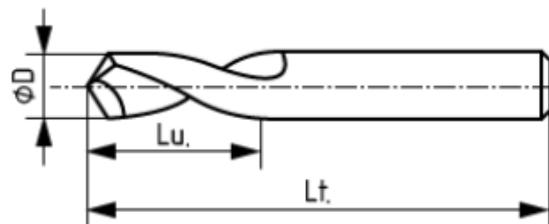


Figure 4.6 : Foret à pointer.

5 Conditions de coupe en usinage

5.1 Vitesse de coupe V_c

5.1.1 Définition

En Fraisage et Perçage : On appelle « vitesse de coupe » la vitesse d'un point de l'arête tranchante de l'outil.

En tournage : La vitesse de coupe est la vitesse d'un point de la pièce en contact avec l'outil.

Par des catalogues constructeurs : les fabricants d'outil (Carburier) préconisent des vitesses de coupe établies à partir d'expérimentations en laboratoire. Ces expérimentations permettent d'obtenir le meilleur compromis entre la durée de vie maximale de l'outil et l'enlèvement maximum de matière.

$$\text{Par le calcul : } V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad (\text{Eq 5.1})$$

Avec

N : fréquence de rotation en tr/min.

V_c : vitesse de coupe en m/min.

D : diamètre usiné en mm.

5.1.2 Paramètres influant sur la vitesse de coupe

La vitesse de coupe dépend de plusieurs paramètres :

La machine : puissance, qualité géométrique.

La pièce : matière, nature du brut.

L'outil : matière, géométrie, durée de vie.

Le type d'usinage : ébauche ou finition, usinage extérieur ou intérieur, mode de génération de surface, lubrification.

5.2 L'avance

5.2.1 Définition

L'avance correspond à la distance parcourue par l'outil pendant un tour de la pièce.

En tournage elle se note *f* et exprimée en mm/tr (millimètre par tour)

En fraisage elle se note *f_z* et est exprimée en mm/tr/dt (millimètre par tour et par dent)

5.2.2 Principaux critères de choix de l'avance :

- matière de l'outil (acier rapide ou carbure métallique)
- type d'opération (ébauche ou finition).
- spécifications de rugosité imposées sur la surface générées.
- type de machine.

5.3 Vitesse d'avance

5.3.1 Définition : La vitesse d'avance indique la vitesse de déplacement de l'outil par rapport à la pièce si on ne prend en compte que le mouvement d'avance. C'est donc la vitesse de déplacement du porte-outil. Elle se note *V_f* et est exprimée en mm/min (millimètre par minute).

Chapitre3: Procédés d'obtention des pièces par enlèvement de matière.

Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min) en Tournage [11].

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Tournage d'Extérieur				Tournage Filetage	
		Acier ARS Rapide		Carbure		Acier Rapide	Carbure
		0.05 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.2	0.2 à 0.3	f = pas du filet	
P	Acier Non Allié	50	40	250	200	35	120
	Acier Faiblement Allié	30	20	150	130	20	80
	Acier Fortement Allié	20	15	120	100	15	60
	Acier Moulé Faiblement Allié	30	20	150	120	20	75
M	Acier inoxydable	25	20	150	130	20	90
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	40	30	80	60	20	30
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	30	25	100	80	15	40
	Fonte Sphéroïdale (EN-GJS...)	55	45	90	70	25	40
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	250	200	550	400	150	230
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	120	80	250	200	90	110
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	80	40	120	100	45	60
Vitesse de coupe Vc en m/min							

NB : Pour des opérations de tournage intérieur et de tronçonnage il faut diviser les valeurs du tableau par 2.

Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min) en fraisage [11].

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Fraisage				Fraisage filetage
		Acier Rapide		Carbure		Carbure
		0.03 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.2	0.2 à 0.3	f = pas du filet
P	Acier Non Allié	50	40	140	120	150
	Acier Faiblement Allié	30	25	100	80	130
	Acier Fortement Allié	20	15	80	70	100
	Acier Moulé Faiblement Allié	25	20	90	80	120
M	Acier inoxydable	20	15	100	90	150
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	35	30	100	90	120
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	30	25	80	70	100
	Fonte Sphéroïdale (EN-GJS...)	40	35	100	90	120
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	250	200	500	400	300
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	120	80	300	200	250
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	80	40	120	80	100
Vitesse de coupe Vc en m/min						

Tableau de valeurs indicatives moyennes en perçage [11].

Nuance ISO	Matériaux à usiner	Perçage		
		Acier Rapide	Acier Rapide Revêtu	Carbure
P	Acier Non Allié	30	45	70
	Acier Faiblement Allié	20	40	60
	Acier Fortement Allié	15	35	40
	Acier Moulé Faiblement Allié	10	30	70
M	Acier inoxydable	12	20	40
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	25	50	80
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	15	30	80
	Fonte Sphéroïdales (EN-GJS...)	25	50	80
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	60	90	100
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	60	90	100
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	40	60	100
Vitesse de coupe Vc en m/min				

Références bibliographique

- [1] www.commerce-machines-occasion.fr/differents-procedes-tournage-mecanique/
- [2] www.technologuepro.com/cours-tournage-fraisage/tournage.pdf
- [3] prod.mpmi.free.fr/cours/le_tournage.pdf
- [4] A. Belloufi. Cours procédés de fabrication, Master –Maintenance industrielle. Université Kasdi Merbah, Ourgla. 2010.
- [5] S. Bensaada. Coupe des métaux. Technologie d'usinage. Edition universitaire européenne, 2010.
- [6] analyse-fabrication.univ-lille.fr
- [7] <https://www.sandvik.coromant.com>
- [8] www.rocdacier.com/cours-tournage-usinage/
- [9] robert.cireddu.free.fr/Ressources/Prod/Le_tournage/index.htm
- [10] A. Chevalier A, j. Bohan. Guide du technicien en productique. Hachette, 1998.
- [11] <http://kera-industry.com/wp-content/uploads/2014/09/Les-conditions-de-coupes.pdf>

CHAPITRE 4 : TECHNIQUES D'ASSEMBLAGES

Définition

On appelle « assemblage » la zone d'interconnexion de deux éléments ou plus. Sa fonction principale est de transmettre correctement les efforts entre ces éléments. On distingue deux catégories d'assemblage :

- Par contacts mécaniques,
- les assemblages par procédés de soudage, qui assurent une continuité entre les pièces métalliques au niveau des joints.

La résistance d'un assemblage est déterminée sur la base de la résistance individuelle de ses composants.

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

4.1 Le boulonnage

Le boulonnage, du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de sa possibilité de réglage, est l'un des assemblages les plus utilisés en construction métallique. Il se fait à l'aide de pièces métalliques cylindriques qui permettent d'assembler entre elles les différents éléments. Pour cela, des trous d'un diamètre légèrement supérieur à celui des boulons (afin de permettre un certain jeu) sont préalablement percés dans les pièces qui sont à assembler.

4.1.1 Les boulons traditionnels

Un boulon traditionnel est composé d'une vis, d'un écrou et d'une ou deux rondelles (dans certains cas facultatives). Généralement, la tête de la vis et l'écrou sont de forme hexagonale ce qui facilite le serrage qui se fait à l'aide de clefs. Le boulon est destiné à assurer un serrage entre la face d'appui de la tête, et celle de l'écrou. Le boulon permet de lier par adhérence une ou plusieurs pièces mécaniques. L'assemblage ainsi obtenu est rigide et démontable (figure 4.1).

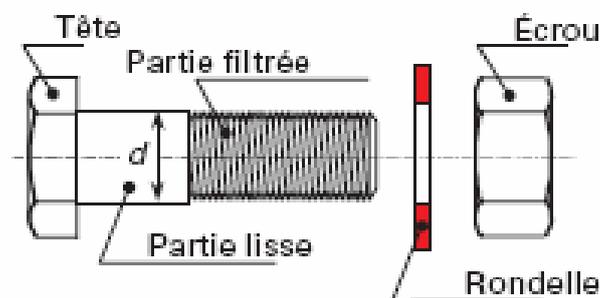


Figure 4.1 : Constituants d'un boulon.

Vis : pièce constituée d'une tige filetée sur tout ou partie de sa longueur, avec ou sans tête, mais comportant un dispositif d'entraînement ou d'immobilisation (figure 4.2).

Écrou : Toute pièce ayant un trou taraudé fait office d'écrou. Un écrou associé à une tige filetée, une vis, un goujon quelconque assure une liaison démontable. Associé à une tige filetée, un écrou peut faire office :

- d'écrou d'assemblage ;
- d'écrou de transformation de mouvement (déplacement du mors mobile d'un étau par exemple).

Goujon : tige comportant un filetage à ses 2 extrémités et destinée à assurer un serrage entre la face d'une pièce dans laquelle l'un des extrémités vient s'implanter à demeure par vissage, et la face d'appui d'un écrou vissé à l'autre extrémité.

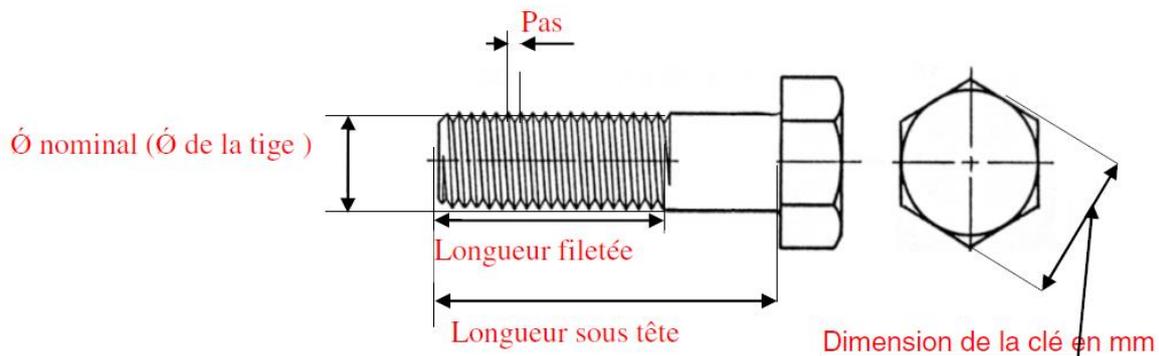


Figure 4.2 : Schéma d'une vis à tête hexagonale.

On distingue deux catégories de boulons traditionnels :

4.1.2 Les boulons ordinaires

Ce type de boulons ne nécessite pas de précautions particulières lors de leur mise en œuvre. La qualité d'un boulon est définie par son appartenance à des classes. Ces classes sont fonction de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction ultime (ou limite de rupture) du boulon considéré (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Valeurs nominales de la limite d'élasticité R_e et de la résistance ultime à la traction R_r des boulons ordinaires.

Classe de résistance	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9	12.9
R_r (MPa)	400	400	500	500	600	800	1000	1200
R_e (MPa)	240	320	300	400	480	640	900	1080

Le premier nombre représente $1/100$ de la limite de rupture F_{ub} , et le produit des deux nombres est égal à $1/10$ de la limite d'élasticité F_{yb} (MPa).

Exemple pour un boulon de classe 4.6

$$R_r = 4 \times 100 = 400 \text{ MPa}$$

$$R_e = 4 \times 6 \times 10 = 240 \text{ MPa.}$$

Exemple 2 :

$$\text{vis de classe 8-8 } R_r (\text{mini}) = 100 \times 8 = 800 \text{ N/mm}^2$$

$$R_e (\text{mini}) = R_r \times Y/10 = 800 \times 8/10 = 640 \text{ N/mm}^2$$

Remarque : le produit des deux nombres es est égal à Re en daN/mm².

4.1.3 Transmission des efforts

Lorsqu'un effort est perpendiculaire à l'axe du boulon (effort de cisaillement), les pièces assemblées doivent pouvoir glisser jusqu'à rentrer en contact avec la tige de la vis. Une pression latérale dans les zones de contact entre pièces et tiges est induite et ces dernières sont cisailées au droit des surfaces de glissement, tandis que les pièces assemblées sont soumises à de la pression seulement aux points de contact (figure 4.3).

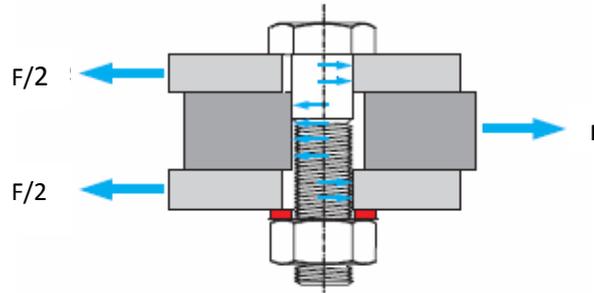


Figure 4.3 : Effort de cisaillement.

4.1.4 Les boulons à haute résistance (HR)

Ces boulons sont fabriqués par des aciers de haute limite d'élasticité. Leurs caractéristiques mécaniques sont obtenues par traitement thermique. Il est toutefois important de souligner que pour que l'assemblage soit considéré comme HR, tous les éléments de celui-ci doivent être marqués HR.

La précontrainte de ces boulons dépend de la qualité de leur mise en oeuvre, d'où la nécessité d'une main d'oeuvre qualifiée. Si dans le cas des boulons ordinaires, les rondelles sont facultatives, dans le cas des boulons précontraints, une rondelle doit obligatoirement être placée entre l'écrou et l'élément à assembler.

Un assemblage de ce type est destiné à mobiliser le frottement entre les pièces assemblées, grâce à la précontrainte installée, qui assure une forte pression entre les pièces assemblées.

Dans le cas d'un effort parallèle à l'axe des boulons, les pièces restent en contact tant que l'effort extérieur reste inférieur à l'effort de précontrainte.

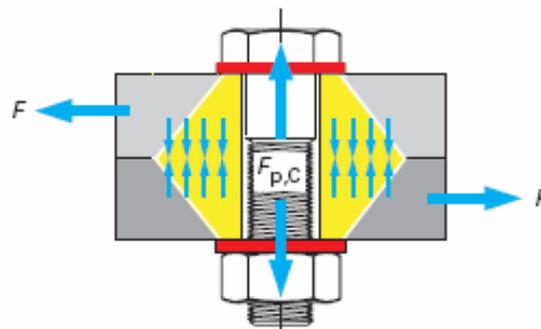


Figure 4.4 : Assemblage par boulon précontraint [1].

4.1.5 Comparaisons entre boulons ordinaires et boulons précontraints

Le comportement des boulons ordinaires et boulons précontraints est différent selon l'orientation de l'effort appliqué.

Dans le cas d'efforts parallèle à l'axe, il vaut mieux utiliser un boulon HR car la contrainte de traction est plus faible pour cette catégorie de boulons.

4.2 LE RIVETAGE

4.2.1 Principe

Le rivetage est un procédé d'assemblage non démontable, permettant d'assembler des pièces métalliques d'épaisseurs relativement faibles difficilement soudable.

Le rivet se présente avant assemblage comme une tige possédant une tête, ayant une longueur suffisante pour pouvoir former la deuxième. Pour réaliser un assemblage par rivetage, le rivet utilisé doit avoir une longueur supérieure à la somme des épaisseurs pièces assemblées. Ainsi, le diamètre du trou, réalisé sur ces pièces, est supérieur au diamètre du rivet, pour faciliter le montage.

Le rivet est positionné dans un trou préalablement percé. Une deuxième tête est formée à l'aide d'une bouterolle et d'une contre bouterolle. La contre bouterolle est placée du côté où se trouve la tête existante pour empêcher tout déplacement et la contre bouterolle, elle est martelée à la main ou à l'aide d'une machine pour former la deuxième tête (figure 4.5).

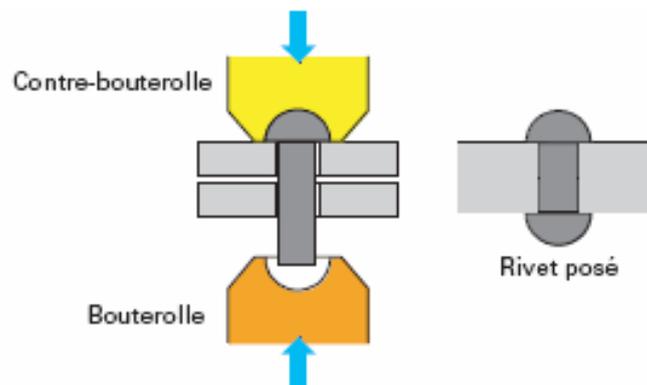


Figure 4.5 : Mise en œuvre d'un rivetage.

Le rivet, placé à chaud, se contracte pendant le refroidissement, et presse ainsi les 2 pièces l'une contre l'autre. Le corps du rivet est donc soumis à une tension de pose, comme un boulon. Certains rivets sont placés à froid avec un équipement spécial.

La réaction due au refroidissement augmente le serrage entre les pièces, ce qui crée une sorte de précontrainte.

NB :

Les rivets d'acier ayant un diamètre de 10mm et plus sont posés à chaud (entre 900 et 950°C). Tandis que les rivets d'acier de diamètre inférieur à 10mm, ainsi que les rivets de métaux légers et de cuivre sont montés à froid.

4.2.2 Classification des rivets

Selon la forme géométrique, on trouve plusieurs types de rivet. La figure 4.6 représente les modèles les plus rencontrés en pratique.

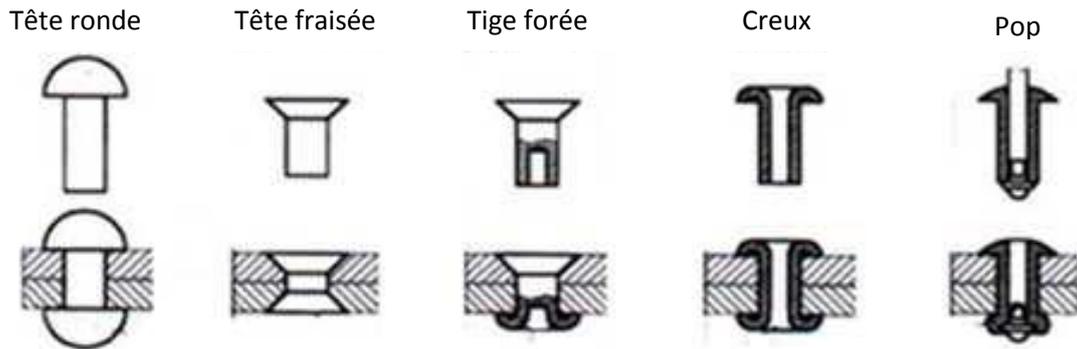


Figure 4.6 : Types de rivets.

4.3 ASSEMBLAGES SOUDES

4.3.1 Généralités

Par soudure, on entend un assemblage de deux pièces obtenu par fusion locale du métal avec interpénétration, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler ; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle de matériau de base. Le soudage trouve des applications dans des secteurs d'activité très diversifiés comme la production, la construction, la réparation et la maintenance. Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place prépondérante dans la construction des bateaux, bâtiments, fusées, tuyaux, réservoirs. Car il permet d'adapter au mieux les formes de construction.

La clé des problèmes qui se posent lors d'une opération de soudage relève du métier du soudeur ou du constructeur soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages soudés : découpage de l'assemblage et disposition des joints.
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces,
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

Le soudage est présent dans les différents secteurs industriels :

- Le transport terrestre (automobile, ferroviaire, machines agricoles et de construction),
- Les bâtiments et travaux publics (assemblage métallique),
- La construction navale (structures off-shore, navires, sous-marins),
- L'énergie (hydroélectricité, nucléaire, gaz et pétrole notamment, équipements électriques et électroniques),
- L'aéronautique.

Le soudage constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Ce type d'assemblage a des avantages et des inconvénients.

Avantages

Le soudage est un Procédé simple et rapide, il assure une continuité métallique de la pièce en lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage qui sont équivalentes à celles du métal assemblé. Caractéristiques mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité...Il répond à des sollicitations élevées. Il est durable car insensible aux variations de température, aux conditions climatiques. Il est Moins encombrant et plus esthétique que le boulonnage ou le rivetage. Pour finir il garantit l'étanchéité de la pièce à souder.

Inconvénients

De fait un grand nombre de travailleurs (environ 3 millions dans le monde selon le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC) est concerné par les risques liés à ce travail, que ce soit dans les ateliers ou sur les chantiers. [2]

- Déformation de retrait des soudures,
- Présence de contraintes résiduelles de soudure qui compliquent l'état de contrainte de l'assemblage,
- Plus onéreux (main-d'œuvre qualifiée, matériel spécifique, contrôle des soudures).
- Les fumées de soudure sont inconfortables, insalubres, irritantes ou toxiques.

4.3.2 Classification des procédés de soudage

Les différents procédés de soudage se sont souvent différenciés par l'activation d'énergie, les modes d'action ou les moyens de protection contre l'atmosphère. On regroupe les procédés de soudage en quatre types principaux en fonction de l'énergie utilisée (figure 4.7).

- a)** Energie thermochimique : Acétylène + oxygène ;
- b)** Energie électrothermique : arc électrique ;
- c)** Energie mécanique : Percussion - explosion ;
- d)** Energie de radiation (focalisée) : Laser.

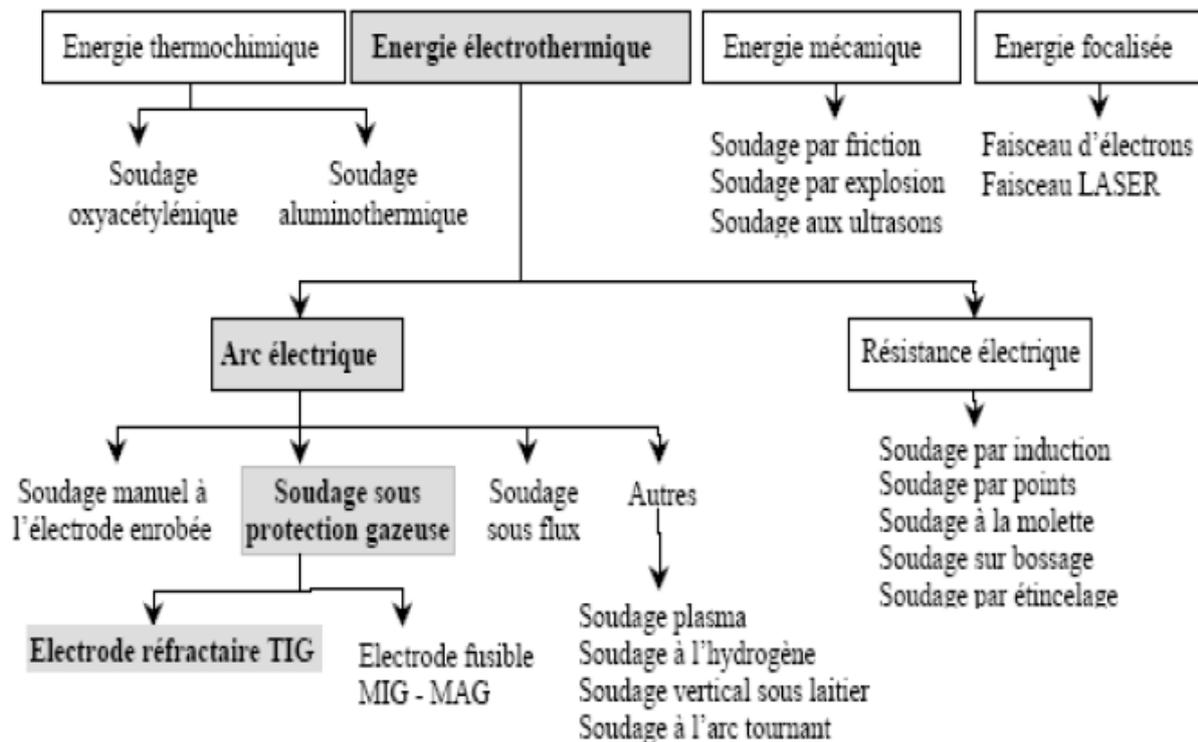


Figure 4.7 : Classification des procédés de soudage en fonction des sources d'énergie NF EN 4063, ISO 4063.

En réalité, les procédés de soudage peuvent également être classés soit par mode d'apport d'énergie nécessaire ou soit par mode de protection du métal chaud (tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Classement des procédés de soudage.

Activation	Action complémentaire	Protection
Fusion	Sans	Impérative
	Compression	Facultative
Chauffage	Compression	Eventuelle
Frottement	Compression	Non

4.3.3 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée

Cette méthode manuelle constitue l'un des méthodes opératoires de soudage à l'arc les plus répandus (voir figure 4.8). Elle nécessite une compétence considérable pour réaliser des soudures de bonne qualité. L'électrode est constituée d'un fil à cœur d'acier et d'un flux d'enrobage contenant des éléments alliés, comme par exemple le manganèse et la silice. Un arc électrique est créé entre une électrode fusible (Cathode) et les pièces à souder (Anode), grâce à un générateur de courant, alternatif ou continu, de faible voltage, mais de fort ampérage. L'arc (Température au coeur de l'arc $\cong 5500^{\circ}\text{C}$, 2700°C à la cathode et 3500°C à l'anode) fond le métal de l'électrode et une partie des pièces à assembler, ainsi que l'enrobage de l'électrode. Le métal fondu remplit les vides entre pièces et forme après refroidissement l'assemblage. Lors de la fusion l'enrobage de

l'électrode donne naissance à un laitier, étant plus léger que le métal il se dépose à la surface du bain de fusion et forme une protection de la soudure. La protection a pour rôle de :

- protéger le métal contre l'oxygène et l'azote de l'air (fragile) ;
- retarder le refroidissement de l'acier pour éviter le phénomène de trempe ;

Les corps principaux de l'enrobage sont : SiO_2 , CaO , Mn , Fe_3O_4 .

Le métal de base forme les parties à assembler, de même nature ou de natures différentes.

Le métal d'apport, identique ou différent du métal de base, peut intervenir dans l'élaboration du joint.

Le métal du joint, comprenant le métal déposé et les bords fondus qui sont dilués ; certains éléments peuvent diffuser dans les parties adjacentes. De plus, au-delà du joint, une zone plus ou moins étendue peut être thermiquement affectée et peut subir des modifications de structure.

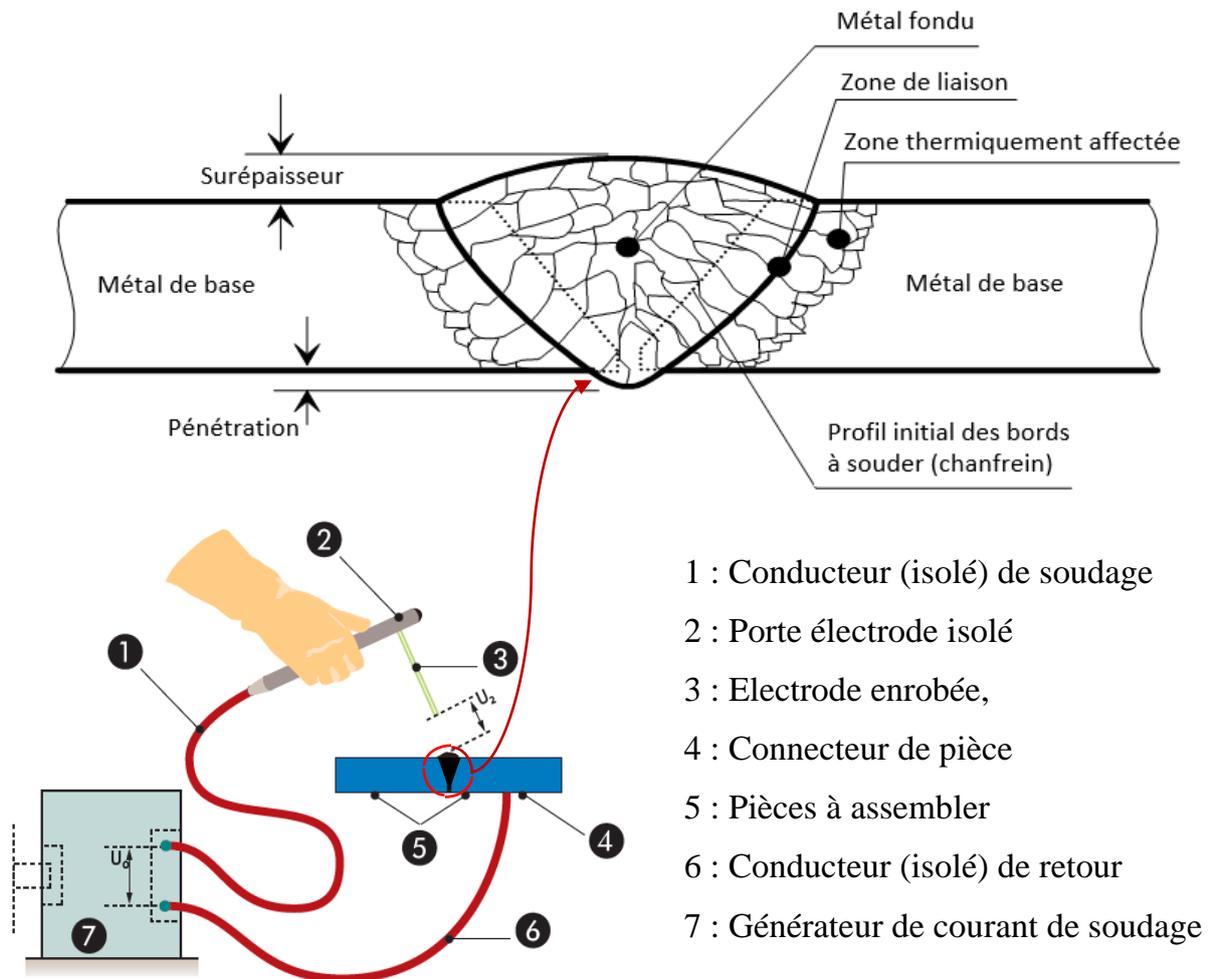


Figure 4.8 : Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées .

4.3.4 Soudage MIG, MAG (Metal Inert, Activ Gaz)

Ces types de soudage se font sur des postes semi-automatiques. Les soudures sont réalisées sous atmosphère inerte (MIG : argon ou hélium avec peu de CO₂) ou sous atmosphère active (MAG : le taux de CO₂ est plus important). Le gaz, actif ou inerte, conditionne la profondeur de pénétration de la soudure. Ainsi la soudure pénètre plus profondément pour le MAG que pour le MIG.

Le procédé MIG est applicable sur beaucoup de matériaux mais notamment sur les alliages légers et les aciers inoxydables. Cependant, il faut prendre certaines précautions pour que la soudure soit correcte. Il faut notamment éviter les soudures à l'extérieur : le vent peut modifier l'atmosphère inerte et risque d'oxyder la soudure.

4.3.5 Soudage TIG (Tungsten Inert Gaz)

L'arc jaillit entre une électrode réfractaire et les pièces. La protection de l'arc et du bain de soudage est réalisée par une atmosphère composée de gaz inertes. Le soudage T.I.G s'effectue avec ou sans apport de métal.

Paramètres atmosphère On utilise l'argon, l'hélium et les mélanges (Ar + He ; He + H ; Ar + H)

L'addition d'hydrogène à l'argon et à l'hélium augmente la tension de l'arc et permet d'améliorer la pénétration et la vitesse de soudage. L'azote est utilisé pour le soudage du cuivre. L'électrode est en tungstène ou en tungstène thorié (2% de Th)

Domaine d'application

Aciers non alliés (C < 0.3 %) dont l'épaisseur est de 0,2 à 4 mm, aluminium, cuivre, magnésium, et leurs alliages, aciers inoxydables et réfractaires.

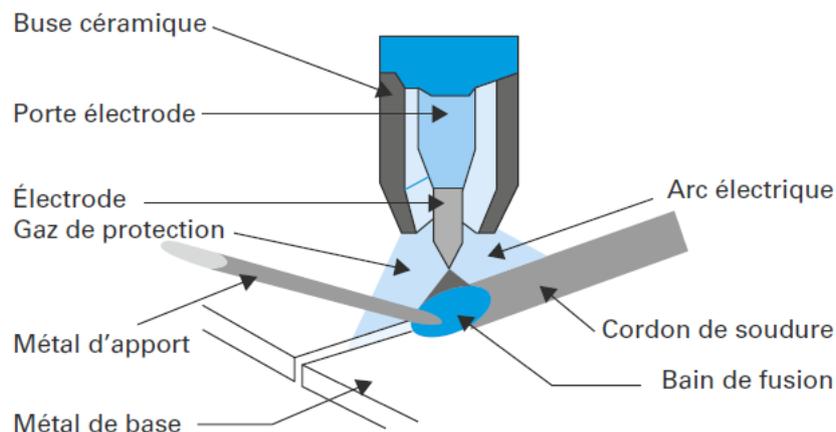


Figure 4.9 : Principe du soudage T.I.G.

4.3.6 Soudage par la résistance

Le soudage par résistance est un procédé simple et rapide, qui produit la chaleur grâce à la résistance électrique à l'interface en appliquant un effort de serrage, et une forte intensité électrique. C'est un procédé de soudage sans atmosphère protectrice.

La première technique du soudage par résistance électrique était le soudage par points inventée par Pr. Elihu Thomson en 1877. Puis, la première machine de soudage a été construite et brevetée en 1885.

Les raisons pour lesquelles le soudage par point est largement répandu dans l'industrie automobile sont le faible coût de fabrication par rapport à la qualité de l'assemblage obtenu, et l'automatisation de procédé.

Les procédés de soudage par résistance électrique incluent le soudage par point, le soudage à la molette, et le soudage par bossage. Typiquement pour ces procédés, des électrodes en cuivre sont utilisées pour passer le courant et pour appliquer l'effort de serrage. Les paramètres de soudage sont l'intensité, le temps, l'effort, et l'électrode.

4.3.6.1 Soudage par points

Les pièces superposées localement sont serrées entre deux électrodes (figure 4.10). L'ensemble pièces/électrodes est parcouru par un courant qui provoque la fusion localisée à l'interface des pièces dans la zone des électrodes. La fusion est provoquée par effet Joule. Courant de forte intensité sous basse tension.

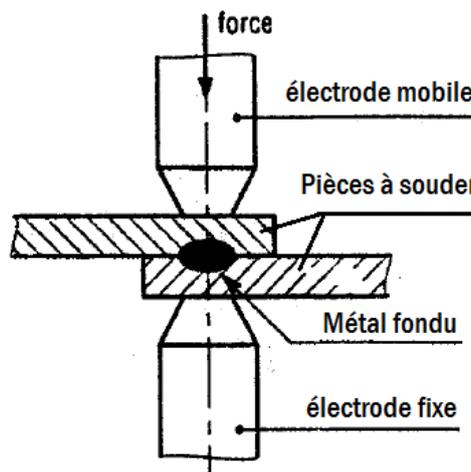


Figure 4.10 : Soudage par point.

Les différentes phases du procédé de soudage par point sont schématisées dans la figure 4.11.

Domaines d'application

Ce procédé est beaucoup utilisé en industrie automobile, mais également par exemple pour la fabrication de batteries ou d'ustensiles de cuisine. Il se prête particulièrement bien à l'assemblage des aciers ou d'aciers inoxydables, mais moyennant certaines précautions, d'autres matières peuvent également être soudées, telles que l'aluminium, le cuivre, voire même des soudures hétérogènes comme présenté sur la figure 4.12. On peut souder les aciers non alliés et alliés inox, les alliages légers, les alliages cuivreux. Il est possible d'assembler des matériaux métalliques de nature différente.

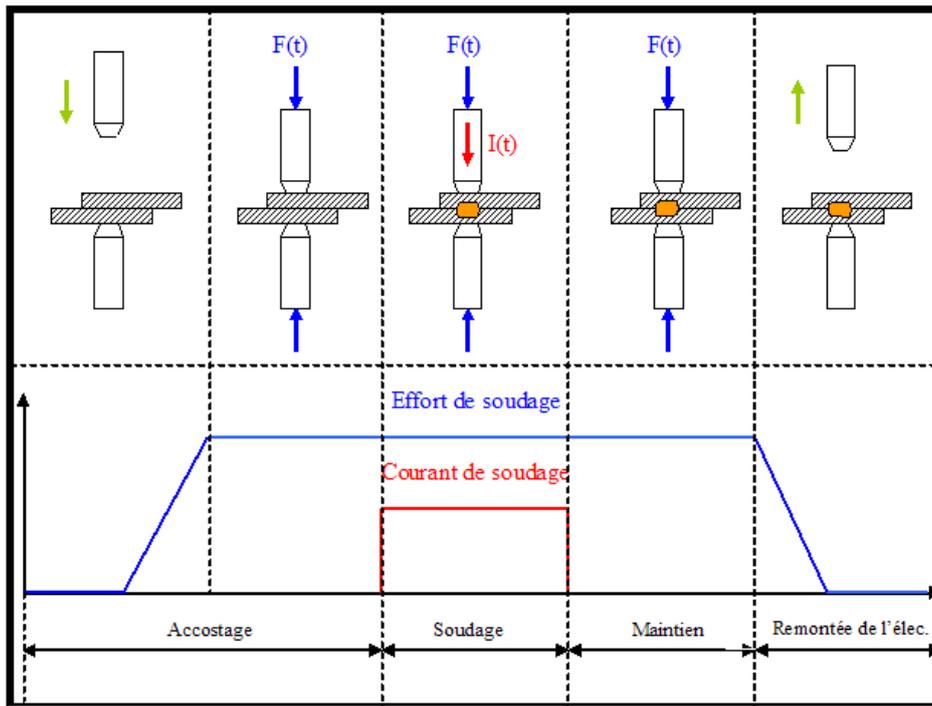


Figure 4.11 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point.

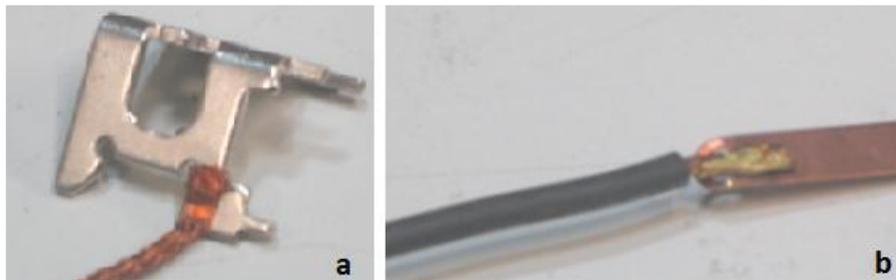


Figure 4.12 : a) Soudage d'une tresse en cuivre sur un support en acier inoxydable.
b) Raccord entre un fil en laiton et un support en cuivre.

4.3.6.2 Soudage à la molette

Deux molettes se substituent aux électrodes et assurent le maintien des pièces en position de recouvrement ainsi que leur déplacement. Suivant la durée des temps de passage du courant et des temps de repos on obtient les soudures représentées dans la figure 4.13. Le but du soudage à la molette est d'obtenir une soudure étendue par recouvrement de deux points consécutifs (le recouvrement est compris entre 25% et 50%).

4.3.6.3 Soudage par bossages

Le procédé de soudage par bossage est une méthode d'assemblage directement dérivée du procédé classique de soudage par résistance par points. Le passage du courant est localisé par des protubérances ou bossages situés sur l'une des pièces. Dès que la matière atteint un degré de plasticité suffisant, le blocage s'affaisse et l'interpénétration des deux pièces s'effectuant localement (Figure 4.14).

Dans le cas de ce dernier, la surface de passage du courant est déterminée par la forme des électrodes et de l'effort de compression qui doit vaincre la raideur des tôles. La surface de contact peut donc être variable et elle est relativement mal contrôlée. Dans le

cas du soudage par bossage, l'effort de compression et l'endroit du passage du courant sont localisés à un ou des points déterminés par des bossages préexistants sur une des deux pièces à assembler. En effet, les bossages, grâce à leur effet de concentration délimitent parfaitement la surface de passage du courant de soudage. Ils assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser. Le soudage par bossage est souvent utilisé dans le cas d'assemblage des tôles ayant une certaine courbure, car sans le bossage, il est difficile de garantir un contact correct des deux tôles à l'endroit de la soudure comme illustré sur la figure 4.15.

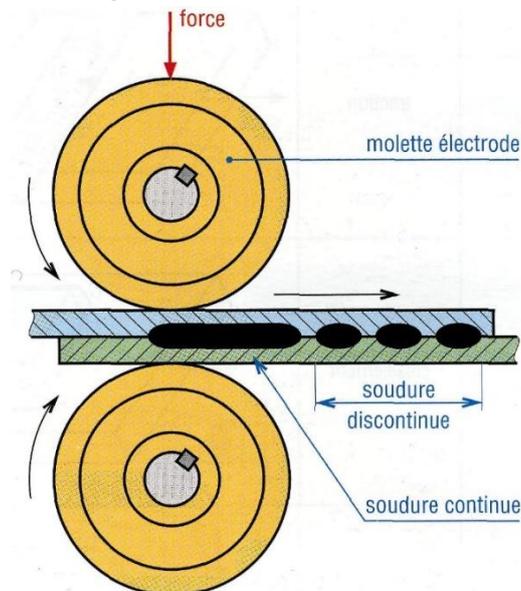


Figure 4.13 : Soudage à la molette.

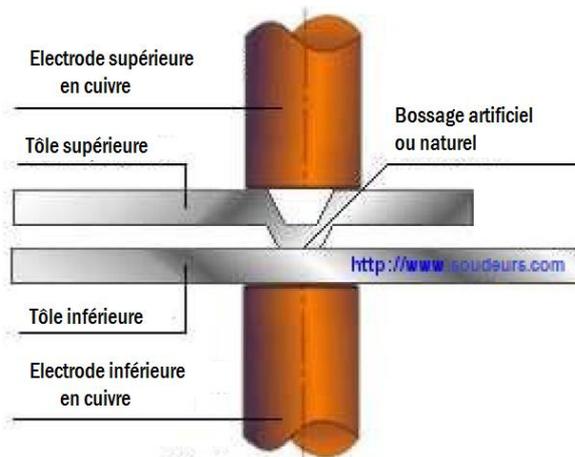


Figure 4.14 : Soudage par bossage.

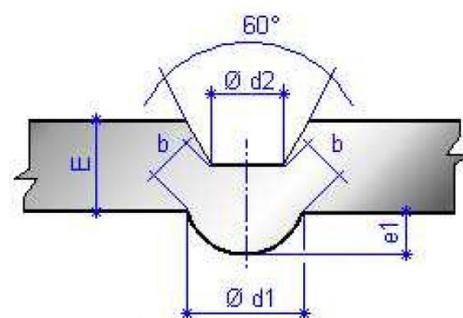


Figure 4.15 : Profil type du bossage

4.3.7 Soudage oxyacétylénique

4.3.7.1 Principe

La chaleur est fournie par une flamme obtenue à partir de deux gaz {carburant et comburant oxygène} mélangés dans un chalumeau (figure 4.16) dans des proportions variables. La chaleur est transmise aux pièces par convection et rayonnement.

La flamme comprend quatre zones (figure 4.17) :

- Le dard situé à l'extrémité de la buse,
- Une zone entourant le dard, où s'effectue la combustion primaire,
- Une zone définie par sa caractéristique chimique (oxydante, réductrice ou carburante)
- Une zone englobant les précédentes où s'effectue la combustion secondaire appelée panache.

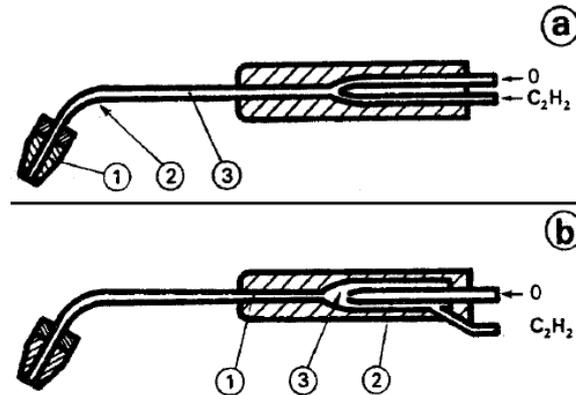


Figure 4.16 : chalumeaux

a) à haute pression : 1 buse, 2 lance, 3 chambre de mélange

b) à basse pression (le plus répandu) L'oxygène arrive par un injecteur à l'entrée de la chambre d'aspiration.

4.3.7.2 Métal d'apport

Le métal d'apport est de même nature que le métal de base. Il contient de surcroît, un agent désoxydant (Si et Mn). Dans le cas des alliages légers et cuivreux, il est nécessaire d'employer un flux afin de renforcer l'action protectrice de la flamme.

4.3.7.3 Domaine d'application

Le soudage oxyacétylénique convient particulièrement aux aciers non - alliés. On peut également souder les laitons, les alliages d'aluminium. Reste intéressant pour les tôles fines et le rabotage de tubes.

Etant donné la propagation de la chaleur dans le métal de base, ce procédé donne lieu à des déformations sensibles.

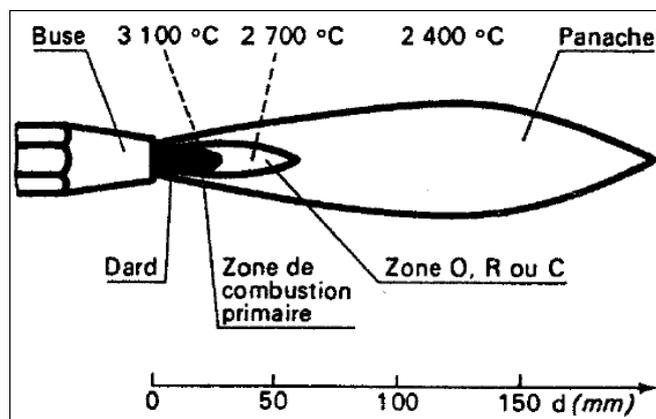


Figure 4.17 : Structure d'une flamme.

Le siège de la plus haute température se situe à l'extrémité de la zone de combustion primaire.

- O = Oxydante;
- R = Réductrice;
- C = Carburante.

4.3.7.4 Caractéristique chimique de la flamme oxyacétylénique

On appelle rapport de consommation K, le quotient du volume d'oxygène par le volume du gaz combustible :

$$K = \frac{\text{Volume d'oxygène}}{\text{Volume d'acétylène}} \quad (\text{Eq 4.1})$$

Si $K > 1$: La flamme est oxydante, elle est utilisée pour le soudage d'alliages contenant du Zinc. La surface du bain se recouvre ainsi d'une pellicule d'oxyde protectrice empêchant la volatilisation du zinc.

Si $K < 1$: La flamme est carburante. Elle est utilisée pour apporter du carbone au métal de base (rechargement).

Si $K = 1$: La flamme est réductrice.

4.3.7.4.1 Température de la flamme

La température de la flamme conditionne la vitesse de soudage. Elle dépend de la nature du mélange et du rapport de consommation.

4.3.7.4.2 Mélange oxyacétylénique

Si $K = 0,75 \rightarrow \theta = 2900 \text{ °C}$

Si $K = 1,5 \rightarrow \theta = 3100 \text{ °C}$

Si $K = 2,5 \rightarrow \theta = 3000 \text{ °C}$



La flamme oxyacétylénique a des applications variées (soudage, coupage).

4.3.8 Le soudage par friction-malaxage « Friction Stir Welding » (FSW)

Ce procédé consiste à déplacer un outil cylindrique en rotation dans la ligne de joint entre les tôles à assembler. Un échauffement dû à la friction entre l'outil en rotation et les pièces à assembler se produit, voir figure 4.18. Cet échauffement permet de ramollir les matériaux sans les fondre. L'outil malaxe la matière et élimine ainsi l'interface entre les matériaux, ce qui permet de réaliser une liaison continue.

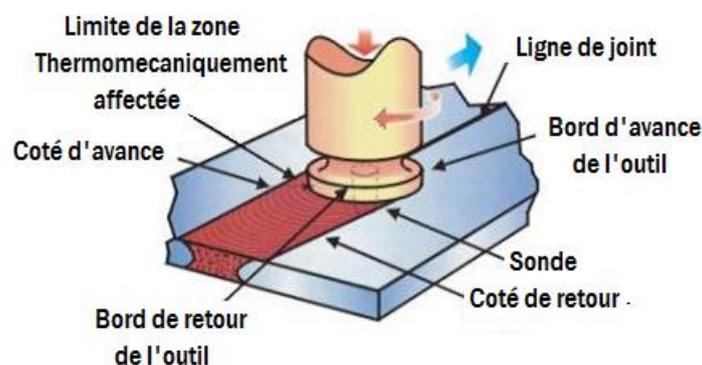


Figure 4.18 : Représentation schématisée du procédé de soudage par friction-malaxage [6].

On parle de procédé de soudage par friction malaxage ou de procédé d'assemblage à l'état pâteux ou semi-solide. L'intérêt de ce procédé est de permettre l'assemblage de matériaux dissimilaires réputés métallurgiquement incompatibles comme c'est le cas pour l'acier avec l'aluminium. Le faible échauffement, comparé à celui produit lors de procédés avec fusion, permet de limiter la propagation des phases intermétalliques fragiles.

4.3.9 Le soudage par faisceau laser

Le principe du soudage par faisceau laser est de concentrer des puissances de plusieurs kW sur des surfaces de quelques dixièmes à quelques millimètres carrés, générant ainsi des puissances surfaciques de 10^6 W.cm^{-2} , bien supérieures à celles mises en oeuvre dans d'autres procédés, soit quelques centaines de kW.cm^{-2} pour le soudage à l'arc et quelques dizaines de kW.cm^{-2} pour le soudage par procédé plasma.

Lorsque le faisceau laser irradie très localement un matériau métallique avec une puissance surfacique de l'ordre de celle citée précédemment, il se forme un bain de matière liquide sur lequel s'exerce différentes forces liées à la vaporisation du métal et aux tensions superficielles du liquide surchauffé. Ces forces tendent à créer un capillaire, couramment appelé keyhole.

Dans le but d'assembler l'acier avec l'aluminium, le soudage laser en mode keyhole est utilisé dans le cas de la configuration d'assemblage en transparence où l'acier peut être placé soit au-dessus de l'aluminium, (voir figure 4.19-a), soit en dessous, (voir figure 4.19-b).

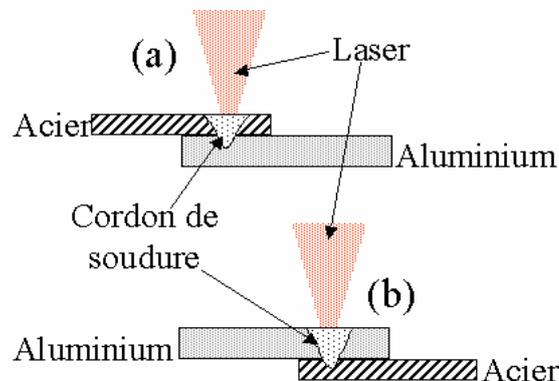


Figure 4.19 : Configuration de soudage en transparence.

4.4 Types de soudure

Les soudures peuvent être effectuées bout à bout ou en angle

4.4.1 Soudures en bout à bout

Il y a deux types de soudures en bout à savoir :

- soudure en bout à pénétration partielle (figure 4.20).

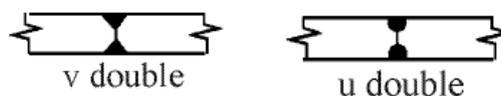


Figure 4.20 : soudure en bout à pénétration partielle.

- soudure en bout à pleine pénétration (figure 4.21).

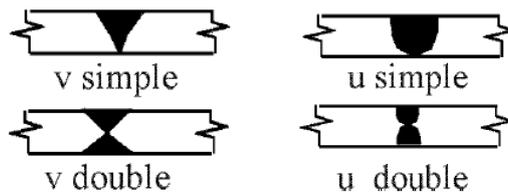


Figure 4.21 : soudures en bout à pleine pénétration.

Les soudures en bout peuvent quelquefois être réalisées sans chanfreinage.

4.4.2 Soudure d'angle

Les soudures d'angle peuvent être utilisées pour assembler des éléments dont les faces à assembler par fusion forment un angle compris entre 60° et 120° .

Des angles inférieurs à 60° sont également admis. Toutefois, dans ces cas, la soudure doit être considérée comme une soudure en bout à pénétration partielle.

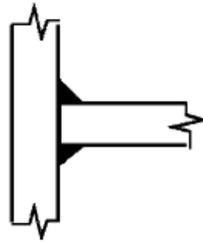


Figure 4.22 : Soudure d'angle.

4.4.3 Soudure en entaille

Les soudures en entaille, constituées de soudure d'angles réalisées dans des trous circulaires ou allongés (figure 4.23), ne peuvent être utilisées que pour transmettre des efforts de cisaillement pour éviter le voilement ou la séparation de parties qui se recouvrent, il faut que le diamètre du trou doit être inférieur à 4 fois l'épaisseur de l'élément perforé.

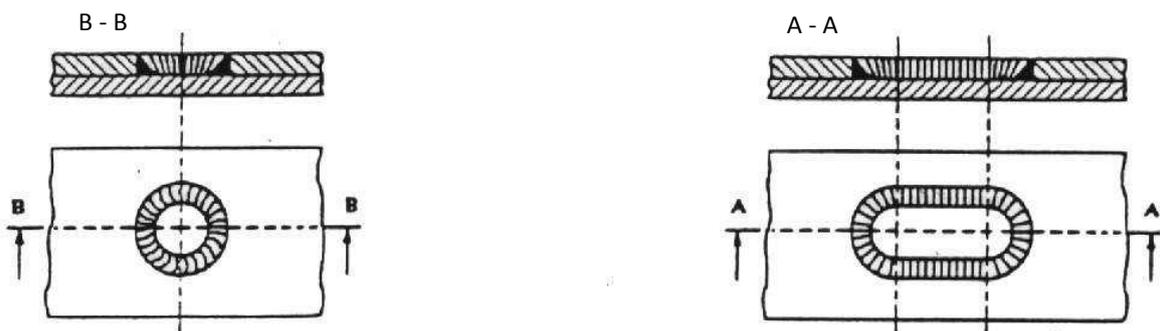


Figure 4.23 : Soudure en entaille

4.4.4 Soudures en bouchon

Les soudures en bouchon sont réalisées dans des trous circulaires ou oblongs comme le montre la figure 4.24, ce genre de soudure on le réalise que pour transmettre qu'un effort de cisaillement.



Figure 4.24 : Soudures en bouchon.

4.5 Préparation des bords des pièces à souder

Cette opération consiste à diminuer l'épaisseur au bord des pièces à souder pour faciliter la pénétration de la soudure. Cette opération s'appelle chanfrein, les différents types de chanfreins utilisés en charpente métallique sont donnés dans les tableaux 4.2 et 4.3.

Tableau 4.2 : Types de chanfreins pour les soudures bout à bout.

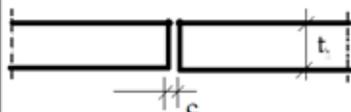
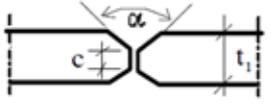
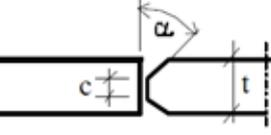
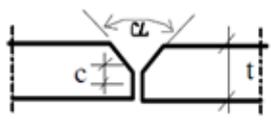
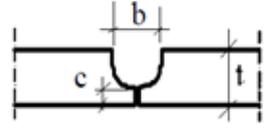
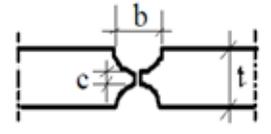
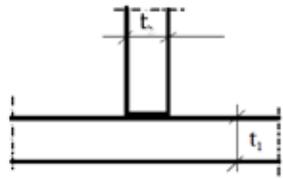
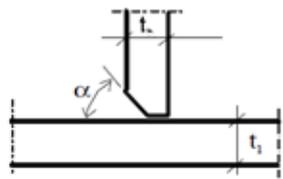
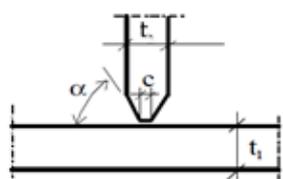
Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
Sans	 $t < 6\text{mm}$ $c = 1 \div 3\text{mm}$	
en X	 $t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$	Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes
en K	 $t = 12 \div 40\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 50^\circ$	
en V	 $t \leq 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $\alpha = 60^\circ$	Permet de souder sans tourner les pièces, mais il y a un inconvénient.
en U	 $t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$ $b = t/2$	Lors du refroidissement il y a des déformations angulaires
en double U	 $t = 10 \div 15\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm}; t/5)$	Symétrie donc élimine les phénomènes de déformation ou de contraintes internes

Tableau 4.3 : Chanfreins des soudures d'angle.

Mode de chanfrein	Valeurs	Observation
sans 	$t_2 \leq 12\text{mm}$	
en V 	$t_2 \leq 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t_2 / 5)$ $\alpha = 50^\circ$	
en K 	$t_2 > 25\text{mm}$ $c = \min(3\text{mm} ; t_2 / 5)$ $\alpha = 60^\circ$	

Références bibliographique

- [1] D. SACQUEPEY et D. SPENLE, Précis de Construction Mécanique, Tomme 3, AFNOR-NATHAN, 1984.
- [2] H. Longeot et L. Jourdan, Construction Industrielle, Dunod, 1982.
- [3] J-F. Debongnie, Conception et Calcul des Eléments de Machines, Liège, Belgium, 2011.
- [4] Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées. Fiche pratique de sécurité ED 83. INRS, 1999.
- [5] G. SABATIER, F. RAGUSA, H. ANTZ. Manuel de Technologie Mécanique. Dunod, Paris, 2006.
- [6] A. MATHIEU. Etude de l'Assemblage Hétérogène Acier/Aluminium Obtenu par Faisceau Laser : Approche Thermique et Physico-Chimique. Thèse, Université de Bourgogne, France, 2006.
- [7] R.W. MESSLER, Jr. "What's Next for Hybrid Welding", Welding Journal, 83(3), 2004, 30-34.
- [8] P. PAILLARD. Assemblage des matériaux par soudage. Technique de l'ingénieur. BM 7700.