

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES PROCEDES DE MISE ENFORME

I.1 INTRODUCTION

Il existe de nombreuses techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication (obtention de la pièce brute, puis obtention de la pièce finale). Deux types de solutions se présentent pour mettre en forme la matière.

A. Mise en forme sans enlèvement de matière

C'est le domaine du formage à chaud, à froid, de la fonderie ou du frittage. Exemples :

a- Moulage en sable

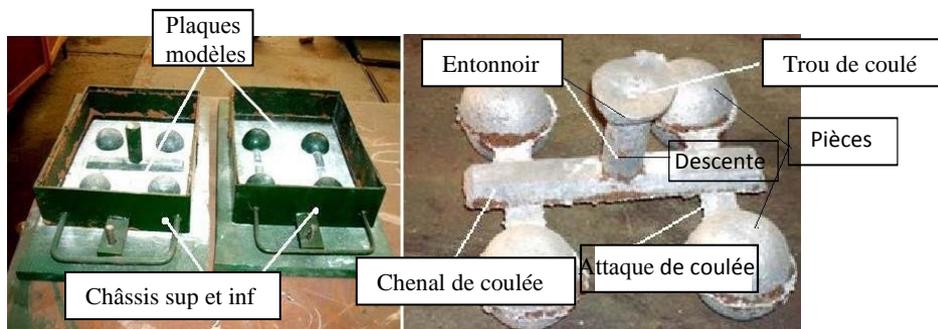


Fig I.1.a Outillage pour la préparation du moule

Fig I.1.b Pièce brute avec système de coulé et d'alimentation

b- Forgeage



Fig I.2 Marteau pilon pour la frappe des pièces lourde

B. Mise en forme avec enlèvement de matière

C'est le domaine de l'usinage, Exemple : usinage conventionnel. Les deux solutions de mise en forme se complètent : très souvent l'usinage permet de parachever une pièce ébauchée par fonderie ou formage.

Fig I.3.a Tour parallèle



Fig I.3.b Fraiseuse verticale



Fig I.3.c Tournage



Fig I.3.d Fraisage

I.2 CHOIX DU PROCEDE DE MISE EN FORME

Il est évident que les contraintes de fabrication (géométrie, propriétés mécaniques, propriétés physiques, financières etc...) imposent aux fabricants le ou les procédés appropriés. Souvent il arrive que plusieurs techniques soient appropriées pour effectuer une opération donnée; on parle alors de techniques concurrentes. Par exemple dans le cas de taraudage, on peut opter soit pour le taraudage par enlèvement de matière soit pour le taraudage par déformation plastique. On fait alors notre choix en fonction des contraintes qu'elles imposent et en considérant les inconvénients et avantages de chacune.

1.4 DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'OBTENTION DES PIÈCES



Fig I.4 Procédés d'obtention des pièces

I.5 PLACE DE L'USINAGE DANS LES TECHNIQUES DE PRODUCTIONS

I.5.1 USINAGE

L'usinage consiste en un enlèvement de matière sur la pièce afin de lui donner la forme, les dimensions et un fini de surface d'un produit déterminé. Cet enlèvement peut être obtenu par une action mécanique des outils tranchants, abrasion, érosion, déplacement des ions, corrosion chimique, vaporisation, fusion, etc. Quel que soit le mode d'enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage, etc.) il existe un élément commun, en l'occurrence la formation de copeaux.

I.5.2 CLASSEMENT DES MODES D'USINAGE

En dehors des techniques conventionnelles étant : le tournage, le perçage, le fraisage, le taraudage, l'alésage et la rectification, on compte aussi plusieurs techniques dites "non-conventionnelles". Parmi celles-ci on retrouve l'usinage par ultrasons, par jet d'eau et par jet abrasif mais aussi l'usinage chimique, électrochimique et les différents types d'usinage électrothermiques.

Un classement des modes d'usinage proposé par Springborn et Marty est présenté à la (Fig I.5). Ce classement est obtenu après avoir élaboré le choix de critère suivant : nature de l'énergie ou mécanisme, mode d'enlèvement de matière, milieu de transfert, source d'énergie, Procédé, Principaux domaines d'application.

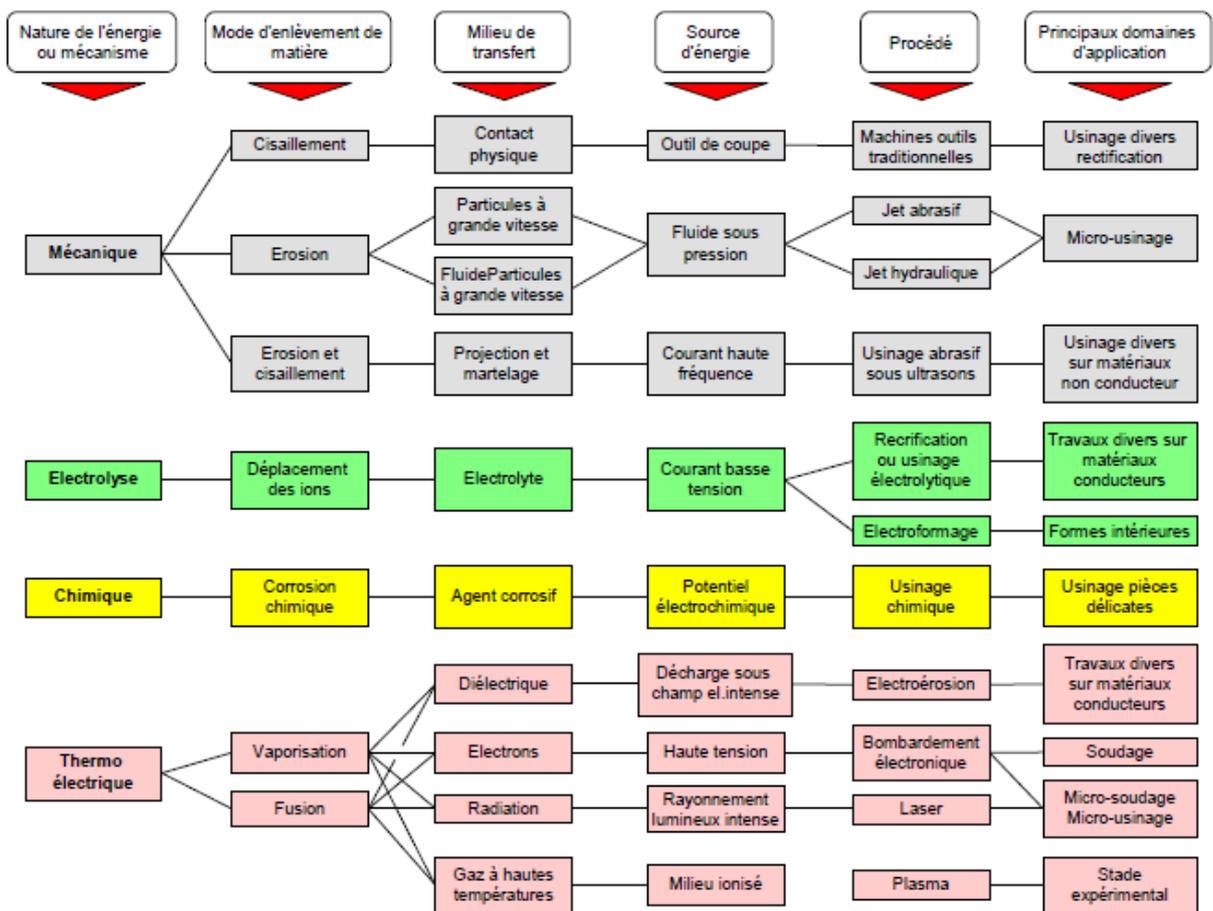


Fig I.5 Classement des modes d'usinage

Dans la suite on s'intéressera uniquement à l'usinage conventionnel. Il existe de nombreuses techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication (obtention de la pièce brute, puis obtention de la pièce finale). De plus, les pièces obtenues peuvent subir des traitements thermiques ou des traitements de surface afin de modifier leurs propriétés.

- Les principaux traitements thermiques :

- Trempe : consiste à chauffer un matériau jusqu'à transformation de sa structure interne puis de le refroidir suffisamment rapidement pour « figer » plus ou moins cette phase. La principale conséquence d'une trempe est le durcissement (superficiel) du matériau.
- Revenu (d'après trempe) : consiste à chauffer un matériau en dessous de la température de trempe, afin de supprimer les contraintes internes dues à la trempe. Ceci permet au matériau trempé d'être moins fragile, plus résistant à la fissuration.
- Recuit : consiste à chauffer un matériau à haute température puis de le refroidir très lentement. Ceci permet de supprimer les effets d'une trempe non désirée.

- Les principaux traitements de surface :

- Sablage : projection de sable afin de décaper ou d'écrouir la surface.
- Moletage : déformation superficielle en forme de stries afin de faciliter la prise en main.
Dépôts métalliques : nickelage, cuivrage, cadmiage, galvanisation (inoxydables), chromage (aspect brillant ou anti-usure), étamage, argenture, dorure...
- Diffusion chimique superficielle : cémentation (carbone), nitruration (azote), boruration, afin d'augmenter la dureté superficielle ; ou aluminisation afin de protéger contre l'oxydation.
- Peinture : sert à protéger (contre l'oxydation, la corrosion) et à améliorer l'aspect des pièces. Le choix d'un procédé d'obtention dépend de nombreux facteurs, dont le matériau, les formes de la pièce, les états de surface, la précision, ...

Ce cours présente un descriptif très succinct des principaux procédés d'obtention des pièces.

I.5.3 OBTENTION PAR FUSION (FONDERIE, OU MOULAGE)

Il consiste à rendre liquide un matériau afin qu'il prenne la forme d'un moule.

Avantages : - Peu de gaspillage de matière première ;

- Permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.

Inconvénients :

- Nécessite un outillage important et coûteux (surtout pour les moules métalliques) ;

- La pièce à obtenir doit posséder des épaisseurs approximativement constantes ou variant faiblement, ne pas posséder d'arêtes vives (congés et arrondis vivement conseillés), et avoir des surfaces de dépouilles ;

- L'état de surface (rugosité) obtenu est moyen ;

- La précision obtenue est moyenne (retraits de matière et déformation en refroidissant) ;

- Ces deux derniers inconvénients obligent souvent à ajouter des usinages

Au niveau des surfaces fonctionnelles de la pièce ;

Il existe principalement deux techniques de moulage : en sable ou métallique.

a) Moulage en sable

Le décochage s'effectue par destruction du moule. On doit donc fabriquer autant de moules que de pièces à fabriquer. Il existe plusieurs procédés de moulage en sable (Procédé à vert ; procédé à sec ; procédé à durcissement thermique, chimique ou physique). Le moule en sable est obtenu à partir d'un modèle permanent (généralement en bois, en résine ou en métal) ou unique (en cire ou en polystyrène) dans le cas du moulage à modèle perdu.

L'intérêt de cette technique est que le sable est réfractaire (il résiste à la chaleur), et que le moule ne coûte pas cher à fabriquer. Par contre, l'état de surface ($Ra \approx 3,2 \mu m$) et les précisions obtenues sont moins bon. Cette technique convient bien pour des petites séries.

- Exemple d'obtention d'une pièce par moulage en sable, à joint horizontal
- a) Le châssis inférieur (2) est rempli de sable, puis compressé par la plaque modèle face externe (1) ;
- b) Le châssis supérieur (4), posé sur la plaque modèle face interne (5), est rempli de sable pressé par la plaque (3) ;
- c) La plaque (3) est retirée, un noyau (6') est déposé dans la partie inférieure du moule (6), puis le châssis (4) est positionné sur le châssis (2), centré par les goujons. Le moule ainsi formé peu recevoir le métal en fusion.
- d) Après décochage, la pièce (8) est débarrassée du système de coulée (7) et peut rejoindre le parachèvement.

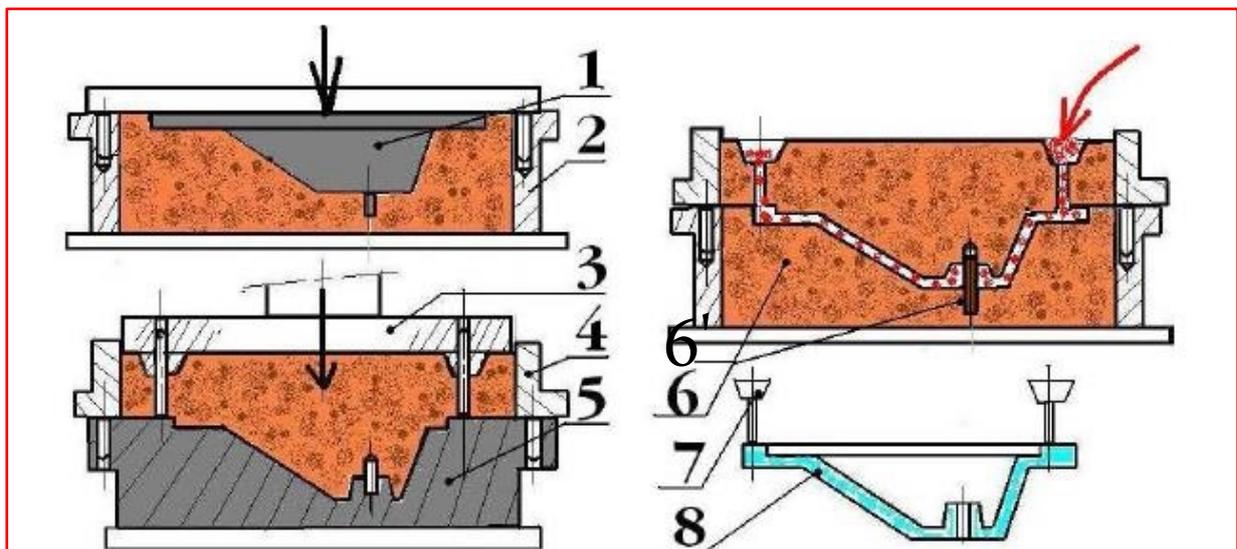


Fig I.6 Obtention d'une pièce par moulage en sable

b) Moulage métallique (ou moulage permanent)

Le moule métallique est réutilisable plusieurs fois. Le démoulage est rendu possible par la différence de matière entre le moule et le métal coulé. Le moule subit toujours un poteyage avant introduction du métal en fusion (il est enduit d'un liquide protecteur qui facilitera son démoulage). Le moulage métallique est classé en trois catégories selon la pression d'introduction du matériau liquide dans le moule :

- Moulage par gravité

La pression est nulle, le matériau liquide est introduit par le haut et remplit le moule par gravité. L'état de surface ($Ra \approx 1,6 \mu\text{m}$) et la précision obtenue est moyenne. Cette technique, dont l'outillage est moins coûteux que les suivantes, est adaptée pour les petites séries.



Fig I.7 Moulage par gravité

- Moulage à basse pression

La pression est faible (0,2 à 2 bars), le matériau liquide est introduit par le bas. Le procédé est semi-automatique, et souvent considéré comme une amélioration du moulage par gravité. Le coût de l'outillage est plus élevé, les cadences sont plus importantes et l'état de surface et la précision sont meilleures. Cette technique est adaptée pour les petites séries ou grandes.

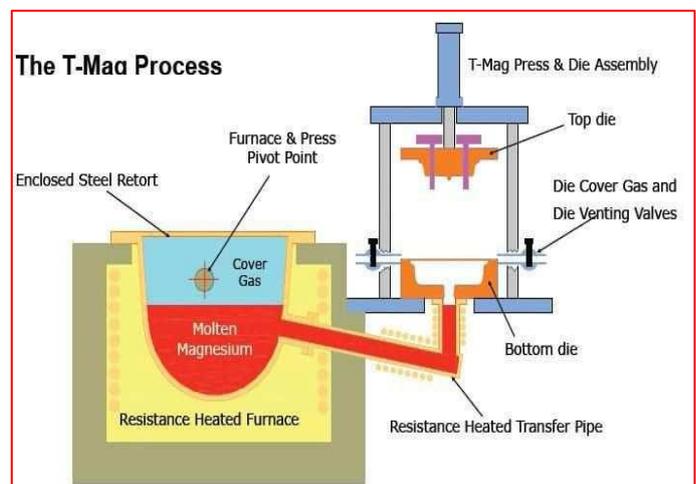


Fig I.8 Moulage à basse pression

- Moulage sous pression (ou moulage par injection)

La pression d'injection du matériau liquide est importante (entre 50 et 200 bars). Ce procédé est souvent automatisé et permet de grandes cadences de production (jusqu'à 500 pièces / heure). Le coût de l'outillage est très élevé. L'état de surface et la précision des pièces obtenues sont bons. Cette technique est adaptée pour les très grandes séries.

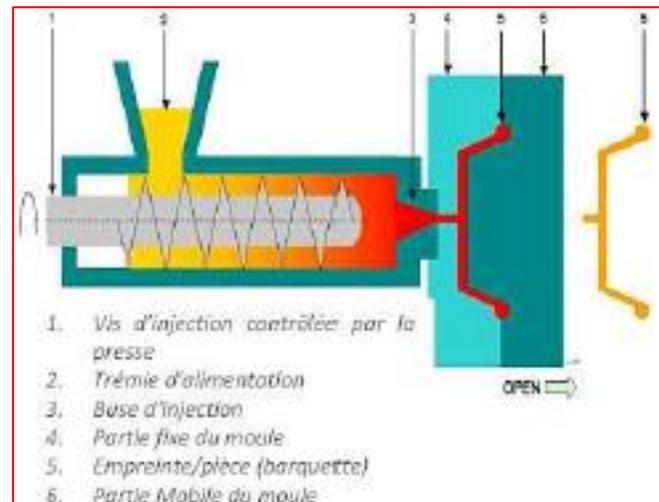


Fig I.9 Moulage sous pression

- Moulage par centrifugation

Le moule est entraîné en rotation rapide. Le matériau liquide versé à l'intérieur se colle à la paroi par la force centrifuge et se solidifie. La centrifugation se fait sur des machines à axe vertical, horizontal ou oblique.

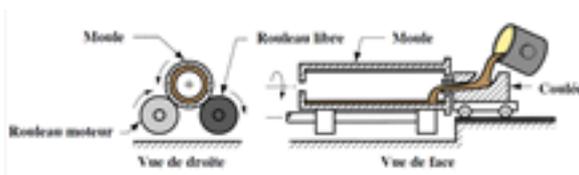


Fig I.10 Moulage par centrifugation à axe horizontal

- Moulage par insert (ou surmoulage)

Cette technique consiste à mouler un matériau (souvent en plastique) par-dessus une pièce, appelée insert (souvent en métal), insérée dans le moule. Il faut pour cela que le matériau à surmouler possède une température de fusion plus faible que le matériau de l'insert.

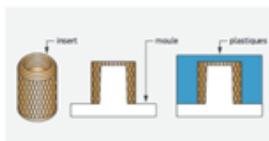


Fig I.11 Moulage par Insert

I.5.4 OBTENTION PAR DÉFORMATION

Elle consiste à déformer plastiquement le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée. Une déformation plastique est une déformation permanente du matériau.

a- Extrusion (ou filage)

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

Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir.

Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...).

Avantages : - Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;

- Bons états de surface ;

- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

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

- Formes limitées à des « extrusions ».

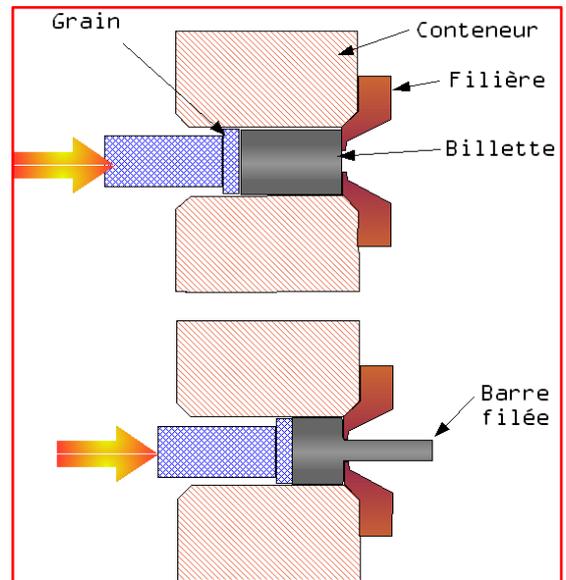


Fig I.12.a Extrusion de formes pleines (filage direct)

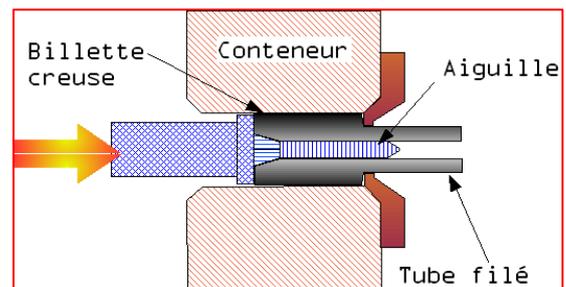


Fig I.12.b Extrusion de formes creuses par aiguilles

b- Laminage

Principe :

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoirs.

Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés. La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.

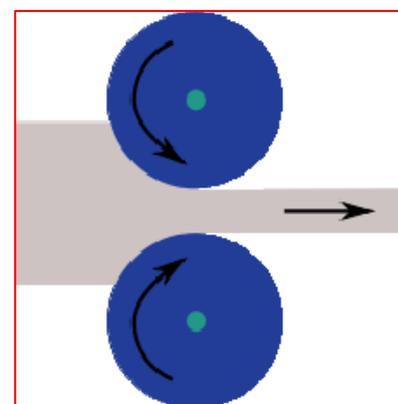


Fig I.13 Laminage

c- Forgeage libre

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue.

Principe du forgeage libre :

Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200 °C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres. Aucune matrice ne délimite la déformation du matériau, et la forme obtenue dépend fortement du savoir-faire de l'opérateur. L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique. La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adapté au travail en série.

Avantages :

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

Inconvénients :

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



Fig I.14 Forgeage libre au marteau-pilon

d- Estampage et matriçage

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

Principe :

Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs. L'estampage et le matriçage sont adaptés à une production en série.

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

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

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

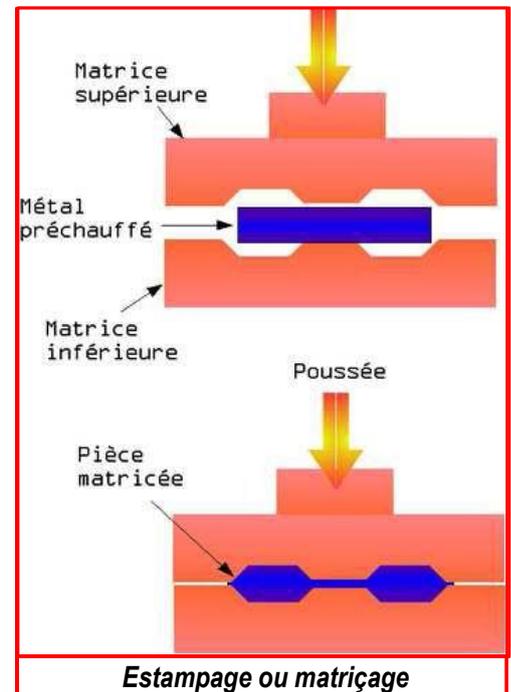


Fig I.15 Estampage

e- Pliage

Le pliage est une déformation permanente effectuée à froid sur une tôle plane. La surface obtenue présente des plis rectilignes et est développable (c'est-à-dire applicable sur un plan par dépliage).

Avantages : - Outillage simple : presses hydrauliques avec différents poinçons et matrices.

Inconvénients : - Ressaut élastique résiduel difficile à prévoir ; - Longueur de pliage limitée.

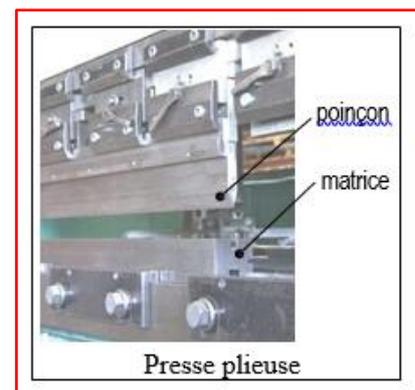


Fig I.16 Presse plieuse



Fig I.17 Pièces obtenues après pliage

f- Cintrage

Le cintrage est la déformation à froid d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle donnés (opération effectuée avec une cintrreuse). On peut obtenir un cintrage approximatif en effectuant plusieurs petits pliages rapprochés les uns des autres.



Fig I.18 Cintruses (manuelle et industrielle)

g- Profilage à froid

Principe :

Une tôle plane (feuillard), introduite entre les galets tournants d'une machine à profiler, subit des déformations progressives qui l'amènent à la forme finale désirée, sans que soit modifiée son épaisseur initiale.

Ce procédé est adapté aux grandes séries.

Avantages : - Longueur de profilé non limitée ;
- Procédé rapide et productif (possibilité de découpe en vol).



Fig I.19 Profilage à froid

h- Emboutissage

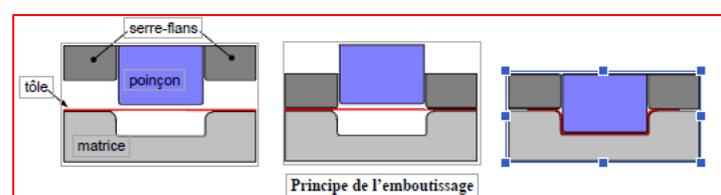
Principe :

L'emboutissage est la déformation à froid d'une tôle plane en une forme creuse non développable. La tôle est déformée entre un poinçon mobile et une matrice fixe, le serre-flan évitant la formation des plis. L'opération ne doit pas entraîner de variation sensible de l'épaisseur de la tôle.

L'outillage est spécifique à la forme de la pièce à obtenir, et le seuil de rentabilité exige donc une production en série.



Fig I.20 Emboutissages successifs d'une canette



i- Emboutissage

Principe :

Une **poudre** (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est **comprimée** dans un moule, puis **chauffée** dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlée) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant.

Avantages : - Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages (encore appelés dans ce cas « pseudo- alliages »).

Inconvénients :

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.



Fig I.21 Poudres métalliques



Fig I.22 Coussinets frittés

I.5.5 OBTENTION PAR ENLÈVEMENT DE MATIÈRE (USINAGE)

Il consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux).

a) Tournage (sur un tour classique ou à commande numérique CN)

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. Le tournage permet principalement d'obtenir des formes de révolution autour de l'axe de rotation de la pièce.

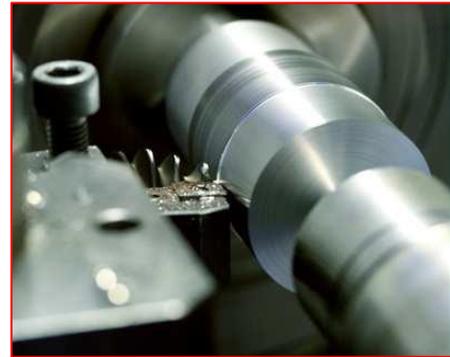


Fig I.23 Tournage

b) Fraisage (sur une fraiseuse classique ou à commande numérique CN)

En fraisage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de l'outil (la fraise), tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de la pièce maintenue dans un étau. Le fraisage classique permet principalement d'obtenir des formes prismatiques, mais le fraisage par CN permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes.

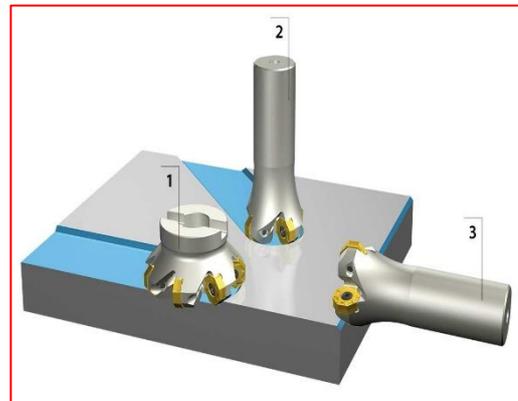


Fig I.24 Fraisage

c) Perçage (sur une perceuse)

Le terme perçage signifie « obtention d'un trou (borgne ou débouchant) par usinage ». Ce trou peut être effectué par un foret sur une perceuse, une mèche sur un vilebrequin (perceuse manuelle), découpe, électroérosion, etc.



Fig I.25 Perçage

d) Brochage (sur une brocheuse)

Le brochage est un procédé d'usinage à l'aide d'un outil de forme à tranchants multiples appelé « broche ».

L'outil broche possède des dents qui augmentent de hauteur progressivement, de sorte que chacune entaille plus profondément la pièce que celle qui la précède.

Le brochage intérieur (formes a, b, c, d ci-contre) nécessite que la broche puisse traverser la pièce. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable un trou débouchant.

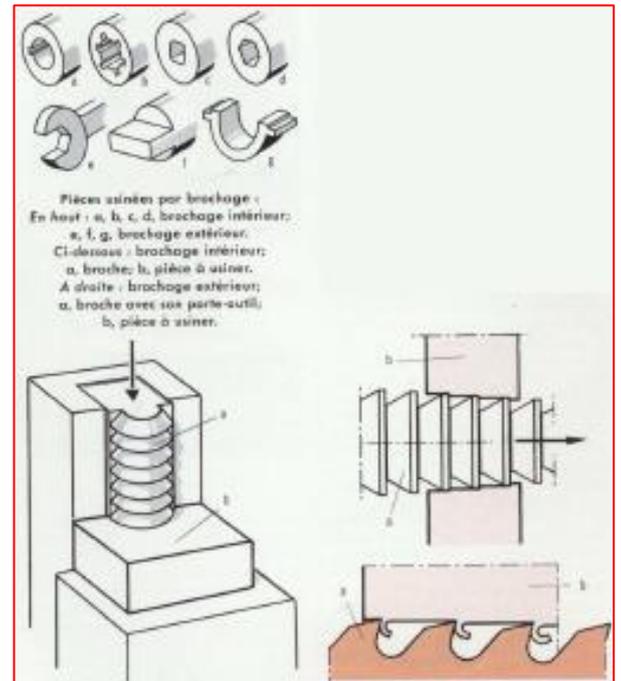


Fig I.26 Brochage

e) Rectification, rodage, super finition (sur une meule ou sur des bandes abrasives)

Ces trois techniques sont des techniques de finition des pièces, par abrasion (ou meulage), jusqu'à l'obtention de surfaces en « poli-miroir ». Une meule (ainsi qu'une bande abrasive) est constituée de particules coupantes agglomérées par un liant : chaque particule enlève un petit copeau quand l'une de ses arêtes se présente sur la pièce, généralement à grande vitesse ; le copeau est de très petite section, il n'est pas tranché mais gratté. L'amélioration de l'état de surface est obtenue en utilisant des abrasifs de plus en plus fins. L'état de surface obtenu est excellent (rugosité de l'ordre de $Ra = 0,1 \mu\text{m}$) et la précision des cotes aussi (de l'ordre de $1 \mu\text{m}$).

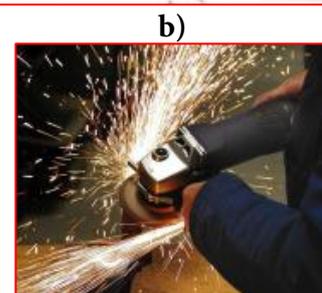
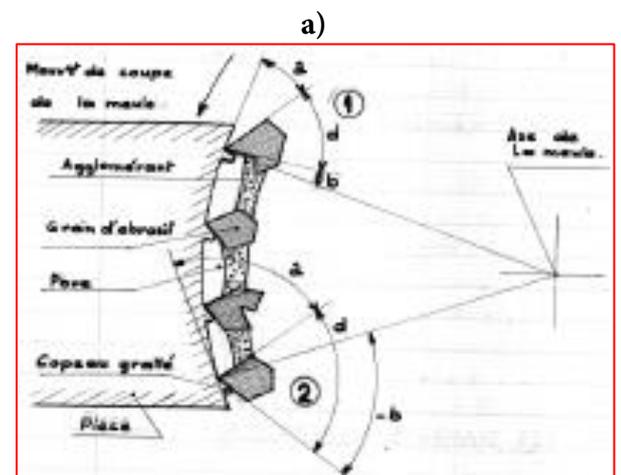


Fig I.27.a/b Rectification

f) Électroérosion

Principe :

L'enlèvement de matière est obtenu par des décharges électriques entre une électrode pièce et une électrode-outil.

Avantages : - Usinage possible de matériaux trempés et durs, impossibles à usiner avec les procédés par enlèvement de copeaux ;

- Usinage de formes tridimensionnelles « démoulables »

(l'outil pénètre dans la pièce et y laisse sa forme complémentaire) et hélicoïdales (en donnant à l'outil un mouvement de rotation conjuguée avec son mouvement de translation) ;

- Bons états de surface ($R_a \approx 2 \mu\text{m}$) et précision ($\approx 20 \mu\text{m}$).

Inconvénients : - Ce procédé ne s'applique qu'aux matières conductrices de l'électricité ;

- Coût du matériel (spécifique à chaque forme de pièce à obtenir) et usure de l'outil électrode.

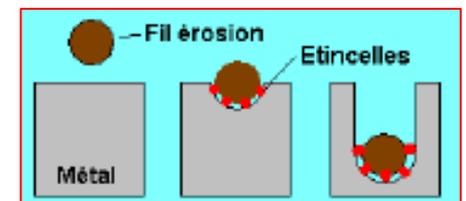
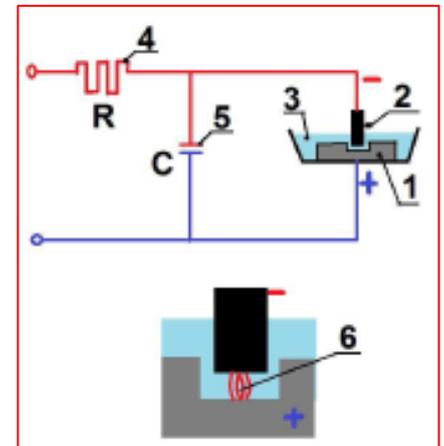


Fig I.28 Électroérosion

g) Découpage, poinçonnage, cisailage

Le découpage est le cisailage d'une tôle sur un contour fermé.

- Cisailage : Consiste à couper (cisailer) des tronçons de profilé ou de tôle.

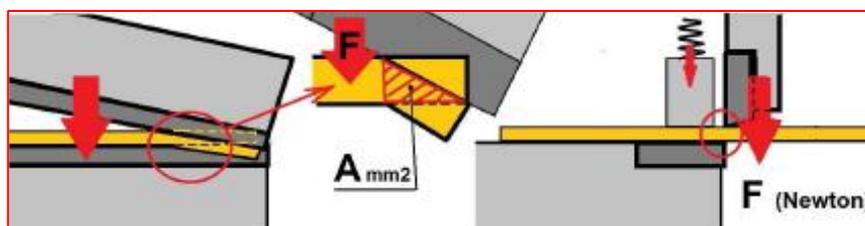


Fig I.29 Cisailage

- Poinçonnage : Le découpage est effectué par un poinçon ayant la forme de l'ajour (trou) à découper

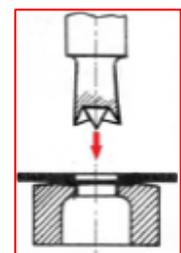


Fig I.30 Poinçonnage

On recense plusieurs techniques de découpages :

- ◆ **Découpage classique** (mécanique, par un outil tranchant de profil fermé déplacé par une presse) ;
- ◆ **Oxycoupage** (jet d'oxygène pur sur un métal préalablement localement chauffé à sa température de combustion) ;
- ◆ **Découpage laser** ;
- ◆ **Découpage par jet d'eau** (le jet d'eau doit posséder une finesse, une vitesse et une pression telles qu'il soit capable de couper la plupart des métaux sans les mouiller) ;
- ◆ **Découpage plasma** (apparenté au soudage TIG, mais avec des mélanges gazeux différents – un arc électrique génère un jet de plasma qui provoque une fusion locale sur toute l'épaisseur du matériau à découper).

I.5.6 OBTENTION PAR PROTOTYPAGE RAPIDE

Le prototypage rapide est une méthode de fabrication qui regroupe un ensemble d'outils permettant d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les maquettes, les prototypes et les préséries. Ces modèles contribueront à valider les différentes fonctions que doit remplir le produit.

Le prototypage rapide intègre trois notions essentielles : le temps, le coût et la complexité des formes.

Temps : l'objectif du prototypage rapide est de réaliser rapidement les modèles, dans un but de réduction des temps de développement des produits.

Coût : le prototypage rapide permet de réaliser des prototypes sans qu'il soit nécessaire de recourir à des outillages coûteux, tout en garantissant les performances du produit final. On est donc en mesure d'explorer différentes variantes du produit en cours d'élaboration afin de retenir la solution la plus appropriée.

Complexité des formes : les machines procédant par ajout de matière sont capables de réaliser des formes extrêmement complexes (inclusion, cavité...), irréalisables par des procédés tels que l'usinage par exemple.

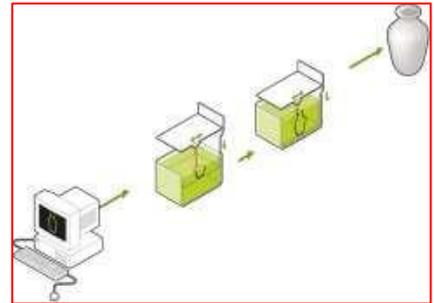
Voici les techniques de prototypage rapide les plus utilisées :

a) UTGV (Usinage Très grande Vitesse)

Il s'effectue sur des centres d'usinage multi-axes à commande numérique. La forme finale est obtenue par enlèvement de matière (usinage) avec différents outils, et souvent plusieurs mises en position de la pièce.

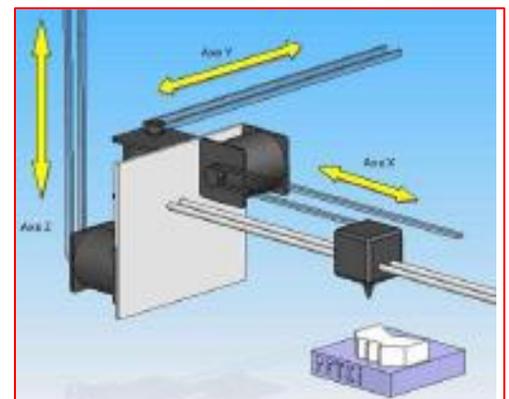
b) Stéréolithographie

L'objet est obtenu par superposition de tranches fines de matière. A partir d'un fichier 3D, une pièce est construite couche par couche du bas vers le haut, dans un bain de résine liquide (ou de poudre métallique) qui durcit au contact d'un faisceau laser.

**Fig I.31** Stéréolithographie**c) Impression 3D (dépôt de fil fondu)**

Cette technique permet de produire un objet réel à partir d'un fichier CAO en le découpant en tranches puis en déposant de la matière couche par couche pour, en fin de compte, obtenir la pièce terminée. Le principe est donc assez proche de celui d'une imprimante 2D classique : les buses utilisées, qui déposent de la résine (ou du plastique, ou du métal), sont d'ailleurs identiques aux imprimantes de bureau. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume.

Un matériau support est aussi utilisé afin de pouvoir obtenir n'importe quelle forme volumique. Le matériau support est ensuite dissout dans un bain de dissolvant.

**Fig I.32** Impression 3D**I.5.7 OBTENTION PAR ASSEMBLAGE**

Les principales solutions technologiques pour réaliser des liaisons complètes permanentes et non-démontables : soudage ; rivetage ; collage ; emmanchement ou frettage ; sertissage.... Nous ne développerons ici que le soudage, et seulement de façon succincte.

a) Généralités sur le soudage

On appelle soudage les procédés d'assemblages permanents et non-démontables qui créent une continuité de matière entre les pièces assemblées.

Exemples d'application :

- Mécano-soudage : assemblage de formes simples soudées entre elles pour réaliser une pièce de forme complexe ;
- Assemblage avec continuité électrique, ou étanchéité...

Z.A.T (Zone Affectée Thermiquement) :

La continuité est obtenue par un échauffement de la zone interface entre les pièces avec ou sans apport de matière.

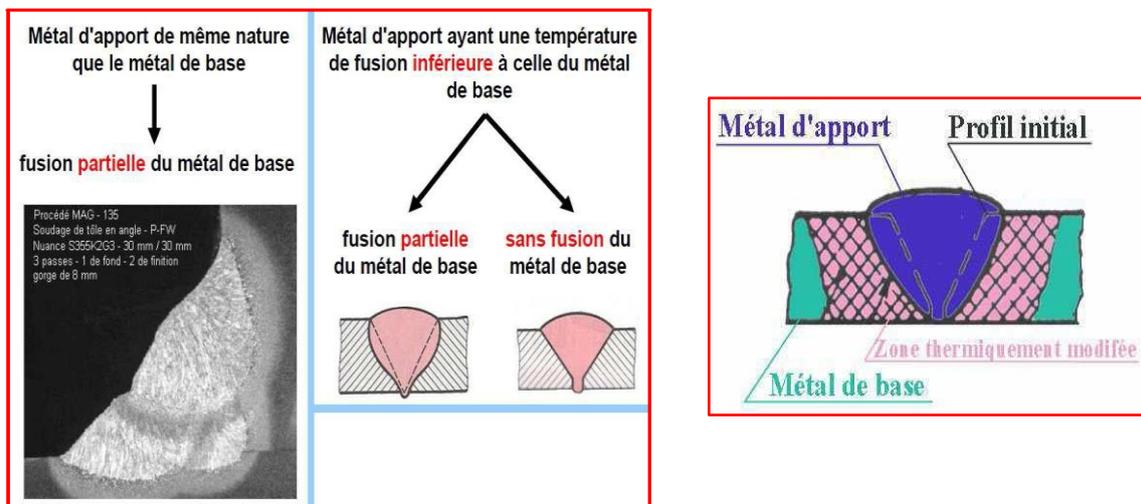


Fig I.33 Classification des soudages en fonction de la Z.A.T

La zone affectée thermiquement (Z.A.T) est modifiée dans sa structure cristalline suite au refroidissement de la pièce après le chauffage nécessaire au soudage.

Cette modification est voisine du processus observé lors d'un traitement thermique à l'air (la pièce est chauffée puis refroidit à l'air libre).

Les dimensions de la Z.A.T (le plus souvent indésirable) varient suivant le procédé de soudage utilisé. C'est ce qui fait l'intérêt ou les limites de certains procédés. Le procédé idéal de soudage est celui qui fournit la plus grande puissance le plus localement possible (jusqu'à $108\text{W}/\text{cm}^2$).

- Défauts, contraintes et déformations

La Z.A.T est le siège de déformations et de contraintes internes résiduelles. Les contraintes et déformations sont liées : les déformations provoquent des contraintes et réciproquement de manière à atteindre un nouvel équilibre dans la pièce lors de son refroidissement.

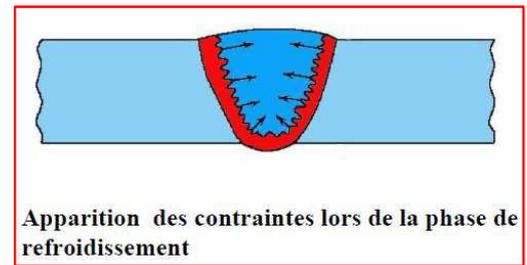


Fig I.34 contraintes internes

Les déformations dues au soudage s'appellent des retraits. Ils impliquent que la forme de la pièce finie ne sera pas simplement la juxtaposition des formes des éléments assemblés.

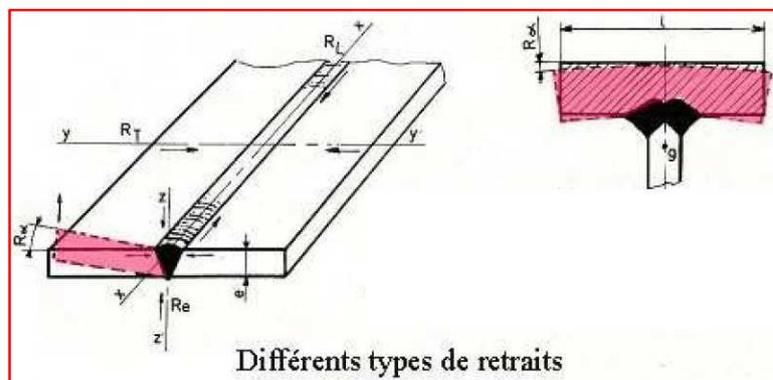


Fig I.35 Types de retraits

- Limitation des déformations et préparation des bords

Pour des bords de tôles préparés avec des chanfreins, la forme de la préparation des bords aura une influence sur le retrait. De plus on limitera celui-ci s'il est possible de faire un cordon des deux côtés.

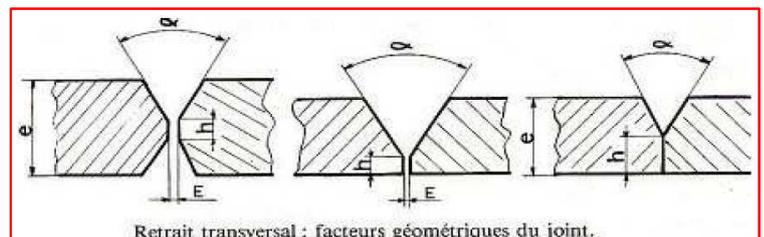


Fig I.36 Facteurs géométriques du joint

Lorsque la valeur de la déformation est prévisible, on peut pré-positionner les pièces à assembler par un point de soudage ou un montage spécifique avec une déformation inverse. Le bridage avec pré-déformation élastique revient à créer une précontrainte inverse en plus de la déformation inverse ce qui permet de réduire déformations et contraintes résiduelles.

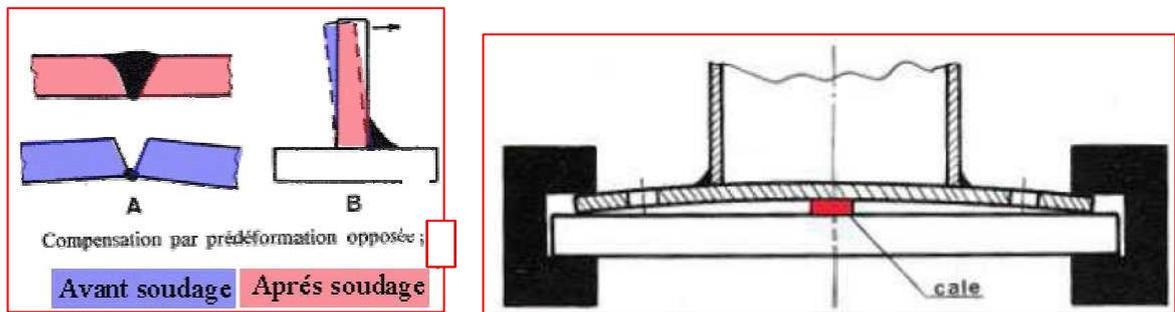


Fig I.37 Compensation par déformation et bridage.

- Les différentes techniques de soudage

Soudure avec métal d'apport :

- Arc électrique
- Électrode enrobée
- MIG – MAG
- TIG
- Sous flux
- Solide
- Brasage

Soudure sans métal d'apport :

- Friction
- Par résistance Laser
- Bombardement d'électrons
- Ultra-son

**CHAPITRE II: LES PROCEDES DE
FABRICATION PAR ENLEVEMENT
DE MATIERE**

II. GENERALITES

Il existe de nombreuses techniques visant l'obtention d'une pièce par transformation de l'usinage s'effectue dans le but de donner aux pièces brutes la forme, les dimensions et la précision nécessaire demandée par le concepteur dans son dessin de définition, par enlèvement de copeau (surépaisseur) sur des machines-outils appropriées.

En fonction de la forme à donner à la surface et du type de la machine-outil, on distingue les opérations de coupe suivantes : le tournage, le perçage, la rectification, le fraisage, le rabotage, ...etc.

Opération de tournage : Pendant le tournage, la pièce tourne autour de son axe, tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée. L'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la pièce. Le tournage s'effectue sur machine dite tour.

Opération de perçage : Pendant le perçage, la pièce est fixe tandis que l'outil est animé de deux mouvements continus simultanés, le mouvement de coupe et le mouvement d'avance suivant l'axe de l'outil. Le perçage s'effectue sur des machines à percer appelées perceuses.

Opération de rectification : 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.

Opération de fraisage : Au fraisage le métal est travaillé avec un outil spécial appelé fraise. La coupe s'effectue en faisant tourner la fraise et en amenant par un mouvement rectiligne la pièce. L'usinage des pièces au fraisage se fait sur des machines-outils appelées fraiseuses.

Opération de rabotage : Lors du rabotage, le mouvement rectiligne intéresse soit la pièce, soit l'outil. Sur une raboteuse, on met en mouvement la pièce tout en déplaçant latéralement l'outil d'une certaine quantité. Sur un étau limeur, c'est l'outil qui effectue un mouvement rectiligne en revenant à l'origine à la suite de chaque course de travail, tandis que la pièce se déplace latéralement d'une quantité égale à l'avance désirée. Le rabotage s'effectue sur des machines-outils appelées raboteuses ou étaux limeurs.

Opération de mortaisage : Le mortaisage est une opération analogue au rabotage, seulement le mouvement de l'outil se fait verticalement, et ce mode d'usinage s'intéresse généralement au travail des surfaces intérieures.

II.1 TOURNAGE

Les tours sont des machines-outils employées pour l'usinage des pièces de révolution. La pièce est serrée dans un porte pièce (mandrin) ou entre les pointes, et reçoit un mouvement de rotation autour de son axe. C'est le mouvement principal ; l'outil est serré dans le porte outil et reçoit les mouvements rectilignes longitudinal ou transversal. Les opérations élémentaires de tournage sont : le chariotage, le dressage, le filetage, le tronçonnage, le perçage. La combinaison des mouvements de la pièce et de l'outil permet de réaliser des surfaces variées : cylindriques, coniques, sphériques, hélicoïdales... qui peuvent être extérieures ou intérieures. Malgré la diversité des conceptions et des dimensions, tous les tours présentent beaucoup d'ensembles et d'éléments similaires (Fig II.1).

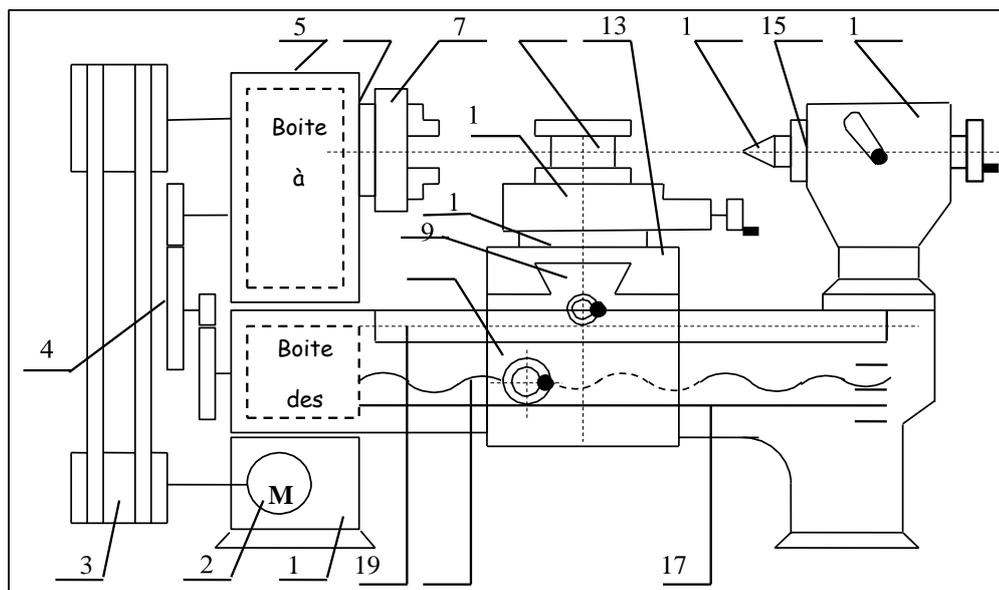


Fig II.1 Schéma d'un tour

1 = Bâti, 2 = Moteur, 3 = Transmission par courroie, 4 = Inverseur tête de cheval, 5 = Poupée fixe, 6 Broche, 7 = Mandrin, 8 = Tablier, 9 = Traînard, 10 = Chariot intermédiaire, 11 = Chariot supérieur, 12 = Porte-outil (tourelle), 13 = Chariot inférieur, 14 = Contre pointe, 15 = Fourreau, 16 = Poupée mobile, 17 = Barre de commande (barre de chariotage), 18 = Vis de commande (vis mère, vis de filetage), 19 = crémaillère.

Les types de tour employés dans l'industrie sont les tours : Parallèles ; revolver ; en l'air ; verticaux et multibroches.

Ces tours peuvent être automatiques, semi-automatiques, ou à commande numérique avec calculateur. Ils se distinguent les uns des autres par leur forme, leurs dimensions, la précision d'usinage, de la puissance, ...etc.

II.1.1 TOURS REVOLVERS

Les tours revolvers (Fig II.2) n'ont ni contre poupée, ni de vis mère. Ils sont équipés par un chariot revolver muni d'une tourelle revolver à 6 positions à axe de rotation vertical ou horizontal. Dans chaque position on fixe des outils divers. Le changement des outils se fait rapidement par rotation de la tourelle.

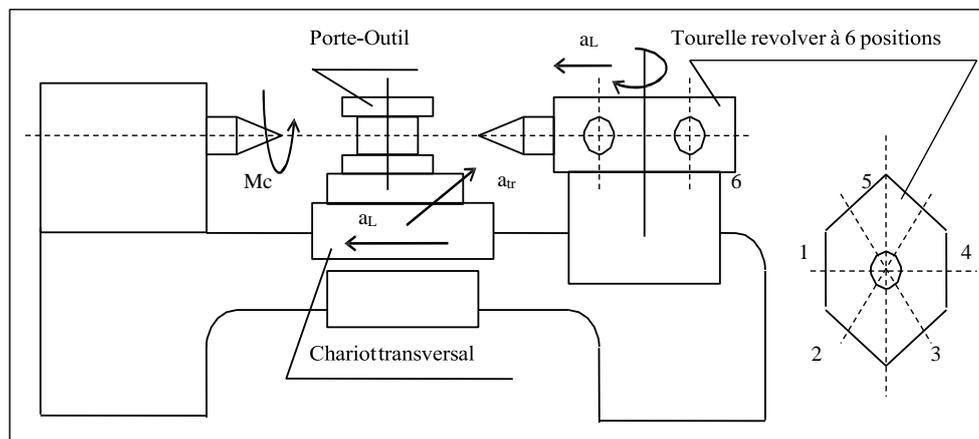


Fig II.2 Tour revolver

Il existe aussi un chariot transversal qui est équipé d'un porte outil à 4 positions et peut se déplacer dans le sens longitudinal et transversal, il s'utilise pour le chariotage, tronçonnage, dressage, etc.... Ces machines sont efficaces lors de l'utilisation d'un grand nombre d'outils pour l'usinage de la pièce.

II.1.2 TOURS EN L'AIR

Les tours en l'air (Fig II.3) ont des plateaux à mors (mandrins) de grand diamètre (allant jusqu'à 5000 mm). Ils servent à usiner des pièces de grands diamètres mais de petites longueurs (anneaux, volants, roues dentées, bagues,...). Actuellement, ces types de tours sont remplacés par des tours verticaux.

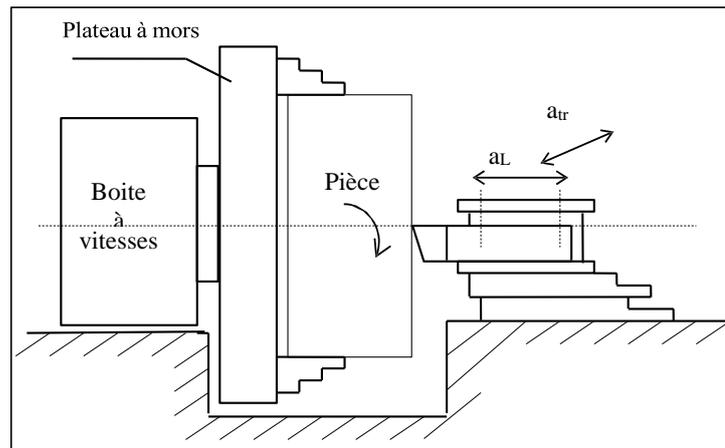


Fig II.3 Tour en l'air

II.1.3 TOURS VERTICAUX

Le tour vertical (Fig II.4) comprend un ou deux montants verticaux (colonnes), une traverse et un plateau à mors. Sur la traverse se trouvent deux chariots verticaux et sur les montants des chariots latéraux. Ces machines-outils servent à usiner des pièces de grands diamètres (peut atteindre 5000 mm et plus) et dont les alésages sont excentrés.

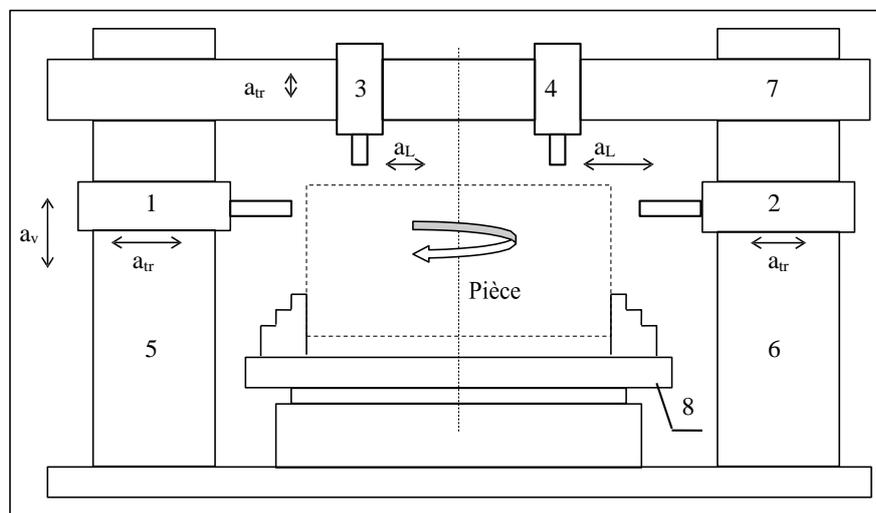
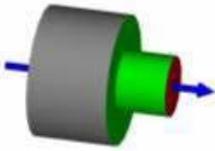
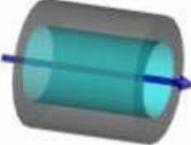
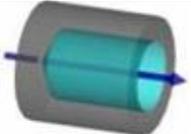
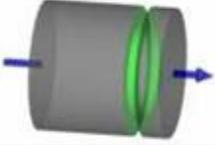
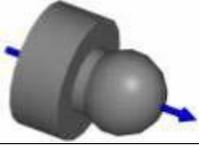


Fig II.4 : Tour Vertical

1, 2 : Chariots Latéraux ; 3,4 : Chariots Verticaux ; 5,6 : Colonnes ; 7 : Traverse ; 8 : Plateau à mors.

II.2 PRINCIPAUX USINAGES REALISABLES SUR TOUR

Sur les tours différents usinages sont réalisables : extérieur et intérieur. Parmi ces usinages on peut citer :

Dessin	Opérations
	Dressage C'est la réalisation d'un plan perpendiculaire à l'axe de la pièce. (surface rouge)
	Chariotage C'est la réalisation d'un cylindre ayant le même axe que celui de la pièce. (surface grise)
	Perçage C'est un trou dans la pièce. Il peut être débouchant ou
	borgne. Attention en tournage, l'axe du trou est confondu avec l'axe de la pièce.
	les gorges C'est l'association de 2 plans parallèles avec un cylindre (surfaces vertes)
	Quelconque C'est l'association de plusieurs surfaces élémentaires : sphère, cylindre, plan, cône ...

Filetage extérieur :

à l'aide d'outils à fileter pour les grands diamètres, et de filières pour les petits diamètres.

Filetage intérieur :

à l'aide d'outils à fileter pour les grands diamètres, et de tarauds pour les petits diamètres.

Moletage : avec des outils à moleter ou la molette striée.

II.3 PERÇAGE

Les machines à percer (Fig II.5) s'emploient pour réaliser des trous. La pièce est bridée sur la table de la machine et n'effectue aucun mouvement, tandis que l'outil est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), d'avance et de pénétration.

Ces machines-outils sont utilisées pour le façonnage des trous cylindriques ou coniques débouchant ou borgnes à l'aide de foret, de foret aléseur et d'alésoir, ainsi que pour le taraudage au moyen d'un taraud monté sur mandrin.

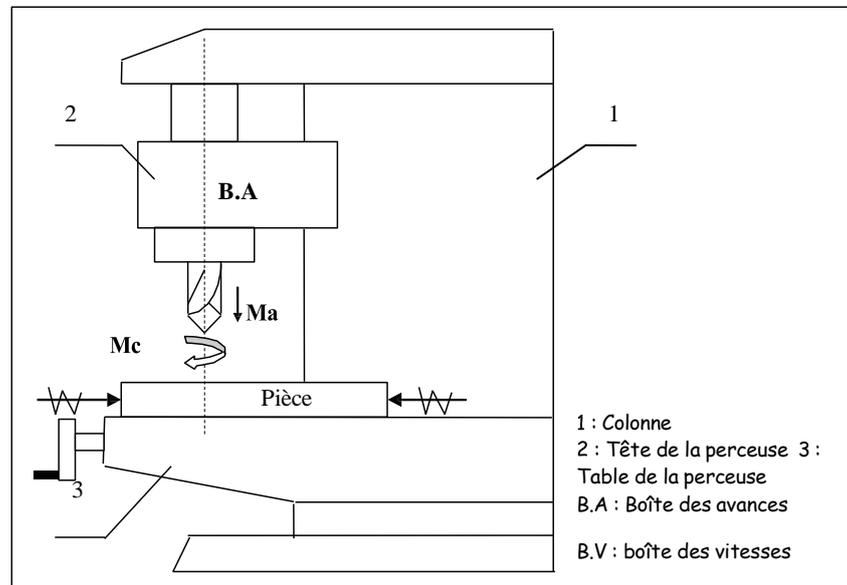


Fig II.5 Schéma d'une perceuse

Les perceuses les plus fréquemment rencontrées dans la pratique sont :

II.3.1 PERCEUSES SENSITIVES

Ce type de machine permet l'usinage de trous de petits diamètres (allant jusqu'à 15 mm). Elles sont appelées perceuses sensibles parce qu'elles sont commandées manuellement.

II.3.2 PERCEUSES A COLONNE

Ce sont les machines qui permettent de réaliser des trous de moyen diamètre et sont largement utilisées dans l'industrie.

II.3.3 PERCEUSES RADIALES

Ces machines sont destinées à la réalisation des trous dans des pièces de grands encombrements. La pièce est immobilisée. En faisant pivoter le bras radial autour de la colonne, et en faisant coulisser le porte-outil le long du bras, on arrive à amener la broche avec le foret vers n'importe quel point de la pièce.

II.3.4 PERCEUSES HORIZONTALES

A cause de la disposition horizontale de la broche, ces machines sont réservées à des opérations spéciales tel que l'alésage par exemple.

II.3.5 PERCEUSES MULTIBROCHES

Ce genre de machines est utilisé pour l'usinage de pièces ayant plusieurs trous à effectuer sur le même plan d'une pièce. Le nombre d'outils travaillant en même temps peut atteindre 24 outils.

II.3.6 PERCEUSES C.N.C

Ces machines donnent une grande précision d'usinage grâce au ordinateur dont elles sont munies.

II.4 FRAISAGE

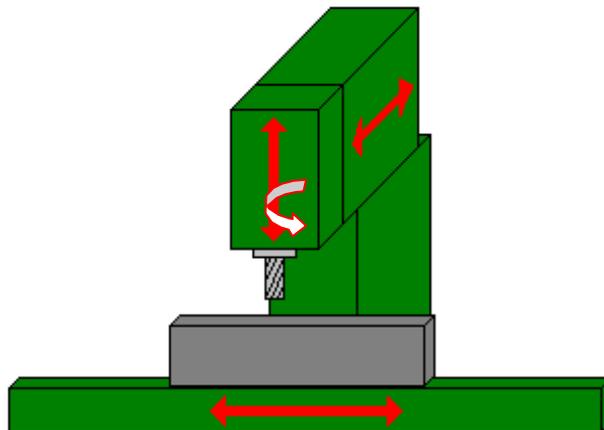


Fig II.6 Principe du fraisage

Les machines à fraiser les plus répandues en construction mécanique et dans l'usinage des métaux sont de trois types : la fraiseuse horizontale, la fraiseuse verticale et la fraiseuse universelle.

II.4.1 FRAISEUSE HORIZONTALE

Il y a des fraiseuses horizontales (Fig II.7) dont la table est mobile en translation selon les trois directions (mouvement latéral, transversal et vertical), peut aussi pivoter d'un certain angle, ce pivotement les classe dans la catégorie des fraiseuses universelles. Dans ce cas, l'angle de rotation de la table est lu directement sur une échelle spéciale. Il y a des fraiseuses universelles qui offrent une possibilité d'inclinaison de la broche par rapport à la pièce pour donner plus de souplesse dans la réalisation des pièces par l'opérateur.

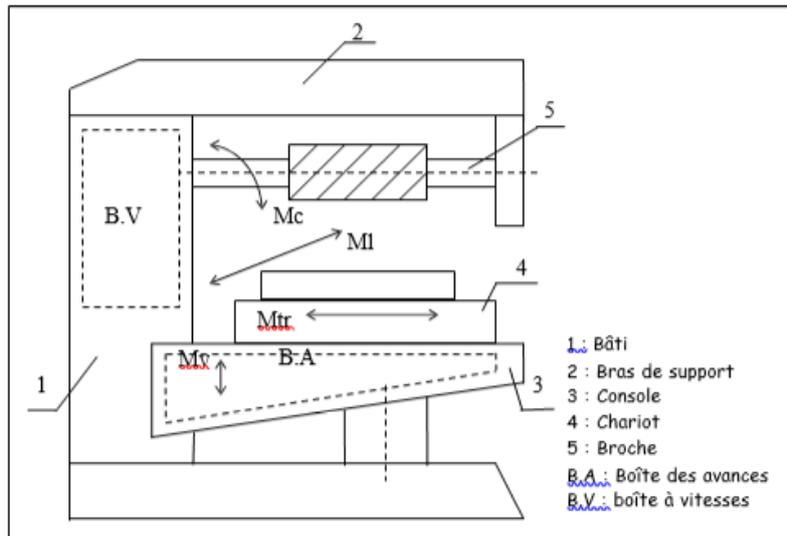


Fig II.7 : Schéma d'une fraiseuse horizontale

II.4.2 FRAISEUSE RABOTEUSE

Ce sont des machines sur lesquelles on usine des pièces encombrantes (Fig II.8). Le nombre d'outils qui peuvent travailler en même temps peut être de 4 outils.

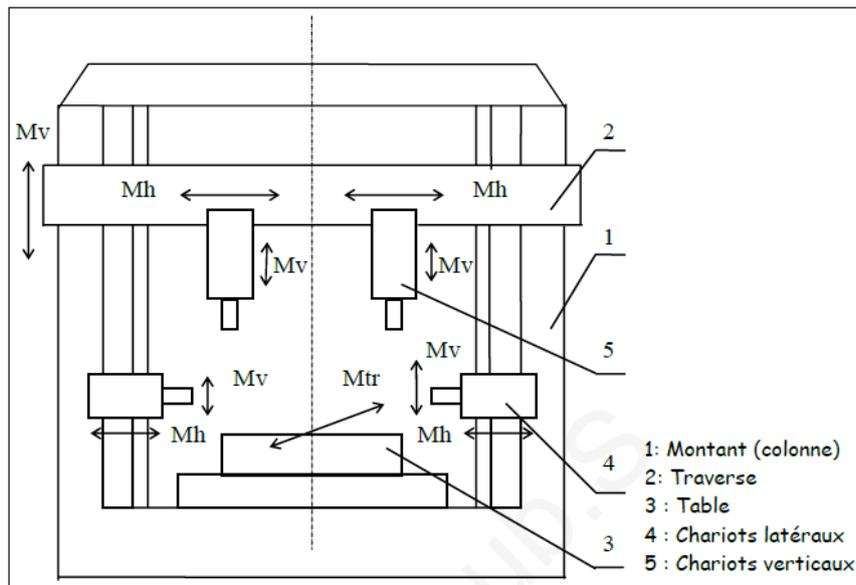


Fig II.8 Schéma d'une fraiseuse genre raboteuse

II.5 RECTIFICATION

La rectification à son origine assurait la correction et la mise à la cote des pièces déformées par les traitements thermiques. Actuellement, les machines à rectifier sont employées pour obtenir des surfaces finies et des précisions élevées. La rectification effectuée sur des surfaces planes, cylindriques et coniques (extérieures comme intérieures), ainsi que des surfaces de forme complexe tel que : les dents d'engrenages, filetages, etc... Dans un atelier de rectification, on trouve plusieurs types de rectifieuses, parmi elles : les rectifieuses planes, les rectifieuses cylindriques, les rectifieuses sans centres, les machines de super finition, les affûteuses.

II.5.1 RECTIFIEUSE 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. L'avance de la table est à commande hydraulique. La pièce est immobilisée sur la table au cours du travail grâce à l'attraction exercée par une plaque électromagnétique (Fig II.9). 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.

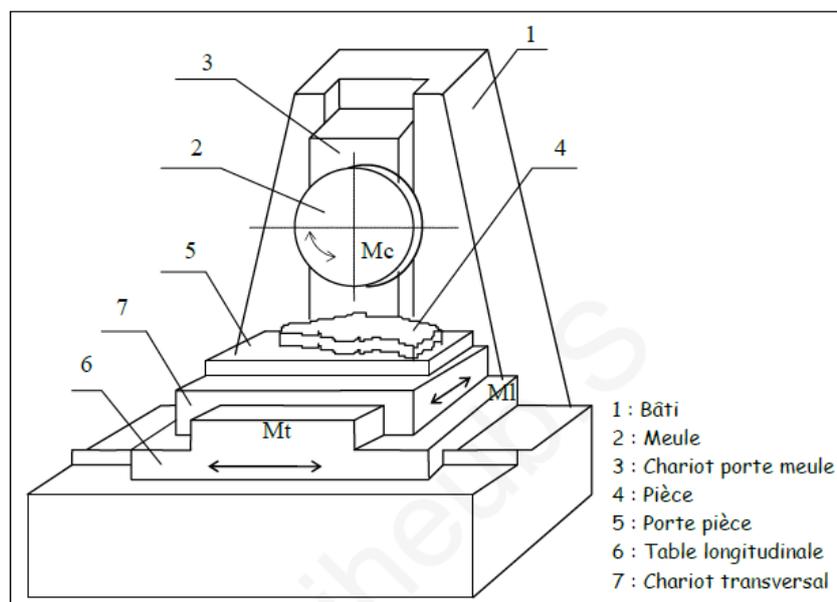


Fig II.9 Schéma d'une rectifieuse plane

II.5.2 RECTIFIEUSE CYLINDRIQUE

La construction de la rectifieuse cylindrique est plus complexe (Fig II.10). 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.

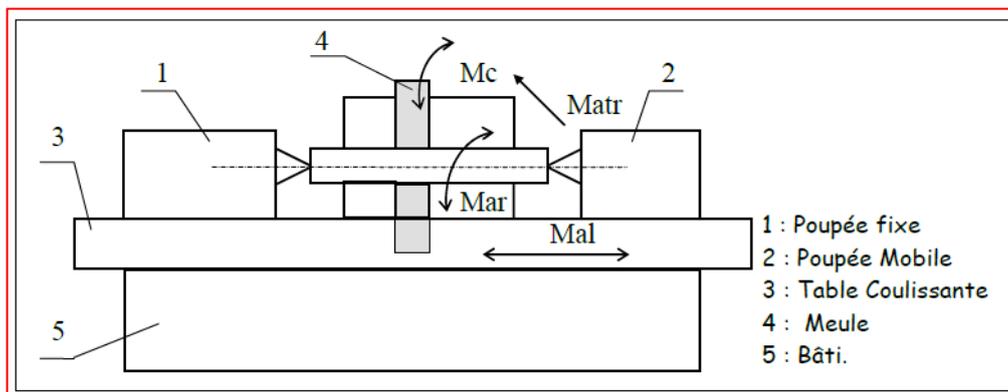


Fig II.10 Schéma d'une rectifieuse cylindrique

II.5.3 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 II.11).

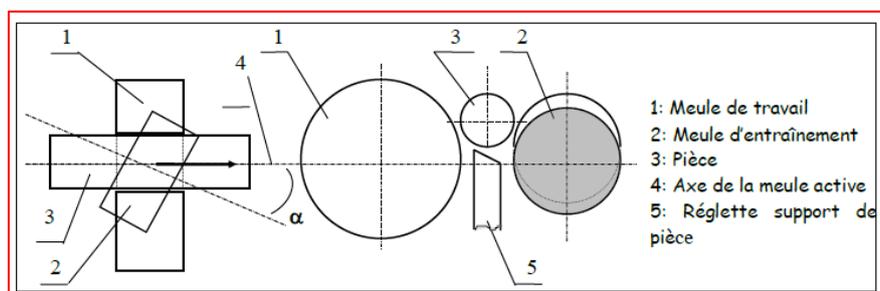


Fig II.11 Schéma d'une rectifieuse sans centres

Le principe de fonctionnement est le suivant :

La pièce à rectifier se trouve entre deux meules, prenant appui sur une réglette 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° pour la rectification ébauche, et d'un angle $\alpha = 0,5$ à $1,5^\circ$ pour la finition.

II.6 RABOTAGE

Les machines à raboter servent à usiner des surfaces planes de grandes et moyennes dimensions. Les pièces de faibles encombrements sont usinées sur des machines dites étaux limeurs.

II.6.1 RABOTEUSES

La caractéristique principale d'une raboteuse est que la pièce est fixée sur la table de la machine outil et est animée d'un mouvement rectiligne (longitudinal) alternatif. La course aller est la course active ; le retour est la course à vide (Fig II.12). L'outil est monté dans le porte-outil du chariot exécutant l'avance transversale.

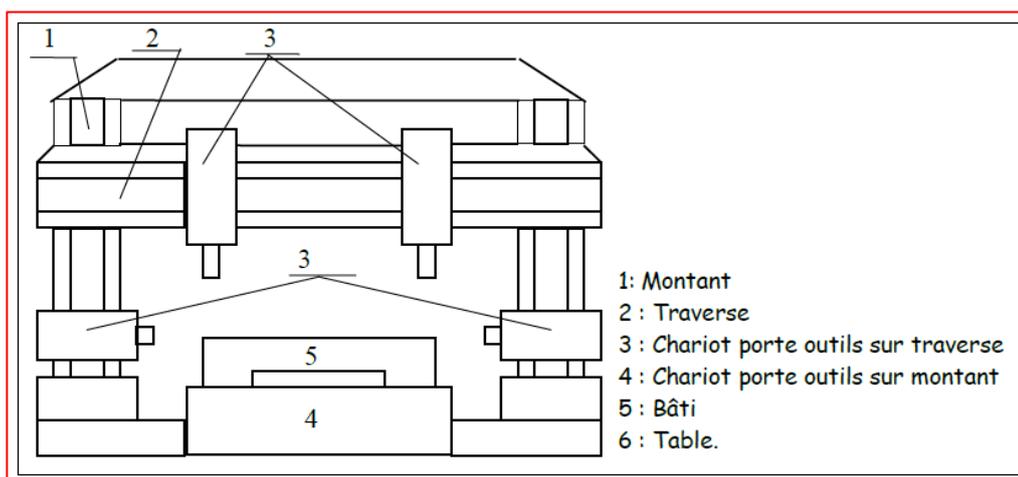


Fig II.12 Schéma d'une raboteuse

II.6.2 ETAU LIMEUR

Sur un étau limeur, c'est le coulisseau porte-outil fixé sur le chariot qui effectue le mouvement rectiligne alternatif, tandis que la table portant la pièce exécute le mouvement d'avance transversale. Ces machines sont utilisées en cas de production en petite série pour l'exécution de rainures de clavette dans les alésages, ainsi que sur de petites surfaces planes, .. Etc.

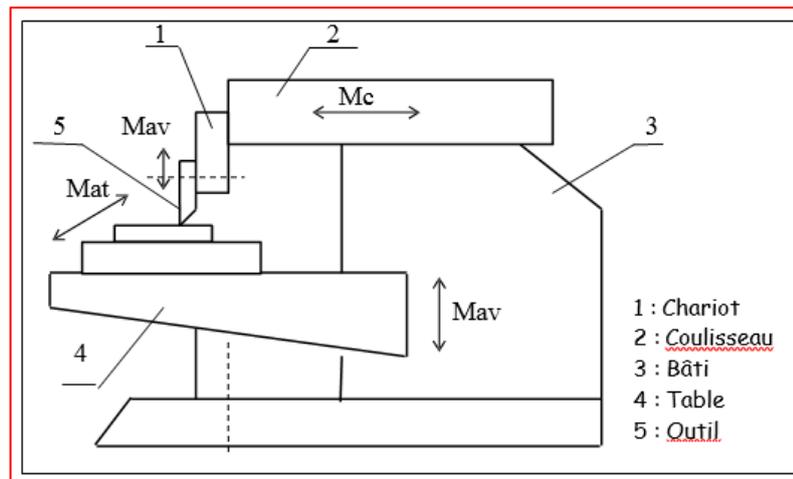


Fig II.13 Schéma d'un étau-limeur

II.6.3 MORTAISEUSES

Une machine à mortaiser présente un coulisseau vertical et une table circulaire (Fig II.14). On imprime à la table un mouvement d'avance longitudinal, transversal ou de rotation. Elles sont de même configuration que les étaux-limeurs et principalement utilisées pour la réalisation des petites cannelures pour la synchronisation des dentures de boîtes à vitesses.

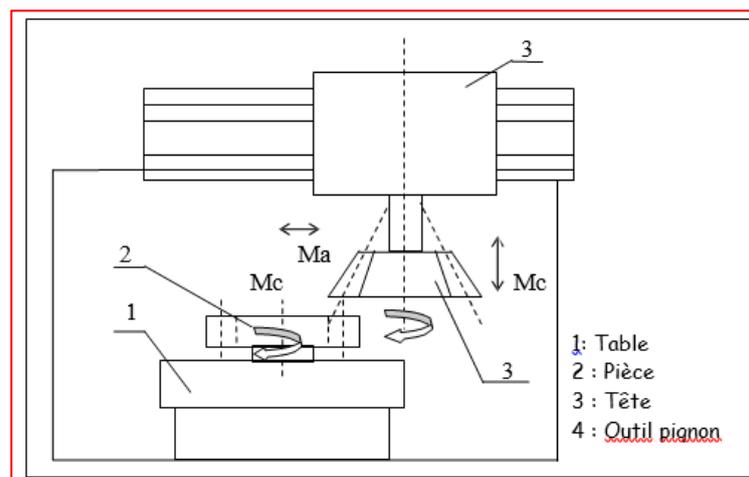


Fig II.14 Schéma d'une machine à mortaiser

II.7 TAILLAGE D'ENGRENAGES

Les machines à tailler les engrenages sont destinées à la confection de roues dentées. Il existe plusieurs types de machines à tailler les engrenages (Fig II.15).

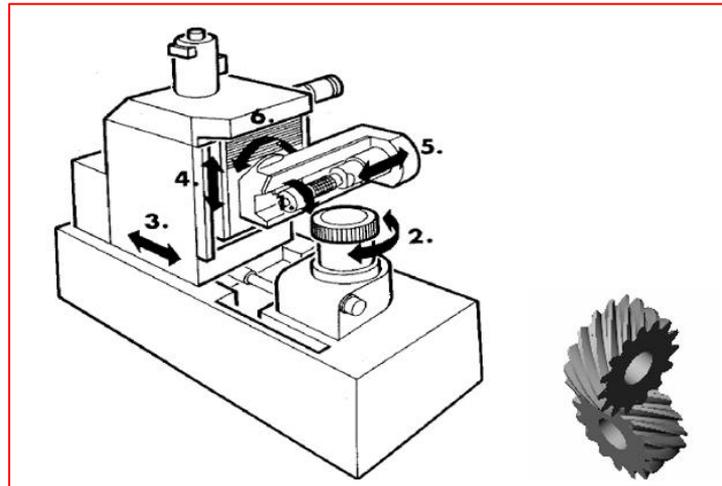


Fig II.15 Schéma d'une machine à tailler les engrenages

Ces machines sont toujours complexes à cause de la combinaison de plusieurs mouvements (très précis) simultanément. Selon le mode de fabrication des roues on utilise soit des outils pignons ou des fraise mères.

II.8 AUTRES PROCEDES D'USINAGES

- Le tronçonnage ou le débitage : scies mécaniques, les tronçonneuses, ...etc.
- Le brochage,
- Le rodage,
- Le pointage,
- L'usinage par électrochimie;
- L'usinage par électroérosion.

II.9 DEGRE D'AUTOMATISATION

En fonction du degré d'automatisation les machines-outils se divisent en :

- Machines outils ordinaires,
- Machines outils automatiques
- Machines outils semi-automatiques

II.10 DEGRE D'UNIVERSALITE

D'après le degré d'universalité, on distingue trois catégories de machines-outils :

- Machines-outils universelles

Elles peuvent être utilisées universellement. Elles sont équipées de dispositifs universels, d'outils universels et peuvent usiner des pièces de différentes formes et dimensions. On utilise ces machines pour le travail unitaire ou de petites séries. Elles ont une gamme étendue des vitesses de coupe et d'avance.

- Machines-outils spécialisées

Ce sont des machines-outils qui s'utilisent pour la production en série. Elles sont employées dans la production des pièces de formes déterminées. La gamme des vitesses et avances est réduite et leur chaîne cinématique est simplifiée.

- Machines-outils spéciales

Elles s'utilisent dans la production de grande série ou de masse et servent pour l'usinage d'un seul type de pièces.

- Précision d'usinage

On distingue des machines-outils de cinq classes différentes :

- Normales,
- Supérieures,
- Hautes,
- Très hautes,

Chaque type de machines-outils peut avoir différentes classes de précision au même temps.

II.11 PARTICULARITES DE CONSTRUCTION

Les particularités de construction des machines-outils que l'on rencontre souvent est la quantité d'outils qui travaillent simultanément et la disposition de l'axe de la broche dans l'espace.

CHAPITRE III: LES OUTILS DE COUPE

III.1 INTRODUCTION

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière à l'aide d'une machine-outil destinée à conférer à une pièce des dimensions et un état de surface (écart de forme et rugosité) situés dans un intervalle de tolérance donné (Fig III.1).



Fig III.1 Principe de l'usinage

L'enlèvement de matière est obtenu par une action mécanique de compression jusqu'à cisaillement mettant en œuvre un outil coupant en contact avec la pièce à usiner (Fig III.2), où le phénomène de coupe ne peut être obtenu que si l'outil est plus dur que la pièce.

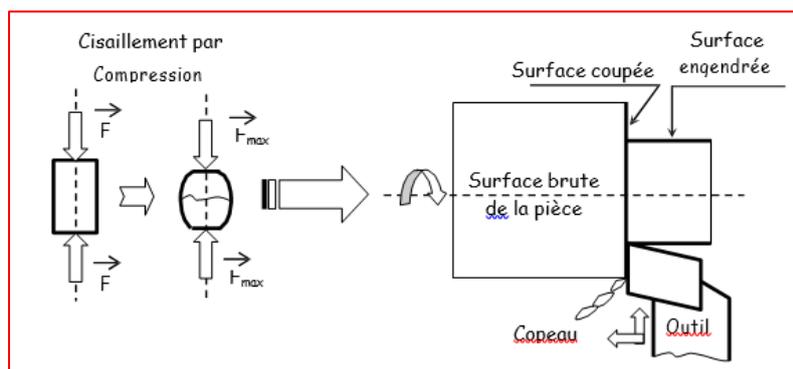


Fig III.2 Enlèvement de matière

Pour cela, les moyens d'obtention des pièces sont très variés et l'on peut avoir à produire des pièces par quantité plus ou moins grandes à savoir:

- Production unitaire : 1 à 10 pièces
- Production en série :
 - * Petite série : 10 à 200 pièces
 - * Moyenne série : 200 à 1000 pièces
 - * Grande série : 1000 à 5000 pièces
- Production de masse : plus de 5000 pièces
- Production continue en chaîne : lorsque les postes de travail sont occupés en permanence pour la même pièce.

Dans cette optique, les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de répondre aux exigences industrielles imposées, qu'elles soient économiques ou écologiques,etc. Aujourd'hui, l'ingénieur de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions tel que :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-elle en terme de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Afin de réaliser rapidement des pièces mécaniques avec la qualité demandée et à moindre coût.

III.2 DEFINITION

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement sous forme de copeaux. Il existe une grande variété d'outils (Fig III.3) : des outils mono-coupe (tournage), et multi-coupe (fraisage, perçage, ect..).

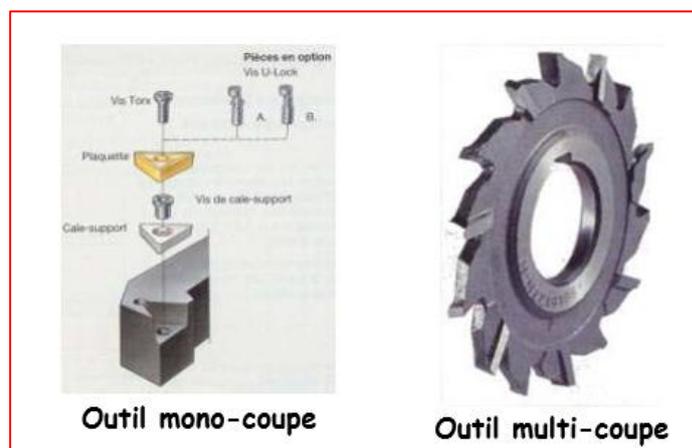


Fig III.3 Exemple d'outils

Quelque soit leurs destinations ainsi que leurs différents aspects extérieurs, n'importe quel outil comporte une partie active, c'est à dire celle qui enlève directement la matière sous forme de copeau et un corps d'outil qui porte les éléments composants l'outil. Les outils de coupe présentent alors deux parties fonctionnelles distinctes :

- **La partie active** qui constitue l'**arête coupante** et qui doit obligatoirement subir l'opération **d'affûtage**.
- **Le corps d'outil** dont le rôle est de résister sans déformation excessive à l'effort de coupe ainsi que pour la fixation de l'outil sur la machine.

La fabrication des outils est donc liée à la nature de ces parties fonctionnelles. Pour cela, les matériaux utilisés pour la fabrication des outils ont les propriétés suivantes :

- Stabilité thermique ;
- Stabilité contre l'usure.

III.2.1 STABILITE THERMIQUE

Par définition : la stabilité thermique est la capacité de l'outil lui permettant de couper les métaux à haute température.

III.2.2 STABILITE CONTRE L'USURE

La stabilité contre l'usure c'est la capacité de résister à l'usure par frottement pendant l'enlèvement de la matière. A cet effet, tous les matériaux employés pour la fabrication des outils de coupe peuvent être rangé dans les catégories suivantes:

- Aciers au carbone.
- Aciers alliés.
- Aciers à coupe rapide.
- Carbures métalliques.
- Céramiques.
- CBN
- Diamants.
- Abrasifs.

III.2.3 ACIERS AU CARBONE

Ces aciers ont une teneur en carbone comprise entre (0,6 et 1,3%). La dureté varie entre (58 et 63) HRC. La vitesse de coupe varie entre : $V_{c1} = (10 \text{ à } 15) \text{ [m/min]}$. Les nuances les plus utilisés sont : XC 65 ; XC 85 ; XC 95.

La vitesse de coupe V_c , est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce (Fig III.4). Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation 'N' et du diamètre 'D' de l'élément en rotation.

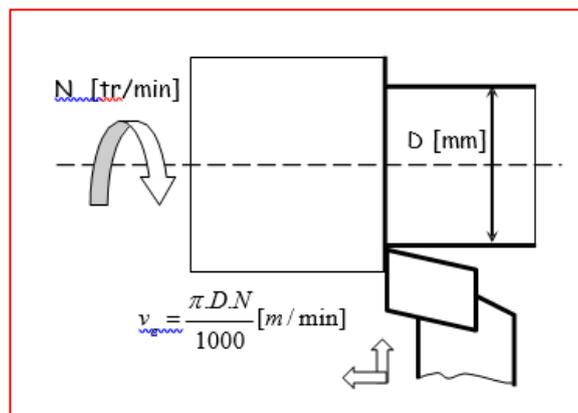


Fig III.4 Eléments d'un outil de coupe

III.2.4 ACIERS ALLIES

Ces types d'aciers sont utilisés pour la fabrication des limes, tarauds, forets etc. l'acier allié est obtenu par l'ajout d'éléments d'alliage (Chrome, Tungstène, Molybdène, Vanadium,) à l'acier au carbone. La dureté varie entre (60 à 62) HRC. La vitesse de coupe varie entre : $V_{c2} = (1,2 \text{ à } 1,4) V_{c1} \text{ [m/min]}$. Les nuances les plus utilisées sont : Z 35 NCD 22 ; 36 CD 4.

III.2.5 ACIERS A COUPE RAPIDE

Ils sont obtenus avec un taux de tungstène et de chrome atteignent respectivement (8,5 à 19%) et (3,5 à 4,6%), La dureté de ces aciers après la trempe varie entre (62 à 65 HRC). Les vitesses de coupe des outils en aciers à coupe rapide sont trois fois plus grandes que celle des outils en acier au carbone $V_{c3} = 3 \cdot V_{c1}$.

$V_{c3} = (100 \text{ à } 120) \text{ [m/min]}$ pour l'acier
 $V_{c3} = (150 \text{ à } 180) \text{ [m/min]}$ pour la fonte

Les désignations des aciers à coupe rapide sont:

- A.R.O. : Acier Rapide Ordinaire ;
- A.R.S.: Acier Rapide Supérieur ;
- A.R.E.S. : Acier Rapide Extra Supérieur.

La composition chimique est :

ACIER	% C	% Cr	% W	% V	% Mo	% Co
A.R.O	0,7	4	1,5	1,5	0,75	---
A.R.S	0,8	4	6,5	2	6,5	---
A.R.E.S	0,8	5	20	2	2	10

III.2.6 CARBURES METALLIQUES

Les outils à base de carbure métallique peuvent être classé en trois catégories.

A\ Carbure de tungstène (mono-carbure) ; composé principalement de grains de carbure de tungstène aggloméré par du cobalt : 8 % de Co et 92 % WC.

B\ Carbure de titane-tungstène (carbure double) : 30 % de TiC ; 4 % Co ; 66 % WC.

C\ Carbure de titane – tantale - tungstène (carbure triple) : 30 % de TiC et TaC ; 12 % Co ; reste 58 % WC.

Les mono-carbures sont efficaces pour l'usinage de la fonte et des alliages non ferreux comparativement aux carbures doubles et triples qui sont efficaces principalement pour l'usinage des aciers. La dureté des outils en carbure métallique dépend de la composition chimique et varie de (88 à 92 HRC). Ces matériaux mêmes portés à (800 et 900 °C) gardent une dureté relativement élevée.

III.2.7 CERAMIQUES

Les céramiques ont une résistance à la compression suffisante (jusqu'à 500 Kgf/mm²), une grande dureté (89 à 95) HRc, avec une stabilité thermique élevée (1200°C) et une résistance à l'usure remarquable.

III.2.8 CBN (NITRURE DE BORE CUBIQUE)

Après le diamant, le CBN est le matériau le plus dur connu de l'homme. Toutefois, le diamant offre l'inconvénient de s'oxyder sous les températures élevées habituellement générées lors de l'usinage des matériaux ferreux, voisines de 700°C pour les aciers durs. C'est pourquoi son emploi est limité à l'usinage des matériaux non ferreux. Par contre, la coupe des aciers traités s'avère possible avec le CBN car il présente des caractéristiques intéressantes.

Il présente également une mauvaise conductibilité thermique mais on observe que la chaleur de coupe est évacuée par le copeau dans une forte proportion (90% environ). L'outil CBN s'échauffe assez peu.

III.2.9 DIAMANTS

Les diamants sont des métaux très durs. Ils ont un faible coefficient de frottement et une faible aptitude à l'adhésion (collage, soudage aux métaux). Une tenue à la chaleur élevée, une résistance à l'usure importante.

III.3 GEOMETRIE DES OUTILS DE COUPE

Les principaux éléments des différents outils de coupe sont semblables (Fig III.5). Un outil de coupe peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés. Généralement, dans un outil de coupe on trouve les éléments suivants

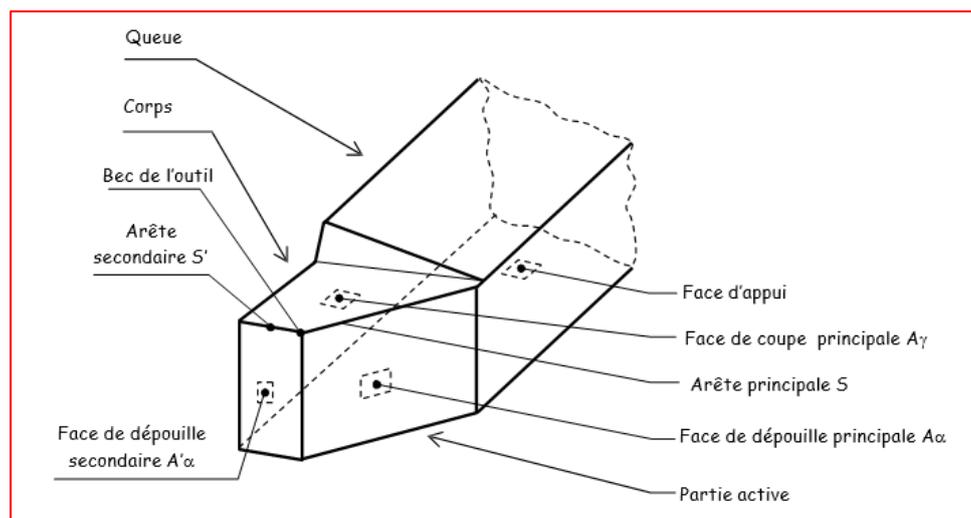


Fig III.5 Eléments d'un outil de coupe

III.3.1 DESCRIPTION DES ELEMENTS (Fig III.5)

III.3.2 LE CORPS D'OUTIL

C'est la partie de l'outil qui porte les éléments composants l'outil (éléments coupants où plaquettes) et qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine.

III.3.3 LA PARTIE ACTIVE DE L'OUTIL

C'est la partie qui intervienne directement dans l'opération de coupe. Elle est composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arrêtes tranchantes.

- La face de coupe : $A\gamma$

C'est la surface sur laquelle glisse le copeau lors de la coupe

- La face de dépouille : $A\alpha$

C'est la surface devant laquelle passe la surface coupée par l'outil. On distingue la face en dépouille principale et la face en dépouille secondaire. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arête tranchante principale.

- L'arête tranchante principale : S

C'est l'arête tranchante destinée à l'enlèvement de la matière. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille principale $A\alpha$.

- L'arête tranchante secondaire : S'

C'est une arête qui commence à l'extrémité de l'arête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe $A\gamma$ et de la face en dépouille secondaire $A\alpha'$. NB : Certains outils possèdent plusieurs arêtes secondaires.

- Le Bec d'outil

C'est la partie où se rejoignent l'arête principale et l'arête secondaire. Cette partie peut être droite, arrondie, où vive.

III.3.4 LES PLANS DE L'OUTIL (FIG III.6)

- Plans de l'outil en main

C'est le plan de référence de l'outil (plan **Pr**) : plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil (pour un outil classique).

- Plan d'arête de l'outil, **Ps** : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil **Pr**.
- Plan de travail conventionnel, **Pf** : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil **Pr**, au point considéré de l'arête, et parallèle à la « direction supposée d'avance » de l'outil.
- Plan vers l'arrière de l'outil, **Pp** : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil **Pr** et au plan de travail conventionnel **Pf**, au point considéré de l'arête.

- Plans de l'outil en travail

- Plan de référence en travail, **Pre** : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.
- Plan d'arête en travail, **Pse** : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre**. Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe.
- Plan de travail, **Pfe** : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre**.
- Plan vers l'arrière en travail, **Ppe** : plan perpendiculaire au plan de référence en travail **Pre** et au plan de travail **Pfe**, au point considéré de l'arête.

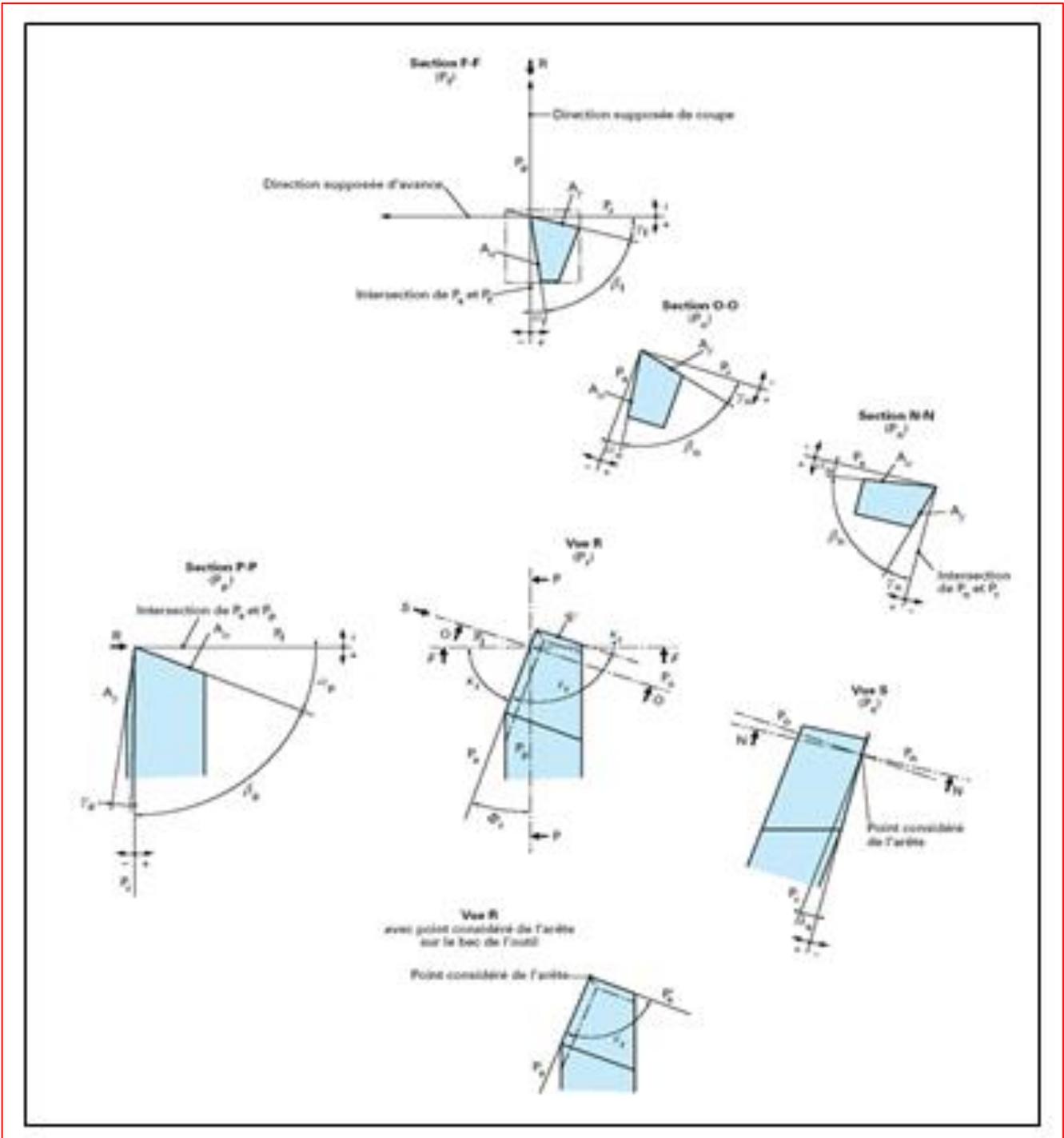


Fig III.6 Plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit

III.3.5 ANGLES DE L'OUTIL

- Angles d'arête de l'outil en main

- Angle de direction d'arête de l'outil k_r : angle aigu mesuré dans le plan de référence P_r entre le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f (Fig III.7). Il est mesuré de P_f vers P_s et dans le sens où la trace de P_s dans P_r s'éloigne du bec de l'outil.

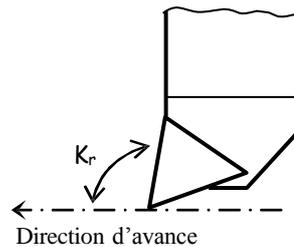


Fig III.7 Angle de direction d'arrêt de l'outil

- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ (Fig III.8) : angle aigu mesuré dans le plan d'arête P_s , entre l'arête et le plan de référence P_r . Il est positif lorsqu'en s'éloignant de la pointe de l'outil de l'arête se trouve en dessous du plan P_r .

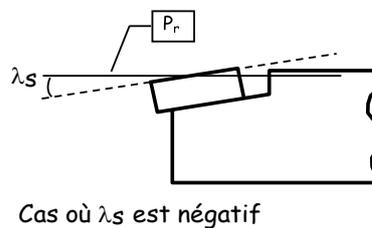


Fig III.8 Angle d'inclinaison d'arête

- Angle de pointe de l'outil ϵ_r : C'est l'angle mesuré dans le plans P_r , entre le plan d'arête P_s et le plan d'arête secondaire P_s' .

- Angle de direction d'arête secondaire de l'outil k_r : C'est l'angle, mesuré dans le plan P_r , entre le plan conventionnel de travail P_f et la projection de l'arête secondaire dans le plan de référence de l'outil P_r .

Les angles de direction d'arête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arête secondaire de l'outil sont liés par la relation : $k_r + k_r' + \epsilon_r = 180^\circ$

- Angle d'arrête de l'outil en travail

- Angle de direction d'arête en travail k_{re} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pre**, entre les plans **Pre** et **Pse**. La convention de sens adoptée pour k_{re} est la même que pour l'angle k_r .

- Angle d'inclinaison d'arête en travail λ_{se} : c'est l'angle mesuré dans le plan **Pse**, entre l'arête et le plan **Pre**. La convention de signe pour l'angle λ_{se} est la même que pour l'angle λ_s .

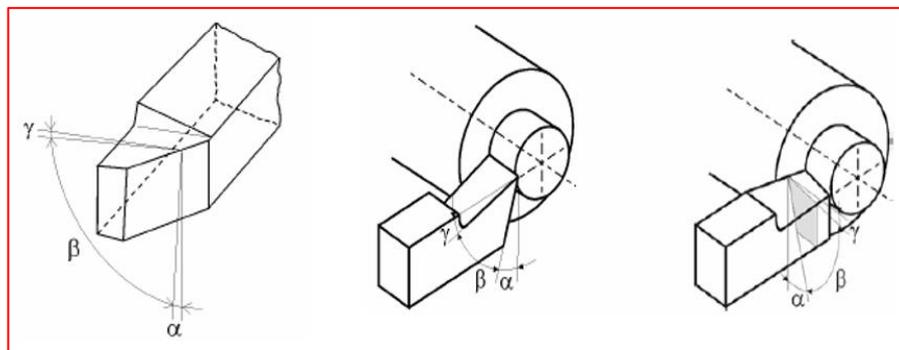
- Angles des faces

La position des faces de coupe et de dépouille est définie dans des plans de sections particuliers qui passent tous par un point considéré de l'arête (Fig III.9). Lorsqu'on fait une section de l'outil par ces plans et quelque soit le plan considéré pour définir la section on trouve :

- Angle aigu entre la face de dépouille **A α** et le plan d'arête **Ps** (**Pse**).

- Angle de taillant **β** : angle aigu entre la face de coupe **A γ** et la face de dépouille **A α** .

- Angle de coupe **γ** : angle aigu entre la face de coupe **A γ** et le plan de référence **Pr** (**Pre**).



Outil en main

Outil en travail

Fig III.9 Angles des faces

Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou de l'outil en travail, ces trois angles sont liés par la relation : $(\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ)$

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants:

- **Po** (**Poe**) : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence **Pr** (**Pre**) et au plan d'arête **Ps** (**Pse**), au point considéré de l'arête (Fig III.10) ;

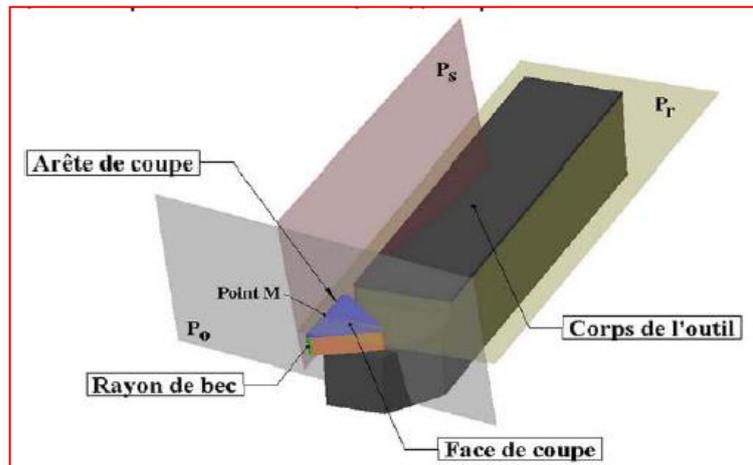


Fig III.10 Définition basique d'un outil en tournage

- **Pn** : plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ($Pn = P_{ne}$) ;
- **Pf** : plan de travail conventionnel (plan de travail P_{fe}) ;
- **Pp** : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail P_{pe}).

III.3.6 ORIENTATION DE L'ARETE

- **Outil à droite "R" (Right)** (Fig III.11.a)

L'outil étant tenu verticalement, la pointe en bas, l'observateur regardant la face de coupe ; l'outil est "à droite" si l'arête est orientée vers la droite. Néanmoins, un outil à arête "à droite" travaille "à gauche", sens du mouvement d'avance.

- **Outil à gauche "L" (Left)** (Fig III.11.b)

L'outil étant tenu verticalement, la pointe en bas, l'observateur regardant la face de coupe ; l'outil est "à gauche" si l'arête est orientée vers la gauche. Néanmoins, un outil à arête "à gauche" travaille "à droite", sens du mouvement d'avance.

- **Outil neutre (Neutral)** (Fig III.11.c)

La partie active de cet outil est symétrique par rapport à l'axe du corps. Il travaille indifféremment à droite ou à gauche ; c'est le cas d'un outil à deux arêtes, tel que l'outil à retoucher. Ou bien l'avance est parallèle au corps de l'outil, c'est le cas d'un outil à une arête telle celle de l'outil pelle.

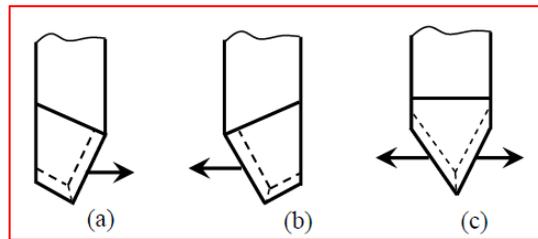


Fig III.11 Orientation de l'arête coupante

III.4 CHOIX DU MATERIAU DES PLAQUETTES (SANDVICK)

<p>GC4015 Finition et ébauche légère de l'acier et l'acier coulé. Grande résistance à l'usure et bonne résistance à la déformation plastique, autorisant des taux d'enlèvement de matière élevés.</p> <p>GC4025 Ébauche légère et moyenne de l'acier et l'acier coulé. Vitesses de coupe moyennes à élevées pour des avances relativement élevées.</p> <p>GC4035 Ébauche légère à moyenne de l'acier et l'acier coulé, en conditions défavorables. Vitesses de coupe et avances moyennes.</p>	<p>CT530 Nuance cermet pour fraisage léger. Fraisage à sec et sous arrosage. Haute résistance à la déformation plastique et à la formation d'arêtes rapportées.</p> <p>GC4030 Fraisage finition à ébauche, à sec ou sous arrosage, de matières jusqu'à 300 HB. Vitesses de coupe moyennes à élevées.</p> <p>GC235 Fraisage semi-finition à ébauche. Convient pour opérations exigeant une grande ténacité. Vitesses de coupe modérées.</p>	<p>GC1020 Choix de base comme plaquette centrale. Excellente également à la périphérie avec des vitesses de coupe faibles à modérées.</p> <p>GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Vitesses de coupe faibles à modérées.</p> <p>GC4025 Choix de base pour les plaquettes périphériques avec des vitesses de coupe élevées. Bonne résistance à l'usure et sécurité d'arête dans les aciers à teneur en carbone faible à moyenne.</p>
<p>GC2015 Finition et ébauche légère de l'acier inoxydable en conditions relativement favorables. Moindre tendance à la formation d'arêtes rapportées. Vitesses de coupe moyennes à élevées.</p> <p>GC2025 Choix de base pour l'acier inoxydable. Semi-finition à ébauche légère d'acier inoxydable austénitique ou duplex. Vitesses de coupe moyennes. Bonne sécurité d'arête.</p> <p>GC2035 Ébauche de l'acier inoxydable en conditions favorables avec des vitesses de coupe inférieures à 130 m/min.</p>	<p>CT530 Nuance cermet pour fraisage finition. Haute résistance à la déformation plastique et à la formation d'arêtes rapportées. Plage étendue de vitesses de coupe.</p> <p>GC235 Fraisage semi-finition à ébauche en conditions instables. Vitesses de coupe moyennes à faibles.</p> <p>GC1025 Fraisage de finition de l'acier inoxydable. Choix de base pour matières collantes et écrouissables.</p>	<p>GC1020 Excellente ténacité d'arête et résistance à la formation d'arêtes rapportées. Pour plaquettes périphériques et centrales. Convient pour les alliages réfractaires.</p> <p>GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Mêmes caractéristiques que GC1020.</p>
<p>GC3005 Optimisation pour l'usinage de la fonte nodulaire.</p> <p>GC3015 Choix de base pour la semi-finition et l'ébauche. Débit important d'enlèvement de métal. Autorise des vitesses de coupe élevées.</p> <p>GC3025 Convient pour de mauvaises conditions de stabilité avec des vitesses de coupe modérées.</p>	<p>GC3020 Fraisage semi-finition à ébauche, surtout à sec. Vitesses de coupe moyennes à élevées.</p> <p>GC3040 Pour opérations exigeant une bonne ténacité, avec des vitesses de coupe faibles à moyennes. Fraisage sous arrosage.</p> <p>H13A Choix de base pour le fraisage de la fonte nodulaire ferritique. Fraisage léger à moyen. Vitesses de coupe modérées.</p>	<p>GC1020 Choix de base pour les opérations exigeant une grande ténacité. Très bonne nuance de plaquette centrale.</p> <p>GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Mêmes caractéristiques que GC1020.</p> <p>GC4025 Choix de base comme plaquette périphérique pour la fonte. Haute sécurité d'arête et bonne résistance à l'usure. Vitesses de coupe jusqu'à 300 m/min.</p>

III.5 CONTROLE DE LA POSITION DE LA PIECE PAR RAPPORT A L'OUTIL

III.5.1 LES MOYENS DE CONTROLE

Le moyen le plus simple est le vernier : tambour gradué sur lequel on lit les déplacements de l'outil. C'est l'opérateur qui contrôle la position de l'outil, et qui arrête l'avance de l'outil lorsque la position est atteinte. Ces machines s'appellent les machines conventionnelles. Les pièces fabriquées sont limitées à des formes simple. Ces machines sont de plus en plus rare dans l'industrie, car elles sont peu productives. On les trouve dans les ateliers de réparation.

La machine la plus courante est la machine à commande numérique. Un codeur permet de connaître la position de l'outil, et une boucle d'asservissement permet de contrôler l'alimentation des moteurs d'avance pour atteindre la position désirée. Ces machines nécessitent donc une programmation pour être mise en œuvre, mais la programmation devient de plus en plus transparente grâce aux logiciels de FAO (fabrication assistée par ordinateur) qui génèrent le programme à partir du fichier CAO de la pièce, ou grâce à une nouvelle génération de machine dites « par apprentissage ».

CHAPITRE IV: LA COUPE DES METAUX

IV.1 PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante (Fig IV.1):

- Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau ;
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine-outil.

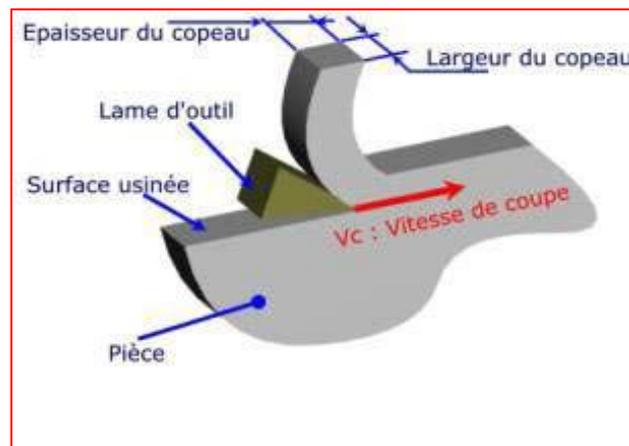


Fig IV.1 Configuration de la coupe

Un examen plus approfondi du mécanisme de la coupe nous conduit à observer qu'il procède grâce à trois mouvements principaux perpendiculaires entre eux (Fig IV.2).

- **Mouvement de coupe « M_c »** : C'est un mouvement qui participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail.
- **Mouvement d'avance « M_a »** : C'est le mouvement qui a pour but de décaler latéralement une quantité a ; dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.
- **Mouvement de pénétration « M_p »** : C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe ; où, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, comme le montre la figure suivante :

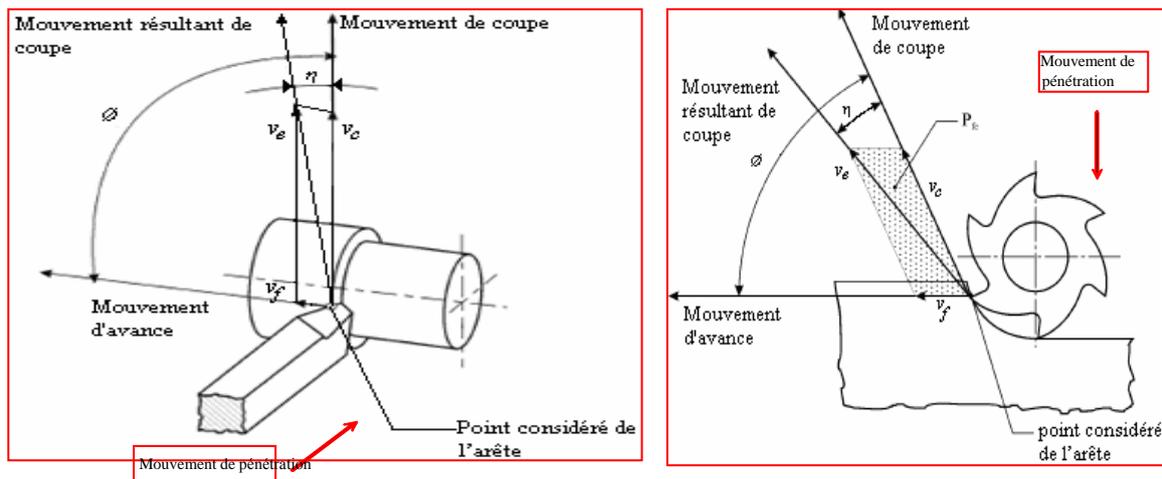


Fig IV.2 Les mouvements de coupe.

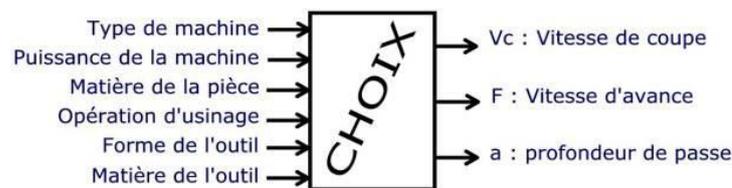


Fig IV.3 Choix des paramètres de coupe.

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser. Donc il faut choisir entre tournage, fraisage ou perçage.

Pour ce qui est de la puissance de la machine, (La puissance de la machine influe sur les performances) Dans le cas de l'usinage, il y a deux grands cas de figure :

- **Usinage en ébauche** : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps, l'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux. Mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut 'caler' ou la pièce peut voler.
- **Usinage en finition** : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes ... Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

Pour la matière il est évident que les efforts de coupe ne sont pas les mêmes si vous usinez une pièce en polystyrène ou en acier. Donc la matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine (entre autre).

En ce qui concerne l'**Opération d'usinage** c'est la même idée que pour le type de machine. Idem pour la Forme de l'outil. Cependant, **la matière de l'outil** influe sur l'usure de l'outil et sa durée de vie du fait que c'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse. Tous ces critères sont intimement liés et étant donné que l'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela, il faut déterminer certains paramètres spécifiques :

- La vitesse de coupe : **Vc**
- La vitesse d'avance : **F (ou Vf)**
- La profondeur de passe : **a**

IV.2 LES PARAMETRES DE COUPE

Les paramètres de la coupe (Fig IV.4) sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques).

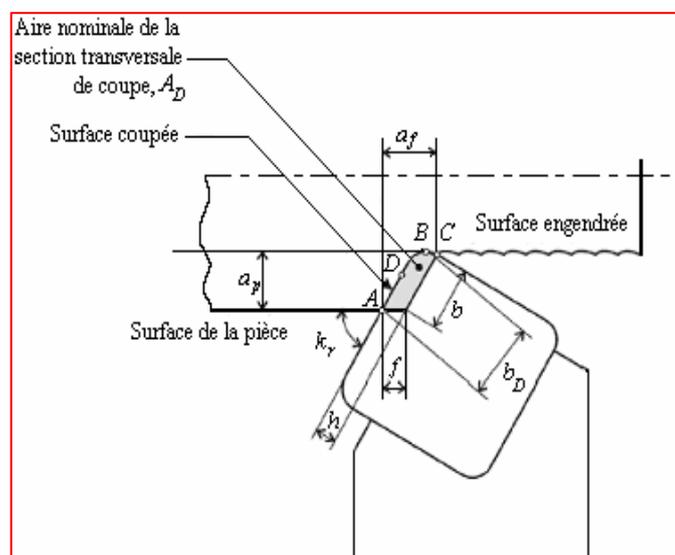


Fig IV.4 Dimensions de coupe dans le cas de tournage.

La détermination des paramètres de coupe à une grande importance dans la production industrielle, car a titre d'exemple des régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la

pièce à usiner, et élèvent le prix de revient, aussi bien des régimes élevés ne sont pas avantageux non plus, parce que l'outil s'use rapidement, ce qui nous oblige à le changer très souvent, donc on aura toujours le même résultat que précédemment (augmentation du prix de revient de la pièce). Pour cela, les paramètres adoptés doivent être optimums pour assurer un prix de revient minimum de la pièce avec une plus grande productivité.

IV.2.1 VITESSE DE COUPE « V_c »

C'est le déplacement d'un point de l'arête tranchante de l'outil par rapport à la surface de coupe en une unité de temps.

IV.2.1.1 VITESSE LINEAIRE D'UN POINT EN ROTATION

On l'évalue en parcours circconférentiel, c'est à dire en longueur de circonférence de la pièce parcourue. En désignant par D le diamètre du cercle décrit en millimètres (mm), par N la vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min) et par V_c la vitesse linéaire en mètre par minute (m/min), on aura :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad [m/min]$$

- Exemple de tournage: le mouvement de coupe anime principalement la pièce (pièce tournante).

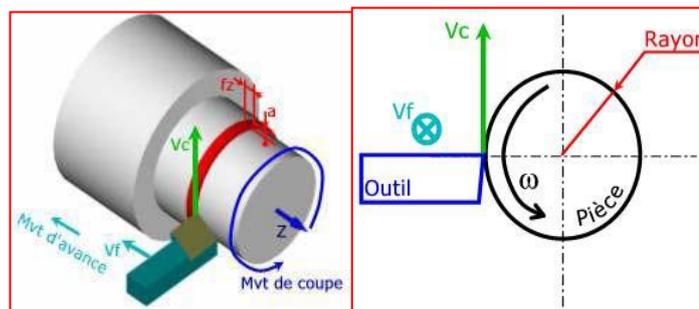


Fig IV.5 Vitesse de coupe en tournage.

On en déduit la vitesse de coupe V_c , qui déterminera la vitesse de rotation de la pièce que l'on doit régler sur machine.

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad [[tr/min]]$$

Le diamètre « D » correspond à la position de la pointe de l'outil, ce qui engendre deux cas de figures :

- On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre
 $D = \text{diamètre du cylindre}$
 - On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan
- Exemple de fraisage : le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante), la même formulation est applicable ; cependant le diamètre « D » correspond au diamètre de la fraise.

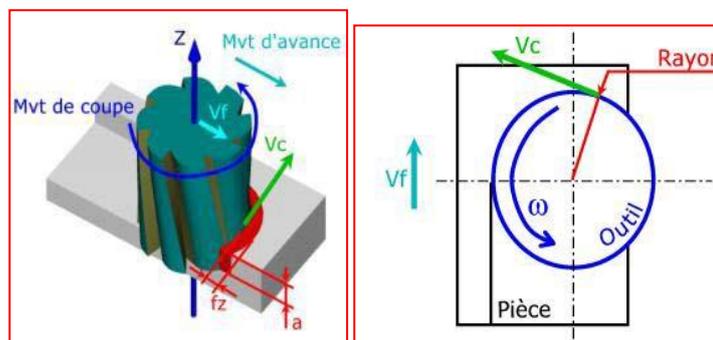


Fig IV.6 Vitesse de coupe en fraisage.

IV.2.1.2 VITESSE DE COUPE DANS LE CAS DU MOUVEMENT DE COUPE RECTILIGNE

Le mouvement de coupe rectiligne est généralement alternatif, car il ne peut être continu. A chaque course de travail, la vitesse augmente depuis zéro jusqu'à la valeur maximale. Ce sont les longueurs d'échappée « l » de l'outil (Fig IV.7) qui sont réservées à cette augmentation.

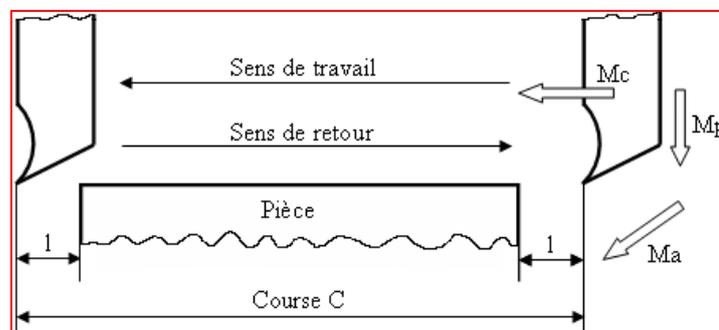


Fig IV.7 Vitesse de coupe en en rabotage

On admet alors que la vitesse est constante pendant toute la course de travail C et qu'elle correspond à la vitesse moyenne. En mouvement alternatif (rabotage par exemple), un battement comprend une course de travail (détachement du copeau) et une course de retour (à vide). On admet que la course travail et la course retour sont effectuées dans des temps égaux. Le nombre de battements par minute est désigné par N [Bat/min] et la course C par [mm], la longueur de travail parcourue par l'outil sera :

$$e = C \times N \text{ [mm/min]}$$

Vu que la course de travail est égale à la course retour et que les deux courses sont effectuées dans des temps égaux, d'où $t = 1/2$. Ce qui nous donne une vitesse de coupe :

$$V_c = e / t = 2 \times C \times N \times 10^{-3} \text{ [m/min]}$$

IV.2.2 LA VITESSE D'AVANCE V_f ET AVANCE PAR TOUR f

La vitesse d'avance V_f , est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce (Fig IV.8). Elle est exprimée soit en [mm/mn] soit en [mm/tour].

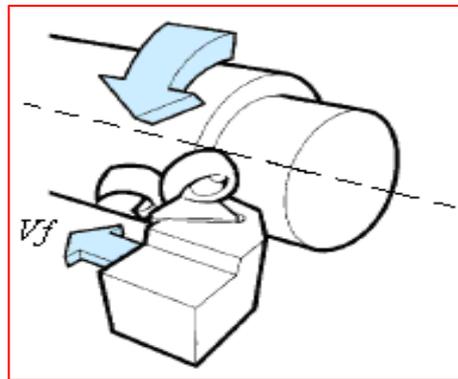


Fig IV.8 Vitesse d'avance V_f

L'avance notée f (Fig IV.9), correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

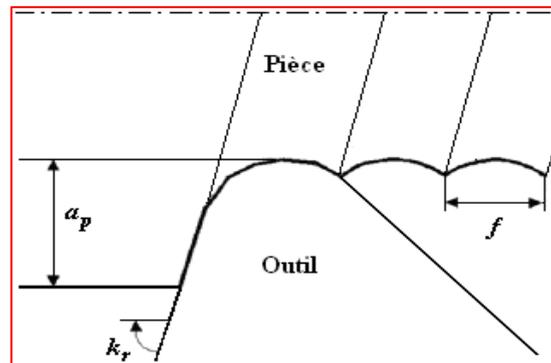


Fig IV.9 L'avance f dans le cas de tournage.

IV.2.2.1 LA VITESSE D'AVANCE V_f EN TOURNAGE ET FRAISAGE

Dans le cas de tournage la vitesse d'avance V_f [mm/min] est donnée par la formule suivante :

$$V_f = f_z \times N \text{ [mm/min]}$$

f_z en mm/(tr.dent) correspond à la capacité de coupe de l'arête coupante pour une rotation de 1 tour de la pièce. En d'autre terme, c'est la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

En fraisage la vitesse d'avance V_f [mm/min] est égale à :

$$V_f = z \times f_z \times N \text{ [mm/min]}$$

Où z est le nombre de dents de la fraise, f_z en mm/(tr.dent) correspond à la distance que la dent va parcourir à chaque tour de la fraise.

NB : Sur une fraise il peut y avoir plusieurs dents, donc plusieurs arêtes de coupe. On prend donc en compte le nombre de dents « z » dans la formulation de la vitesse d'avance.

IV.2.2.2 LES TYPES D'AVANCES

On distingue trois sortes d'avance (Fig IV.10) :

a) Avance longitudinale : On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

b) Avance transversale : On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

b) Avance oblique : On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

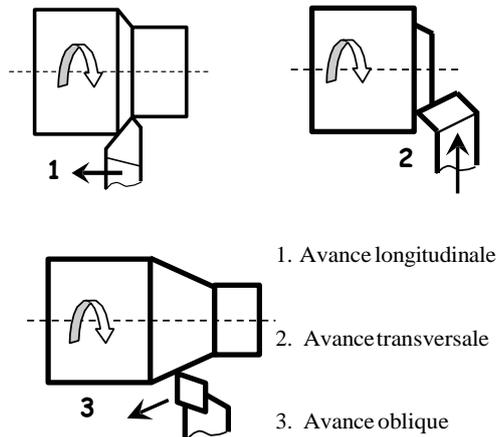


Fig IV.10 Les types d'avances

L'avance peut être désignée par :

- Avance par tour " f_{tr} "
- Avance par battement " f_{bat} "
- Avance par dent " f_z "
- Avance par minute " f_{min} "

Elle s'exprime respectivement par :

- Millimètre par tour "**mm/tr**", lors du tournage, fraisage, perçage,etc.
- Millimètre par battement "**mm/bat**", lors du rabotage, mortaisage,etc.
- Millimètre par dent "**mm/dent**", lors du fraisage, brochage, ...etc.
- Millimètre par minute "**mm/min**", dans tous les cas d'usinage.

L'avance représente une donnée clé pour la qualité de la surface usinée, elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

IV.2.3 PROFONDEUR DE PASSE « a »

La profondeur de passe (Fig IV.11) notée a en [mm], correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

- Les différents types de profondeurs :

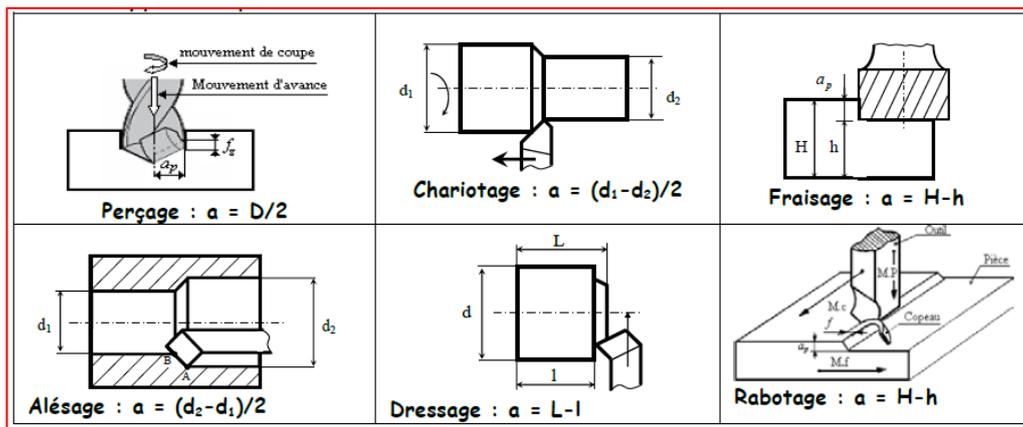


Fig IV.11 Profondeur de passe

IV.2.4 TEMPS DE FABRICATION

- **TEMPS MANUELS « Tm »**

C'est la durée d'un travail physique ou mental dépendant uniquement de l'opérateur ; il est exprimé en centième de minutes [Cmin].

- **TEMPS TECHNICO-MANUELS « Ttm »**

C'est la durée pendant laquelle le travail dépend des actions composantes et simultanées de l'opérateur et de la machine.

- **TEMPS MASQUE « Tz »**

C'est la durée d'un travail humain ou machine accompli pendant l'exécution d'un travail prédominant.

- **TEMPS SERIE « TS »**

C'est la durée des opérations nécessaires pour équiper le poste (mise en place du montage porte-pièce, montage et réglage des outils), ainsi que celles intervenant lors du montage du poste de travail.

- TEMPS TECHNOLOGIQUE « T_t »

C'est la durée pendant laquelle le travail effectué dépend uniquement des moyens matériels.

IV.2.5 EFFORTS DE COUPE

De tous les procédés d'usinage, la coupe est la méthode la plus fréquemment utilisée pour le façonnage des matériaux. C'est là une raison suffisante d'étudier et d'optimiser en permanence ce processus. Les économies même les plus réduites, réalisées par exemple en termes de durée d'usinage, sont d'une importance essentielle dans l'optique de la rentabilité de la production en série. Les mesures de l'effort de coupe contribuent de manière décisive à l'étude de ces processus et à leur évaluation. Dans ce cadre deux appareils de mesure sont utilisés :

- **Dynamomètre statique** : utilisé pour mesure des 3 composantes de force, le montage de l'outil de coupe sur l'appareil de mesure permet la mesure directe des forces agissant sur celui-ci pendant le tournage. Pour étudier les processus de fraisage et de rectification, la pièce à étudier est fixée sur la plaque supérieure du dynamomètre (Fig IV.12). Les forces de réaction de l'outil en rotation sont alors mesurées par le dynamomètre via la pièce à usiner.



Fig IV.12 Montage du dynamomètre statique.

- **Dynamomètre rotatif** : utilisé pour mesure du couple s'exerçant sur l'outil, Dans les processus de perçage et de fraisage, le couple constitue, parallèlement aux forces, un critère essentiel d'évaluation. L'outil est monté directement sur le dynamomètre en rotation (Fig IV.13).



Fig IV.13 Montage dynamomètre rotatif.

IV.2.5.1 VALEUR APPROXIMATIVE DE L'EFFORT DE COUPE EN TOURNAGE

L'effort de coupe **F_c** dépend de la résistance spécifique à la rupture par compression **R_r** de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail. Pour la commodité des calculs on admet la relation suivante pour l'effort de coupe :

$$\mathbf{F_c = K \times S \times R_r}$$

Avec : **R_r** la Résistance spécifique à la rupture par compression ;

S : Section du copeau définie par l'avance **f** et la profondeur de passe **a**, soit : **S = a × f** ;

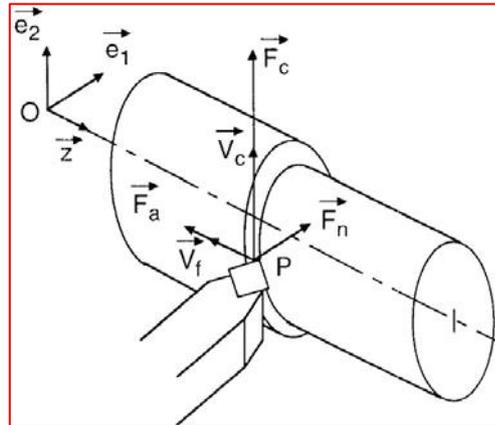
K : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du copeau, (il est plus fort en finition qu'en ébauche) et de la géométrie de l'outil de coupe.

On adopte généralement les valeurs suivantes **K = 2,5 à 4** pour les aciers et **K = 4 à 5** pour les fontes. Pour les efforts d'avance et de pénétration ils sont donnés par les équations suivantes :

$$\mathbf{F_a = (0,2 \text{ à } 0,3) F_c}$$

$$\mathbf{F_p = (0,4 \text{ à } 0,5) F_c}$$

Etant donné que les trois efforts forment un trièdre trirectangle alors :



$$F = \sqrt{(0,25.F_c)^2 + (0,45.F_c)^2 + F_c^2} \cong 1,12 F_c$$

On prend généralement : $F \approx F_c$

IV.2.5.2 EFFORTS DE COUPE LORS DU PERÇAGE

Le foret possède deux arêtes tranchantes et à chacune et en son milieu s'applique un effort de coupe tangentiel F_c . Les deux efforts forment un couple de moment :

$$M_c = F_c \times D/2$$

La résistance des efforts de coupe s'exerçant sur une arête admet trois composantes :

- F_c : effort tangentiel de coupe ;
- F_f : effort d'avance ;
- F_p : effort de pénétration.

Si le foret est parfaitement affûté et si le matériau de la pièce est homogène, on a :

$$F_c = F_c' ; F_f = F_f' ; F_p = F_p'$$

Les composantes F_p, F_p' égales et pratiquement opposées s'annulent. La résultante des efforts d'avance est portée par l'axe du foret:

$$R_a = 2 \times F_f = K \times f_{tr} \times D$$

Avec K : Coefficient déterminé expérimentalement ; f_{tr} : Avance par tour ; D : diamètre du foret en mm.

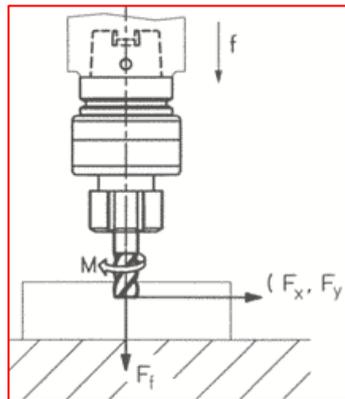


Fig IV.14 Efforts de coupe lors du perçage

IV.2.5.3 EFFORT DE COUPE LORS DU FRAISAGE

L'enlèvement de métal est réalisé par deux mouvements conjugués ; un mouvement de coupe (**Mc**) de l'outil-fraise, entraîné par la broche de la machine et un mouvement d'avance (**Ma**) de la pièce fixée sur la table. Le sens des efforts qui sollicitent les dents de la fraise est lié au mode du fraisage adopté :

A En opposition ou en sens contraire de l'avance lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de sens contraire à celui de l'avance de la pièce.

B En avalant ou en concordance lorsque le mouvement de coupe de l'outil est de même sens que celui de l'avance de la pièce.

Les efforts qui s'appliquent successivement à chaque dent de l'outil sont :

L'effort tangentiel de coupe **Fc** normal au rayon qui aboutit à l'arête coupante ;

L'effort d'avancement **Ff**, parallèle à la direction de l'avance ;

L'effort de pénétration **Fp**, perpendiculaire au précédent.

La fraise étant portée par son axe O, les efforts F_f et F_p admettent la résultante F qui passe obligatoirement par O.

L'effort de coupe qui s'applique à chaque dent a pour valeur : $F_c = K \times S \times R_r$

Avec, **S** : Section du copeau étant le produit de son épaisseur **e** par la largeur de coupe **C**,
Rr : Résistance spécifique à la rupture par compression, **K** : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière.

IV.2.5.4 PUISSANCE EN TRAVAIL [Pe]

La puissance **P** [watts] est égale au produit de la force **F** [Newtons] par la vitesse **V** [m/sec]

$$P_e = F \times V \text{ [watts]}$$

$$P_e = \frac{F_c \times V_c}{60 \times \eta} = \frac{R_r \times k \times S \times V_c}{60 \times \eta}$$

Avec :

R_r : Résistance à la rupture [N/mm²] ;

k : Coefficient dépendant de la composition de la matière ;

S : Section du copeau [mm²] ;

V_c : Vitesse de coupe [m/min] ;

η : Rendement de la machine.

IV.2.6 FORMATION ET TYPES DE COPEAUX

L'analyse des mécanismes de formation du copeau lors du processus d'usinage est le pas fondamental pour toute étude dans le domaine de la coupe, à titre d'exemple l'optimisation du choix des outil et prédiction de leur durée de vie. Durant ce processus, différents phénomènes peuvent avoir lieu tels que les déformations plastiques, le contact et le frottement entre l'outil et la pièce, les effets thermiques, l'usure, etc....

Si l'on examine la courbe de traction d'un acier (Fig IV.15), on observe trois zones :

- **oa** : Déformation élastique (réversible)
- **ab** : Ecoulement du métal
- **bc** : Déformation plastique (irréversible)
- à partir de **c** : Rupture

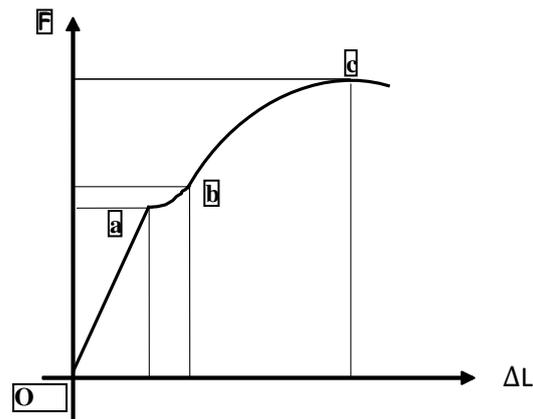


Fig IV.15 Courbe de traction d'un acier

Dans le cadre de la formation du copeau, nous nous intéresserons à la déformation plastique, qui consiste dans le glissement de certaines couches de la matière par rapport à d'autres suivant des plans de cisaillement. Ces glissements provoquent :

- La modification de la forme, des dimensions et des positions relatives des grains du métal ;
- Un échauffement important et modifications des propriétés de la matière à usiner ;

La Fig IV.16 résume le principe de la formation du copeau :

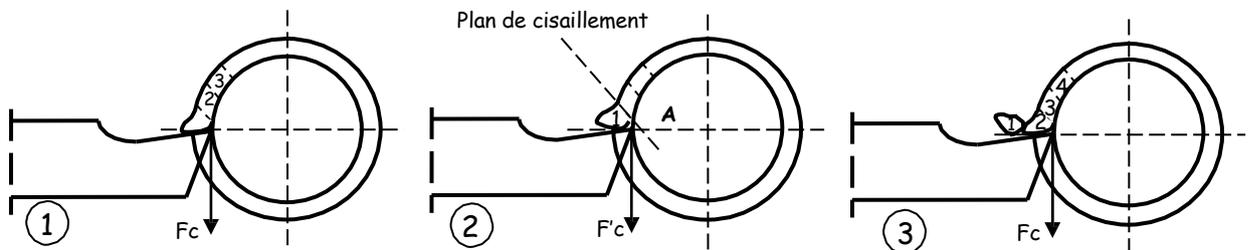


Fig IV.16 Mécanisme de la formation du copeau

- En **1** : l'arête coupante a pénétré dans la matière qui, ne pouvant s'écouler normalement, vient s'arc-bouter sur la face de coupe et se trouve fortement comprimée. L'effort de coupe augmente jusqu'à la valeur maximale F_c .
- En **2** : une craque due au cisaillement consécutif à la compression se manifeste en A, et la portion de copeau 1 glisse sur la face de coupe, accentuant l'importance de la craque. L'effort de coupe diminue simultanément jusqu'à la valeur minimale F_c' .
- En **3** : le copeau est de nouveau comprimé et l'effort de coupe augmente.

Le cycle est continu, et les efforts dus à l'action de coupe varient périodiquement très nettement pour les aciers, avec une plus grande fréquence pour la fonte (copeaux parcellaires), plus faiblement pour les métaux tendres.

IV.2.6.1 LES TYPES DE COPEAUX

Pendant l'usinage de l'acier, on distingue trois types de copeaux :

a- Copeau discontinu : a lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe faible $V_c = (5 \text{ à } 10) \text{ m/min}$. Les éléments du copeau sont liés entre eux très faiblement

b- Le copeau cisailé : a lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe moyenne $V_c = 80 \text{ à } 100) \text{ m/min}$; la surface du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que la surface opposée on voit des entailles qui définissent bien la direction des éléments isolés du copeau liés les uns aux autres.

c- Le copeau continu : a lieu pendant l'usinage de l'acier à vitesse de coupe grande $V_c > 100 \text{ m/min}$.

Pendant l'usinage des métaux friables (fontes, bronze, alliage d'aluminium), on distingue le copeau fragmenté. Il est constitué d'éléments arrachés de la matière de base ; de formes variées qui ne sont pas liés les uns aux autres. La pente d'avancée se forme immédiatement, le long de toute la surface de cisaillement suivant laquelle s'effectue la séparation entre le copeau et le métal de base. Un tel copeau laisse une surface usinée rugueuse couverte de creux et de crêtes importants.

IV.2.6.2 NOTION D'ETAT DE SURFACE

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface (Fig IV.17).

Sur la surface d'une pièce obtenue par usinage, on distingue quatre principaux types de défauts (Fig IV.18), d'ordre macro où microgéométrique :

1. Écarts de forme et de position ;
2. Ondulations (défauts périodiques) ;
3. Signature du procédé d'élaboration : stries, sillons (défaut périodique ou pseudopériodique) ;
4. Défauts accidentels ; arrachements, piqûres, etc.

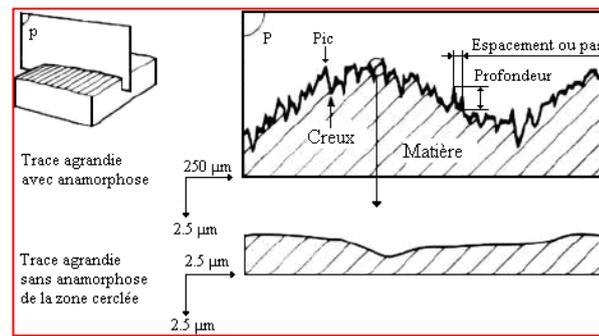


Fig IV.17 Relevé d'un profil d'état de surface.

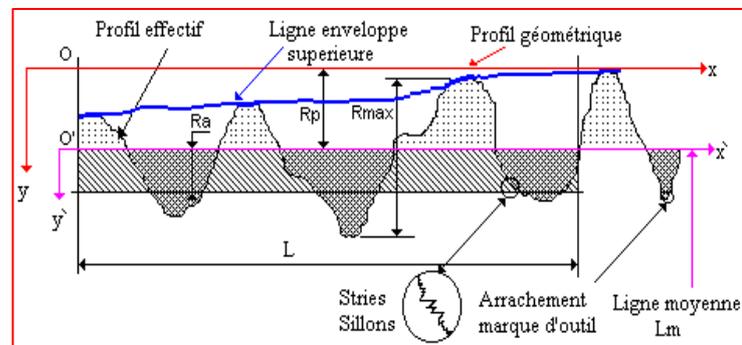


Fig IV.18 La rugosité.

IV.2.6.3 ARETE RAPPORTEE

Sous l'influence d'éléments perturbateurs : températures, frottements ; il peut arriver que le copeau continu adhère à l'outil où il en résulte la formation d'une couche appelée "arête rapportée" sur l'arête coupante de l'outil et susceptible de créer des perturbations dans l'usinage. (Fig IV.19). L'importance de cette arête rapportée augmente jusqu'à ce qu'elle soit évacuée vers le copeau ou vers la pièce ; dans ce dernier cas, il peut en résulter une altération de l'état de surface de la pièce.

On arrive à éliminer l'arête rapportée en augmentant la vitesse de coupe et en diminuant l'avance c'est à dire en réduisant le rendement de l'usinage, parfois l'emploi de lubrifiants appropriés permet d'éviter cette réduction.

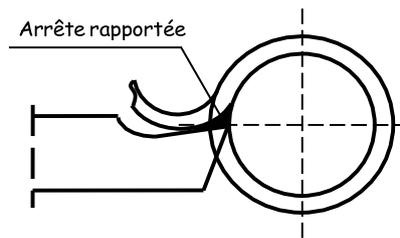


Fig IV.19 Arête rapportée

IV.2.7 FORMULATION MATHÉMATIQUE DES PARAMÈTRES DE COUPE

IV.2.7.1 LOI DE TAYLOR [AMÉRICAIN, 1907]

L'expérience de Taylor consistait à étudier la durée de l'outil de coupe en acier rapide en faisant une opération de chariotage pour une ensemble de pièces en acier, sans arrosage, avec des conditions de coupe de base : $f = 0,5$ mm/tr comme avance et une profondeur de passe $a = 5$ mm, qui restaient inchangées.

A partir de cette expérience la « Loi de Taylor » surgit :

$$V_c \times T^\alpha = K_t = \text{Constante}$$

dite "Loi de Taylor", qui signifie que la vitesse de coupe V_c à adopter pour que l'outil ait une durée T entre les affûtages est donnée par la relation :

$$V_c = K_t / T^\alpha$$

K_t : est un coefficient qui dépend essentiellement des conditions de coupe

α : est un exposant qui caractérise surtout l'outil. Il est variable d'un acier à un autre comme suit :

- Acier rapide ordinaire : $\alpha = 0,12$ à $0,14$
- Acier rapide supérieur : $\alpha = 0,15$ à $0,18$
- Alliages coulés dits "STELLITE" ou "TANTUNG" : $\alpha = 0,22$ à $0,25$
- Carbures frittés : $\alpha = 0,28$ à $0,32$

NB : Lors de l'utilisation d'un outil à profil curviligne (arête tranchante arrondie), les résultats obtenus ne sont pas applicables directement pour un outil de coupe à arête rectiligne (car pour un outil à profil curviligne l'épaisseur du copeau n'est pas constante).

La relation $V_c.T^\alpha = Kt$ ne permet de déterminer V_c en fonction de T , ou réciproquement que si l'on connaît à la fois la valeur de la constante Kt et de l'exposant α , toutes les autres conditions de coupe restant invariables. Il est donc nécessaire pour chaque cas particulier de se livrer à deux essais minimums ; le premier donnera la durée T_1 de l'outil pour la vitesse V_{c1} et le deuxième donnera la durée T_2 de l'outil pour la vitesse V_{c2} .

On pourra alors écrire : $V_{c1} \times T_1^\alpha = V_{c2} \times T_2^\alpha = Kt$

D'où la relation : $[\ln(x.y) = \ln x + \ln y]$

$$\ln V_{c1} + \ln T_1^\alpha = \ln V_{c2} + \ln T_2^\alpha$$

$$\ln V_{c1} + \alpha \times \ln T_1 = \ln V_{c2} + \alpha \times \ln T_2$$

$$\alpha \times (\ln T_1 - \ln T_2) = \ln V_{c2} - \ln V_{c1}$$

IV.2.7.2 LOI DU COMMANDANT DENIS OU "LOI DU DEBIT CONSTANT" [FRANÇAIS, 1920]

Le Commandant Denis s'est livré à des essais systématiques de débit de l'outil dans des conditions les plus diverses. Il a utilisé un outil à chariotier à arête rectiligne. Les conclusions de ses travaux peuvent se résumer ainsi :

- Toutes les autres conditions de coupe restant les mêmes, le débit de l'outil varie lorsque la vitesse de coupe varie.
- Le débit maximal de l'outil conserve la même valeur lorsque la section du copeau varie, mais seulement si l'avance f , la profondeur a et la vitesse de moindre usure V_{c0} restent liées par la relation :

$$f_0^2 \times a_0 \times V_{c0}^3 = f_1^2 \times a_1 \times V_{c1}^3 = f_2^2 \times a_2 \times V_{c2}^3 = \dots = \text{Constante}$$

- Dite "**Loi du débit Constant**". A l'issue de cette loi Le Commandant Denis a fait ressortir des tableaux comportant les valeurs des débits maximums correspondant à des vitesses de moindre usure V_0 et à des conditions type d'avances f , de profondeur de passe a , d'outil, de matière bien définies.

IV.2.8 USURE DES OUTILS

L'usure des outils de coupe est un des phénomènes physico-chimiques les plus complexes. Il influe sur la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce. Elle est due par son apparition aux causes suivantes :

- Frottements outil-copeau, outil-pièce et pièce-copeau (usure abrasive).
- Déformations plastiques de la matière de la partie active de l'outil.
- Echauffement important dû à la coupe.
- L'émiettement de l'outil (arrachement de petites particules métal).

L'usure peut être sous plusieurs formes:

- L'usure abrasive est particulière à tous les outils, elle est la cause principale de l'emoussage de l'outil.
- L'usure due aux déformations plastiques de la matière de l'outil est surtout pour les outils en aciers à faible teneur en éléments d'alliages (acier rapide).

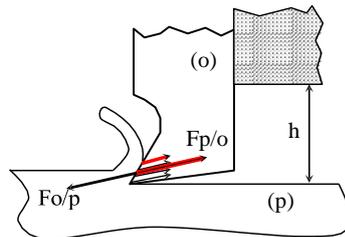


Fig IV.20 Frottement outil-copeau

L'usure provoquée par une haute température de coupe se manifeste plus fortement dans les aciers au carbone et les aciers rapides, par suite de leurs résistances à chaud relativement faible. L'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée comme le montre la figure :

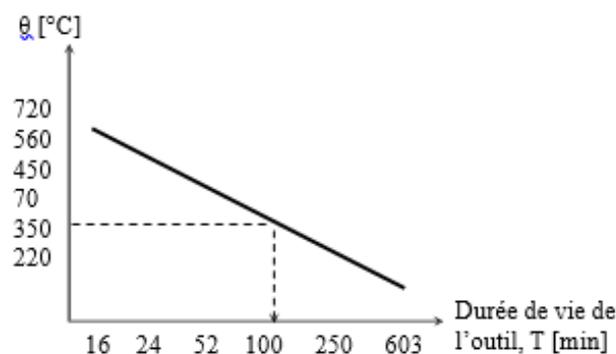


Fig IV.21 Courbe (θ° , T[min]).

Une autre série d'expériences de tournage dont l'objectif consistait à déterminer la vitesse « v_c » en fonction du temps « T » pour un usinage à sec et un autre avec lubrification, donne les résultats suivants :

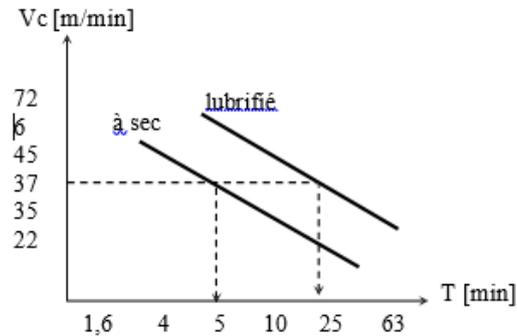


Fig IV.22 Influence de la lubrification.

Ce que l'on constate sur la figure, qu'avec une lubrification bien adoptée au travail à réaliser permet d'augmenter considérablement la durée de vie de l'outil, d'où une diminution de l'usure. Les outils en carbures métalliques s'usent généralement à cause de l'émiettement c'est à dire l'arrachement de petites particules du métal de l'outil, tandis qu'ils restent fortement résistant à l'usure par frottement.

IV.2.8.1 TYPES D'USURES

En fonction des conditions de coupe, l'usure peut se produire suivant la surface de dépouille, suivant la surface d'attaque ou suivant les deux surfaces en même temps :

L'usure de la surface de dépouille (Fig IV.23a) est particulière aux outils qui enlèvent le copeau de faible épaisseur (inférieur à 0,1mm) avec une vitesse de coupe trop grande (supérieure à 80 m/min) ainsi que lors de l'usinage de métaux à copeau friables (fontes, bronze, etc...).

L'usure de la surface d'attaque (Fig IV.23b) se produit lors de l'usinage des matières plastiques avec des outils qui enlèvent les copeaux dont l'épaisseur est supérieure à 0,5 mm, la vitesse est variée de 20 à 30 m/min, dans cette zone se forme l'arête rapportée qui protège la surface de dépouille contre l'usure. Elle commence par l'apparition d'un petit creux qui s'élargit avec le temps.

L'usure simultanée des surfaces de dépouille et d'attaque (Fig IV.23c) est particulière aux outils qui enlèvent les copeaux dont l'épaisseur varie de 0,1 à 0,5 mm. La vitesse de coupe est assez grande. L'arête tranchante disparaît, la coupe suivante devient impossible donc l'outil doit être raffûté.

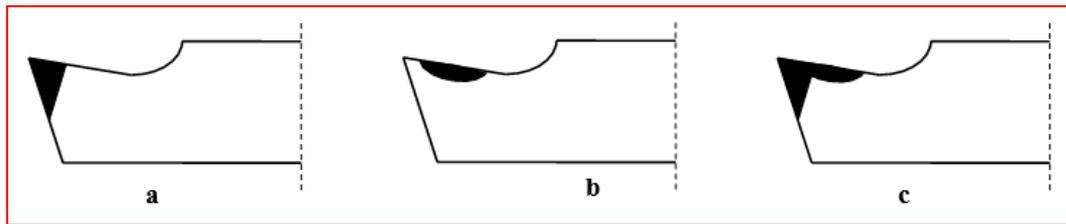


Fig IV.23 Outil en acier rapide

Dans le cas des outils en carbure métalliques travaillant habituellement avec des vitesses de coupe élevées ce qui ne permet pas la formation de l'arête rapportée. C'est pourquoi après un certain temps passé durant l'usinage, toute la surface d'attaque y compris l'arête tranchante s'expose à l'usure. L'usure des deux surfaces forme une nouvelle arête tranchante (Fig IV.24) qui se renouvelle durant la coupe.

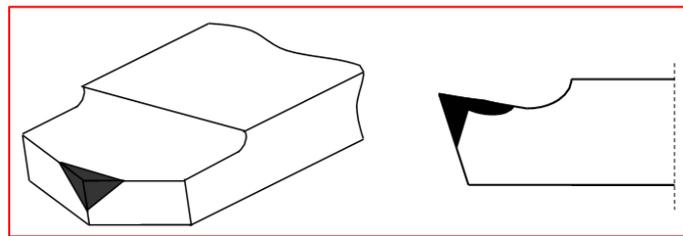


Fig IV.24 Outil en carbure métallique

L'émiettement est la cause principale de l'usure des outils en carbure métallique. Il se fait par suite de broutements se produisant pendant l'usinage à des vitesses relativement faible (inférieure à 50 m/min).

IV.2.8.2 DEPENDANCE ENTE L'USURE ET LE TEMPS

La relation entre la valeur de l'usure et le temps représentée par la courbe (Fig IV.25) peut-être divisée en trois périodes :

- **Période I** : Usure initiale ou rodage (à éviter pour les réglages)
- **Période II** : Usure normale ou domaine normal d'utilisation de l'outil
- **Période III** : Usure accélérée (catastrophique) danger de rupture.

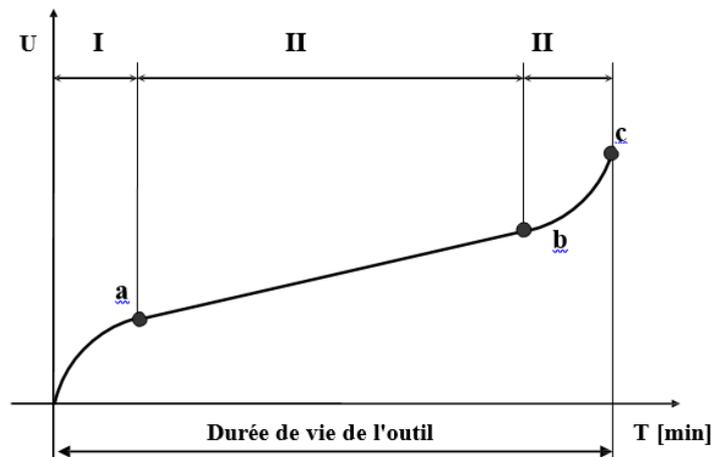


Fig IV.25 Courbe d'usure

La première période : est celle du rodage (usure initiale qui donne lieu à une usure intense, plus les surfaces de frottements sont nettes, et plus l'évolution de l'usure est faible dans le même intervalle de temps.

La deuxième période : est celle de l'usure normale, elle est définie par la progression de l'usure en fonction de la durée de travail pendant la deuxième période, l'augmentation de l'usure en unité de temps est une constante.

La troisième période : est celle où l'usure atteint un certain degré. Les conditions de coupe et de frottements changent pour établir la troisième période qui est celle de l'usure accélérée (usure catastrophique).

Le temps des deux premières périodes où l'outil peut travailler sans réaffûtage constitue la durée de service ou de vie de l'outil qui est le temps de travail.

IV.2.9 LA LUBRIFICATION

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. L'échauffement de la partie active est fonction de la vitesse de coupe (V_c) et croît avec elle. Exemple : pour le tournage à sec de l'acier XC 38 si « V_c » passe de 50 à 100 [m/min] alors « θ » passe de 600 °C à 800 °C.

IV.2.9.1 CONSEQUENCE DE L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE

- Sur l'outil :

La dureté du matériau de coupe diminue à partir de certaines températures.

Exemples : Aciers rapides $\cong 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

Carbures $\cong 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $900\text{ }^{\circ}\text{C}$

Céramique $\cong 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ces valeurs représentent les valeurs moyennes au-dessous desquelles il est bon de maintenir la température de l'outil car l'usure est d'autant plus rapide que la température de la partie active est plus élevée ; comme on peut le constater sur la figure (Fig IV.26) qui représente la répartition de la température sur la partie active de l'outil lors de l'usinage à sec d'un acier $V_c = 60\text{ m/min}$.

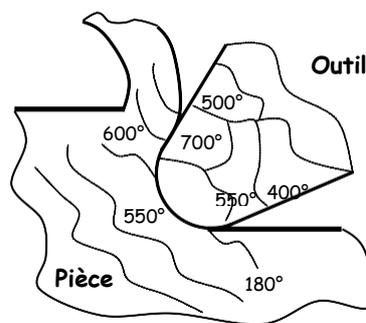


Fig IV.26 Répartition de la température dans la zone de coupe.

Comme conclusion la température de la partie active de l'outil doit être réduite pour ne pas entraîner sa perte de dureté.

- Sur la pièce :

Dans la zone de formation du copeau la température tend à augmenter la plasticité du métal et par conséquent elle permet une diminution notable des efforts de coupe. En revanche elle provoque une dilatation de la pièce.

Exemple : d'usinage d'une pièce (Al4G) dont le coefficient de dilatation thermique linéaire $\lambda = 23.10^{-6}$ avec un outil de carbure sans lubrification.

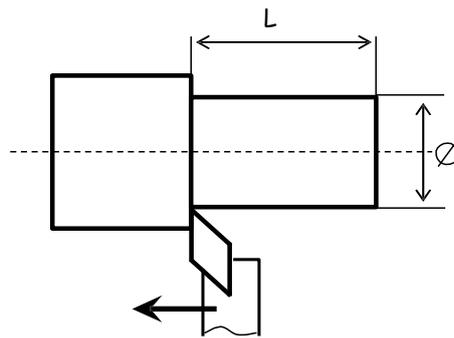


Fig IV.27 Chariotage à sec

La mesure de L en cours d'usinage $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ nous donne une longueur $L_1 = 200,36 \text{ [mm]}$, une autre mesure effectuée cet fois au poste de contrôle avec $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ nous donne une longueur $L_2 = 200,09 \text{ [mm]}$.

Question : que s'est-il passé ?

Réponse : La pièce en refroidissant s'est rétractée et si l'usineur n'en tient pas compte la dimension « L » risque d'être hors tolérance même remarque pour le diamètre « \varnothing ». Comme conclusion dès que l'on doit réaliser un travail de précision il faut limiter la température de la pièce en cours d'usinage.

IV.2.9.2 LIMITATION DE LA TEMPERATURE θ EN COURS D'USINAGE

Les résultats d'une série d'expériences de tournage dont l'objectif consistait à déterminer la température θ en fonction de la vitesse de coupe V_c pour 4 avances par tour f montrent que à :

1. Avance f égale si V_c augmente θ augmente
2. Vitesse V_c égale si f augmente θ augmente

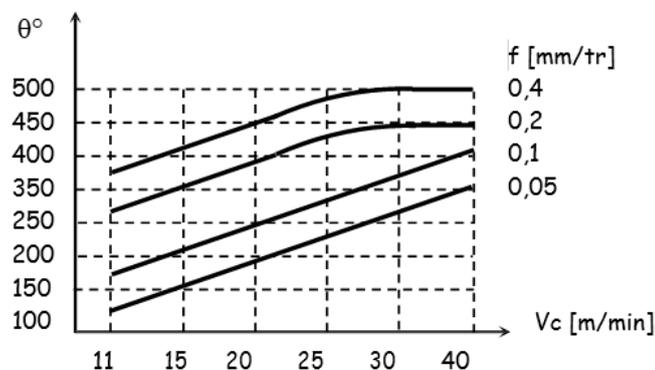


Fig IV.28 Série d'expériences.

Conclusion : Pour diminuer la température θ° il faut refroidir la zone de coupe par lubrification

- Pratique de l'arrosage :

Lors de l'usinage le débit doit être abondant pour cela la pression doit être suffisante pour évacuer les débris métalliques et pénétrer entre la face de coupe et le copeau. C'est essentiellement **la partie active** de l'outil qui doit être refroidie.

**CHAPITRE V: GENERALITES SUR LES
MACHINES OUTILS A COMMANDE
NUMERIQUE**

V. INTRODUCTION

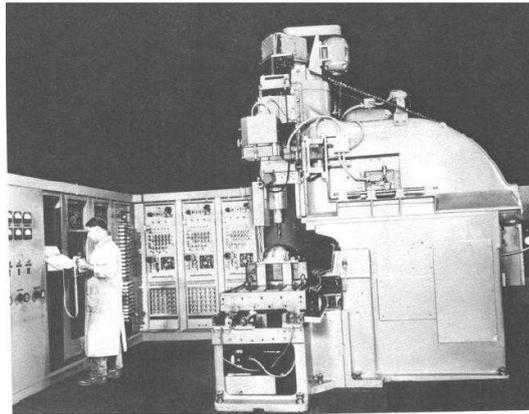
Apparue il y a seulement quelques dizaines d'années, la commande numérique (CN) impose actuellement sa technologie dans le monde de l'usinage. Conçue pour piloter le fonctionnement d'une machine à partir des instructions d'un programme sans intervention directe de l'opérateur pendant son exécution, elle a dans un premier temps, permis de franchir un pas important dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles. Tours, fraiseuses, perceuses et aléseuses sont ainsi devenues capables d'assurer, en quantité comme en qualité, une production à peine imaginable quelques années auparavant. La CN est également à l'origine de nouvelles conceptions des machines polyvalentes comme le centre d'usinage.

La machine-outil à commande numérique représente le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. De part l'avancée des techniques, la machine-outil a subi des modifications, et le couple outil machine-outil s'est adapté aux exigences de productivité modernes.

V.1 HISTORIQUE DE LA COMMANDE NUMERIQUE

En 1947, dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique pour le compte de l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façonner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher le profil théorique. Mais, lorsque l'US Air Force confie à ce même Parsons la réalisation de pièces de formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, celui-ci réalise que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en 3 dimensions sera en mesure de donner satisfaction.

Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes. Cette machine, une fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale (Fig V.1), conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le Servomechanisms Laboratory du MIT.



FigV.1 Première MOCN en 1952

L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de numerical control. Il faut encore attendre quelques années de vastes fonds de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première MOCN réellement opérationnelle. Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes.

1954 : Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.

1955 : à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.

1959 : apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre).

1964 : en France, la Télémécanique Électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais Téléstatic.

1968 : la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante.

1972 : les mini-calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.

1976 : développements des CN à microprocesseurs.

1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel.

1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM).

1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits.

V.2 DEFINITIONS ET STRUCTURE D'UNE MACHINE-OUTIL A COMMANDE NUMERIQUE

V.2.1 DEFINITION

La MOCN est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des codes dans un programme CN. Lorsque la machine-outil est équipée d'une commande numérique capable de réaliser les calculs des coordonnées des points définissant une trajectoire (interpolation), on dit qu'elle est à calculateur. Elle est appelée Commande Numérique par Calculateur (CNC). La plupart des MOCN sont des CNC. La figure ci-dessous montre une machine à commande numérique de type BOXFORD.

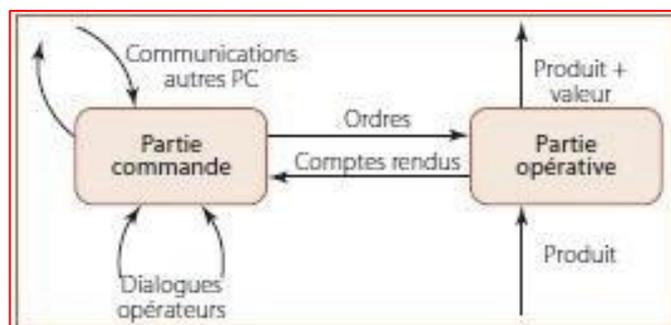


FigV.2 MOCN de type BOXFORD (FANUC).

V.2.2 STRUCTURE D'UNE MACHINE-OUTIL A COMMANDE NUMERIQUE

Une machine-outil à commande numérique est composée de deux principales parties :

- Partie commande
- Partie opérative



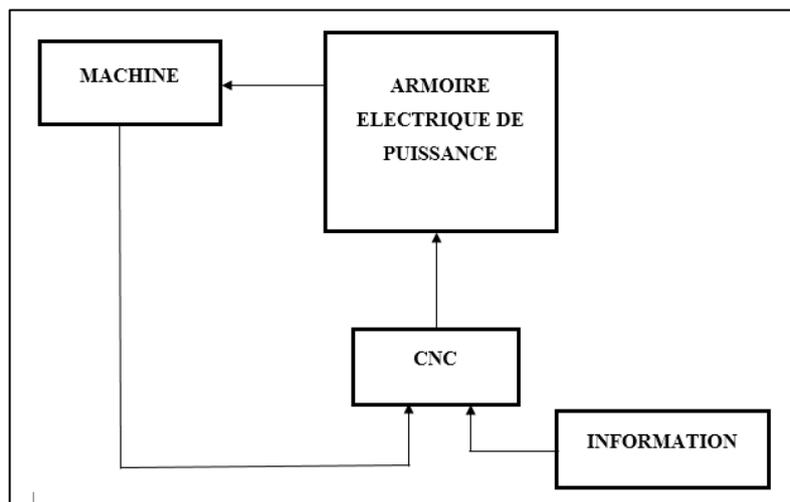
FigV.3 Structure d'une M.O.C.N

V.2.2.1 PARTIE COMMANDE

Différente d'une machine conventionnelle, elle est constituée d'une armoire dans laquelle on trouve :

- Le pupitre permettant de rentrer les commandes à l'aide d'un clavier,
- Le lecteur de données (ce lecteur peut être une option lors de l'achat de la machine),
- La sortie RS 232 pour les liaisons avec les Périphériques externes,
- L'écran de visualisation de toutes les données enregistrées,
- Le calculateur,
- Les cartes électroniques (commandes d'axes, mémoire ...).

La partie commande est alimentée par un courant faible et ne peut donc pas alimenter en direct les moteurs de la machine (FigV.4).



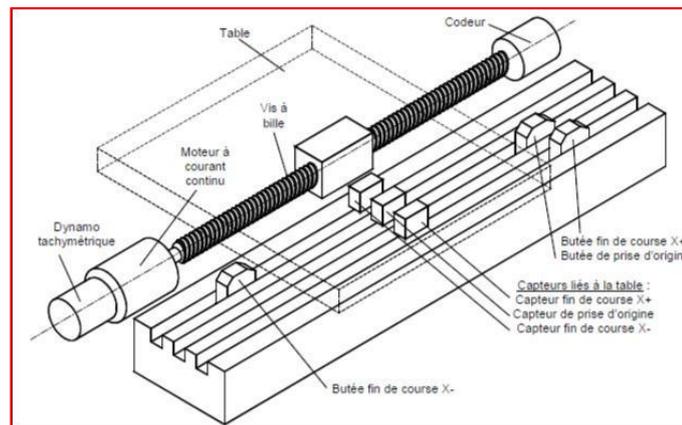
FigV.4 Fonction originale d'une commande numérique

V.2.2.2 PARTIE OPERATIVE

Les mouvements sont commandés par des moteurs ; presque comparable à une machine-outil classique, et elle comprend :

- Un socle, très souvent en béton hydraulique vibré, assurant l'indépendance de la machine au sol,
- Un bâti, un banc, dont les larges glissières sont en acier traité,
- Un support outil (broche, torche, laser, jet d'eau ...),

- Une table support pièce, mobile selon 2 ou 3 axes, équipée de système de commande à vis et écrou à bille. Le granit, ou le granit reconstitué, est utilisé pour la fabrication des tables et des bâtis des machines à mesurer tridimensionnelles des rectifieuses et de certains tours,
- Des moteurs chargés de l'entraînement de la table,
- Un élément de mesure ou capteur de position renseignant à tout moment sur la position du mobile sur chaque axe,
- Une dynamo tachymétrique assurant la mesure de la vitesse de rotation.



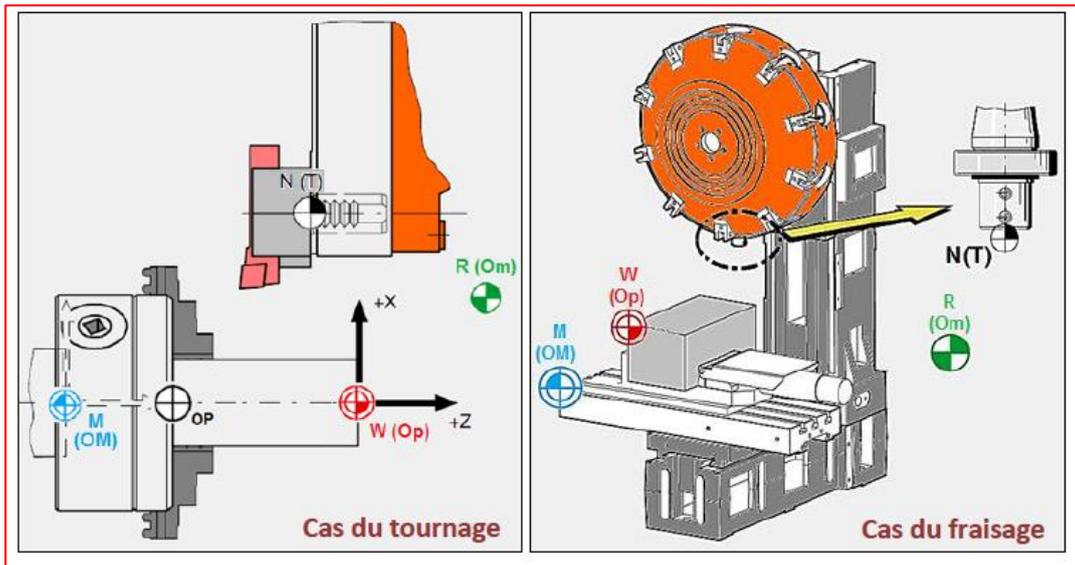
FigV.5 Eléments de la partie opérative

V.3 ORIGINES (Le tableau ci-dessous résume les différentes origines des MOCN)

Points utilisées	Symbole	Définition
Origine machine M (OM)		C'est la référence des déplacements de la machine. C'est un point défini (sur chaque axe) par le constructeur qui permet de définir l'origine absolue de la machine. OM et om peuvent être confondues.
Origine mesure R (Om)		C'est le point de départ de toutes les mesures dans l'espace machine
Origine Programme OP		C'est le point de départ de toutes les cotes.
Origine Pièce W (Op)		origine de la mise en position (isostatique de la pièce)

Tableau V.1 Point utilisées dans des MOCN

La Figure suivante représente la répartition des origines en tournage et en fraisage (Fig V.6)

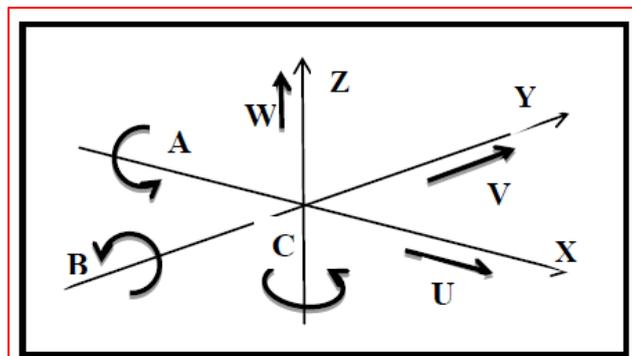


FigV.6 Cas du Tournage et du Fraisage

V.4 SYSTEMES D'AXES

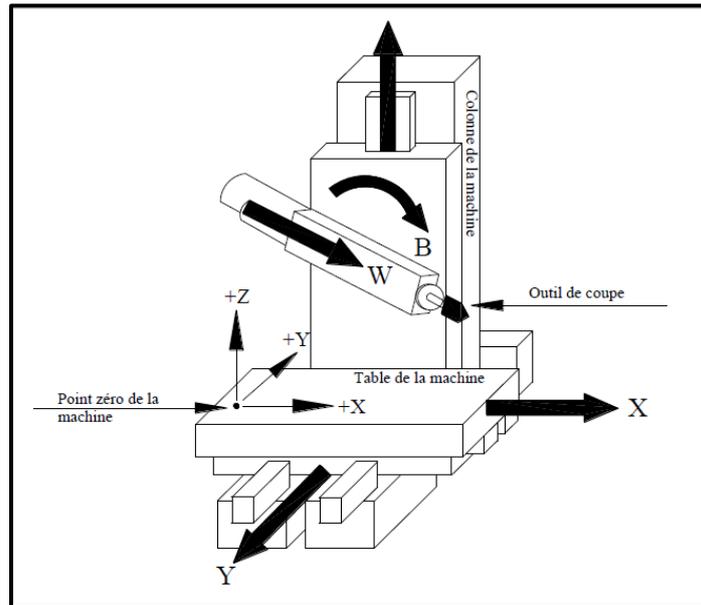
Les déplacements de l'outil ou du porte-pièce s'effectuent par combinaisons de translations et/ou de rotations. Chaque mouvement élémentaire (axe) est repéré par une lettre affectée du signe + ou - indiquant le sens du déplacement.

- Les translations primaires s'effectuent suivant les axes X, Y, Z formant ainsi le trièdre de référence.
- **Les rotations primaires** sont les trois rotations A, B, C autour de ces trois axes. L'axe Z : est celui de la broche.
- **Les translations primaires (U, V, W)** sont parallèles à X, Y et Z.



FigV.7 Systèmes d'axes.

La Figure (FigV.8) ci-dessous montre un exemple d'un centre d'usinage à cinq axes.



FigV.8 Fraisage à cinq axes

V.5 TYPES DES MOCN

Le classement des machines est nécessaire car il aide au choix de machines, lors d'étude de gammes de fabrication. Traditionnellement, on classe les machines en fonction des formes de surfaces à réaliser : cylindriques / parallélépipédiques, tournage / fraisage. Cette classification est remise en cause, car la commande numérique et l'adaptation des structures de machine cassent le lien entre les deux couples.

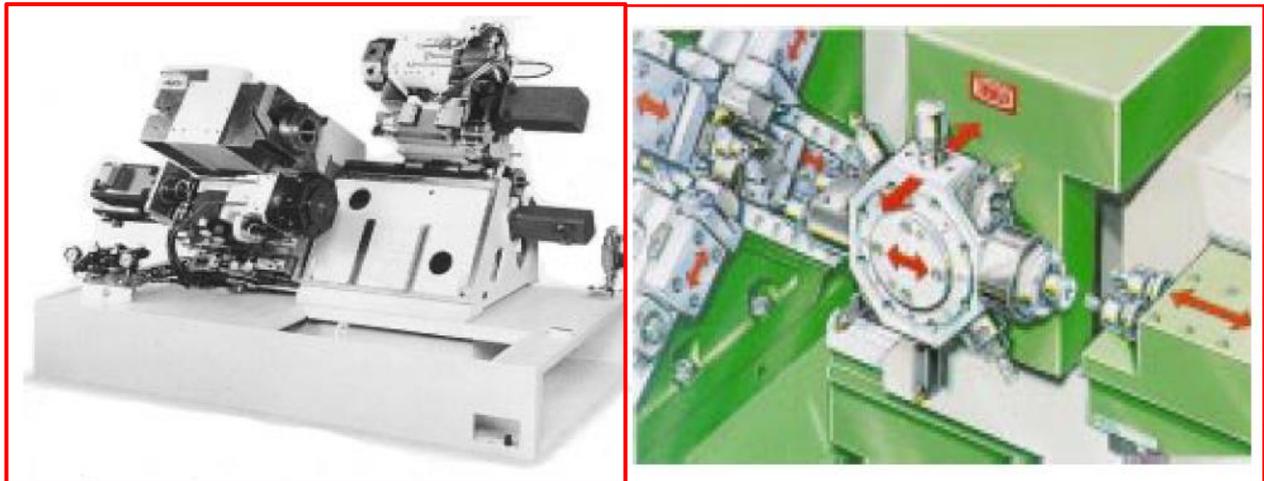
On classe maintenant les machines-outils par le nombre de mouvements élémentaires qu'elles peuvent mettre en œuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce (Tableau V.2). Seuls les axes sont décomptés. La mise en œuvre simultanée de plusieurs outils entraîne l'augmentation du nombre d'axes.

Cette classification ne permet pas d'associer directement un type de forme usinable à une classe de machine, Car elle ne reflète pas la cinématique de l'outil. Par exemple un tour à cinq axes ne permet pas de faire des pièces différentes par rapport à un tour à trois axes. De plus en plus, la broche se comporte comme un axe asservi. C'est le cas en tournage, où l'on peut être obligé de mettre en place une seconde motorisation lorsqu'elle génère un mouvement d'avance (tournage avec outil tournant).

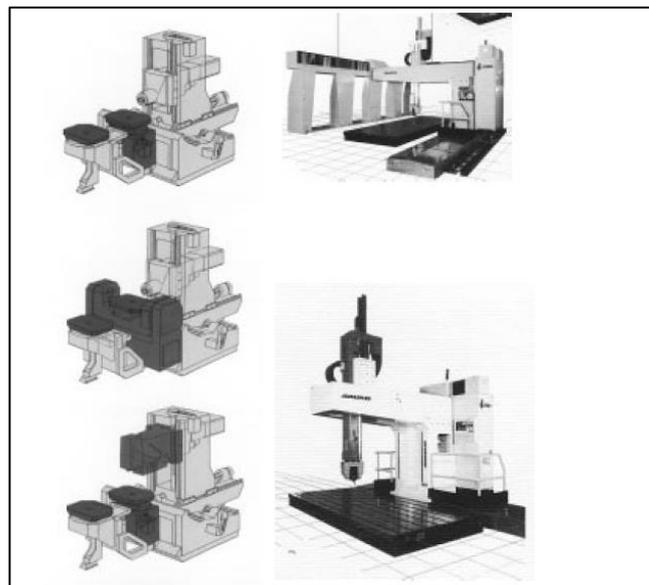
N ^b d'axes	Mouvements	Désignation du type d'usinage et des opérations possibles
1	Z	brochage, presse
2	X, Z	tournage : toutes les formes obtenues ont le même axe de symétrie
3	X, Y, Z	Fraisage : surfaçage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste parallèle à une direction fixe par rapport à la pièce.
3	X, Z, C	Tournage, avec asservissement de la broche, permet le fraisage sur tour : tournage général, fraisage à l'outil tournant, perçage hors axe. La broche est asservie en position.
4	X, Y, Z, B	Fraisage : surfaçage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste contenu dans un plan fixe par rapport à la pièce.
4	X, Y, Z, C	fraisage (cf. X, Y, Z, B)
4	X, Y, Z, C	tournage
4	2x(X,Z)	tournage à deux tourelles
5	2x(X,Z),C	tournage à deux tourelles et asservissement de la broche, (cf X, Z, C)
5	X, Y, Z, A, C	fraisage de formes gauches : fraisage avec le flanc de l'outil, fraisage avec dépinçage, perçage en toutes directions.
5	X, Y, Z, B, C	fraisage de formes gauches (cf. X, Y, Z, A, C)
5	X, Y, Z, A, B,	fraisage de formes gauches (cf. X, Y, Z, A, C)

Tableau V.2 Classification des machines-outils

En fraisage, la broche est plutôt un demi-axe, car on cherche à asservir sa vitesse de rotation à la vitesse d'avance de l'outil pour assurer, par exemple, des interpolations hélicoïdales (taraudage) ou de façon à garantir l'avance par dent de l'outil. Les machines 5 axes du type (X, Y, Z, A, C) sont privilégiées dans le cadre de l'usinage de pièces de dimensions importantes (FigV.9) et (FigV.10) bien qu'elles perdent en rigidité au niveau de la tête de la machine.



FigV.9 cinématique de tour multi-axes



FigV.10 Structure des machines de 3 à 5 axes

On peut classer les machines à plus de cinq axes en trois catégories :

- Les mouvements génèrent une forme particulière, ce sont les affuteuses (jusqu'à neuf axes), ou des machines spéciales ;
- Les mouvements sont dédoublés, ce sont les machines transferts ;
- Les mouvements ne sont pas dédoublés, ce sont les robots. La dissociation entre le robot et la machine-outil vient de la comparaison des performances respectives sur la rigidité, la vitesse de déplacement et la précision.

V.6 USINAGE NON CONVENTIONNEL

V.6.1 INTRODUCTION

Il n'y a pas que les procédés conventionnels qui ont bénéficié des progrès remarquables dans les algorithmes de calcul ou logiciels informatiques. Des procédés non conventionnels tel que EDM, découpe laser ou jet d'eau ont eux aussi "exploité" ces progrès pour gérer des trajectoires de coupe complexes et de garantir une place dans la chaîne numérique.

Aujourd'hui des grands noms s'occupent de la programmation numérique de ces procédés, vu leur place prometteuse dans l'industrie manufacturière, et tentent d'être au diapason de leurs progrès, par le développement des stratégies bien adaptées.

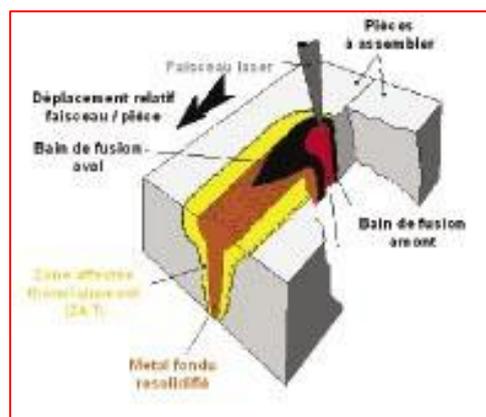
Les procédés de découpe de métaux par oxycoupage, plasma et laser sont dérivés de ceux de soudage. Le point commun de ces procédés est une fusion locale du métal qui permet pour :

- Le soudage, d'assembler des pièces métalliques avec ou sans métal d'apport ;
- La découpe, d'expulser le métal fondu à l'aide d'un gaz sous pression sous forme de gouttelettes. Cette fusion et les réactions chimiques qui peuvent se développer, sont à l'origine de dégagement de polluants particuliers et gazeux.

V.6.2 SOUDURE ET DECOUPAGE AU PLASMA ET/OU LASER

V.6.2.1 SOUDAGE AU LASER

Le soudage laser est un procédé de soudage à haute densité d'énergie (FigV.11). Cette caractéristique permet d'obtenir la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques. Un bain de métal fondu se développe tout autour de ce capillaire. Le déplacement relatif de celui-ci engendre la formation d'un joint soudé.



FigV.11 Principe du soudage au laser.

C'est grâce à ce capillaire que l'énergie thermique est distribuée non plus en surface mais sur toute la profondeur de ce "trou" rempli de vapeurs métalliques autour duquel la matière est fusionnée. Cette caractéristique permet d'obtenir des cordons très étroits et fortement pénétrants.



La répartition de l'énergie thermique sur toute la profondeur du capillaire permet d'obtenir une morphologie de zone fondue particulière. D'autre part cette technologie supporte parfaitement l'automatisation du procédé. Cet aspect permet une qualification rapide et surtout une parfaite reproductibilité du process.

V.6.2.2 DECOUPE AU LASER

La focalisation d'un rayon laser permet de chauffer jusqu'à vaporisation une zone réduite de matière. Les lasers utilisés couramment ont une puissance de 1500 watts mais les sources peuvent varier de quelques watts à plus de 4 kW. La puissance est adaptée en fonction du matériau et de l'épaisseur à découper.

Le découpage laser a été utilisé dans l'industrie à partir des années 1980. Depuis il s'est répandu et s'est banalisé. Dans le secteur de la transformation des métaux, il est complémentaire d'autres procédés comme le découpage par poinçonnage. Alors que celui-ci est tributaire de la forme de l'outil utilisé, le découpage laser permet de faire varier à volonté la forme découpée. À cette fin, les machines de découpe laser sont programmables.

- Asservissement des axes

Comme en électroérosion, les déplacements des axes sont asservis à la puissance du laser qui dépend de la matière de la pièce à découper ainsi que son géométrie.

V.7 MACHINE CNC (FABRICATION DE RESSORTS)

V.7.1 GENERALITES

La fabrication de ressorts de qualité reste une opération délicate. En effet, pour s'adapter aux dispersions dans les propriétés des matériaux, le réglage des machines actuelles nécessite un grand savoir-faire de la part des opérateurs. Nous nous intéressons ci-après à la conception des ressorts fabriqués à froid qui est la plus répandue.

Le fil est livré aux fabricants de ressorts sous forme de bobines. Il y a de nombreuses manipulations à effectuer avant d'arriver au produit fini. Ces opérations peuvent pour la plupart être manuelles (on peut par exemple enrouler un fil autour d'un axe pour former le corps d'un ressort). Cependant, pour des raisons de productivité, la fabrication industrielle est essentiellement réalisée par des machines spécialisées.

V.7.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

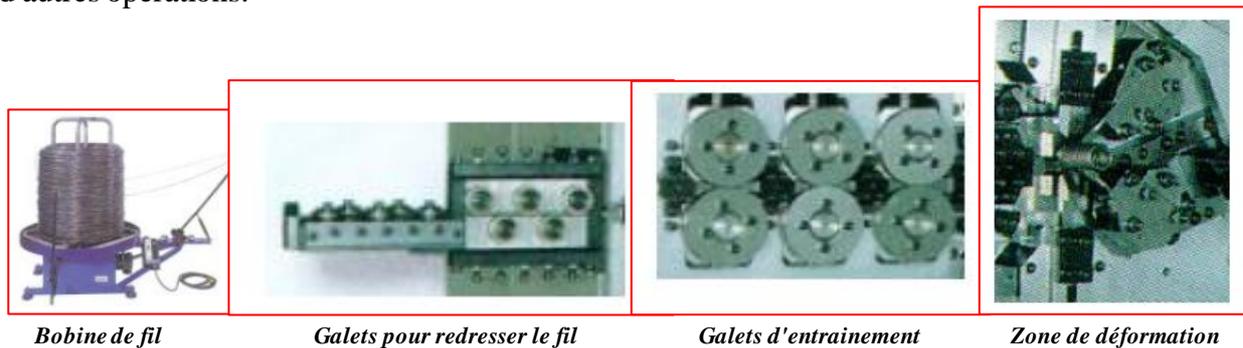
Le principe de fonctionnement le plus courant d'une machine conçue pour fabriquer (à froid) les ressorts hélicoïdaux à fils ronds est donné par les figures V.12 et V.13.



FigV.12 Machine à fabriquer les ressorts (SMI)

Le fil venant de la bobine est mis en mouvement par les galets d'entraînement de la machine. Tiré, il parcourt une première série de galets qui le redresse de manière à ce qu'il arrive vers la zone de déformation avec une géométrie bien régulière. Après avoir traversé les galets d'entraînement, le fil est poussé dans la zone de déformation.

Dans cette zone, des obstacles sont successivement placés sur la trajectoire du fil de manière à le mettre en forme. Pour que la géométrie du ressort soit bien régulière, le moment d'arrivée des outils est contrôlé par des cames ou par commande numérique. Ce type de machine permet de réaliser le corps du ressort ainsi que certaines extrémités. Une fois mis en forme, le ressort subit en général d'autres opérations.



FigV.13 Principe de fonctionnement

- Les Operations de finition

A la sortie de la machine, on effectue souvent un traitement thermique de revenu pour éliminer les contraintes internes emmagasinées lors de la déformation plastique du fil. Ce revenu augmente aussi la limite élastique de certains matériaux. Pour cela, le ressort est placé dans un four à air dont la température est comprise entre 200 °C et 480 °C pendant une durée qui peut aller de 5 minutes à 4 heures. Lorsque les conditions de production le permettent, le four est directement placé après la machine. Les ressorts tombent directement sur un tapis roulant et traversent le four. La vitesse de déplacement du tapis est déterminée pour que les ressorts restent dans l'enceinte du four pendant le temps désiré.

Pour augmenter la résistance à la fatigue du ressort, on peut réaliser un grenailage. Cette opération est un traitement mécanique de surface. On déforme plastiquement le matériau dans une couche superficielle en le martelant avec des billes projetées à grande vitesse. Pour que le grenailage soit efficace, il faut qu'il soit régulier car la rupture du ressort intervient toujours dans la zone la plus faible. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une grenaille homogène (en acier dur trempé et revenu dont la dureté doit être supérieure à celle des pièces traitées) projetée le plus perpendiculairement possible à la surface du ressort. Cette opération ne peut être effectuée que sur les ressorts qui ont un espace suffisant entre les spires.

On réalise aussi régulièrement des traitements anticorrosion en recouvrant la surface du ressort avec un matériau protecteur. C'est en principe la dernière étape de la fabrication du ressort. Celui-ci est ensuite contrôlé puis conditionné pour être livré. Le conditionnement et les procédures de contrôle sont définies pour chaque type de ressorts.

V.8 LES MACHINES DE PROTOTYPAGE

V.8.1 OBJECTIF

L'objectif principal du prototypage rapide est la fabrication d'un modèle physique (maquette, prototype, outillage) dans un délai très court, à moindre coût et avec le minimum d'outillage et d'étapes intermédiaires dans le processus de réalisation.

V.8.2 EVOLUTION

- Le rapid prototyping (le prototypage rapide)

Les prototypes permettent de valider rapidement la conception d'un nouveau produit en phase de développement afin de réduire le temps de mise sur le marché (time to market). L'impact du prototypage rapide est le plus fort dans les premières semaines de la conception, quand les modifications ne coûtent que très peu.

- Le rapid tooling (l'outillage rapide ou l'outillage consommable)

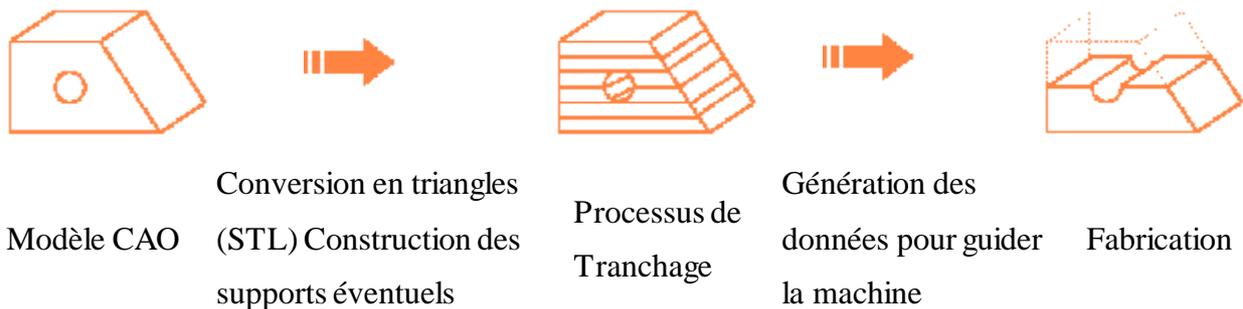
La réalisation de présérie ne peut se faire par des machines de prototypage rapide pour des questions de délais et de coûts. L'outillage ainsi réalisé se fait à partir de plusieurs technologies reconnus par leur spécificité comme par exemple les inserts en frittage de poudre métallique, les broches en tournage, le plan de joint par électroérosion, les fonds des empreintes par UGV.

- Le rapid manufacturing (la fabrication express)

Ce serait des nouvelles machines qui utiliseraient le principe de la fabrication des produits couche par couche donc sans outillage particulier, mais très rapidement pour des petites et moyennes séries. Ces produits auraient les bonnes caractéristiques mécaniques, chimiques et autres sans être lié au mode d'obtention conventionnel.

V.8.3 TECHNIQUES DE PROTOTYPAGE

Toutes les techniques de prototypage rapide font référence au même principe: fabriquer un objet couche par couche ; il faut en effet découper l'objet en tranches, pour le reconstituer du bas vers le haut par superposition de ces tranches.



Mais avant de faire du prototypage rapide, il est indispensable de créer un modèle en CAO. De la qualité de ce modèle dépendra la qualité du prototype. Quelles que soient les techniques employées, le processus de réalisation d'un prototype est identique:

1. La création du modèle 3D en CAO.
2. Le maillage STL.
3. Le transfert de la CAO vers le prototypage rapide.
4. La fabrication du modèle en prototypage rapide.
5. La finition du prototype.

V.8.4 DIFFERENTS TYPES (Voir Chap I)

- Stéréolithographie
- Stratoconception
- Frittage de poudre
- Imprimante 3D

V.9 PROGRAMMATION DES MOCN

V.9.1 ORGANISATION ET STRUCTURE D'UN PROGRAMME CNC

Un bloc est une suite de mots qui définit une seule instruction. Un bloc peut être un seul mot ou une combinaison de mots.

Un bloc est terminé par un caractère de fin de bloc END OF BLOCK (EOB). Dans la plupart des langages, l'EOB est visible, et dans certains langages, il n'est pas (NUM). Quelques exemples de blocs sont fournis ci-dessous avec un EOB visible :

M02 ; (bloc d'un mot)

N11 M30 ; (bloc de deux mots)

N12 T01 M06 ; (bloc de trois mots)

N13 G80 G90 G18 ; (bloc de quatre mots)

N14 G01 X5.0 Y107 F355 ; (bloc de cinq mots)

Chaque mot est composé d'une adresse et d'une valeur. Le code de l'adresse est le caractère de la seule lettre (A-Z) au début de chaque mot qui définit ce que l'ordinateur doit faire avec les données numériques qui suit. Ces définitions d'adresses sont les plus couramment utilisées pour le fraisage et le tournage, elles peuvent varier selon les langages. Les Mots composés d'adresses G, communément appelés fonctions G, sont les codes les plus utilisés en programmation G-Code (d'où son nom) (Tableau V.3). Beaucoup de ces G-codes sont normalisés à l'ensemble des langages et armoires CNC. Les plus connus sont les CODE G00 G01 G02 G03 Il s'agit de mouvements rapides et de travail, qui représentent les déplacements linéaires et circulaires. Les mots composés d'adresses M, communément appelé M-codes, sont des codes d'adresse machines qui n'impliquent pas de mouvement de l'outil.

Exemples / Tableau V.3 Exemple d'adresses de mot

M03 mise en route la broche ; M07 Arrosage lubrification ; M06 changement de l'outil.

Exemples d'adresses de mot
A axe rotatif X
B axe rotatif Y
C axe rotatif Z
X dimension du mouvement sur axe
Y dimension du mouvement sur axe
Z dimension du mouvement sur axe
D compensation outil
F Avance travail
G Fonction préparatoire (G-codes)
H Compensation outil
N Numéro de bloc
L répétition de cycle
R Rayon
S Vitesse de broche
T Numéro outil

V.9.2 LANGAGE ET PROGRAMMATION CNC

La programmation consiste à décrire les opérations d'usinage dans un langage codé (appelé code G) assimilable par le calculateur de la machine. C'est le langage de programmation des MOCN. Ce langage est normalisé (Norme ISO 1056) où certains codes utilisés ont les mêmes fonctionnalités pour différents contrôleurs de machines-outils (NUM, FANUC, SIEMENS...). Les autres codes peuvent avoir une interprétation différente d'un contrôleur à un autre. Le langage de programmation des MOCN possède les caractéristiques suivantes :

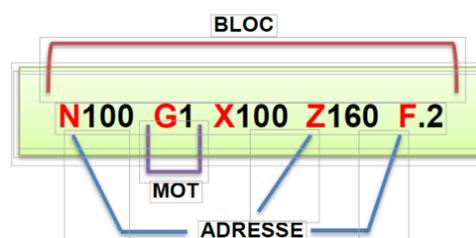
- La chronologie des actions,
- L'appel des outils,
- La sélection des vitesses de coupe et d'avance,
- La formulation des trajectoires,
- La définition des coordonnées de fin de trajectoire et
- Les mises en ou hors fonction d'organes de la machine.

L'ensemble des instructions nécessaire pour l'usinage d'une pièce constitue le programme CN. Ce programme est un ensemble de blocs ou lignes de programme. Chaque bloc est composé de mots (les mots clefs du langage CN).

V.9.2.1 FORMAT D'UN MOT

Un mot du langage CN est constitué d'une lettre appelée adresse et d'un certain nombre de chiffres (de 0 à 9) avec éventuellement un signe + ou - ainsi qu'un point décimal. Le format de chaque mot est l'une des caractéristiques des directeurs de commande. Il faut donc consulter le manuel pour respecter le format autorisé.

- Programme CN :



Un mot peut être une fonction ou un déplacement suivant un axe

G...: fonctions préparatoires

F...: fonctions vitesse d'avance ("Feedrat" = avance)

S...: fonctions vitesse de broche ("Speed" = vitesse)

T...: fonctions outils ("Tools" = outils)

M...: fonctions auxiliaires ("Miscellaneous" = varié, divers)

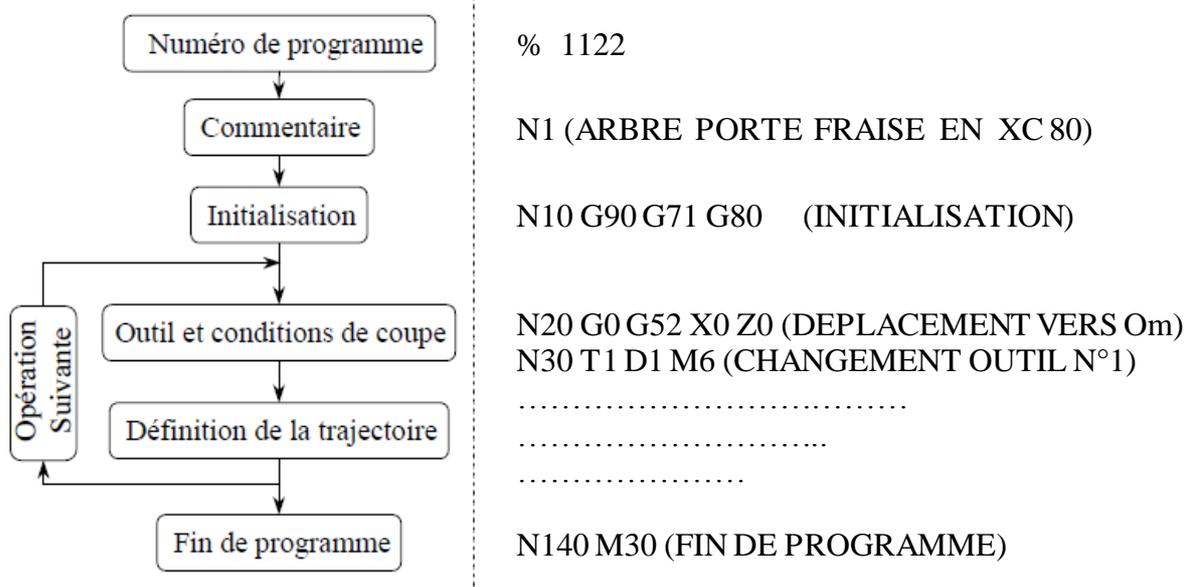
X/Y/Z...: mouvements suivant l'axe X/Y/Z

V.9.3 STRUCTURE D'UN PROGRAMME CN

Pour réaliser les différentes opérations nécessaires à l'usinage d'une pièce un programme CN peut être écrit de différentes manières. Selon la nature de la pièce à usiner et sa complexité différentes structures de programme CN peuvent être proposées :

- Un programme principal,
- Un programme principal contenant des appels de séquences internes,
- Un programme principal et des sous programmes structurés sur deux ou trois niveau.

Pour l'usinage d'une pièce simple ne nécessitant pas des cycles d'ébauche, un programme CN peut être structuré de la manière suivante :



V.9.4 SYSTEME DE COTATION

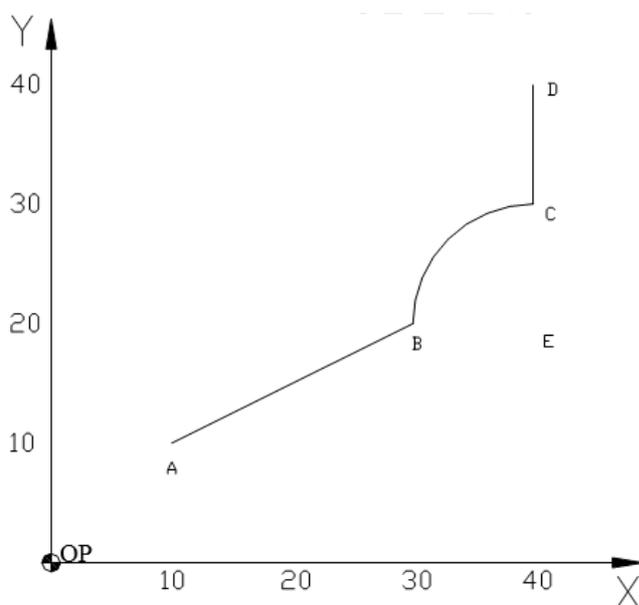
Les cotes programmées peuvent être exprimées dans les formes suivantes :

Programmation absolue (**G90**) : la cote est repérée par rapport à l'origine programme

Programmation relative (**G91**) : la cote est repérée par rapport à la position précédente.

Programmation absolu en cote mesure (**G52**) : la cote est repérée par rapport à l'origine mesure.

- EXEMPLE



Programmation Absolue :

G90 G0 X10 Y10 (A)

G1 X30 Y20 (B)

G2 X40 Y30 I40 J20 (C)

G1 X40 Y40 (D)

Programmation Relative :

G91 G0 X10 Y10 (A)

G1 X20 Y10 (B)

G2 X10 Y10 I10 J0 (C)

G1 X0 Y10 (D)

V.9.5 LES PRINCIPALES FONCTIONS (PREPARATOIRES G ET AUXILLIAIRES M)

Commandes	Description
G00	Avance rapide en coordonnées cartésiennes (la vitesse rapide est programmée par le constructeur).
G01	Interpolation linéaire en coordonnées cartésiennes.
G02	Interpolation circulaire dans le sens horaire en coordonnées cartésiennes.
G03	Interpolation circulaire dans le sens antihoraire (trigonométrique) en coordonnées cartésiennes.
G04	Temporisation.
G09	Arrêt précis.
G10	Avance rapide en coordonnées polaires.
G11	Interpolation linéaire en coordonnées polaires
G12	Interpolation circulaire dans le sens horaire en coordonnées polaires.
G13	Interpolation circulaire dans le sens antihoraire en coordonnées polaires.
G16	Sélection du plan.
G17	Sélection du plan.
G18	Sélection du plan.
G33	Filetage.
G40	Suppression compensation du rayon d'outil (plaquette en tournage).
G 41	Compensation du rayon d'outil à gauche
G 42	Compensation du rayon d'outil à droite.
G 48	Retrait du contour de la manière dont s'est opérée l'approche.
G 50	Suppression modification de l'échelle.
G 51	Sélection modification de l'échelle.
G 53	Suppression du décalage d'origine.
G 54 à G 57	Décalage d'origine.
G 58 et G59	Décalage d'origines additives, programmables.
G 60	Mode d'arrêt précis.
G 62,63	Suppression du mode d'arrêt précis.
G71	Indication de cotes en millimètre.
G90	Programmation en cotes absolues.
G 91	Programmation en cotes relatives.
G 92	Limitation de vitesse pour G96.
G 94	Avance par minute, vitesse d'avance A en mm/mn.
G 95	Avance par tour (<i>f</i>) en mm/tr.
G 96	Vitesse de coupe (m/mn).
G 97	Vitesse constante.

Tableau V.4 Les fonctions préparatoires, instructions G

Commandes	Description
M00	Arrêt programmé
M01	Arrêt optionnel.
M02	Fin de programme pièce.
M03	Rotation de broche sens anti-trigonométrique.
M04	Rotation de broche sens trigonométrique.
M05*	Arrêt de broche.
M06	Changement d'outil.
M07	Arrosage n°2.
M08	Arrosage n° 1.
M09*	Arrêt des arrosages.
M10	Blocage d'axe.
M11	Déblocage d'axe.
M19	Indexation broche.
M40 à M45	6 gammes de broche.
M48*	Validation des potentiomètres de broche et d'avance.
M49	Inhibition des potentiomètres de broche et d'avance.
M64*	Commande broche 1.
M65	Commande broche 2.
M66*	Utilisation mesure broche 1.
M67	Utilisation mesure broche 2.
M998*	Mode MODIF, IMD et appel de sous-programme par l'automate autorisé.
M999	Masquage par programmation des modes MODIF, IMD et appel de sous-programme par l'automate.

Tableau V.5 Les fonctions auxiliaires logiques M.