

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique.**

**Université Abbes Laghrour Khenchela  
Faculté de sciences et de la technologie  
Département de Génie Mécanique**



**TP FABRICATION MECANIQUE**

**SUPPORT DE COURS ET TRAVAUX PRATIQUES  
2<sup>e</sup> Année Licence - Génie Mécanique.**

**Présenté par**

**Laala GHELANI**

**Maître de Conférences B.**

**2020/2021**

## Table des matières

<b>I.1. Définition</b>	1
<b>I.2. Description générale d'un tour</b>	1
<b>I.3. Organes d'un tour parallèle</b>	2
<b>I.4. Outils de coupe en tournage</b>	4
<b>I.5. Différentes formes de plaquettes</b>	5
<b>I.6. Matériaux utilisés pour les outils</b>	5
<b>I.7. Principaux paramètres de coupe</b>	6
I.7.1. Vitesse de coupe ( $V_c$ en m/mn)	6
I.7.2. Détermination de la fréquence de rotation (N en tr/mn)	7
I.7.2.1. Vitesses de coupe indicatives	7
I.7.3. Vitesse d'avance (f en mm/tr)	8
I.7.3.1. Valeurs indicatives	8
I.7.4. Profondeur de passe (a en mm)	8
<b>I.8. Principaux usinages réalisables sur un tour</b>	8
(a) Chariotage	9
(b) Dressage	9
(c) Chanfreinage	9
(d) Centrage	10
(d) Perçage	10
(e) Alésage	10
(f) Rainurage	11
(g) Tronçonnage	11
(h) Filetage et taraudage	12
(i) Tournage de forme	12
(j) Détalonnage	12
<b>I.9. Types de montages</b>	13
(1) .Montage en l'air	13
(2) .Montage mixte	13
(3) .Montage entre pointes	13
<b>II. 1.Fraisage</b>	14
<b>II.2. Principe de travail</b>	14
<b>II.3. Modes de fraisage</b>	15

(a) Fraisage en bout (de face)	15
(b) Fraisage de profil	16
<b>II.4. Génération des surfaces planes</b>	17
<b>II.5. Usinages associés</b>	17
<b>II.6. Mode de travail</b>	18
(a) Fraisage en opposition	18
(b) Fraisage en concordance ou « en avalant »	19
<b>II.7. Rattrapage des jeux de fonctionnement</b>	20
<b>II.8. Fraises</b>	21
<b>II.9. Moyens de serrage lors de fraisage</b>	23
<b>II.10. Paramètres de coupe en fraisage</b>	23
<b>III. Perçage</b>	25
<b>III.1. Principe</b>	25
<b>III.2. Outils de perçage</b>	25
<b>IV. Rectification</b>	27
<b>IV.1. Principe</b>	27
<b>IV.2. Mode d'action de la meule</b>	27
IV.2.1. Rectification plane	28
IV.2.2. Rectifieuse cylindrique	29
(a) Rectification externe cylindrique	30
(b) Rectification intérieur cylindrique	31
(c) Rectifieuse sans centres	31
<b>IV.3. Caractéristiques de constitution</b>	33
<b>IV.4. Domaine d'application</b>	34
<b>IV.5. Influence du procédé sur les propriétés de la pièce produite</b>	35
<b>IV.6. Influence du procédé sur la conception de la pièce</b>	35
<b>V. Soudage</b>	37
<b>V.1. Généralités</b>	37
<b>V.2. Définition de soudage</b>	37
<b>V.3. Type des assemblages soudés</b>	38
V. 3.1 Assemblage bout-à-bout	38
V.3.2 Assemblage en coin ou en angles	39
V. 3.3 Assemblage à bords relevés	40

V.3.4 Assemblage par recouvrement_____	41
<b>V.4. Défauts de soudage</b> _____	41
V.4.1. Fissure_____	41
(a) Fissures transversales _____	41
(b) Fissures de Racine_____	41
(c) Fissures au raccordement_____	41
IV.4.2. Causes possibles_____	42
<b>V.5. Solutions et mesures préventives</b> _____	44
V.5.1. Réglage des paramètres du soudage_____	44
V.5.1.1 Électrode enrobée_____	44
V.5.2. Calcule de la température de préchauffage_____	44
<b>V. 6. Techniques de soudage</b> _____	45
V.6.1. Soudage Oxyacétylénique, ou Soudage au Chalumeau_____	45
V.6.1.1. Principes du procédé et mise en œuvre_____	46
V.6.1.2. Description du poste de soudage OA _____	46
V.6.1.3. Chalumeau_____	46
V.6.1.4. Flammes_____	46
V.6.1.5. Réglage des flammes_____	47
(a) Flamme normale, réductrice _____	47
(b) Flamme oxydante_____	47
(c) Flamme comburante_____	47
V.6.1.6. Température de flamme chalumeau_____	48
V.6.1.7. Prévention des risques professionnels en soudage OA_____	48
V.6.2. Soudage à l'arc électrique_____	49
V.6.2.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobé_____	50
V.6.2.1.1. Composition du matériel_____	50
V.6.2.1.2. Rôle de l'enrobage_____	51
V.6.2.1.3. Choix de l'électrode_____	51
V.6.2.1.4. Amorçage et entretien de l'arc _____	51
V.6.2.1.5. Réglage de l'intensité _____	51
V.6.2.1.6. Préparation_____	52
V.6.2.1.6. Position de l'électrode _____	52
V.6.2.1.8. Sécurité _____	52

V.6.2.2. Soudage à l'arc sous protection ( électrode fusible)	53
V.6.2.2.1. Soudage MIG	53
V.6.2.2.2. Soudage MAG	54
(a) Fil-électrode	54
(b) l'état de la surface des pièces	55
(c) Gaz de protection	55
III.3.3.1. Avantages et inconvénients	55
III.3.3.2. Applications	56
V.2.3. Soudage TIG	56
V.2.3.1.Principe	56
V.2.3.2. Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG	57
V.2.3.3. Applications de la soudure TIG	58
V.2.3.4. Avantages et inconvénients en soudage TIG	58
V.2.3.5. Alimentation électrique	58
V.2.3.6. Gaz utilisés	58
<b>V.3. Soudage par résistance électrique</b>	<b>59</b>
V.3.1.Introduction	59
V.3.2. Particularités du soudage par résistance	59
V.3.3. Principe de base	60
V.3.4. Avantage du soudage par résistance	61
V.3.5. Inconvénients	61

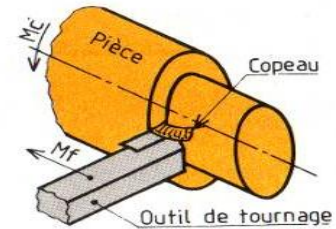
**L**es travaux pratiques de Fabrication mécanique permettent de consolider les connaissances acquises dans la matière Fabrication Mécanique. En effet ces TP concernent les principaux modes de mise en forme des pièces mécaniques et ils permettent d'acquérir la compétence générale relative à la réalisation des pièces mécaniques à partir d'un cahier de charges et d'un dessin de définition de la pièce. Ils visent donc à donner aux étudiants les bases nécessaires en fabrication mécanique et les rendre apte à analyser des fabrications sous l'aspect procédé et les contraintes qui lui sont associées, ainsi que la capacité des machines et des équipements.

L'étudiant apprendra à utiliser les moyens de production et à vivre les difficultés rencontrées lors des réalisations des pièces et ceci dans le but d'en tenir compte lors de la conception des pièces.

### I.1. Définition

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (copeaux) mettant en jeu des outils à arête unique. En tournage la pièce, qui est généralement serrée dans un porte-pièce appelé mandrin, est animée d'un mouvement de rotation uniforme appelé mouvement de coupe  $M_c$ , qui est le mouvement principal du procédé (fig.I.1). L'outil est animé d'un mouvement de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance  $M_f$ , permettant de définir le profil de la pièce.

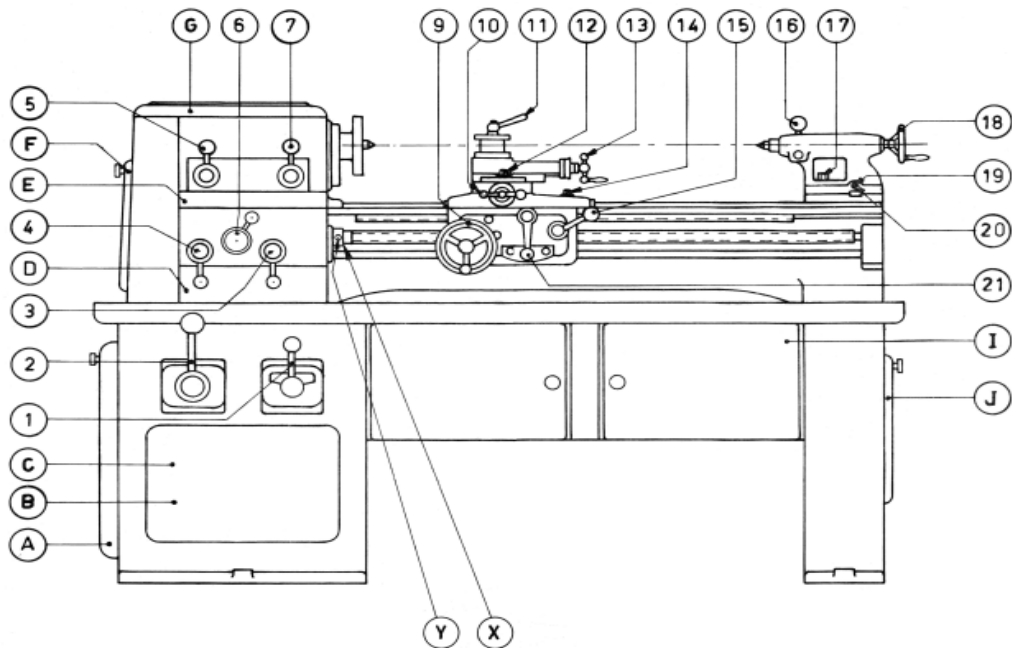
La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution : cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes.



**Fig.I.1.** Principe du tournage.

### I.2. Description générale d'un tour

Pour comprendre et exécuter les différentes opérations qui s'effectuent au tour parallèle, il est nécessaire de connaître les organes principaux qui le constituent (fig.I.2). Il est principalement constitué de :



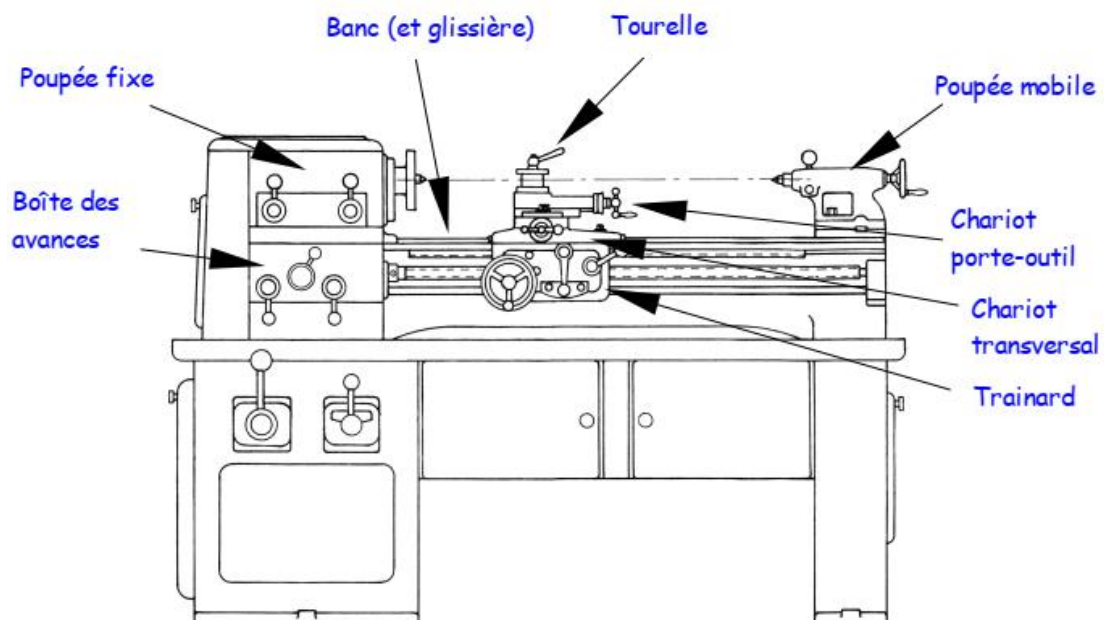
**Fig.I.2.** Tour parallèle.

- (1) . Levier de commande (inverseur et commutateur) du moteur.
- (2) . Levier de commande de la boîte de vitesse,
- (3) . Levier d'inversion du sens de rotation (tringle - vis-mère,
- (4) . Levier de sélection des filetages et avances,
- (5) . Levier donnant (position harnais) les mouvements lent et rapide,
- (6) . Levier baladeur de sélection des filetages et avances,
- (7) . Levier donnant à la poupée les vitesses à la volée ou au harnais,
- (8) . Volant de commande à la main du chariot longitudinal,
- (9) . Commande à la main du chariot transversal,
- (10) . Levier de blocage de la tourelle porte-outils,
- (11) . Vis (deux) de blocage de l'orientation du chariot porte-outils,
- (12) . Commande à la main du chariot porte-outils,
- (13) . Vis de blocage du chariot longitudinal,
- (14) . Levier commandant les demi-écrous de la vis mère (filetage),
- (15) . Levier de blocage du fourreau de la contre-pointe,
- (16) . Écrou de blocage de la contre-pointe sur le banc,
- (17) . Volant de commande du canon de la contre-pointe,
- (18) . Vis de désaxage de la contre-pointe,
- (19) . Contre – vis de désaxage de la contre-pointe,
- (20) . Levier d'embrayage des mouvements automatiques longitudinal et transversal des chariots,
- (21) . Couvercle d'accès à la poulie d'entrée de la boîte de vitesse,
- (22) . A-Accès au moteur principal,
- (23) . C- Couvercle d'accès à l'inverseur,
- (24) . D- Couvercle d'accès au graissage de la boîte « Norton »,
- (25) . E- Porte d'accès à la tête de cheval,
- (26) . F- Couvercle de la poupée fixe,
- (27) . Portes des armoires à outils,
- (28) . J- Couvercle d'accès au dispositif de lubrification,
- (29) . X- Manchon,
- (30) . Y- Vis.

### **I.3. Organes d'un tour parallèle (fig.I.3)**

- Le bâti : Généralement en fonte. C'est l'ossature de la machine,
- Le banc : Il est droit car rectiligne d'une extrémité à l'autre,
- Glissières : Elles sont de profil prismatique et assurent un guidage précis du traînard et de la poupée mobile. Elles sont rigoureusement planes. Il ne faut rien déposer sur les glissières,

- Poupée fixe : Elle est fixée sur le banc de manière à ce que l'axe de la broche soit parallèle aux glissières. Elle tient les mécanismes de commande de la broche et des chariots (longitudinal et transversal),
- Poupée mobile : Ses fonctions sont les suivantes :
  - Supporter la pièce à usiner,
  - Support d'outils (forêts,...).
- Le traînard : Il repose sur le banc par une portée prismatique de forme identique à celle du banc. Il se déplace sur le banc au moyen du système engrenage et crémaillère,
- Chariot transversal : Positionné perpendiculairement par rapport au traînard. Il supporte le petit chariot porte-outil,
- Chariot porte-outil : Il peut s'orienter sur 360°. Il sert au déplacement de l'outil pour de petites longueurs (90 mm),
- Tourelle : Elle s'oriente elle aussi sur 360°. Elle sert à maintenir le porte-outil ou directement l'outil lui-même,
- La boîte des avances et filetages : Située en-dessous de la poupée fixe. Elle commande par un mouvement d'engrenages, la vitesse de rotation de la vis mère et de la barre de chariotage.



**Fig.I.3.** Organe d'un tour parallèle.

### I.4. Outils de coupe en tournage

Les outils les plus courants sont normalisés et la forme leur partie active dépend de l'opération à réaliser (fig.I.4).

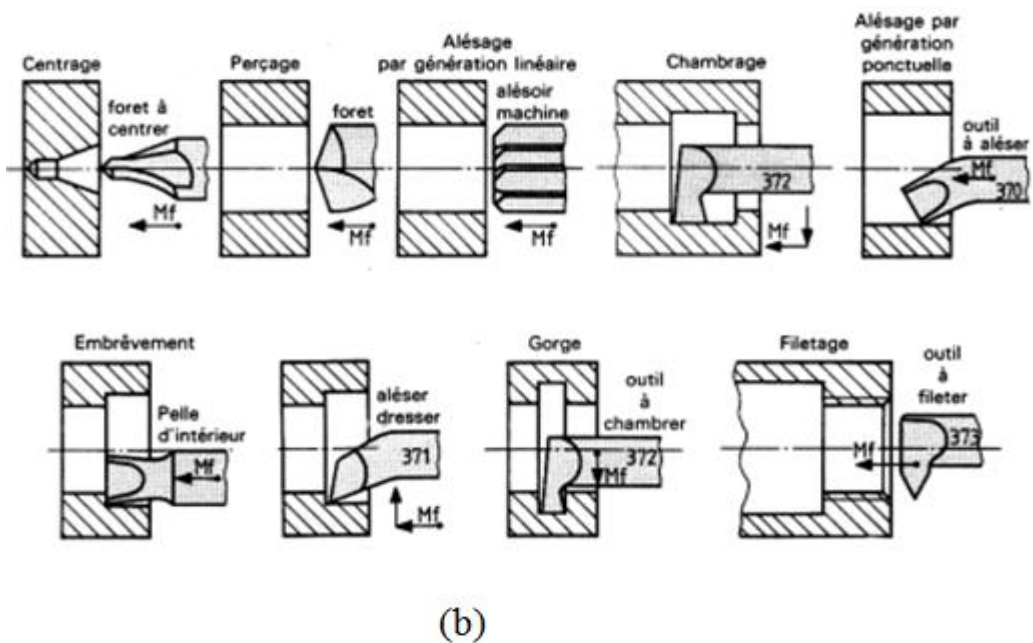
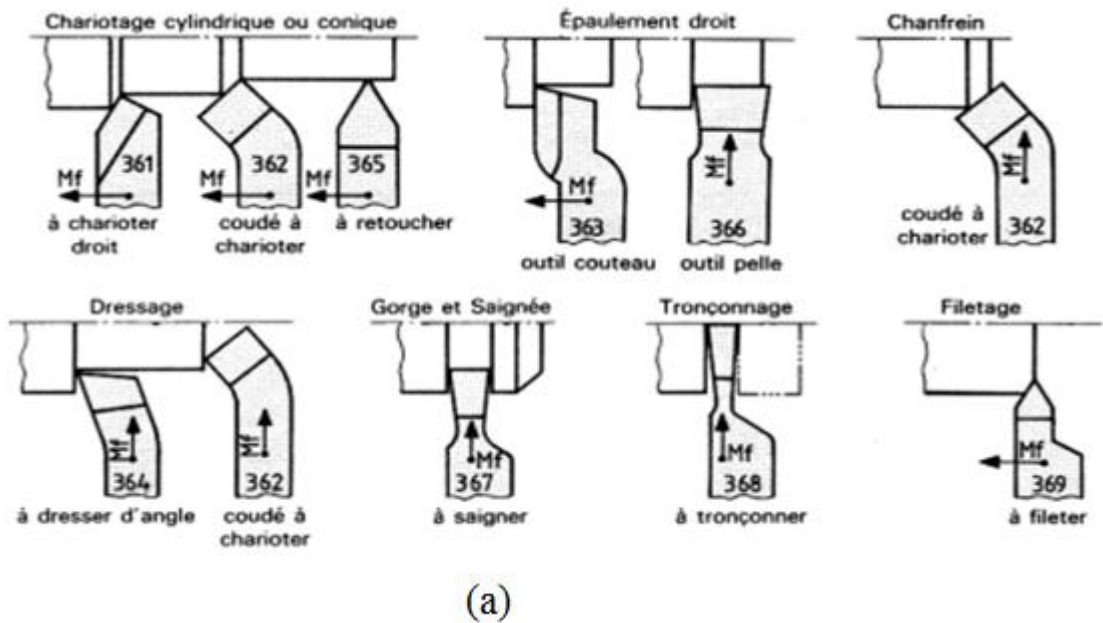
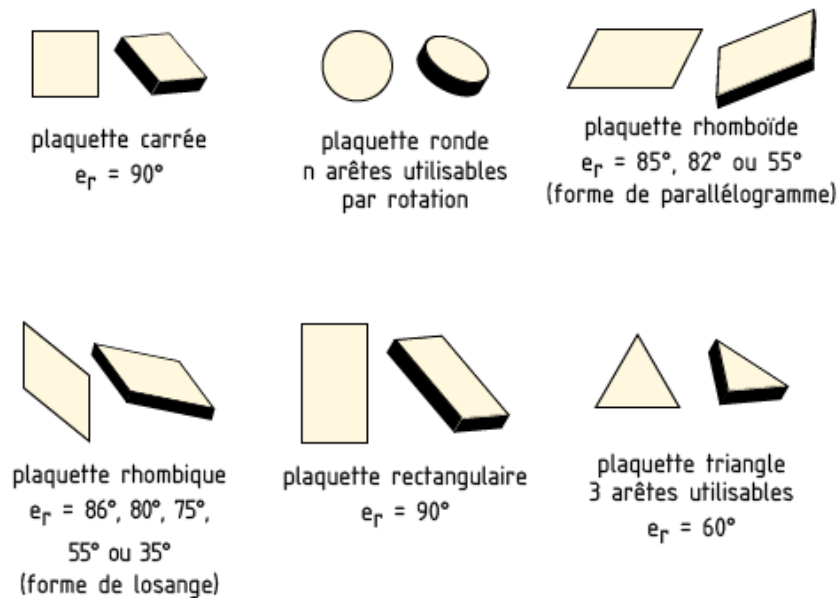


Fig.I.4. Principaux outils utilisés en tournage, a)extérieur, b) intérieur.

### I.5. Différentes formes de plaquettes

On utilise principalement des plaquettes de formes carré, ronde, rectangulaire, rhombique, triangulaire. La forme de la plaquette est choisie en fonction des surfaces à obtenir et du cycle de travail. Si plusieurs formes conviennent on choisira celle qui donne la meilleure résistance mécanique. Si le critère résistance n'est pas prépondérant, on choisira la plus économique, c'est à dire celle qui permet de disposer du maximum d'arêtes utilisables (plaquette carrée). Il existe également des plaquettes de formes hexagonale, octogonale et pentagonale (fig.I.5).



**Fig.I.5.** Principales formes de plaquettes.

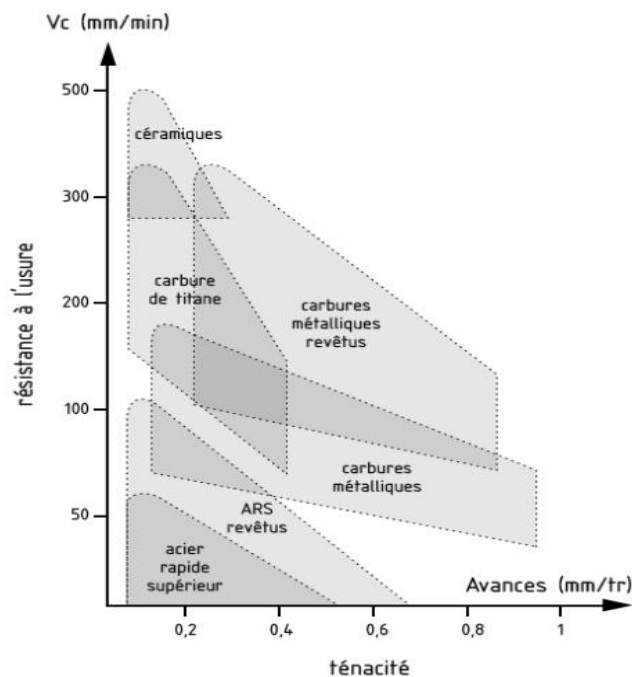
### I.6. Matériaux utilisés pour les outils

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement (fig.I.6) :

- **Aciers rapides** : ce sont des aciers avec un minimum de 0,7% de carbone, 4% de chrome, du tungstène, du molybdène, du vanadium et éventuellement du cobalt, par exemple le X 80 WCrV18-04-01 ou le X 130 WCoCrMoV10-10-04-04-03. On les utilise pour usiner les alliages légers, les fontes, les aciers inoxydables, ils sont monoblocs ;
- **Carbures métalliques** : Rentrent dans cette catégorie les alliages composés de tungstène (60-90%), titane et tantale (1-35%) et de cobalt ou nickel (5-15%), ainsi que d'autres matières en plus faibles quantités comme le molybdène ou le vanadium. La fabrication du métal dur est réalisée par frittage, on en fait généralement des plaquettes que l'on fixe sur

le corps de l'outil par brasage, avec une vis ou aussi par bridage. Certains outils de petites dimensions sont fabriqués entièrement en métal dur.

- **Cermets** (ou céramiques métalliques) : matériaux à base de carbures de titane, de cobalt ainsi que de nickel comme liant. Ils ont une très bonne résistance à l'usure, on les réserve aux opérations de finition pour les aciers, surtout inoxydables.
- **Céramiques** : sous forme de plaquettes frittées comme pour les carbures à base d'alumine ou de nitrure de silicium. On les utilise pour des usinages à grande vitesse mais supportent mal les chocs, elles ne conviennent pas aux alliages légers.



**Fig.I.6.** Illustration des aptitudes des matériaux à outil.

## I.7. Principaux paramètres de coupe

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité d'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit faire un choix judicieux des paramètres de coupe.

### I.7.1. Vitesse de coupe ( $V_c$ en m/mn)

La vitesse de coupe est déterminée en fonction de différents facteurs:

- de la matière à usiner : en général plus elle est tendre et plus la vitesse est élevée
- de la matière de l'outil de coupe ;
- la géométrie de l'outil de coupe ;
- du type d'usinage: ébauche, finition, filetage, etc.

- du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse ;
- de la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées ;
- des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...).

Les fabricants d'outils fournissent des valeurs de vitesse de coupe pour ces différents paramètres. On cherche à déterminer la relation entre la vitesse de coupe,  $V_c$ , et le taux de rotation,  $N$  de la pièce (cas du tournage) .

Si :  $D$  : est le diamètre de la pièce et  $N$  : le nombre de tours par minute, On a :

$$V_c = P.D.N$$

Avec :

- $P \times D$  : circonférence de la pièce en millimètres;
- $N$  : fréquence de rotation en tours par minute.

### **I.7.2. Détermination de la fréquence de rotation (N en tr/mn)**

La vitesse de coupe ( $V_c$ ) [m/min] : désigne la vitesse linéaire de l'outil dans le sens du mouvement de coupe. Elle est donnée par des tableaux en fonction de la matière à usiner, il convient de déterminer la fréquence de rotation de la pièce ( $N$ ) que l'on réglera sur la machine. Pour cela, on utilisera la formule suivante

La vitesse de coupe  $V_c$  étant donnée par :

$$N = \frac{1000.V_c}{\pi.D}$$

Avec

- $N$  : fréquence de rotation en tours par minute (tr/min),
- $V_c$  : vitesse de coupe en mètres par minute (m/min) ,
- $D$  : diamètre de la pièce en millimètre (mm) .

#### **I.7.2.1. Vitesses de coupe indicatives**

(a) pour un outil en acier rapide

- Aciers courants :
  - 20 à 25 m/min en ébauche,
  - 25 à 30 m/min en finition.
- Fontes grises : 18 m/min,
- Cuivre : 35 m/min,
- Aluminium et alliages : 80 m/min,
- Bronzes et laitons : 40 m/min,
- Pour le tronçonnage, le rainurage et l'alésage réduire la vitesse d'un tiers.

**(b) pour un outil carbure**

- De 80 à 1000 m/min (on devra limiter la vitesse de coupe à 140 m/min environ à Cause du manque de puissance et de rigidité de nos machines universelles).
- D : diamètre usiné en m.

**I.7.3. Vitesse d'avance (f en mm/tr)**

L'avance par tour est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

$$V_f = z \cdot f_z \cdot N$$

- $V_f$  [mm/min] ;
- $f_z$  [mm/ (tr.dent)] ;
- N [tr/min] ;
- $f_z$  correspond à la capacité de coupe de l'arête de coupe (la dent) pour une rotation de 1 tour de la pièce. En d'autre terme,  $f_z$  correspond à la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

**I.7.3.1. Valeurs indicatives**

- pour un outil en acier rapide:
  - 0,1 à 0,3 en ébauche ;
  - 0,05 à 0,2 en finition.
- pour un outil en carbure:
  - 0,2 à 0,4 en ébauche ;
  - 0,1 à 0,2 en finition.

**I.7.4. Profondeur de passe (a en mm)**

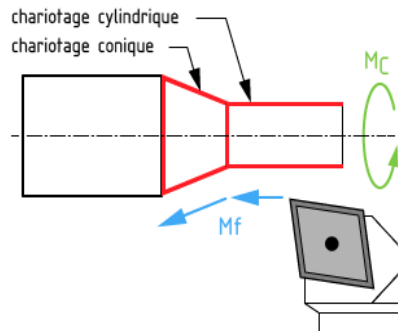
Désigne l'épaisseur de la couche enlevée sur la pièce. Elle est mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance.

**I.8. Principaux usinages réalisables sur un tour**

- Tournage cylindrique extérieur avec pointe et contre-pointe (entre pointes), appelé chariotage, avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Dressage avec passes de dégrossissage et de finition ;
- Chariotage conique ou tournage conique par orientation du chariot porte outil avec passes de dégrossissage et finition ;
- Filetage, tronçonnage, perçage et tournage intérieur (alésage).

(k) **Chariotage**

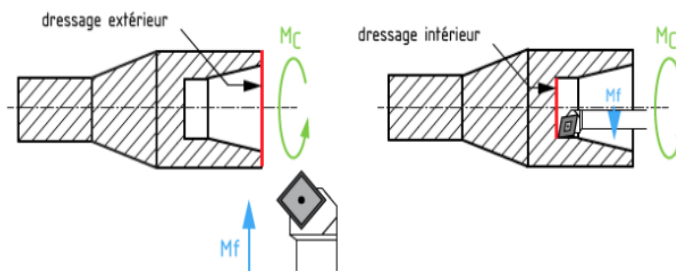
Le chariotage donne une surface latérale cylindrique, ou conique extérieure, l'alésage, une surface intérieure cylindrique ou cambrage. (fig.I.7).



**Fig.I.7.** Schéma représenté l'opération de chariotage.

(l) **Dressage**

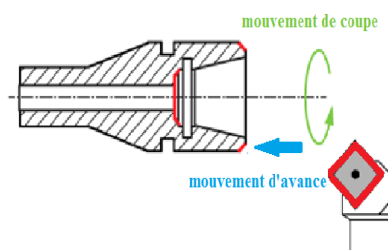
Le dressage donne des surfaces planes perpendiculaires à l'axe de la broche, extérieur ou intérieur (fig.I.8).



**Fig. I.8.** Schéma d'élaboration de dressage.

(m) **Chanfreinage**

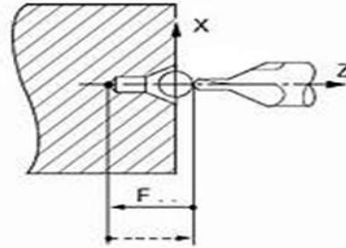
C'est une opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif (fig.I.9).



**Fig.I.9.** Opération de Chanfreinage.

**(d) Centrage**

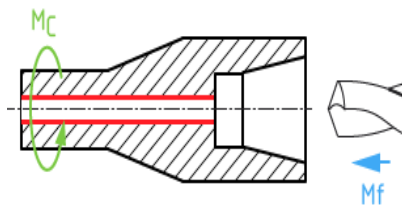
L'opération consiste à usiner à l'extrémité de la pièce à dresser un centre qui servira de logement à la pointe. Les axes des deux centres doivent se confondre avec l'axe géométrique de la pièce (fig.I.10).



**Fig.I.10.** Opération de centrage.

**(n) Perçage**

Le terme de perçage regroupe toutes les méthodes ayant pour objet d'exécuter des trous cylindriques dans une pièce avec des outils de coupe par enlèvement de copeaux. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage (fig.I.11).

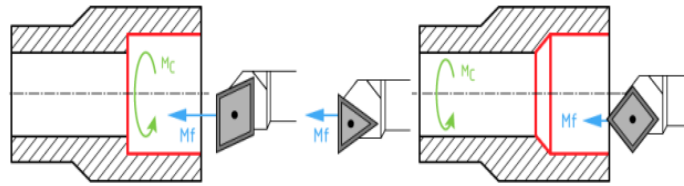


**Fig.I.11.** le perçage Sur une perceuse.

**(o) Alésage**

C'est exécuter une forme de révolution intérieur. L'outil à aléser doit donc pouvoir pénétrer dans l'alésage. Lorsque le trou a été percé avec assez de précision, on peut calibrer au diamètre voulu avec un alésoir, ce qui est une opération rapide mais qui nécessite l'outil exactement approprié au diamètre ; cette méthode n'est en général employée que jusqu'à 20, voire 30 mm de diamètre. Sinon on utilise un grain d'alésage réglable assurant une très bonne précision du trou en position mais qui nécessite plusieurs passages, donc plusieurs porte outils: 1 ou 2 à partir d'un trou percé, 2 ou 3 pour un trou brut de fonderie. Il existe des têtes à aléser portant un seul outil réglable en diamètre soit manuellement, soit par la CN ; dans ce

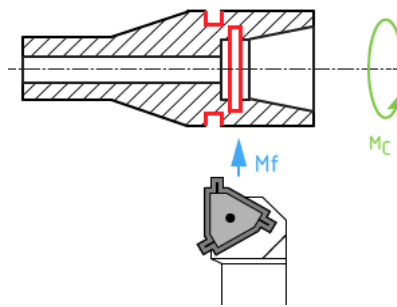
dernier cas, on peut réaliser des opérations de surfacage et d'alésage à différents diamètres ayant éventuellement un profil non rectiligne (fig.I.12).



**Fig.I.12.** Schéma de réalisation d'un alésage.

(p) **Rainurage**

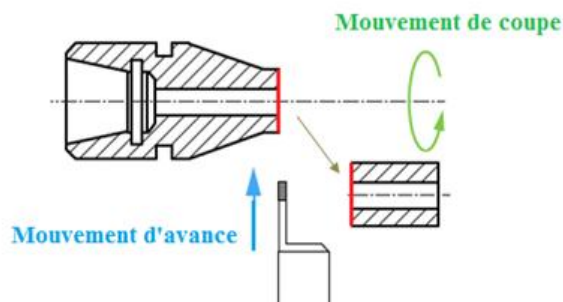
Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple (fig.I.13).



**Fig.I.13.** Opération de rainurage.

(q) **Tronçonnage**

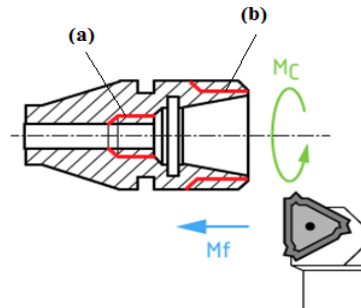
Le tronçonnage consiste à sectionner une barre ou à détacher la pièce du reste de la barre. Une saignée limitée en profondeur est une gorge, Le saignage consiste à usiner des gorges ou saignées sur la surface de la pièce (fig.I.14).



**Fig.I.14.** Opération de tronçonnage.

(r) **Filetage et taraudage**

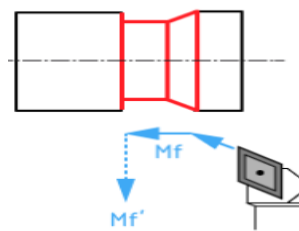
L'outil, dont le déplacement est longitudinal, creuse sur la pièce des rainure hélicoïdales laissant leur relief le filet, suivent la forme de l'outil on obtient un filet triangulaire, trapézoïdale, rond, carré (fig.I.15).



**Fig.I.15.** Opération de filetage, a) intérieur (taraudage),b) extérieur (filetage).

(s) **Tournage de forme**

Consiste à exécuter des pièces de révolution complexe: sphère, cylindre, plan, cône... (fig. I.16).



**Fig.I.16.** Tournage de forme.

(t) **Détalonnage**

C'est une opération qui consiste à réaliser un angle de dépouille de la fraise et pour but de faire l'arrête de ce dernier (fraise) plus haute que le dos de la dent de façon à permettre à la fraise d'exécuter le découpage normale. Le détalonnage est plus employé pour l'usinage des fraises de forme (fig. I.17).

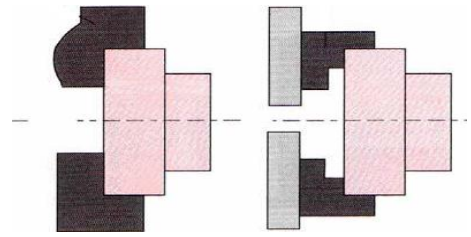


**Fig. I.17.** Profil d'une fraise de forme à denture détalonnée.

## I.9. Types de montages

### (4) .Montage en l'air

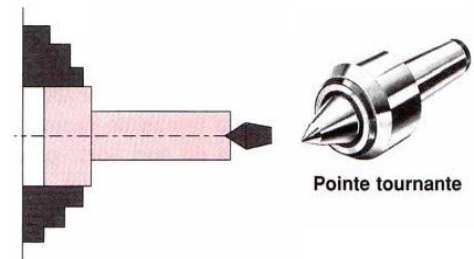
La mise en position de la pièce est assurée sur le porte-pièce par une seule extrémité, ce type de montage est utilisé pour les pièces dites courtes ( $L/D < 2$ ) (fig.I.18). Le montage utilisé est généralement un mandrin et dans certains cas on utilise un plateau avec montage sur équerre. Ce montage permet l'usinage intérieur et extérieur.



**Fig.I.18.** Montage en l'air.

### (5) .Montage mixte

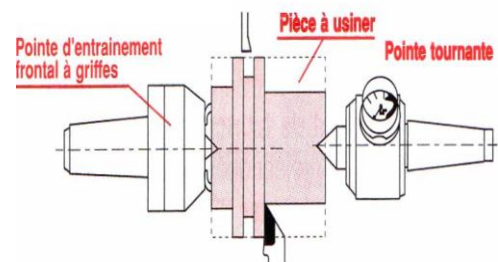
La mise en position de la pièce est assurée d'un côté par un mandrin, comme dans le cas du montage en l'air et de l'autre côté la pièce est soutenue à l'aide de la contre pointe (pointe tournante montée sur la poupée fixe)(fig.I.19). Le mandrin permet le bon maintien et entraînement de la pièce, ce montage est prévu pour les pièces longues et ne permet pas l'usinage intérieur des pièces.



**Fig.I.19.** Montage mixte.

### (6) .Montage entre pointes

La mise en position de la pièce est assurée par deux pointes qui se logent dans les centres de la pièce (fig.I.20). Ce montage est utilisé pour éviter la flexion des pièces ( $L > 2-3D$ ) et permet d'obtenir des conditions géométriques imposées, l'entraînement est assuré par toc et pousse toc (collier).

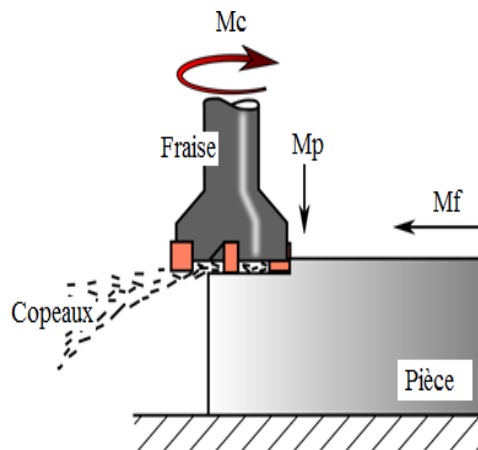


**Fig.I.20.** Montage entre pointe.

## II. Fraisage

### II.1. Définition

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes ( $M_c$ ) et l'avance rectiligne d'une pièce ( $M_f$ ) (fig.II.1). Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des rainures, contournage, etc. . Si la machine est équipée de commande numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes. Aujourd'hui, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC .

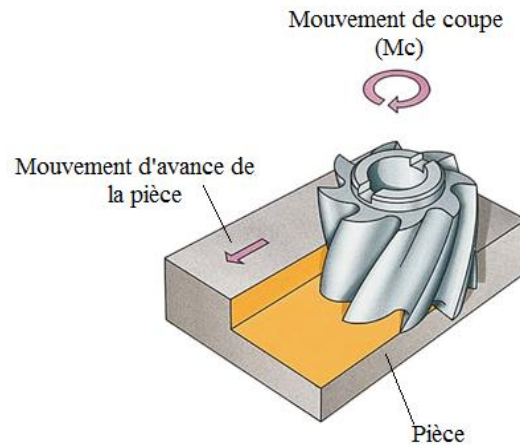


**Fig.II.1.** Procédé de fraisage.

### II.2. Principe de travail

Lors d'une opération de fraisage, l'enlèvement de la matière – sous forme de copeau – résulte de la combinaison de deux mouvements : le mouvement de rotation de l'outil sur son axe d'une part et le mouvement d'avance de la pièce suivant trois axes orthogonaux d'autre part (fig.II.2). Les fraises peuvent présenter des arêtes tranchantes soit sur leur surface latérale, soit en bout, soit latéralement et en bout simultanément les fraises peuvent donc produire des :

- Surfaces planes parallèles à leur axe ;
- Surfaces planes obliques à l'axe de rotation ;
- Surfaces perpendiculaires à l'axe de la fraise ;
- Surfaces quelconques de forme indifféremment positionnées par rapport à l'axe.



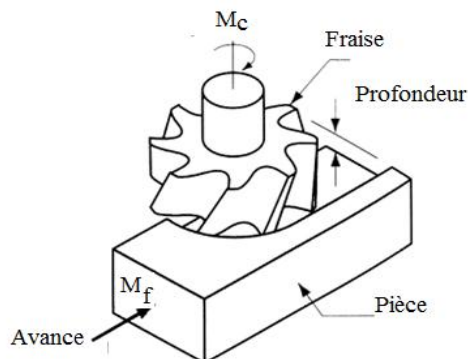
**Fig.II.2.** Principe de fraisage.

### II.3. Modes de fraisage

Ces différentes possibilités font apparaître deux grands principes de fraisage :

#### (c) Fraisage en bout (de face)

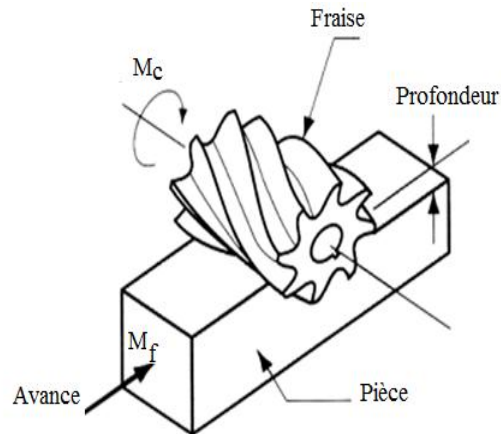
Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (fig.II.3). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure, Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en bout ».



**Fig.II.3.** Schéma de fraisage en bout (Frb).

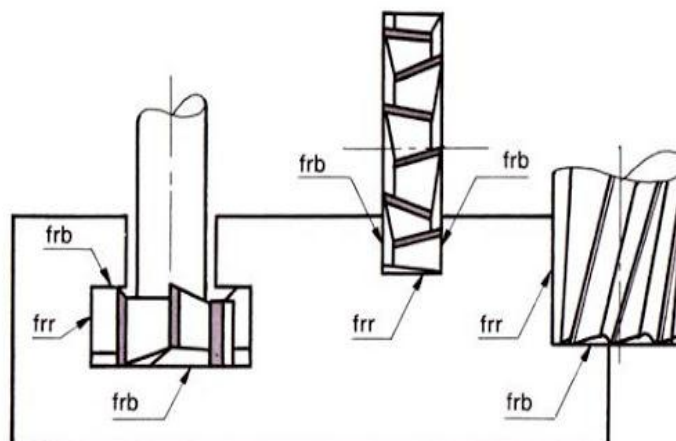
**(d) Fraisage de profil**

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (fig.II.4). La fraise coupe avec son diamètre. C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où quelconques dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est également appelé « fraisage en roulant ».



**Fig.II.4.** Fraisage en roulant (Frr).

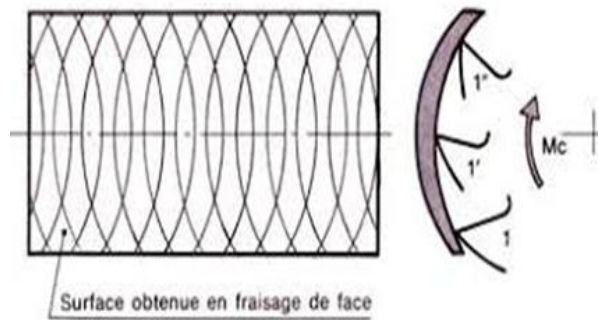
On peut également effectuer un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profil en même temps. C'est le cas des fraises 2 tailles, 3 tailles, travaillant simultanément en bout et en roulant : c'est le fraisage combiné (fig.II.5).



**Fig.II.5.** Fraisage combiné.

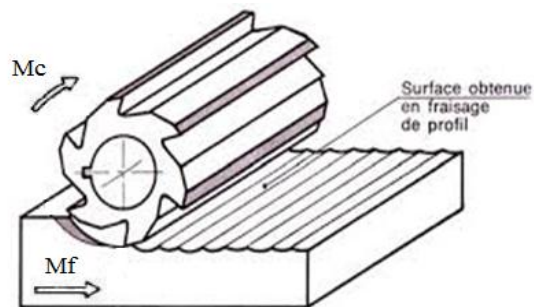
#### II.4. Génération des surfaces planes

L'aspect d'une surface usinée en fraisage en bout est caractérisé par une série de courbes sécantes appelées cycloïdes correspondant à la trace laissée par les dents de la fraise sur la pièce (fig.II.6).



**Fig.II.6.** Texture d'une surface fraisée en bout.

Dans le fraisage en roulant, l'axe de la fraise est parallèle à la surface à usiner (fig.II.7). La forme du copeau enlevé par une dent est semblable à une virgule. L'épaisseur du copeau n'est pas constante. De ce fait, l'effort de coupe est variable au cours de la passe.



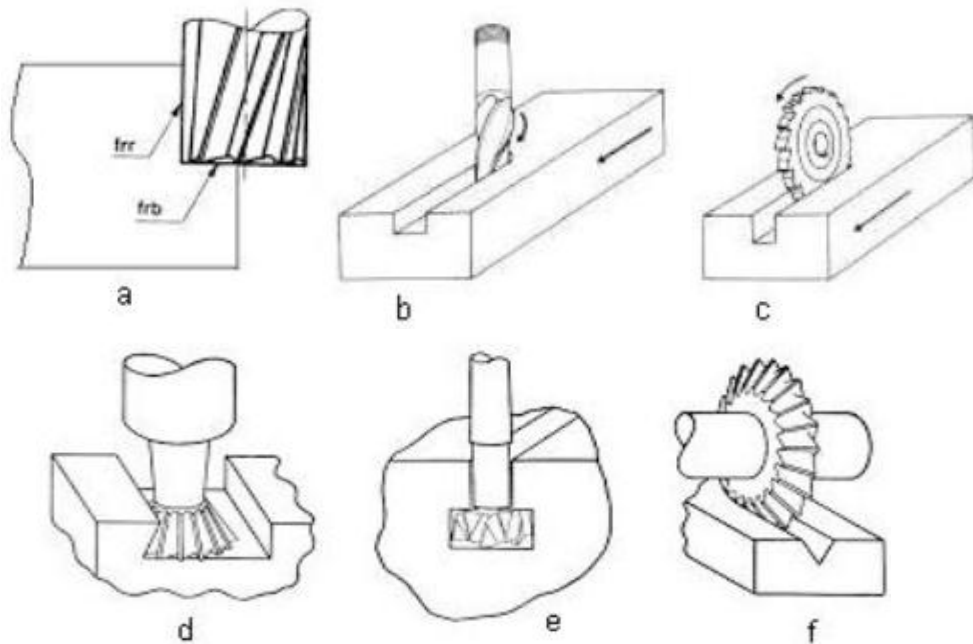
**Fig.II.7.** Texture d'une surface fraisée de profil.

#### II.5. Usinages associés

En fraisage, on réalise souvent plusieurs surfaces simultanément et l'on associe les fraisages en bout et en roulant :

- Fraisage des épaulements droits à l'aide d'une fraise 2 tailles (figure 8a) ;

- Fraisage d'une rainure : Le rainurage peut se faire à l'aide d'une fraise à 2 lèvres (figure 9b) ou à l'aide d'une fraise 3 tailles (figure 8c) ;
- Fraisage d'une queue d'aronde (figure 8d) ;
- Fraisage d'une T (figure 8e) ;
- Fraisage d'un angle (figure 8f).



**Fig.II.8.** Usinage des surfaces associées.

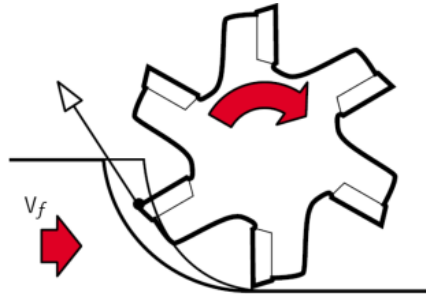
## II.6. Mode de travail

Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe. On distingue, donc, deux modes de travail :

### (c) Fraisage en opposition

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux, nulle au départ, augmente jusqu'à la fin de la passe. Il s'en suit que le métal est écroui jusqu'à ce que l'épaisseur devienne égale à l'épaisseur du copeau taillé minimale (fig.II.9). Les forces de coupe élevées tendent à séparer la fraise de la pièce. La fraise doit être engagée à force dans la pièce, ce qui crée un effet de frottement ou

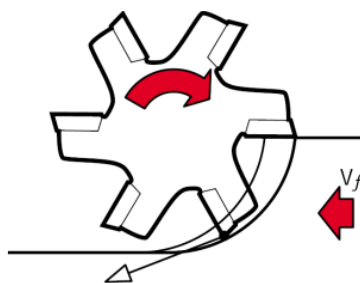
de galetage accompagné d'un fort dégagement de chaleur. Les forces de coupe ont également tendance à soulever la pièce au-dessus de la table de la machine, ce qui oblige donc à faire très attention à la tenue du montage. Ce mode de travail peut être employé sur n'importe quelle machine.



**Fig.II.9.** Fraisage en opposition.

**(d) Fraisage en concordance ou « en avalant »**

Dans le cas de fraisage en avalant, La direction d'avance est **la même** que le sens de rotation de la fraise. La fraise démarre avec une forte épaisseur de copeau jusqu'à être égale à zéro à la fin de la passe (fig.II.10). Cela réduit le dégagement de chaleur et de la tendance à l'écaillage. Cette forte épaisseur de copeau est un élément favorable à l'obtention d'une bonne rugosité. Les forces de coupe tendent à presser la pièce contre ses appuis, par contre le jeu axial de fonctionnement du système vis-écrou de commande de déplacement de la table est constamment rattrapé. Ce procédé ne peut donc être utilisé que sur des fraiseuses munies d'un dispositif de compensation des jeux du système **vis écrou** afin d'éviter que la table se déplace par à coups. Le fraisage en avalant est à préférer chaque fois que la machine, le système de fixation de l'outil et la pièce le permet.



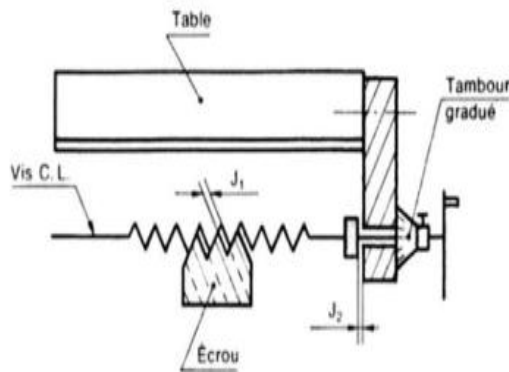
**Fig.II.10.** Fraisage en avalant.

## II.7. Rattrapage des jeux de fonctionnement

La précision des déplacements, donnée par des tambours gradués, est affectée par un jeu axial de fonctionnement  $J$  (fig.II.11) composé :

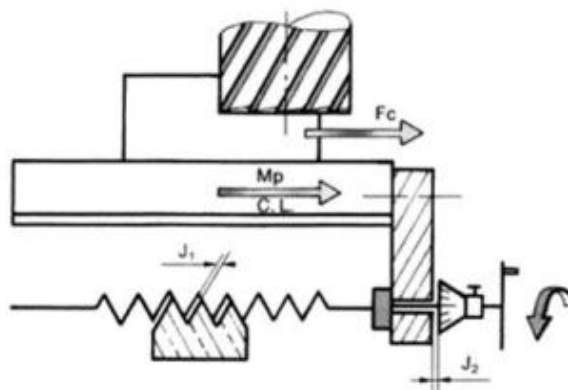
- Du jeu  $J_1$  du système vis-écrou,
- Du jeu  $J_2$  du dispositif d'attelage de la vis :

$$J = J_1 + J_2$$



**Fig.II.11.** Jeux fonctionnels Vis / Ecrou.

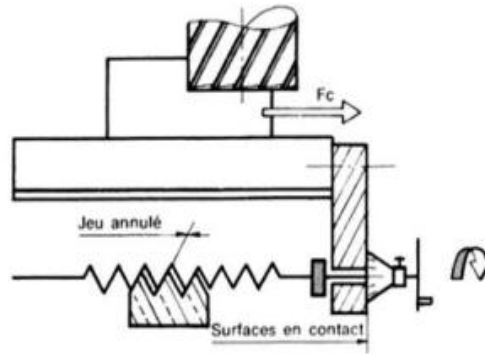
Ces Jeux de fonctionnement, indispensables, augmentent avec l'usure. Pour garantir un usinage convenablement précis, il faut savoir utiliser les chariots d'une fraiseuse pour amener une pièce en position d'usinage pour la réaliser par exemple l'épaulement (fig.II.12).



**Fig.II.12.** Prise de passe au C.L.

Si l'effort de coupe est de même sens que le déplacement du chariot longitudinal à la prise de passe, la table risque de se déplacer de  $J$  (fig.II.13).

Conclusion : il faut donc neutraliser  $J_1$  et  $J_2$ .



**Fig.II.13.** Elimination des jeux fonctionnels.

Cette manœuvre déplace les jeux et modifie la position des surfaces d'appui en contact du dispositif d'attelage et du système vis-écrou, qui s'opposent ainsi à l'effort de coupe.

## II.8. Fraises

On rencontre trois types de fraises

- Fraises à une taille (1T) : elles coupent uniquement sur la périphérie ; de faible épaisseur, elles sont utilisées pour tronçonner ; de forte épaisseur, elles permettent la réalisation de plans ;
- Fraises à deux tailles (2T) : elles coupent sur la périphérie et en bout ;
- Fraises à trois tailles (3T) : elles coupent sur la périphérie et sur chacune des extrémités (en bout et sur la face opposée).

Ces fraises sont, comme pour le cas du tournage fabriquées en ARS ou basées sur des plaquettes carbure rapportées.

Les fraises sont fabriquées :

- Monoblocs en acier rapide (ARS) ; l'acier rapide étant coûteux, les fraises de grandes dimensions sont constituées d'un corps en acier de construction mécanique et de dents rapportées en acier rapide ;
- à dents ou à lames amovibles en ARS ou en carbure.

Pour le montage sur la broche, on distingue :

- Fraises à trou : alésage cylindrique lisse, avec clavetage, avec filetage et centrage ou alésage conique (fig.II.14).
- Fraises à queue : cylindrique lisse ou à méplat, conique à cône morse (fig.II.15) ;



**Fig.II.14.** Fraises en acier rapide.



**Fig.II.15.** Fraises en carbure.

Pour les opérations de poches et de profilage utilisées avec les centres d'usinage, on utilise des fraises à bout hémisphérique en ARS ou des fraises à plaquettes carbure rondes qui permettent de fabriquer des surfaces complexes. Ces fraises sont généralement de petit diamètre (fig.II.16).



(a)



(b)



(c)

**Fig.II.16.** Fraises pour opération de poche et de profilage, a) fraise en bout, b) fraise à fileter, c) fraise à plaquettes..

## II.9. Moyens de serrage lors de fraisage

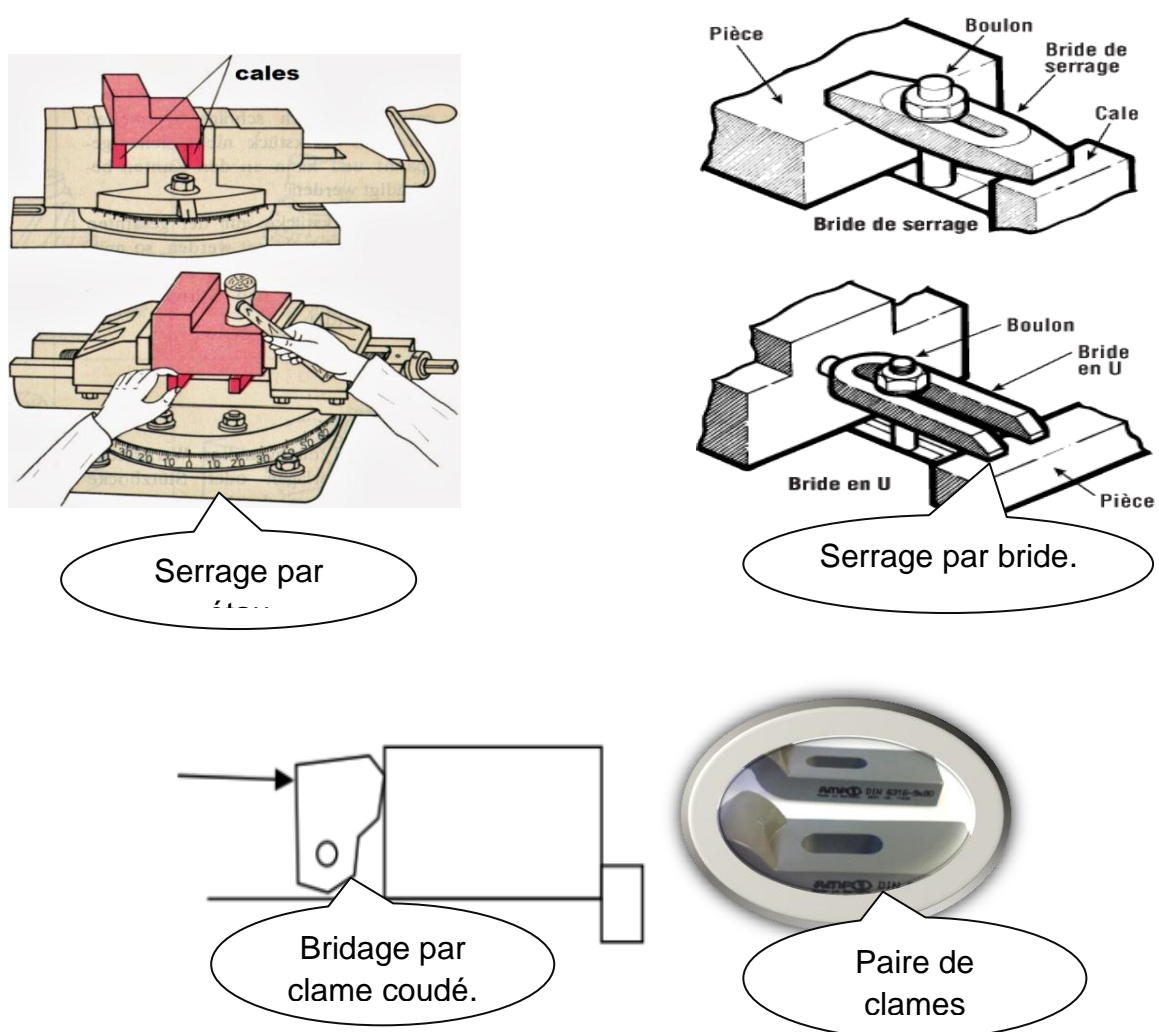


Fig.II.17. Différents moyens de serrage.

## II.10. Paramètres de coupe en fraisage

- **Vitesse de coupe** ( $V_c$  en m/min)

Elle indique la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

- **Vitesse de broche (n en tr /min)**

Elle indique le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute. La vitesse de broche n, le diamètre de l'outil D et la vitesse de coupe Vc sont liés par les formules suivantes :

$$n_{(tr/min)} = \frac{1000 Vc_{(m/min)}}{\pi D_{(mm)}}$$

- **Avance par tour (f en mm/tr)**

C'est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfaçer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation.

- **Avance par dent (fz en mm/dent)**

L'avance par dent représente la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. Elle peut être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour.

- **Avance par minute ou vitesse d'avance (Vf en mm/min) :**

C'est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table.

$$V_f = f_z \times Z \times n \quad (Z : \text{nombre de dents de la fraise})$$

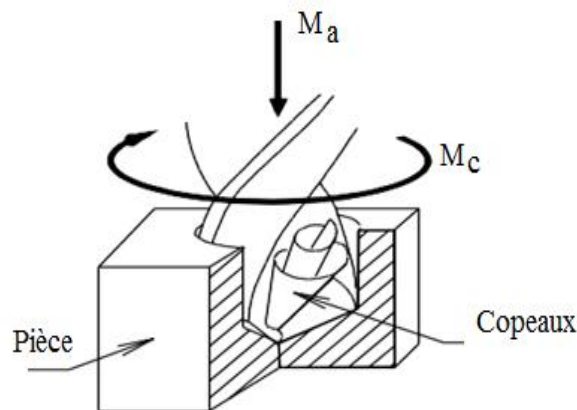
- **Profondeur de coupe**

La profondeur de coupe axiale ( $a_p$ ) en surfaçage ou radiale ( $a_e$ ) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au dessous de la surface initiale de la pièce.

### III. Perçage

#### III.1. Principe

Le perçage est une opération d'usinage importante. Elle permet de réaliser des trous cylindriques débouchant ou borgnes. La réalisation de trous coniques est moins courante. Ces trous servent soit pour la fixation par vis (trou fileté), écrous, rivets, soit pour l'accès. En plus du perçage de trous courts et du forage de trous profonds, ce concept inclut également diverses opérations d'usinage consécutives, telles que brochage, alésage, réalésage et certaines formes de finition comme le calibrage et le galetage. En perçage, l'outil assure simultanément le mouvement de coupe (rotation sur lui-même) et le mouvement d'avance (mouvement axial le long de son axe de rotation) (fig.III.1).








**Fig.III.1.** Opération de perçage.

L'enlèvement de la matière lors de l'opération de perçage s'effectue par la combinaison d'un mouvement rotatif et d'un mouvement d'avance linéaire. Pour le perçage de trous courts sur les machines conventionnelles, ce double mouvement de rotation et d'avance est donné à l'outil. Mais l'utilisation de tours universels CN et CNC à toute fois conduit à recourir de plus en plus fréquemment à la combinaison d'une pièce en rotation et d'un foret qui ne tourne pas.

#### III.2. Outils de perçage

L'opération de perçage définit l'obtention d'un trou quelconque dans une pièce. On y associe des outils de perçage, à savoir les forêts.

Identification	Visualisation de l'outil	Type d'opérations réalisées
	Forêt à centrer	A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage.
	Forêt à pointer	A utiliser pour positionner un perçage.
	Forêt	Pour percer des trous.
	Alésoir	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7).
	Fraise à lamer	Pour noyer une tête de vis.

## IV. Rectification

### IV.1. Principe

La rectification s'effectue sur une machine-outil qui consiste à enlever la matière, sous forme de petits copeaux (grains), au moyen d'un outil particulier appelé meule. On fait appel à ce procédé pour des raisons de précision qui tiennent à la fois aux dimensions, aux états de surfaces et aux conditions de dureté des pièces (fig.IV.1).

Il s'agit de rectifier donc d'approcher une surface d'une forme parfaite (en général : plan, cylindre de révolution ou cône) . La rectification est souvent utilisée dans le but de préparer des surfaces frottantes, par exemple la portée d'un arbre qui tournera dans un palier lisse ou dans un joint d'étanchéité. Elle peut également être utilisée pour donner un profil particulier à la pièce.

Aujourd'hui avec l'apparition des nouveaux procédés d'usinage à grande vitesse, on voit également apparaître un nouveau procédé appelé rectification grande vitesse. Contrairement à l'usinage traditionnel (enlèvement de copeaux par outils coupant), la rectification permet des usinages de précision dimensionnelle élevée grâce au principe de l'usinage par abrasion

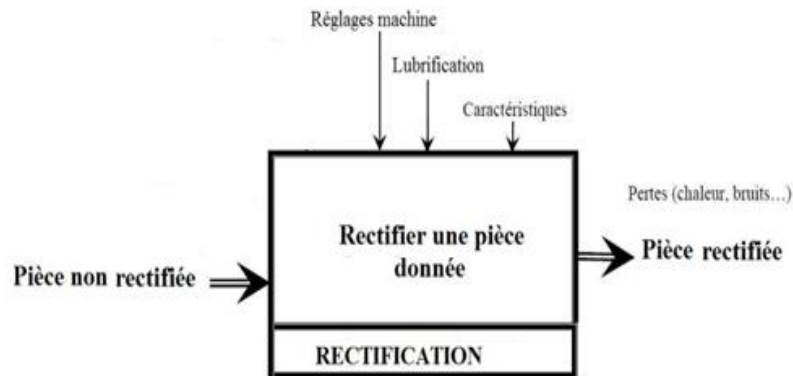
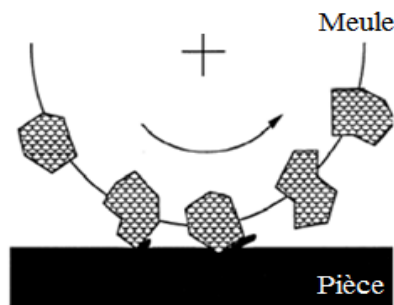


Fig.IV.1. Principe de rectification.

### IV.2. Mode d'action de la meule

Une meule est constituée de matière abrasive vient arracher à la pièce de minuscules fragments qui sont éjectés (contrairement à l'usinage par arrachement de copeaux) (voir figure ci-dessous) , les températures associées à ce procédé sont très élevées dans la zone de coupe, c'est pourquoi les copeaux ont l'apparence d'étincelles (fig.IV.2) . À la différence des autres procédés d'usinage où le nombre de lèvres de l'outil est bien défini et limité, dans

le cas de la rectification, l'outil présente à la pièce un nombre très élevé d'arrête de coupe, chaque arrête étant un grain d'abrasif sur la meule. De par son faible taux d'enlèvement de matière, le procédé de rectification est très lent mais produit des pièces d'une haute précision avec un excellent fini de surface. On utilise la rectification pour réaliser les usinages de précision des surfaces après trempe ou afin d'obtenir des IT (intervalles de tolérances) extrêmement serrés. Toutefois, on doit tenter de minimiser l'utilisation de ce procédé car sa faible productivité augmente de manière importante les coûts de production de la pièce associée.

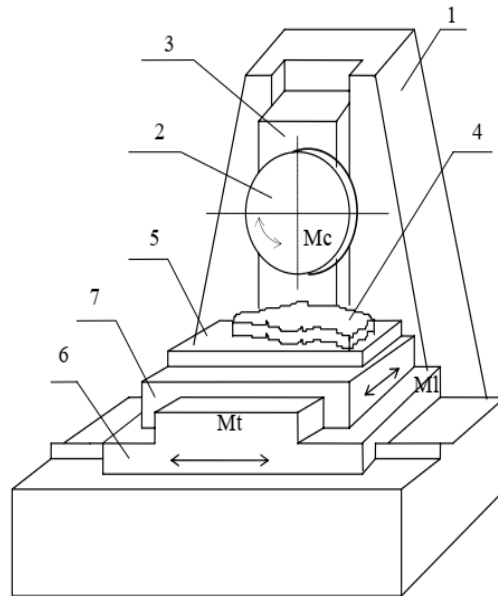


**Fig.IV.2.** Opération de la rectification plane.

Au cours de la rectification, l'outil de coupe appelé meule est animé d'un mouvement de rotation, la pièce se déplace en translation (rectification plane) ou tourne autour de son axe tout en se déplaçant en translation le long de son axe (rectification cylindrique). La rectification se fait sur des rectifieuses planes et cylindriques. Il a trois types de formes principales que l'on rectifie : surfaces planes, de révolutions intérieures et extérieures (voir ci-dessous).

#### **IV.2.1. Rectification plane**

Elle est constituée d'un bâti de fonte, d'une poupée porte-meule et d'une table horizontale mobile sur les glissières du bâti. La pièce est immobilisée sur la table au cours du travail grâce à l'attraction exercée par une plaque électromagnétique (fig.IV.3). Un moteur électrique entraîne en rotation la broche et la meule au moyen d'une transmission par courroie. L'avance est assurée par le déplacement transversal de la poupée porte-meule commandé par une vis.

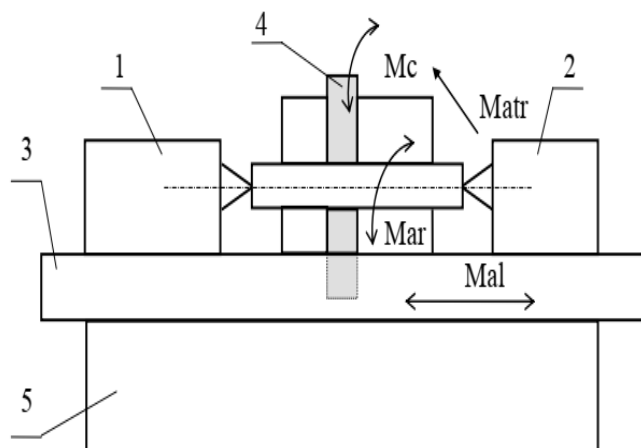


1. Bâti ;
2. Meule ;
3. Chariot porte meule ;
4. Pièce ;
5. Porte pièce ;
6. Table longitudinale ;
7. Chariot transversal.

**Fig.IV.3.** Schéma d'une rectifieuse plane.

#### IV.2.2. Rectifieuse cylindrique

La construction de la rectifieuse cylindrique est plus complexe (fig.IV.4). En plus d'une poupée porte-meule montée sur les glissières du bâti, et d'une table à commande hydraulique mobile en direction longitudinale, cette machine comprend une poupée fixe et une poupée mobile fixée sur la table. La pièce montée entre les centres de ces poupées est entraînée en rotation à une vitesse atteignant 3000 Tr/min. La poupée porte-meule est déplacée en sens transversal au moyen d'un mécanisme d'avance transversale.

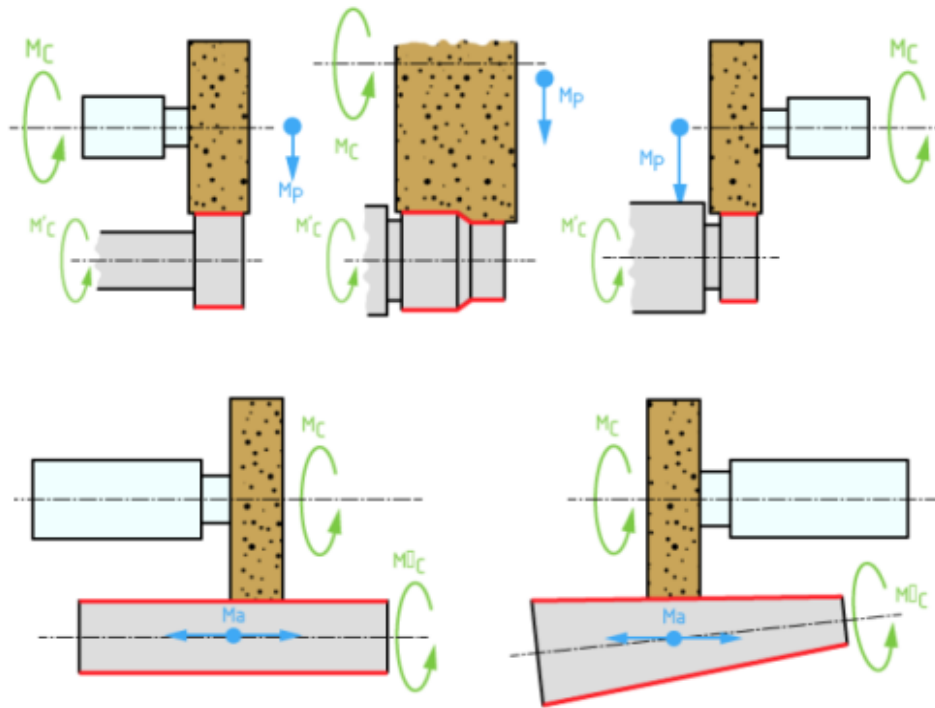


1. Poupée fixe ;
2. Poupée mobile ;
3. Table coulissante ;
4. Meule ;
5. Bâti.

**Fig.IV.4.** Schéma d'une rectifieuse cylindrique

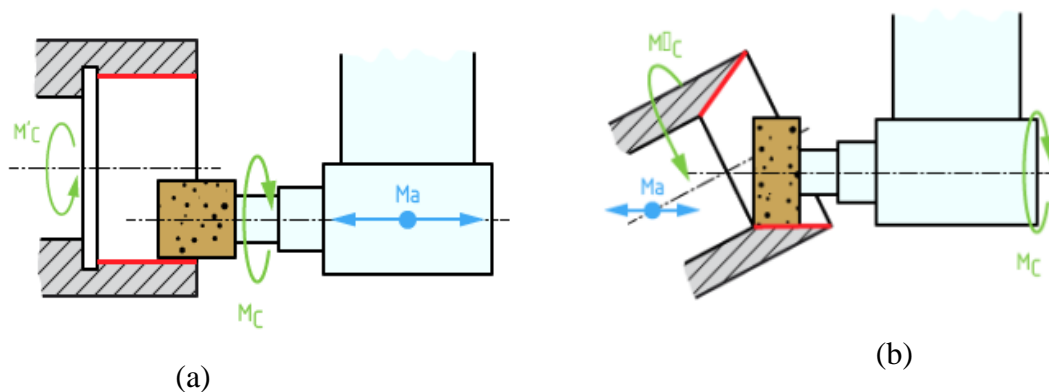
Il existe différents types de rectification cylindrique :

(d) **Rectification externe cylindrique** : permet de rectifier les parties extérieures d'une pièce cylindrique (fig.IV.5).



**Fig.IV.5.** Opérations de rectification extérieure.

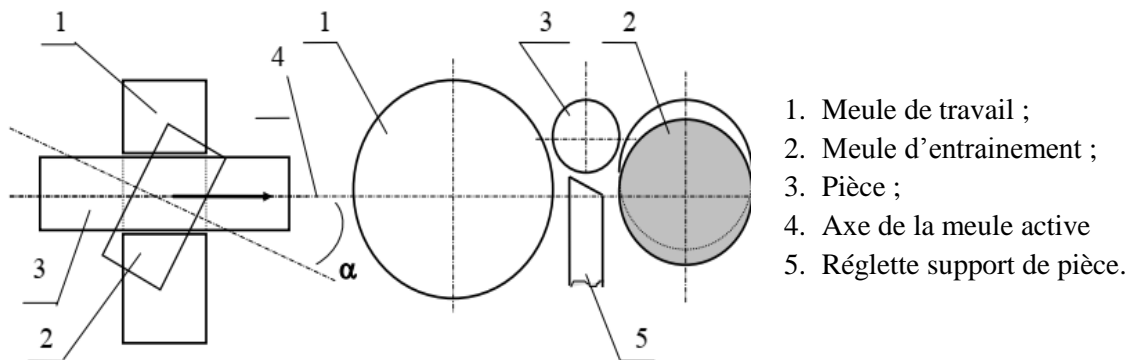
(e) **Rectification intérieur cylindrique** : permet de rectifier les parties intérieures d'une pièce cylindrique. La meule tourne à l'intérieur de l'alésage à rectifier fixe. On procède de même avec un cône intérieur à la différence que la pièce est inclinée de l'angle de la conicité divisé par deux sur le porte-pièce (fig.IV.6).



**Fig.IV.6.** Rectification Intérieure, a) cylindrique, b) conique.

**(f) Rectifieuse sans centres**

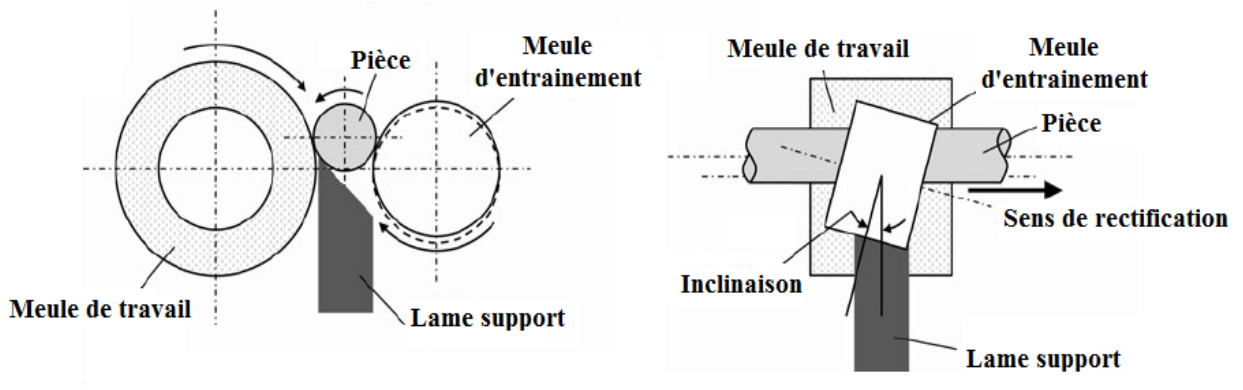
C'est une variante de la rectifieuse cylindrique. Elle porte deux meules animées de rotation dans un même sens, mais une meule constitue l'outil de travail, tandis que l'autre assure l'entraînement (fig.IV.7). La pièce à rectifier est fixée entre la lame et la roue régulatrice. La rotation de la roue régulatrice provoque la rotation de la pièce usinée. Une rotation contraire est imposée à la meule pour réaliser l'opération de rectification



**Fig.IV.7.** Schéma d'une rectifieuse sans centre.

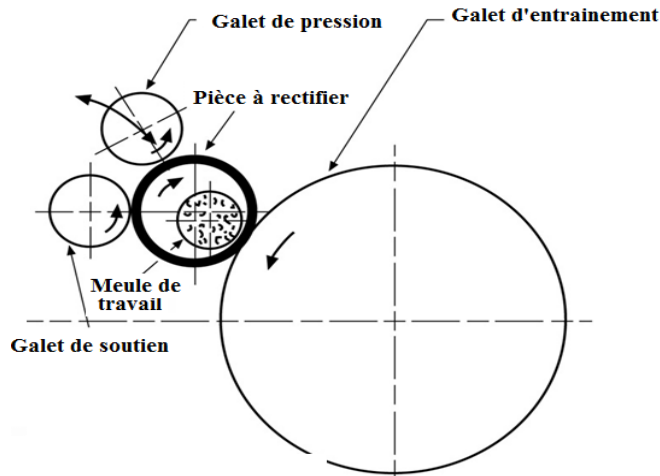
Il y'a deux types de rectification sans centre :

❑ **Rectification sans centre extérieure (fig.IV.8)**



**Fig.IV.8.** Rectification sans centres extérieure.

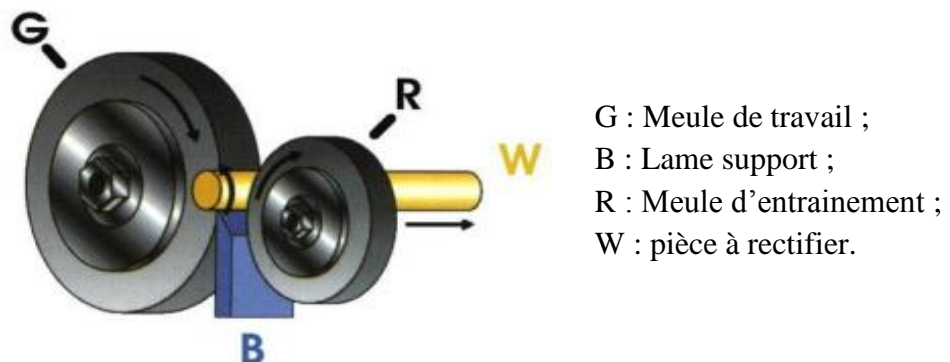
❑ Rectification sans centres intérieure (fig.IV.9)



**Fig.IV.9.** Rectification sans centres intérieure.

Le principe de fonctionnement est le suivant (fig.IV.10) :

- La pièce à rectifier se trouve entre deux meules, prenant appui sur lame support ;
- La pièce entraînée en rotation se voit imprimer un déplacement axial entre les meules, qui est en l'occurrence le mouvement d'avance.
- Le mouvement d'avance est communiqué principalement par la meule d'entraînement, tandis que la meule de travail coupe le métal. Ce mouvement est réalisé en faisant tourner l'axe de la meule d'entraînement dans un plan vertical d'un angle :  $\alpha = 1,5$  à  $6^\circ$  pour la rectification ébauche, et d'un angle :  $\alpha = 0,5$  à  $1,5^\circ$  pour la finition.



G : Meule de travail ;  
 B : Lame support ;  
 R : Meule d'entraînement ;  
 W : pièce à rectifier.

**Fig.IV.10.** Principe rectifieuse sans centres.

Ces trois exemples simples ne sont qu'un bref aperçu des multiples situations de rectification possible.

### IV.3. Caractéristiques de constitution

#### • Abrasifs artificiels

On distingue :

- les abrasifs alumineux (symbole A) tiré de la bauxite et dénommés Alundum, Corindon...
- les abrasifs siliceux (symbole C) constitués par du carbure de silicium et appelés Crystolon, Carborundum...
- l'abrasif diamant en poudre (symbole D) utilisé pour la finition de l'affûtage des outils en carbures métalliques.

#### • Grosseur de grain.

L'échelle des grosseurs de grain est représentée par des nombres allant de 6 à 600. Le numéro indique le nombre de mailles par pouce linéaire (25,4 mm), qui constitue le tamis au travers duquel les grains ont passé.

#### • Grade

Symbolisé par une lettre allant de **D à Z**, caractérise la dureté d'une meule. En général, on utilise des meules dites tendres pour travailler des métaux durs et inversement.

#### • Structure.

Indice de l'espacement des grains d'abrasifs. Elle est caractérisée par un chiffre variant de **1 à 12**.

#### • Agglomérant ou Liants.

Matière qui lie les grains d'abrasif entre eux, une lettre normalisée désigne la nature de l'agglomérant :

V : désigne l'agglomérant vitrifié (argile).

À base d'argile, vitrifiées à haute température.

Durée de vie illimitée (verre).

Vitesse de travail : 35 m/s maxi.

B : désigne l'agglomérant Rétinoïde (résine synthétique).

Appelé aussi "bakélite" ou "organique" à base de résine polymérisées à basse température.

S : désigne l'agglomérant Silicate (silicate de soude).

R : désigne l'agglomérant Rubber (caoutchouc).

Utilisée pour les meules d'entraînement ou contrôle centerless : R51.

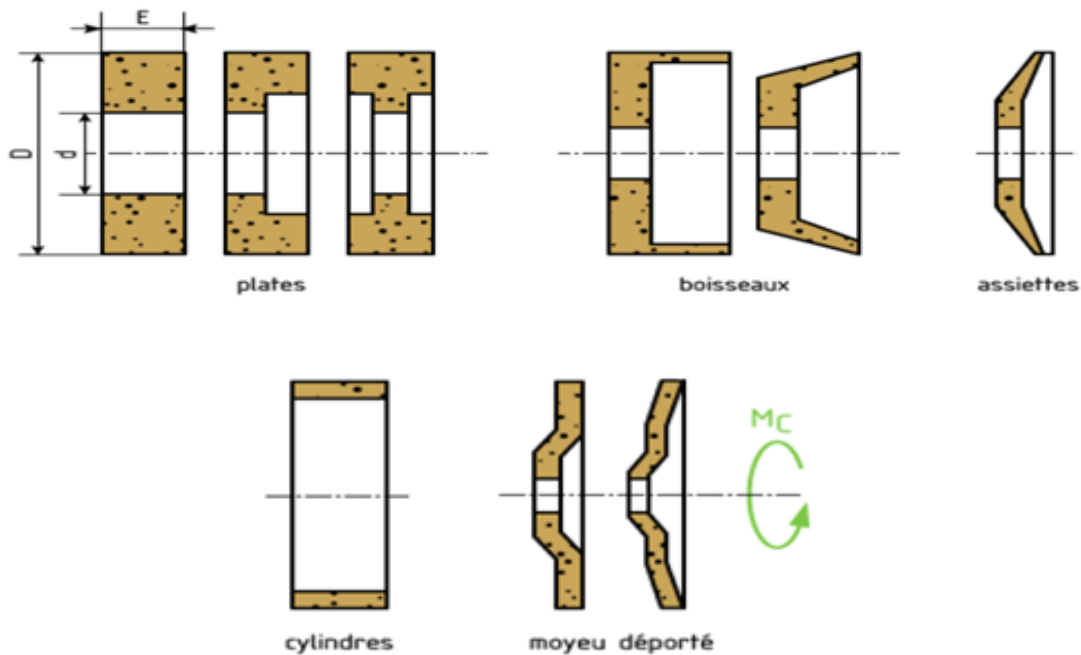
E : désigne l'agglomérant Shellac (gomme de laque).

M : désigne l'agglomérant métallique (utilisé pour la fabrication des meules diamant).

Les meules vitrifiées sont les plus employées, leur vitesse périphérique limite doit être comprise entre 25 et 33 m/s. Les meules résinoïdes sont employées pour les travaux d'ébarbage à grande vitesse 45 à 60 m/s et pour le tronçonnage.

#### IV.4. Domaine d'application

- Les matériaux que l'on peut rectifier sont très divers et peuvent être **très dur**. Ainsi on peut rectifier : les aciers classiques non trempés, les aciers trempés jusqu'à 70 HRC, les aciers chromés durs, les alliages cuivreux, les céramiques, carbures, certains plastiques et certains alliages d'aluminium (quoique que c'est déconseillé car l'aluminium a tendance à « salir » la meule et la rend moins efficace) ;
- Le procédé s'applique à la production en petite, moyenne, grande et très grande série. Cela implique des machines employées différentes selon les dimensions et qualités des surfaces à rectifier ;
- Les poids et les dimensions limites des pièces dépendent des machines et du type de rectification envisagé. On peut rectifier des arbres d'une dizaine de millimètres jusqu'à plus d'un mètre de diamètre sur une longueur de plusieurs mètres ou des surfaces planes de quelques mètres carrés ;
- Les vitesses de coupes varient de 20 à 60 m/s environ. Les vitesses d'avances moyennes varient entre 0.5 m/min à 1.5 m/min. Les profondeurs de passe ou pénétration par course longitudinal varient entre 0.001 à 0.1 mm ;
- La durée de la rectification d'une surface donnée est bien plus longue que son usinage initial, environ de 10 à 20 fois plus long ;
- Les formes des meules sont fixées selon la norme NFE75-201. Leurs dimensions sont fixées par la norme NF E 75 - 202-5 (fig.IV.11).



**Fig.IV.11.** Différentes formes des meules.

Elles peuvent être composées de : diamant - carbure de silicium – corindon - nitrure de bore cubique. Les meules sont également caractérisées par leur grosseur de grain (gros à très fin) et l'agglomérant liant les cristaux. Tout cela permet d'avoir une gamme de meule adaptée à chaque situation.

#### IV.5. Influence du procédé sur les propriétés de la pièce produite

- Les pièces obtenues par ce procédé présentent un état de surface très soigné convenant à des applications de précision et des contraintes spécifiques pointues. Ainsi on obtient un  $R_a$  inférieur à 0.1 jusqu'à 0.025.
- Les surfaces rectifiées sont très dur.
- Les tolérances sont de l'ordre du micromètre.
- Les qualités obtenues sont inférieurs à 6.

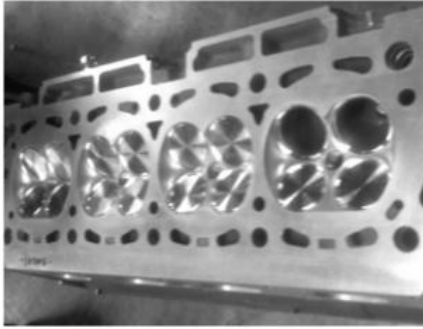
#### IV.6. Influence du procédé sur la conception de la pièce

Les pièces que l'on doit rectifier doivent présenter une légère surépaisseur par rapport à la cote souhaitée que l'on doit prévoir dans la phase d'usinage précédant la rectification. Cette surépaisseur est fonction des dimensions de la pièce, du type de surface rectifiée, du matériau,

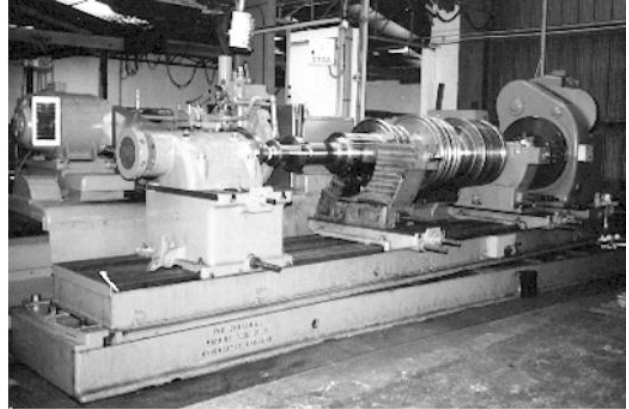
des propriétés de la meule et de la qualité finale voulue. Les surépaisseurs varient entre moins de 0.1 mm et plus de 0.8 mm.

### Quelques exemples de pièces rectifiées

---



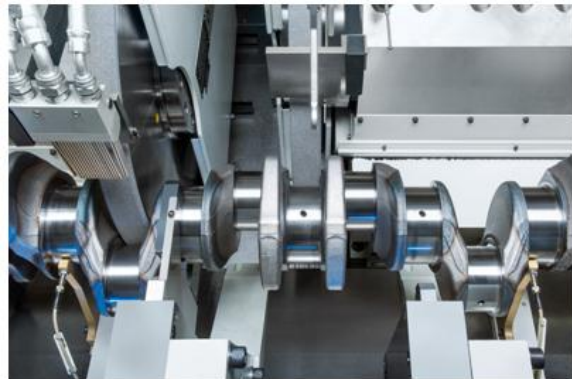
**Culasse moteur avec sièges de soupape rectifiés**



**Arbre sur rectifieuse**



**Rectification d'une surface plane**



**Rectification d'un vilebrequin**

## V. Soudage

### V.1. Généralités

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité de nature entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler.

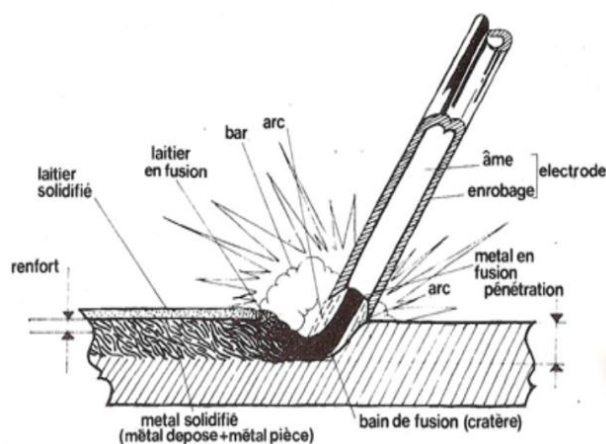
En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures :

- Soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature,
- Soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- Soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes.

### V.2. Définition de soudage

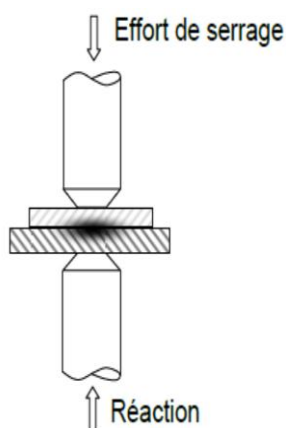
La soudure est un assemblage permanent de 2 pièces métallique, caractérisé par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler. la soudure peuvent s'effectuer :

- Sans pression extérieure, les bords étant portés à la température de fusion, et nécessitant Le plus souvent l'introduction dans le joint d'un complément de métal (métal d'apport) déposé en une ou plusieurs pièces (fig.V.1).



**Fig.V.1.** Soudage sans pression.

- Avec pression extérieure une température qui peut atteindre également la fusion (fig.V.2) .



**Fig.V.2.** Soudage avec pression.

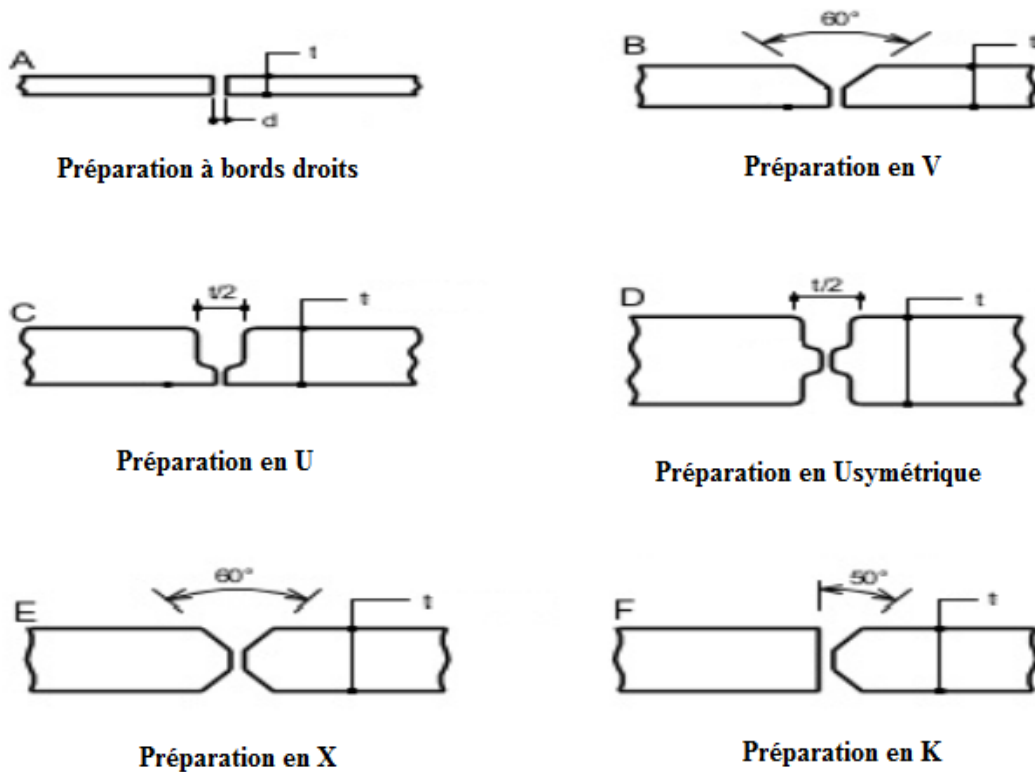
Le métal de base forme les parties à assembler de même nature ou de nature différentes. Le métal d'apport, identique ou différent du métal de base, peut intervenir dans l'élaboration du joint. Le métal du joint comprenant le métal déposé et les fondus qui sont dilués ; certains éléments peuvent diffuser dans les parties. Une zone plus ou moins étendue et adjacente de plus au-delà du joint peut être thermiquement affectée et subir des modifications de structure.

### **V.3. Type des assemblages soudés**

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permet de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration. Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis.

#### **V. 3.1 Assemblage bout-à-bout**

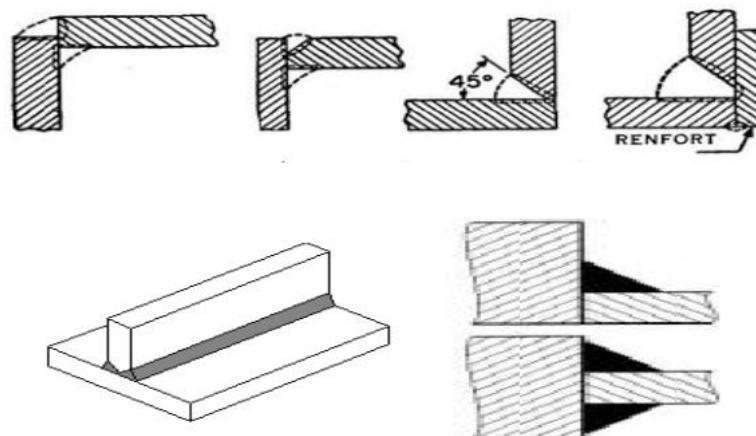
La soudure bout-à-bout (fig.V.3) est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égales à 5 mm.



**Fig.V.3.** Préparation des bords en assemblage bout-à-bout.

### V.3.2 Assemblage en coin ou en angles

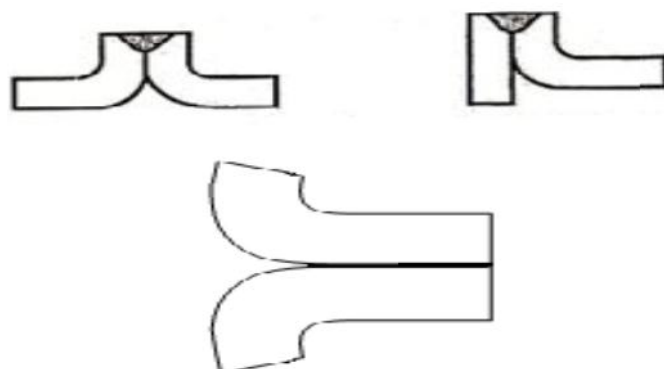
Comme son nom l'indique, il est utilisé pour connecter deux pièces ensemble à un certain angle et le jeu entre eux doit être approprié pour éviter l'effondrement du bain de fusion. Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de 90° faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en T (fig.V.4).



**Fig.V.4.** Assemblages en angles.

### V. 3.3 Assemblage à bords relevés

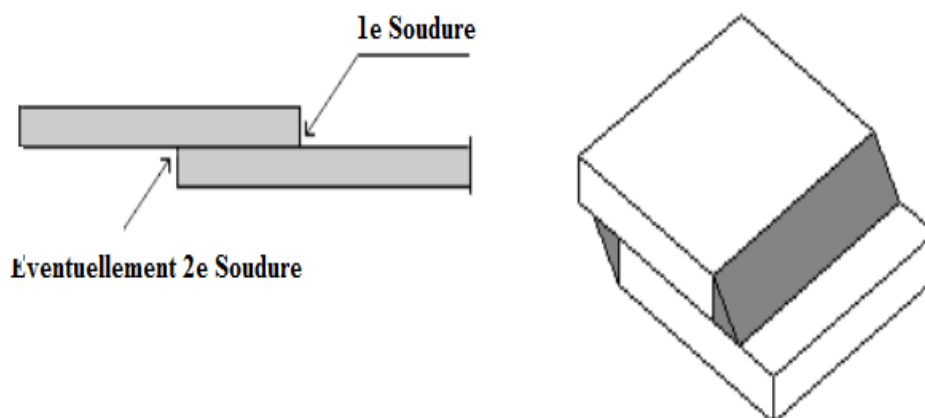
Un type soudure à rainure, est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces de tôlerie qui ont des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être faite pour réunir deux pièces adjacentes (fig.V.5).



**Fig.V.5:** Assemblage à bords relevés.

### V.3.4 Assemblage par recouvrement

Il se forme lorsque deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur une certaine distance le long du bord (fig.V.6). Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.



**Fig.V.6.** Assemblage à recouvrement.

## V.4. Défauts de soudage

### V.4.1. Fissure

#### (d) Fissures transversales

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure. Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (fig.V.7).



**Fig.V.7.** Fissure sur un cordon de soudure.

#### (e) Fissures de Racine

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (fig.V.8). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

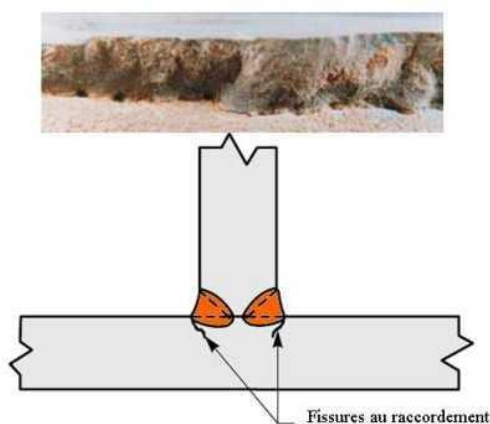


**Fig.V.8.** Fissure de Racine.

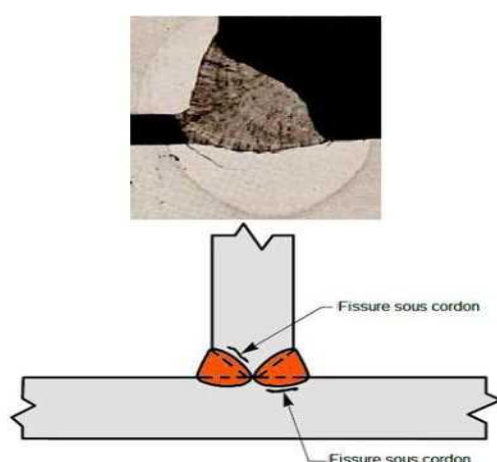
#### (f) Fissures au raccordement

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée

thermiquement (fig.V.9 et 10). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage.



**Fig.V.9.** Fissure au raccordement.

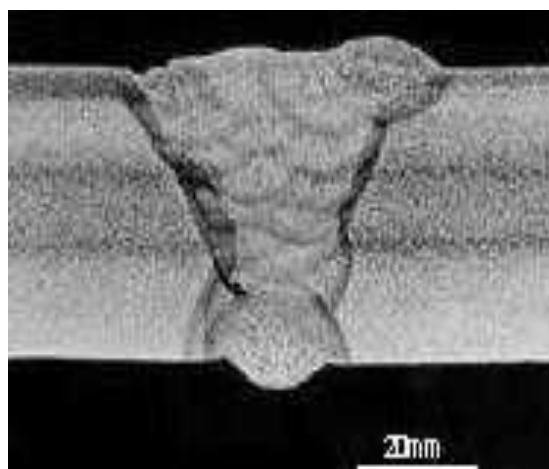


**Fig.V.10.** Fissures Sous –Cordon.

#### IV.4.2. Causes possibles

- (a) Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente. Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.

- (b) Les joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques.
- (c) **Transformations allotropiques** : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles ;
- (d) **Manque de fusion dans le flanc de la soudure** : Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (figure V.11).



**Fig.V.11.** Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

- (e) **Défauts d'alignement**



**Fig.V.12.** Défauts d'alignements.

## V.5. Solutions et mesures préventives

### V.5.1. Réglage des paramètres du soudage

#### V.5.1.1 Électrode enrobée

- Mesurer l'épaisseur des pièces à souder ;
- Choisir un diamètre d'électrode inférieur ou égal à cette épaisseur ;
- Régler l'intensité en fonction du diamètre de l'électrode en consultant la notice d'emploi sur le paquet qui vous donne la plage de réglage. On peut utiliser la formule suivante :  $I = (\text{Diamètre} - 1) * 5$

### V.5.2. Calcul de la température de préchauffage

#### • Méthode Seferien

Cette méthode est également basée sur le « pouvoir trempant », elle consiste, pour un acier donné, à déterminer la température de préchauffage des pièces à souder, de manière à éviter un refroidissement trop rapide du joint qui conduirait à la formation d'une structure fragile (martensite) dans la Z.A.C. Le calcul de cette température de préchauffage s'effectue en trois étapes:

- (1) Calcul du carbone équivalent ( $C_{eq}$ )

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Cr}{18} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

- (2) Calcul du carbone équivalent compensé ( $C_{eq.C}$ )

Le carbone équivalent compensé ( $C_{eq.C}$ ) tient compte de l'épaisseur des pièces à assembler (influence de la vitesse de refroidissement) ainsi que du carbone équivalent ( $C_{eq}$ ). Il est défini par la formule :

$$C_{eq.C} = C_{eq} \times (1 + 0,005 e)$$

Avec :

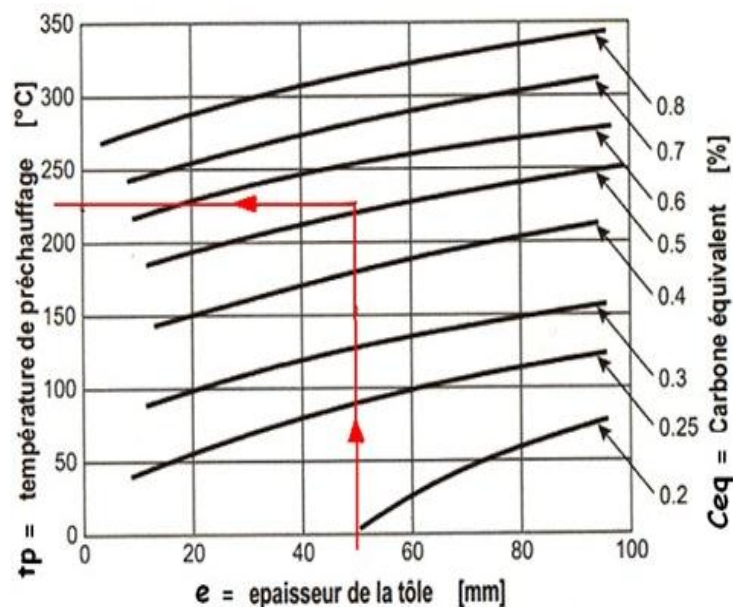
e : épaisseur moyenne des tôles en mm.

- (3) Calcul de la température de préchauffage des pièces à souder ( $T_p$ ).

Elle est calculée en fonction du  $C_{eq.C}$  par l'expression suivante :

$$T_p = 350 \sqrt{(C_{eq.C} - 0.25)}$$

Le diagramme suivant détermine  $T_p$ , directement à partir de  $C_{eq}$  et de e.



## V. 6. Techniques de soudage

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenue par diffusion, déformation, ...

Les techniques de soudage sont nombreuses et peuvent être classées suivant la façon de transférer l'énergie.

1. Soudage Oxyacétylénique ;
2. Soudage à l'arc électrique :
  - Soudage avec électrode enrobée ;
  - Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible (MAG) ;
  - Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible (MIG) ;
  - Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG) ;
3. Soudage par résistance électrique par point.

### V.6.1. Soudage Oxyacétylénique, ou Soudage au Chalumeau

Le soudage Oxyacétylénique est un procédé de soudure à la flamme. Le soudage est réalisé à partir de la chaleur d'une flamme née de la combustion d'un gaz combustible l'acétylène  $C_2H_2$ , avec un gaz comburant d'oxygène  $O_2$ . La température de la flamme peut atteindre les 3200 ° Celsius, lorsque le mélange  $C_2H_2$  et  $O_2$  est correctement équilibré dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de  $\varnothing 0,8$  mm à  $\varnothing 4,0$  mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. On peut souder « en bord à bord ». L'énergie calorifique

de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

### V.6.1.1. Principes du procédé et mise en œuvre

Le chalumeau de soudage est relié par des tuyaux (boyaux) de gaz à la bouteille de gaz combustible d'acétylène (pression de service 0,25 bar) et à la bouteille de gaz comburant d'oxygène (pression de service 3,5 bar). Un manodétendeur placé sur chaque bouteille avec un dispositif de sécurité d'anti-retour régule la pression et l'arrivée des gaz.

Ci-dessous, exemple d'installation de soudage OA.

### V.6.1.2. Description du poste de soudage OA (fig.V.13)

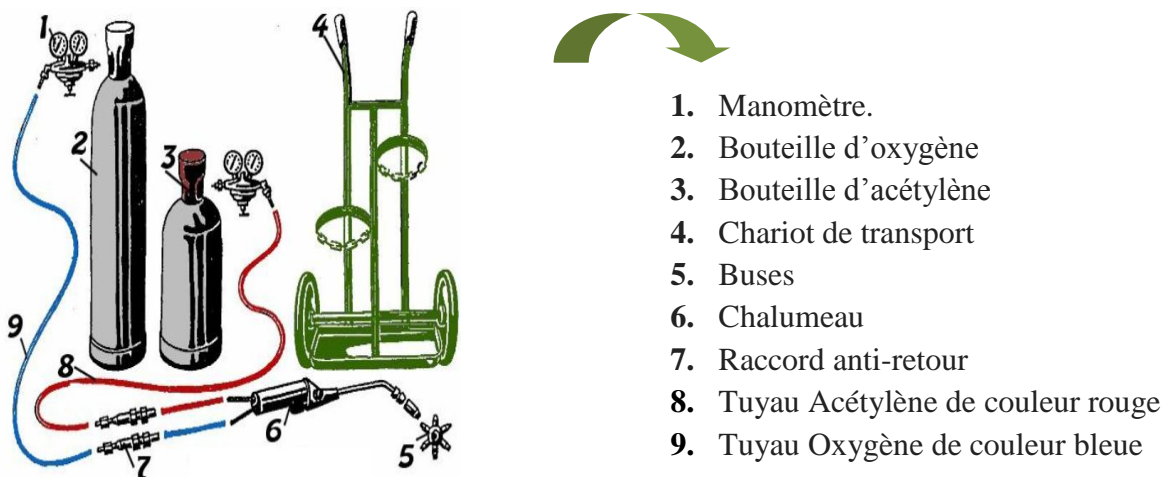
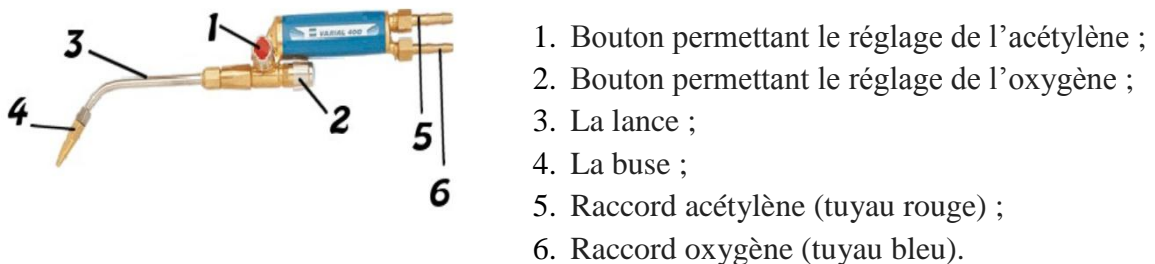


Fig.V.13. Description du poste de soudage OA.

### V.6.1.3. Chalumeau



### V.6.1.4. Flammes

Les flammes utilisées dans le domaine du soudage, proviennent d'un mélange de gaz combustible (acétylène, hydrogène, propane, etc.) et d'oxygène, gaz activant la combustion.

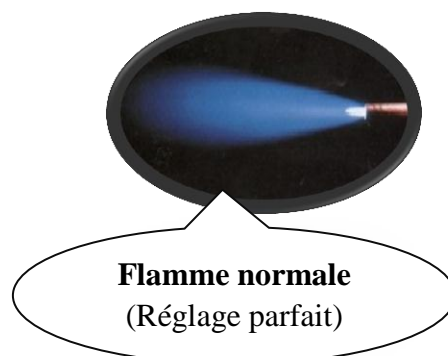
La flamme aérogaz, à rendement thermique insuffisant ne reste guère employée que pour les opérations de préchauffage ou de brasage tendre.

### V.6.1.5. Réglage des flammes

La flamme oxyacétylénique est obtenue par le mélange d'oxygène et d'acétylène dans des proportions qui déterminent sa nature (flamme normale, oxydante ou carburante). Le réglage à obtenir est défini dans le mode d'emploi de l'alliage (voir ci-après). Il faudra d'autre part choisir une buse correspondant à l'épaisseur de la pièce.

#### (d) Flamme normale, réductrice

Alimentation du brûleur en volumes égaux d'oxygène et d'acétylène. La flamme normale est, en effet, fortement réductrice ce qui lui permet de protéger le métal du bain de fusion contre l'oxygène de l'air ambiant (détruisant les oxydes métalliques pouvant se former au cours du soudage).



#### (e) Flamme oxydante

La flamme oxydante qui correspond à un excès d'oxygène par rapport à la flamme normale. Le dard est court et le panache bleuté. Ce réglage est à éviter pour le soudage de l'acier mais s'emploie couramment pour souder le laiton et le soudo-brasage des aciers galvanisés.



#### (f) Flamme carburante

La flamme carburante comportant un excès d'acétylène. Si cet excès est léger, le dard s'entoure d'un halo blanc. La flamme moins chaude que la flamme normale. Si l'excès d'acétylène s'accroît, le dard est masqué par un voile blanc et la température s'abaisse. Cette flamme est très carburante. Elle est utilisée pour le soudage de :

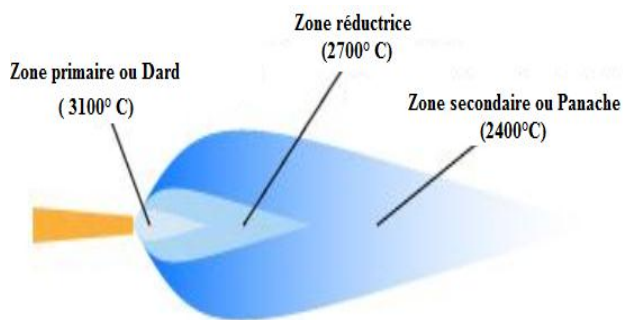


- L'Aluminium et de ses alliages ;
- Les revêtements avec des alliages à base de cobalt.

### V.6.1.6. Température de flamme chalumeau

La flamme est composée de 3 zones (fig.V.14) :

- (a) Le dard ;
- (b) La zone réductrice ;
- (c) Le panache.



**Fig.V.14.** Températures de combustion dans les différentes zones de la flamme.

### V.6.1.7. Prévention des risques professionnels en soudage au chalumeau

- Eviter de coucher la bouteille d'acétylène, pour éviter l'écoulement de l'acétone ;
- Ne pas exposer la bouteille à la chaleur ou au soleil ;
- Ne pas mettre de graisse sur les raccords, risque d'explosion ou inflammation ;
- Travailler avec des lunettes de soudage ;
- Ne pas porter de vêtements en nylon ; risque de brûlures ;
- Saisir les pièces soudées avec des pinces ;
- Ne pas diriger la flamme vers des matières inflammables ;
- L'émission de radiations et de projectiles en fusion imposent le port d'un moyen de protection : le tablier, les gants en cuir.

### V.6.2. Soudage à l'arc électrique

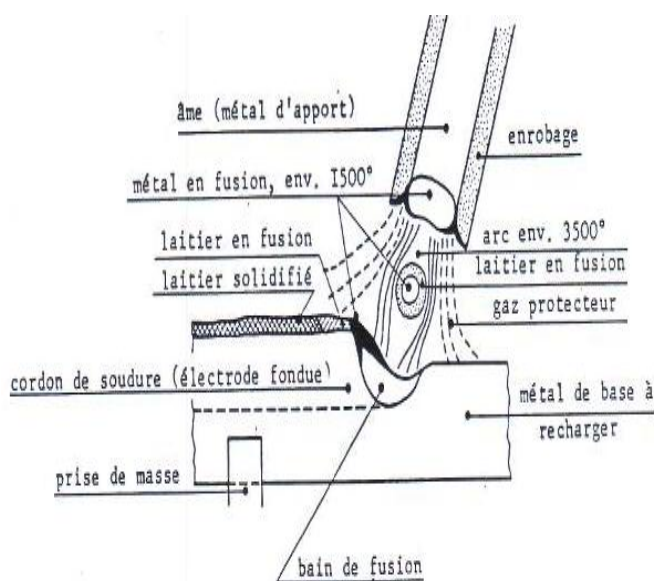
La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm. La formation du bain de métal fondu est assuré par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternatif qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder, cette fusion assure la liaison après le refroidissement des éléments entre eux. L'arc doit s'amorcer facilement et reste stable par le réglage de la tension d'amorçage suffisante et emploi de corps émissifs dans l'enrobage ainsi que la protection avec un milieu gazeux adapté qui favorisant le

soudage. Ce procédé regroupe les types de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Soudage avec électrode enrobées ;
- Soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG ;
- Soudage avec électrode réfractaire TIG .

#### V.6.2.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobé

Le procédé utilise des baguettes, constituées d'une âme métallique et un enrobage, comme métal d'apport. Il consiste à mettre en fusion le métal des pièces à souder et les assembler grâce à cet apport. Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur reliant, le poste de soudage (fig.V.15) qui est un générateur de courant électrique alternatif ou continu, à l'électrode. Au contact de l'électrode avec la pièces à souder, il se forme un arc électrique ( gaz ionisé dans lequel circule le courant électrique ) en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, qui est une sorte d'étincelle de très forte puissance dégageant à la fois une lumière et une chaleur intenses de l'ordre de 3200 – 3500°C, ce qui permet d'obtenir la fusion du métal de base et du métal d'apport en créant le bain de fusion. L'enrobage de l'électrode permet de protéger ce bain de fusion des impuretés de l'air durant le soudage et de sa solidification. Après refroidissement, le laitier doit être enlevé du cordon de métal déposé et il faudra brosser ou meuler celui-ci avant le passage de la prochaine électrode.



**Fig.V.15.** Schéma du mécanisme de soudage avec électrode enrobée.

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide ou en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

#### V.6.2.1.1. Composition du matériel

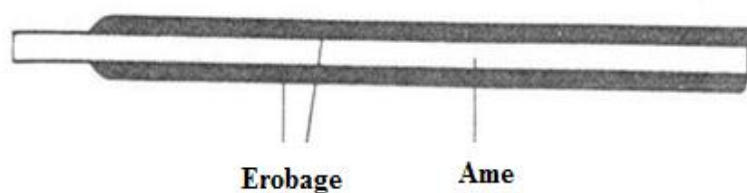
##### • Poste de soudage

Ensemble des appareils électriques susceptibles de permettre l'amorçage et le maintien d'un arc stable avec un débit d courant satisfaisant. Les postes statiques de soudage sont généralement constitués par un transformateur ou par un transformateur et un redresseur de courant. Les postes rotatifs sont des groupes composés d'un moteur et d'une génératrice. Ils débitent généralement du courant continu et comportent des dispositifs appropriés d'auto-régulation.

##### • Electrode enrobée

Une électrode enrobée est constituée par :

- une âme métallique de forme cylindrique ;
- un revêtement ou enrobage de composition chimique très variée.
- Les diamètres des électrodes enrobées sont mesurés sur l'âme nue.
- La longueur de l'électrode est la longueur totale comprenant : la longueur de la partie enrobée et la longueur de la partie dénudée, destinée à être pincée dans le porte-électrode (fig.V.16).



**Fig.V.16.** Coupe d'une électrode enrobée.

#### V.6.2.1.2. Rôle de l'enrobage

L'enrobage remplit un grand nombre de fonctions qui peuvent se résumer (Fig.3) :

- Rôle électrique : l'enrobage facilite la stabilité de l'arc. L'ionisation qui se produit entre l'électrode et la pièce permet l'amorçage et le maintien de l'arc.
- Rôle métallurgique : l'enrobage forme, par sa fusion, un écran qui évite l'action néfaste des gaz de l'air (oxygène et azote). En outre, l'enrobage incorpore au métal

fondus des éléments qui viennent remplacer ceux qui ont été volatilisés ou brûlés du fait de la haute température.

- Rôle physique : l'enrobage guide l'arc et lui assure une direction bien déterminée et constante. On note d'ailleurs la formation, à l'extrémité de l'électrode, d'un cratère (l'enrobage fondant moins vite que l'âme métallique) qui guide l'arc. En outre, les corps contenus dans l'enrobage peuvent modifier la forme du dépôt. Ainsi une électrode déterminée pourra fournir des cordons de soudure ayant la forme désirée : bombés, plats ou concaves. D'autre part, dans le soudage en position, le laitier soutient par action physique, le métal en fusion. Il retarde ainsi le refroidissement du dépôt.

#### **V.6.2.1.3. Choix de l'électrode**

Il est fonction de la nature du métal à souder et des caractéristiques de la soudure. (Electrodes rutiles pour travaux courants).

#### **V.6.2.1.4. Amorçage et entretien de l'arc**

Pour amorcer l'arc, il suffit de gratter la tôle avec l'électrode en passant assez rapidement pour éviter de coller. Le collage est favorisé lorsque les électrodes sont humides ou que l'intensité est trop faible. La stabilité de l'arc dépend de la longueur de l'arc, que l'on doit maintenir le plus court possible, et des caractéristiques du milieu et du courant.

#### **V.6.2.1.5. Réglage de l'intensité**

Le réglage de l'intensité dépend de l'épaisseur des pièces à souder, du diamètre de l'électrode, de la position de soudage, du type d'assemblage,... Il existe des abaques pour choisir l'intensité optimale en fonction de certains de ces paramètres. En général, pour un soudage à plat, on peut se baser sur :

$$I = 50 * (\text{Diamètre d'électrode} - 1)$$

On aura alors 110 A pour un diamètre de 3,2 mm et 75 A pour du 2,5 mm. Une intensité trop faible provoquera un amorçage difficile, un manque de pénétration et une inclusion de laitier. Une intensité trop élevée facilite l'amorçage mais la fusion de l'électrode est plus rapide, les projections abondantes, le cordon s'effondre et l'enrobage se dégrade.

**V.6.2.1.6. Préparation**

Avant de commencer la soudure il est préférable de dégraisser la surface, voire de la meuler jusqu'à ce que le métal soit apparent (dans le cas d'une surface peinte par exemple). Pour des soudures sur une forte épaisseur il est recommandé de chanfreiner les pièces à assembler : en V entre 4 et 15 mm d'épaisseur, et en X au-delà. Lorsque le métal se refroidit après une soudure, il se rétracte, ce qui peut alors déformer l'assemblage voulu. Pour pallier à ce problème on pointe d'abord l'assemblage avant de faire les cordons en entier. C'est-à-dire que l'on va faire des points de soudure à différents endroits et le plus rapidement possible afin que les points précédents n'aient pas le temps de refroidir et se rétracter. Une fois le pointage terminé on contrôle l'assemblage (distance, perpendicularité,...). Si la vérification est satisfaisante on peut passer aux cordons, sinon on fait sauter les points (à la meuleuse) et on recommence.

**V.6.2.1.7. Position de l'électrode**

La manipulation de l'électrode se définit par :

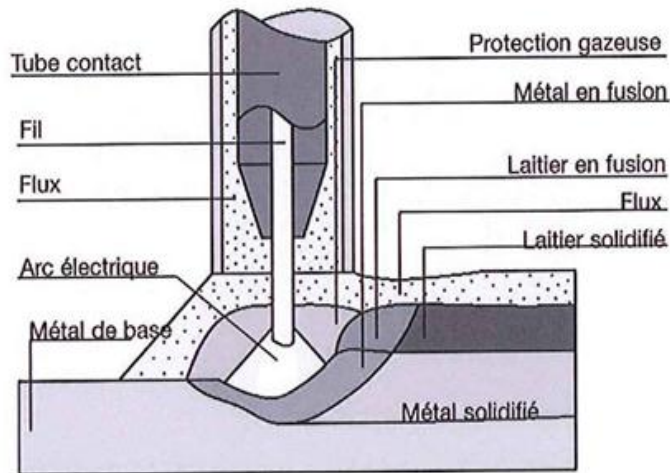
- Les angles d'inclinaison de l'électrode
- La vitesse d'avancement dans le sens du cordon ;
- Le mouvement oscillant autour du cordon.

**V.6.2.1.8. Sécurité**

- Une prise de terre est obligatoire pour tout poste de soudure à l'arc. L'émission de radiations et de projection en fusion imposent le port d'un moyen de protection ; le masque, le tablier, les gants en cuir ;
- Lors de piquage du laitier se protège le visage et les mains ;
- S'isoler l'humidité ;
- Ne pas porter des vêtements en nylon, risque de brûlures ;
- Saisir des pièces soudées avec des pinces ;
- Mettre l'aspiration en fonctionnement afin d'éviter les vapeurs qui se dégagent lors du soudage ;
- Ne pas toucher l'électrode avec les doigts ;
- Ne pas laisser la baguette coller à la pièce, risque de court circuit.

### V.6.2.2. Soudage à l'arc sous protection gazeuse (avec électrode fusible)

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (fig.V.17). La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.



**Fig.V.17.** Soudage à l'arc sous protection gazeuse.

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de soudage à l'arc sous protection gazeuse en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

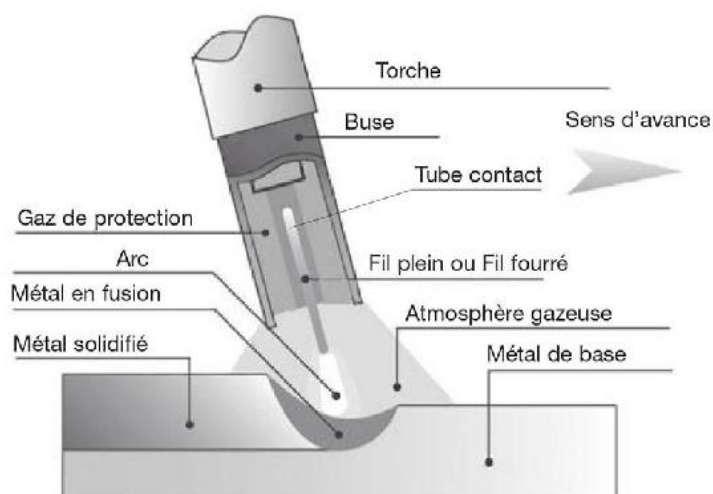
- (a) Procédé MIG (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium);
- (b) Procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif (par exemple le :  $\text{CO}_2$ ).

#### V.6.2.2.1. Soudage MIG

La soudure MIG sous protection de gaz inerte est un procédé de soudage très utilisé de nos jours. Pour ce procédé, on crée un arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport (de  $\varnothing$  0,6 à  $\varnothing$  2,4 mm). Lorsque l'arc est obtenu, on dévide ce fil d'apport à vitesse constante et continu dans le bain de fusion généré par la puissante énergie de cet arc. On

obtient un cordon de soudure par mélange du métal d'apport et du métal de base, en fusion pendant l'arc. L'arc électrique s'établit entre le métal de base et le fil fusible nu enroulé sur une bobine et constituant ainsi une électrode continue consommable et servant de métal d'apport (fig.V.18).

Le fil amené et maintenu par une torche pistolet est protégé pendant sa fusion par un gaz inerte diffusé par une buse, réfractaire concentrique au fil électrode. Le gaz de protection est composé de gaz inertes (Argon ou hélium) ou d'un mélange de ces gaz avec éventuellement une adjonction de CO<sub>2</sub>, d'hydrogène ou d'oxygène.



**Fig.V.18.** Soudage MIG.

#### V.6.2.2.2. Soudage MAG

Procédé de soudage identique au procédé MIG. La différence entre les deux procédés réside dans la nature du gaz de protection utilisé (CO<sub>2</sub> ou mélange Argon + O<sub>2</sub> ou Argon + CO<sub>2</sub> + Oxygène). Des éléments désoxydants, tels que le Mn et le Si contenus dans le fil électrode forment avec le gaz oxydant (CO<sub>2</sub>) au contact de l'arc électrique une réaction chimique protégeant ainsi le bain de fusion de l'oxygène et de l'azote de l'air.

#### (d) Fil-électrode

On choisit un fil – électrode de composition chimique similaire à celle du métal à souder, particulièrement pour les aciers alliés, les aciers inoxydables et les métaux non ferreux. Pour le soudage de l'acier, certains fils-électrodes contiennent plus de désoxydants et permettent de souder des aciers difficilement soudables autrement, incluant des pièces

recouvertes d'une certaine quantité de saleté ou de rouille. Les facteurs à considérer pour le choix du fil-électrode pour un acier sont :

**(e) l'état de la surface des pièces**

- Type d'acier (calmé ou effervescent);
- Gaz de protection utilisé;
- Degré de résilience requis.

**(f) Gaz de protection**

Selon la nature du métal à souder, on peut utiliser le procédé MIG avec un gaz inerte, soit généralement l'argon (Ar), l'hélium (He) ou un mélange des deux (Ar-He). Quant au procédé MAG, il emploie des gaz actifs, tels que le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) ou encore un mélange d'argon associé au gaz carbonique (Ar-CO<sub>2</sub>), à l'oxygène (Ar-O<sub>2</sub>) ou des mélanges faits de trois gaz tels que hélium-argon-gaz carbonique (He-Ar-CO<sub>2</sub>) ou argon-gaz carbonique-hydrogène (Ar-CO<sub>2</sub>-H). Le choix des gaz dépend du métal à souder

<b>Gaz</b>	<b>Application</b>
Argon (Ar)	La majorité des métaux non ferreux
Hélium (He)	Soudage de l'aluminium et du cuivre
CO <sub>2</sub>	Soudage des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés
Ar (75 %) et He (25 %) Ar (50 %) et He (50 %) Ar (25 %) et He (75 %)	Soudage de l'aluminium, du cuivre et de leurs alliages
Ar (98 %) et O <sub>2</sub> (2 %)	Soudage des aciers alliés et inoxydables
Ar (90 %) et CO <sub>2</sub> (10 %) Ar (85 %) et CO <sub>2</sub> (15 %) Ar (75 %) et CO <sub>2</sub> (25 %) Ar (98 %) et O <sub>2</sub> (2 %) Ar (95 %) et O <sub>2</sub> (5 %)	Soudage des aciers inoxydables

**III.3.3.1. Avantages et inconvénients**

- Ce procédé de soudage soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.
- Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de

changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

- Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.
- Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.

### **III.3.3.2. Applications**

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi.

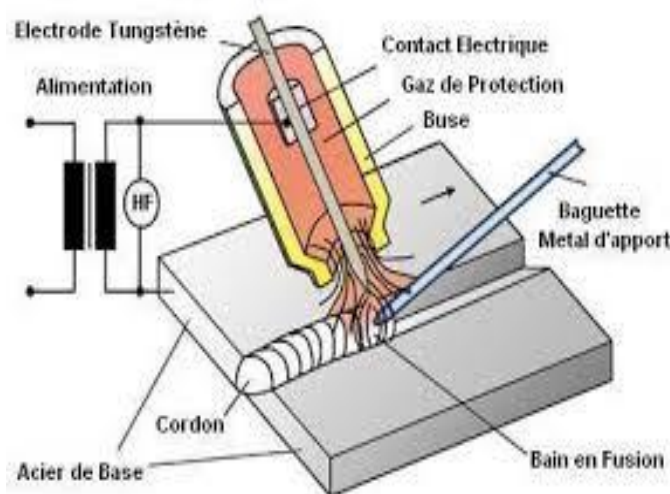
### **V.2.3. Soudage TIG**

La soudure au gaz inerte au tungstène (TIG) est l'ancien nom du procédé de soudage TIG mis au point à la fin des années 1930, lorsque la nécessité de souder du magnésium est devenue évidente. Le procédé maintenant connu sous le nom de soudage à l'arc sous gaz de tungstène GTAW et le nouveau nom sont devenus populaires dans les ouvrages techniques.

#### **V.2.3.1.Principe**

Dans ce procédé, on utilise comme source de chaleur un arc électrique jaillissant entre une électrode réfractaire en Tungstène et la pièce à souder. L'électrode, l'arc et la zone de soudage sont efficacement protégés contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air par un jet de gaz neutre par exemple : Hélium, Argon. En règle générale, les métaux ferreux et cuivreux doivent être soudés en courant continu, polarité négative à l'électrode de Tungstène (Fig.1-2) . Le courant alternatif est employé pour l'aluminium, le magnésium et leurs alliages, ainsi que pour le cupro-aluminium, où il est nécessaire de briser la couche d'oxyde susceptible de se former à la surface du bain de fusion. Dans le cas du soudage avec du courant alternatif, un courant à haute fréquence, permettra l'amorçage de l'électrode par simple rapprochement sans qu'un contact électrode-pièce soit nécessaire. Il aura pour effet également de stabiliser l'arc et

de pallier aux interruptions qui pourraient se -produire chaque fois que le courant alternatif de soudage passerait par zéro (Fig.1-2).



**Fig.V.19.** Soudage TIG.

La température de la flamme peut atteindre 25000 °C, elle permet ainsi de porter à fusion les métaux réfractaires, les oxydes et les mélanges d'oxydes. L'alliage projeté sur la pièce, atteint une température très élevée permettant la fusion superficielle du métal de base. Les gaz, le courant et l'eau de refroidissement sont contrôlés depuis le pupitre de commande, sur lequel les paramètres sont clairement indiqués, permettant ainsi à l'opérateur de juger la qualité du travail en cours. Les dépôts réalisés résistent bien à d'importantes usures occasionnées en frottement. Ils constituent également d'excellentes barrières thermiques et électriques et ont de bonnes propriétés anti-mouillage face à certains métaux liquides.

#### **V.2.3.2. Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG**

- La vitesse de soudage (avance du soudeur),
- Le choix et le débit du gaz,
- Le choix et le débit du métal d'apport,
- Le choix, l'affûtage et le diamètre de l'électrode réfractaire,
- La position de soudage,
- La préparation,
- La dimension et la nature des matériaux à souder.

### **V.2.3.3. Applications de la soudure TIG**

- La réalisation d'ouvrages alimentaires,
- La chaudronnerie d'acier inoxydable,
- L'industrie aéronautique et spatiale,
- La carrosserie,
- Plus généralement, les entreprises travaillant des matériaux à bases d'aciers inoxydables et d'alliages légers.

### **V.2.3.4. Avantages et inconvénients en soudage TIG:**

- large gamme d'épaisseurs à souder,
- simple d'emploi,
- travail précis et esthétique,
- peu de fumées,
- soudage dans toutes les positions,
- procédé automatisable.

### **V.2.3.5. Alimentation électrique**

En fonction des matériaux, des dimensions et des épaisseurs à souder, on pourra souder en courant continu à polarité directe, souder en courant pulsé, ou encore souder en courant alternatif : le courant continu à polarité directe (pôle négatif à l'électrode) s'exécute pour le soudage de tous les métaux, y compris de l'aluminium (avec certaines précautions à prendre) le courant pulsé, qui consiste à développer des périodes de hautes et de basses intensités, pour réduire le volume de métal fondu. Ceci facilite le travail en position et le soudage des faibles épaisseurs avec une meilleure régularité, surtout au niveau des pénétrations. le courant alternatif est principalement utilisé pour le soudage des alliages d'aluminium. L'alternance de polarité craque ainsi la couche d'alumine réfractaire pour permettre ensuite la pénétration.

### **V.2.3.6. Gaz utilisés**

- l'argon pur est le plus couramment utilisé en soudage TIG. (bon amorçage de l'arc)
- l'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du fait de la vitesse plus grande. Le coût du soudage est plus important cependant. (alliages légers, cuivre...)

- l'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc une vitesse de soudage améliorée. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect plus esthétique du cordon de soudure.
- l'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex. Utilisé aussi en protection envers.

### **V.3. Soudage par résistance électrique**

#### **V.3.1.Introduction**

Le soudage par résistance est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique (500 à 150.000Ampères) et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (sauf en Soudo – brasage). L'intensité électrique traverse la matière (durant 5ms à 3secondes suivant les épaisseurs et nuances matières) et chauffe la matière jusqu'à sa fusion. La pression maintient le contact et donc les résistances entre l'électrode et l'assemblage. Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistance électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. Ce procédé est majoritairement utilisé dans l'assemblage de tôle d'acier de faible épaisseur (6mm). Cette technique bénéficie d'un savoir-faire très important et d'une productivité incomparable (dans le domaine d'application). Pour exemple, un châssis automobile est assemblé à plus de 80% par des points soudés.

#### **V.3.2. Particularités du soudage par résistance**

Il s'agit d'une soudure **autogène**, dans laquelle les matériaux fondent sur eux mêmes sans apport extérieur. Le bain de fusion constituant le noyau de point est très localisé et protégé de l'oxydation par l'environnement du creuset, ne nécessitant donc pas de protection, par déploiement d'atmosphère gazeuse extérieure.

La dispersion thermique dans la masse des tôles assemblées est faible, comparée à d'autres procédés tels que l'arc ou la flamme, la température du bain fusion n'excède que peu et durant des temps très courts le point de fusion du matériau. Il induit donc un minimum de tensions résiduelles et de déformations de pièces, d'autant que les électrodes maintiennent l'accostage des pièces durant la dilatation, la fusion et la solidification.

Pour la plupart des matériaux usuels le soudage par points n'entraîne que peu de modification structurale (faible grossissement du grain). Ce mode de soudage peut sauvegarder l'esthétique du produit fini : mobilier métallique, matériel ferroviaire ou aéronautique.

C'est un procédé fiable et robuste. Le point de soudure, réalisé dans les meilleures conditions, confère à l'assemblage obtenu une résistance considérable à la sollicitation

mécanique, qu'il s'agisse de flexions alternées de mises en contraintes permanentes ou de vibrations même à forte fréquence. Les points de soudure ne sont pas ou peu altérables au vieillissement (au niveau du noyau).

Le procédé de soudage par résistance peu s'appliquer avec peu de préparation voire même sans aucune préparation (armatures de béton). Son prix de revient est attractif. Les machines à souder sont relativement onéreuses mais s'amortissant à long terme elles assurent une productivité élevée, pouvant s'automatiser facilement (robotique, machines spécifiques).

Elles nécessitent des puissances électriques d'alimentation, intenses, mais en fait consomment peu d'énergie électrique. Leur maintenance est d'un coût relativement modeste.

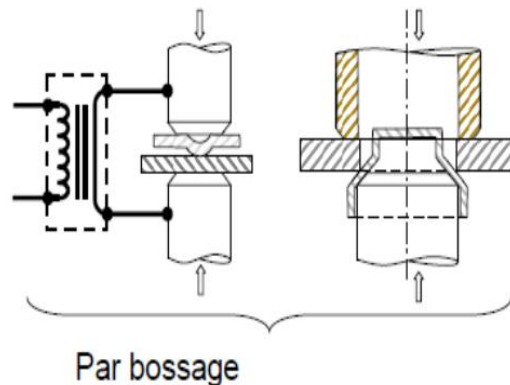
### V.3.3. Principe de base

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet de joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes. L'échauffement provoque la fusion localisée des deux pièces dans la zone située entre les deux électrodes. Le point commun de ces procédés est qu'ils utilisent l'effet Joule, c'est-à dire qu'ils exploitent le phénomène de l'échauffement d'un conducteur parcouru par un courant électrique.

Les procédés de soudage par résistance sont les suivants :

- Soudage à la molette qui est par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.
- Soudage par points donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue.
- Soudage par bossages a le même principe de soudage par points, la différence entre eux c'est que le passage du courant électrique est localisé par des reliefs appelés bossages qui ont créé sur une seule surface des deux pièces à souder et qui 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 ;





#### V.3.4. Avantage du soudage par résistance, par rapport aux autres procédés

- Soudure propre et de très haute qualité (face d'aspect) ;
- Pas de déformation des pièces soudées ;
- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...) ;
- Rapide (5ms à 3 secondes), efficace, peu polluant , pas de modification structurale, sécurité d'exploitation, pas ou peu de préparation, pas de déformation, esthétique du produit fini, peu d'énergie ;
- Autogène nécessite pas de produits d'apports ;
- Positionnement géométrique, avec serrage des éléments à assembler ;
- Délimitation des zones thermique affectées ;
- Pertes énergétiques plus faibles ;
- Il répond à des sollicitations élevées ;
- Il est durable (insensible aux variations de température et climatiques, ...)

#### V.3.5. Inconvénients

- Assemblage par recouvrement ;
- Epaisseur limitée à la capacité machine ;
- Vu le coût élevé, les applications sont limitées, en principe, un poste à souder ne peut réaliser qu'un seul type de soudage ;
- Soudure collée ;
- Projection en métal en fusion ;
- Usure anormale des fusions.

En conclusion, le principal avantage des procédés de soudage par résistance est une automatisation aisée des processus et une très bonne reproductibilité pour autant que les conditions de soudage ne soient pas modifiées. De plus, les opérations de soudage sont très rapides. Dans son domaine d'application, le soudage par résistance est considéré comme un procédé économique ayant une productivité très élevée. Au niveau de micro-soudage, les épaisseurs soudables sont très fines et l'apport d'énergie peut être parfaitement contrôlé. On peut dès lors souder des tôles de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur sans problème.

- [1] André chevalier, Technologie de fabrication mécanique, numéro 10, 1999.
- [2] René pazot, Formulaire du technicien en fabrications mécaniques, éditions : Casteila,2006.
- [3] Claude Barlier, Memotech plus - Usinage des matériaux métalliques,éditeur : casteilla, collection : Memotech, 2010.
- [4] Jean-Pierre Cordebois, Michel Colombie, Fabrication par usinage (mécanique et matériaux), dunod , 2008.
- [5] J. Jacob, y. Malesson, d. Ricque, Guide pratique de l'usinage 2 : tournage, hachette techniques.
- [6] François bagur, matériaux pour outils de coupe, techniques de l'ingénieur, référence bm7080 v1, 1999.
- [7] Jean-pierre urso, Memo-formulaire : Fabrications mécaniques, éditions : eléducative, 002.
- [8] Souhir gara, Procédés d'usinage, tournage - fraisage - perçage rectification,éditeur : ellipses, collection : technosup, 2014.
- [9] Louis rimbaud, Gerard Layes, Joseph Moulin, Guide pratique de l'usinage - volume 1, éditeur : hachette, collection : guides pratiques industriels, 2006.
- [10] Georges paquet, Guide de l'usinage : fraisage - perçage - alésage - brochage- plasturgie - moulage – tournage, éditeur : Delagrave, collection : les guidesindustriels, 2000.
- [11] Joseph jacob, y. Malesson, d. Ricque, Guide pratique de l'usinage - volume 2,éditeur : achette, collection : guide pratique, 2006.
- [12] Éric FELDER, Procédés d'usinage – Présentation, Techniques de l'Ingénieur,Référence BM7000 v1, 2008.
- [13] Dietrich, d. Garsaud, s. Gentillon, m. Nicolas, Précis de méthodes d'usinage,éditeur : AFNOR, Nathan, collection : précis, 2003.
- [14] Jean-Luis Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, AFNOR,Nathan, 2002.
- [15] Jean-François Maurel, Génie mécanique - conception, matériaux, fabrication,contrôle : Applications industrielles, éditions : Dunod, 2015.