



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



# Support de Cours

# Techniques de Fabrication

**Destiné aux étudiants M1 Master MMTH.**

**Dr. BOUSSAHA Ahmed.**

## **Préface**

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

Ce cours est dédié aux étudiants du parcours Master I (Master professionnel) de la spécialité Maintenance Des Machines Thermiques et Hydrauliques (MMTH) dont le but de :

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

Le canevas de ce cours est réalisé par notre cher enseignant le défunt **ZAOUCH BOUBAKEUR** a qui je dois rendre un grand hommage.

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

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

## **I. Procédés de fabrication à Chaud**

### **I.1 Introduction**

Les procédés d'obtention des pièces sont très variés selon la nature des matériaux, leur fonction, leur géométrie. Au cours d'une opération de mise en forme, les matériaux s'écoulent à l'intérieur d'un outillage qui peut être un moule, une matrice, une filière, des cylindres de laminoirs etc....

Ainsi, ils obtiennent leurs formes brutes (fils, tôles, plaques, billettes, lingots ...) et sont prêts pour la transformation finale.

Plusieurs techniques de mise en forme des matériaux se font à chaud telle que : La fonderie, le forgeage, le laminage à chaud etc...

### **I.2 La fonderie : une technique de moulage aux multiples procédés**

Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production.

La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (Minerai de fer, ferrailles, déchets de tôles,...), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano-soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie.

#### **I.2.1 Principe de la fonderie**

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

### **I.3 Méthodes de moulage**

#### **I.3.1 Moulage en sable (manuel ou mécanique)**

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

Cette argile, ajoutée avec de l'eau au sable siliceux, confère au moule une plasticité suffisante pour conserver l'empreinte de la pièce après l'extraction du modèle.

Le moulage en sable à vert utilise un modèle généralement permanent et un moule non permanent. Un moule non permanent est un moule qui ne sert qu'une seule fois pour réaliser une pièce. Pour chaque pièce de coulée produite, le moule est détruit. Il existe deux techniques de moulage en sable silico-argileux à vert : le moulage serré manuellement, appelé « moulage main » et le moulage serré mécaniquement, appelé « moulage machine » ou « moulage mécanisé ».

Le moule est composé en général de deux parties : châssis inférieur et châssis supérieur.

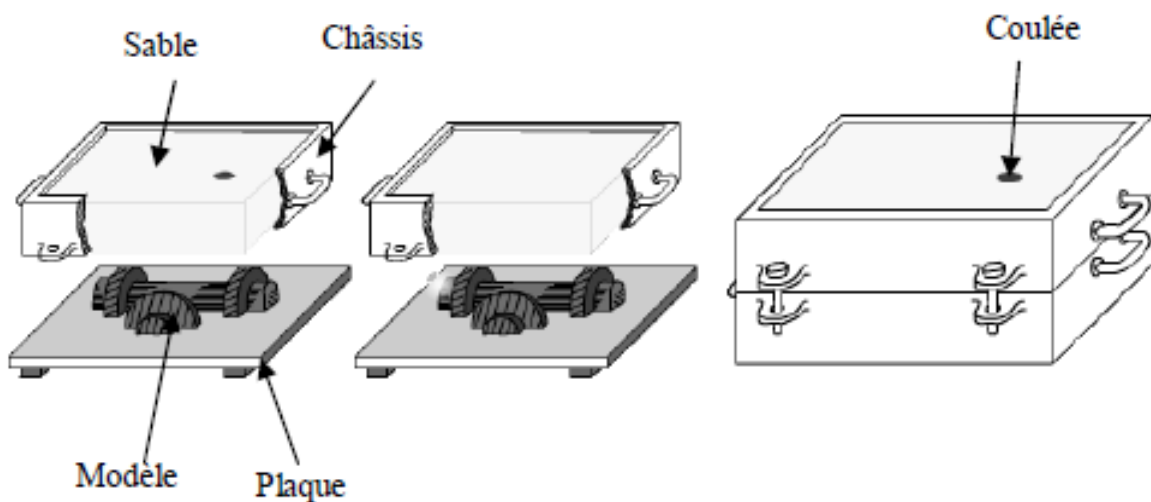


Figure I.1 : Moule en sable

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

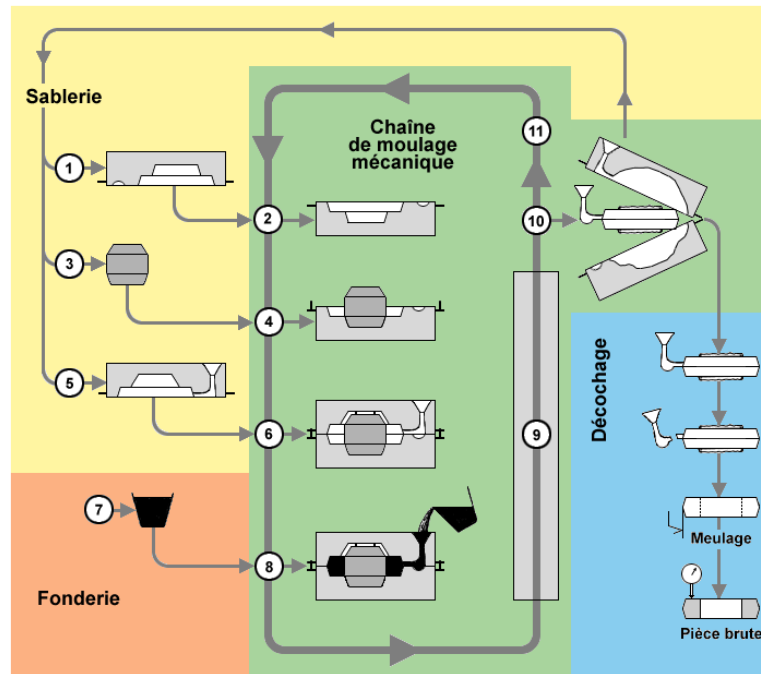


Figure I.2 : Cycle d'obtention d'une pièce par moulage en sable

### I.3.2 Moulage métallique ou moulage en coquille

Le moule permanent peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante.

#### I.3.2.1 Principe du procédé

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

Durant le moulage par gravité, le métal fondu est versé directement dans le moule par le canal de coulée, par contre durant le moulage sous pression le métal fondu est injecté dans le moule au moyen d'une pompe exerçant sur le métal une pression très élevée.

La température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule. De même, pour éviter tout choc thermique, les parties du moule doivent être chauffées à environ 350°C avant la coulée.

### I.3.3 Moulage par gravité

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

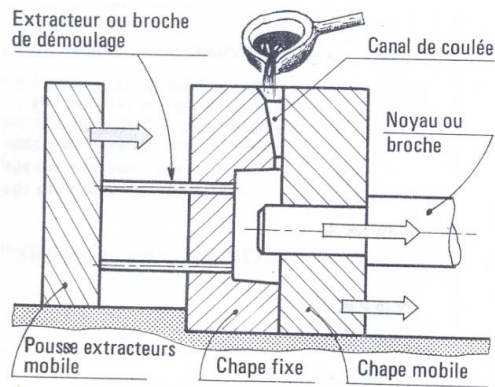


Figure I.3 : Moule fermé

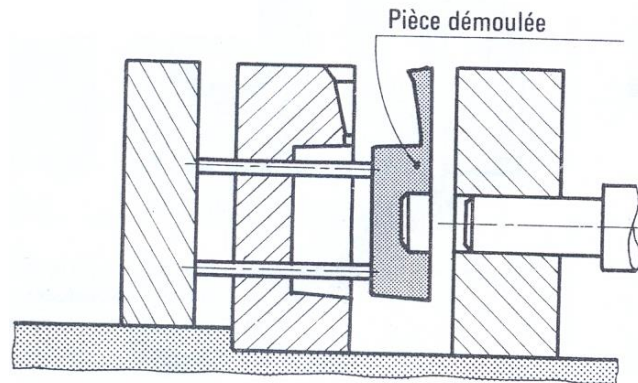


Figure I.4 : Moule ouvert

### I.3.4 Moulage sous pression

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

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

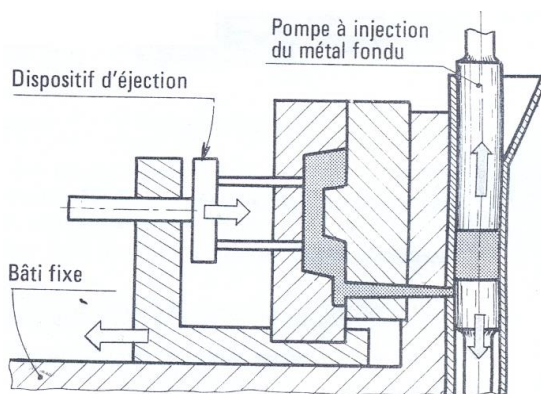


Figure I.5 : Moule fermé

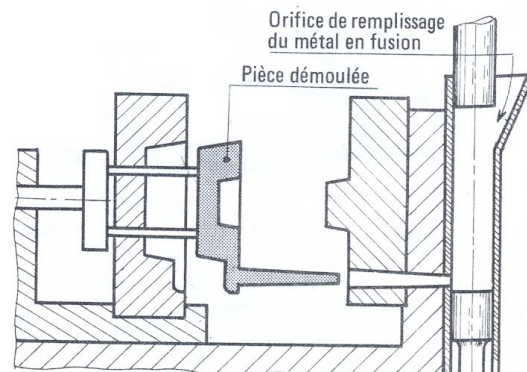


Figure I.6 : Moule ouvert

### I.3.5 Moulage en cire perdue

La technique de moulage à la cire perdue permet de respecter des proportions extrêmement précises au 1/10 de mm près. Il faut d'une semaine à un mois pour fabriquer un moule à la cire perdue : selon sa complexité.

### **I.3.5.1 Principe du procédé**

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

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

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

## **I.4 Le forgeage**

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

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

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

### **I.4.1 Forgeage à la main (travail du forgeron)**

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

- Feu de forge
- Enclume, sa table est trempée et est prolongée par deux appendices appelés bigornes
- Différents marteaux

- Différents pinces de forgeron
- Outils accessoires : poinçon etc.
- Instruments de mesure pour travaux de forgeage
- Habillement (tablier en cuir, chaussures, gants, lunettes etc.)

#### I.4.2 Forgeage mécanique ou industriel

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

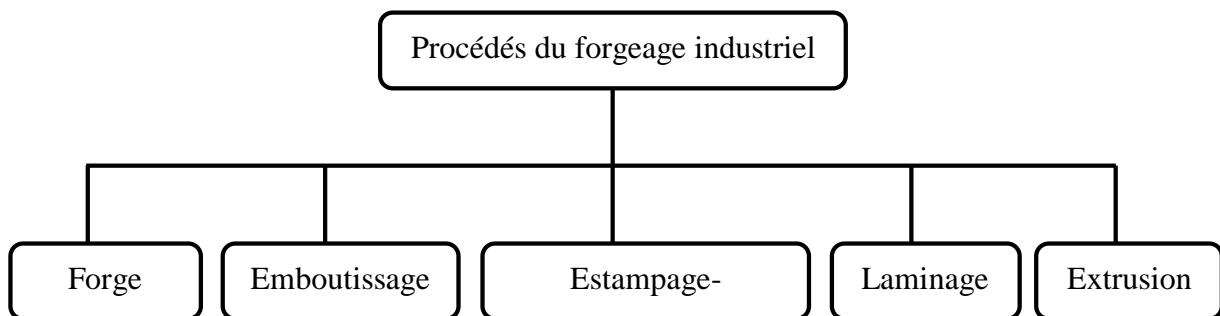


Figure I.7 : Procédés du forgeage industriel

#### I.5 Critères de choix du procédé

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

**I.5.1 Intérêt du forgeage :** génération d'un fibrage qui améliore les performances mécaniques.

#### I.6 Forge libre

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

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

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

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



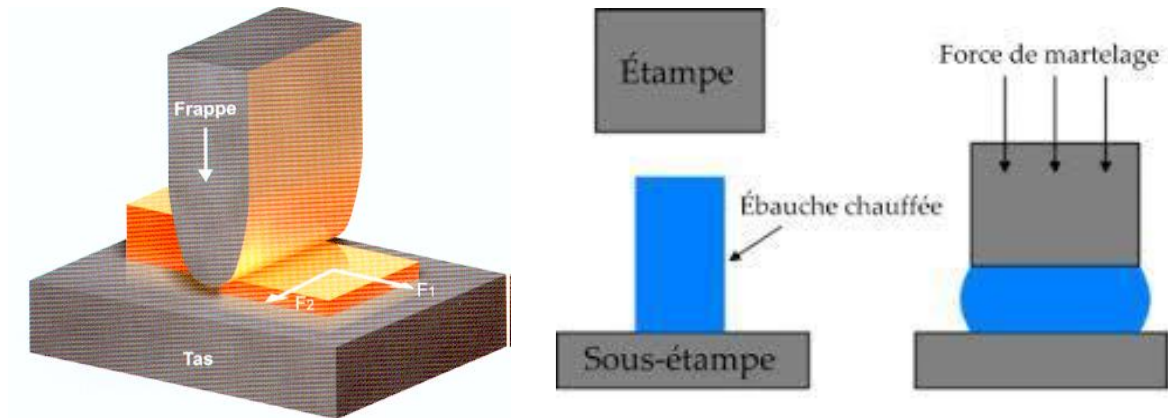


Figure I. 8 : Principe de la forge libre

## I.7 Emboutissage

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

### I.7.1 Conception générale d'un outil d'emboutissage :

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

- **Outils à simple effet** : configuration la plus simple, composée principalement d'une matrice et d'un poinçon.

- **Outils double effet** : comprend en plus de l'outil simple effet, un serre-flan. L'outillage utilisé en emboutissage comprend donc :

- ✓ Une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce ;
- ✓ Un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle ;
- ✓ Un serre-flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon, évite le plissement de la tôle et contrôle son écoulement le long du poinçon.

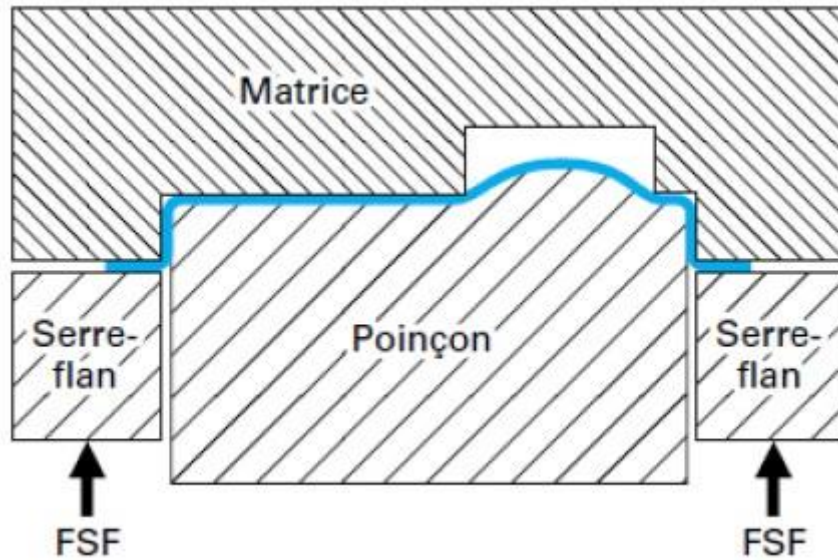


Figure I.9 : Conception générale d'un outil d'emboutissage (FSF représente la force sur le sert-flan)

### I.7.1 Méthode de formage : rôle du serre-flan.

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

### 1.7.2 Principe d'emboutissage

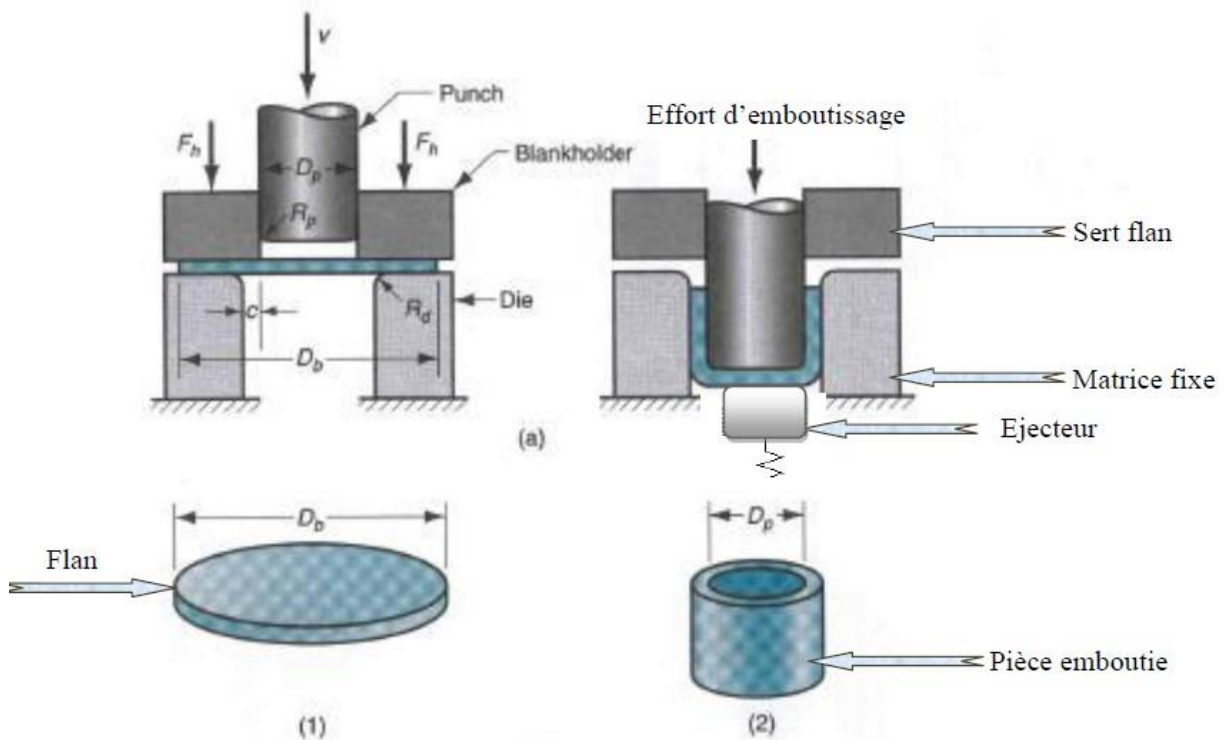


Figure I.10 : Principe d'emboutissage

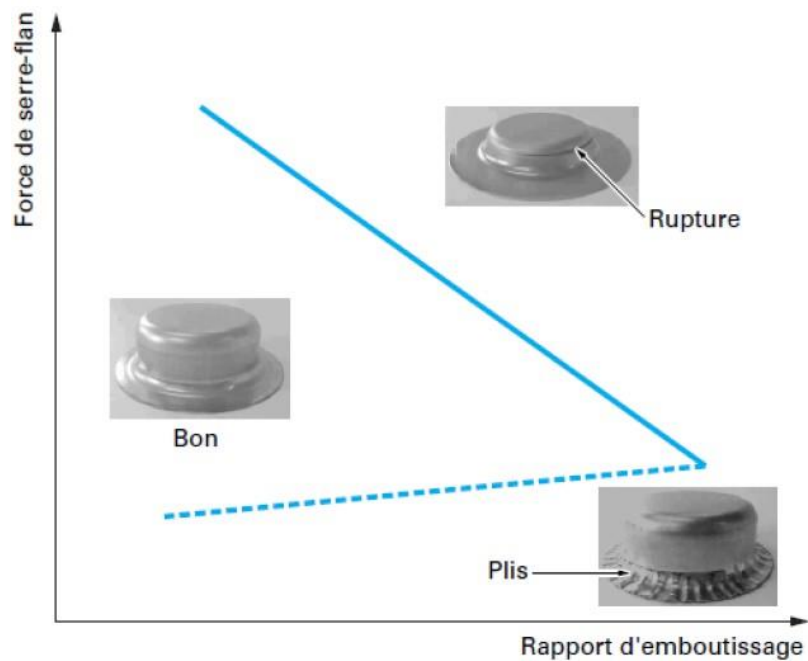


Figure I.11 : Latitude de force de serre-flan

### I.8 Principe de l'essai Engelhardt :

Ce principe consiste à emboutir normalement une pièce jusqu'à dépassement du maximum de la courbe effort de formage-course, et de la faire casser en bloquant le métal sous le serre-flan.

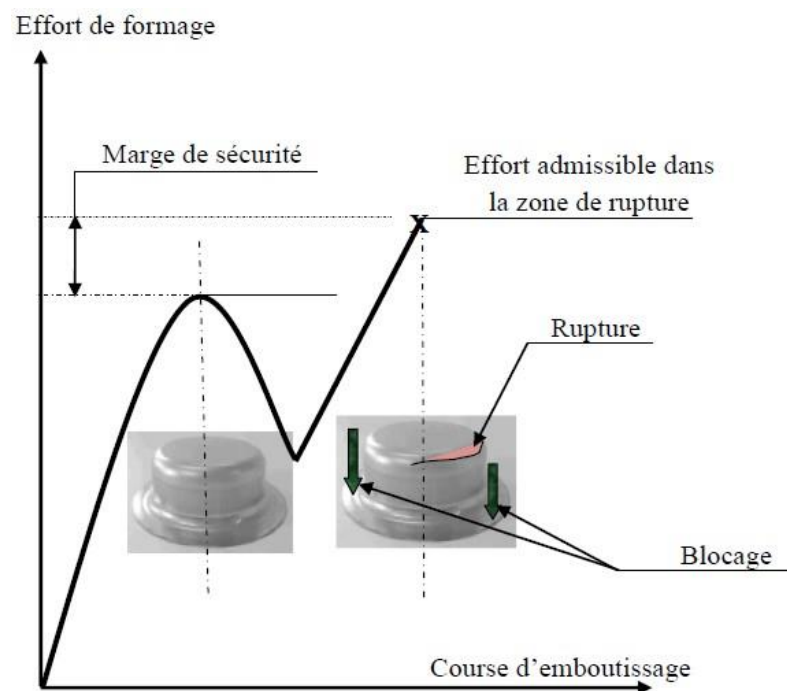


Figure I.12 : Principe de l'essai Engelhardt

La marge de sécurité de la pièce est caractérisée par la différence entre les deux efforts.

**I.8.1 Effort d'emboutissage : Cas des pièces cylindriques****1- Pièces cylindriques sans serre-flan :**

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

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

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

Tableau I.1 : Valeurs de **k** en fonction de  $\frac{d}{D}$ **I.8.2 Effort sur le serre-flan : (Pièce cylindrique avec serre-flan).**

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

- **F<sub>s</sub>** : effort sur le serre-flan (daN) ;
- **P** : Pression spécifique sur le serre-flan (N/mm<sup>2</sup>), en fonction du matériau.

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

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

**Exemple d'application**

Calculer l'effort d'emboutissage sans et avec serre-flan si nous avons à emboutir un flan en tôle ayant 250 mm de diamètre et  $R_m = 450 \text{ daN/mm}^2$  (résistance pratique à la rupture par traction).

On donne :  $e = 5 \text{ mm}$  ;  $k = 0,72$  ;  $\frac{d}{D} = 0,65$  et  $P = 10 \text{ N/mm}^2$ .

**Réponse**

- L'effort d'emboutissage sans serre-flan

$$F_{ssf} = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot k ;$$

$$\frac{d}{D} = 0,65 \quad \longrightarrow \quad d = 0,65 \cdot D = 0,65 \times 250 = 162,5 \text{ mm}$$

$$\longrightarrow F_{\text{ssf}} = 3,14 \times 162,5 \times 5 \times 450 \times 0,72 = 826605 \text{ daN}$$

- Effort sur le serre-flan

$$F_{\text{sf}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot P = \frac{3,14}{4} [(250)^2 - (162,5)^2] \cdot 10 = 28333,6 \text{ daN}$$

- L'effort d'emboutissage avec serre-flan

$$F_{\text{asf}} = F_{\text{ssf}} + F_{\text{sf}} = 826605 + 28333,6 = 854938,6 \text{ daN}$$

## I.9 Estampage-matrigage

### I.9.1 Définitions :

Les deux termes sont synonymes cependant :

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

### I.9.2 Principe du procédé

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

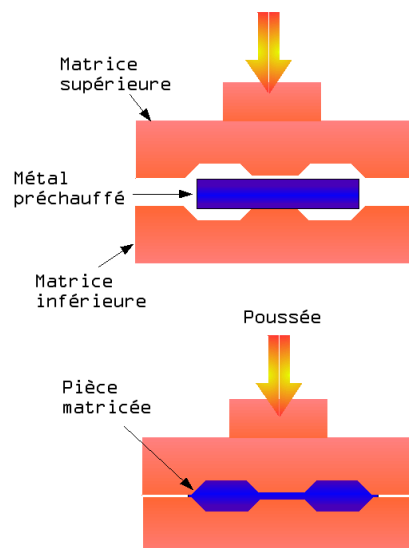


Figure I.13 : Principe de l'estampage-matrigage

Le succès du matrigage vient de trois avantages majeurs :

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

### I.10 Laminage

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

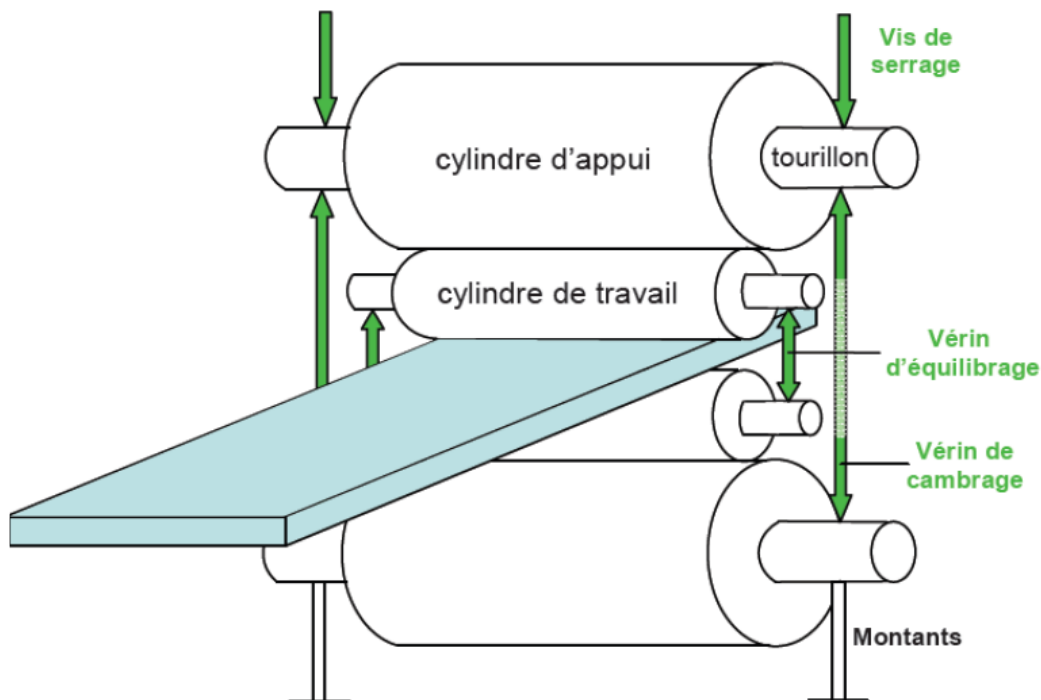


Figure I.14 : Principe du laminage

#### I.10.1 Laminage à froid et Laminage à chaud

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

La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal.

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

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

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

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

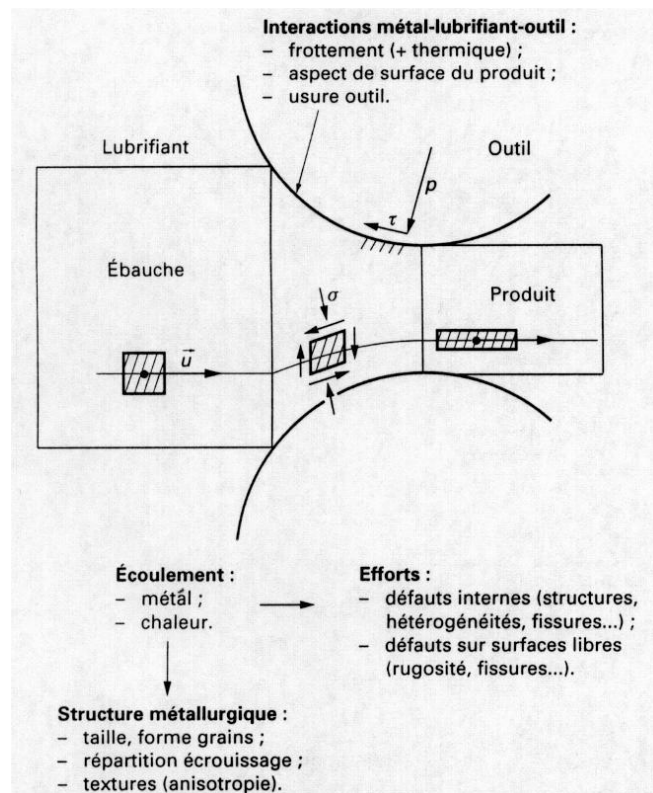


Figure I.15 : Phénomènes apparaissant lors laminage

### I.11 L'extrusion

L'extrusion est un procédé de fabrication thermo-mécanique par lequel un matériau chauffé, comprimé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir : c'est le forgeage par extrusion.

Par le procédé d'extrusion, on obtient un produit long de section transversale constante sur toute sa longueur. La section est généralement plus complexe que celle d'une barre ou d'un tube. Selon la forme de sa section transversale, il est appelé profilé plein, semi-creux, ou creux.

L'extrusion donne des pièces aux formes encore plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage. De plus, les pièces présentent des états de surface excellents, ce qui permet souvent de les utiliser sans usinage complémentaire.

L'extrusion s'applique à divers produits tels les métaux, les matières plastiques, les caoutchoucs, les matériaux composites, mais aussi l'argile pour la fabrication des briques alvéolaires, les pâtes alimentaires, et également à certaines matières pharmaceutiques pour la fabrication de médicaments

### I.11.1 Termes techniques de l'extrusion

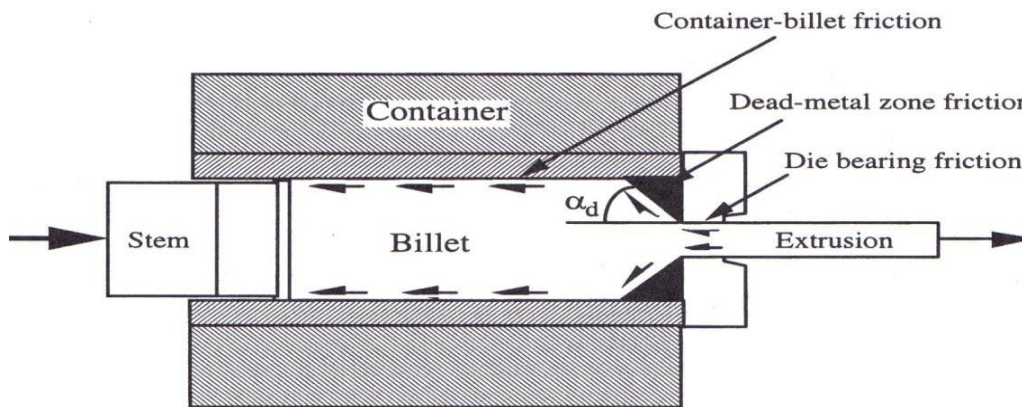


Figure I. 16 : Principe de l'extrusion

- Billette (billet) : Métal plein coulé sous forme cylindrique ou de lingot.
- Conteneur (container) : Chambre qui contient la billette, fermé à une extrémité par un piston et à l'autre par la filière.
- Zone morte (dead-metal zone) : Zone contre la filière dans laquelle le métal ne s'écoule pas.
- Extrudabilité : Facilité avec laquelle un alliage s'extrude

### I.11.2 Types d'extrusions

Avec la méthode d'extrusion, on peut usiner une large gamme de matériaux n'ayant pas les mêmes caractéristiques. C'est pour cette raison qu'il n'est pas possible d'utiliser toujours le



même procédé d'extrusion avec des matériaux aussi différents que l'acier et l'aluminium. C'est pourquoi, il a été développé plusieurs méthodes d'extrusion.

### I.11.2.1 Extrusion directe

Ce procédé est le plus répandu, surtout concernant les alliages doux (à grande filabilité). La billette de métal préalablement chauffée est placée dans le conteneur. Un piston exerce une force sur cette billette, qui se retrouve plaquée contre la filière et file à travers celle-ci en prenant sa forme définitive.

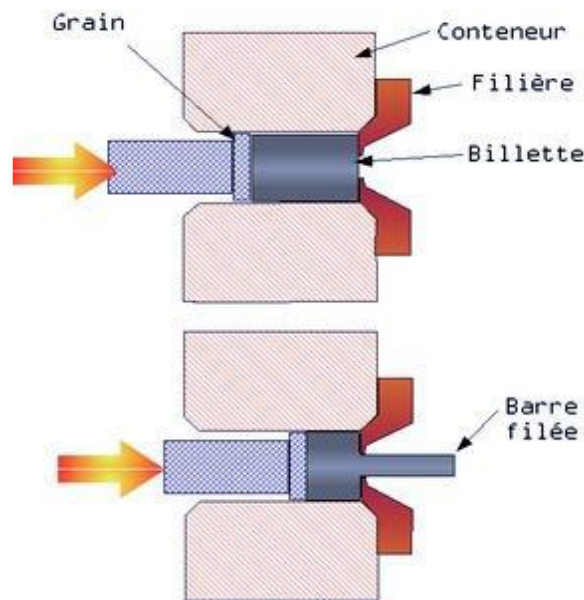


Figure I.17 : Extrusion directe

### I.11.2.2 Filage inverse ou indirecte

Dans le cas du filage inverse, la billette reste fixe par rapport au conteneur et c'est la filière qui avance. Le produit profilé sort donc dans le sens inverse à l'action du piston. Cette méthode permet au produit d'avoir un flux dans le matériau plus uniforme, car on a éliminé les frottements entre la billette et le conteneur. Donc le profilé sort de la filière de façon plus homogène et la qualité est meilleure.

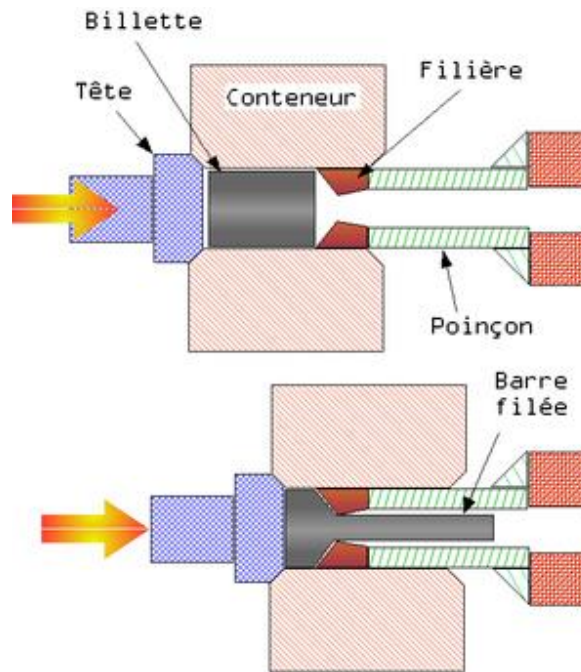


Figure I.18 : Filage inverse ou indirect

### I.11.2.3 Extrusion hydrostatique

Le principe de l'extrusion hydrostatique est le même que pour l'extrusion directe, mais la billette baigne dans un liquide dans le conteneur. On utilise ce procédé sur des billettes froides ou préchauffées. L'avantage principal de l'extrusion hydrostatique est que c'est le liquide qui exerce la pression transmise par le piston sur la billette. Donc la pression radiale est égale à la pression axiale (pression isostatique) sur la billette. De plus, il n'y a plus de friction entre la billette et le conteneur, ce qui implique un écoulement très uniforme.

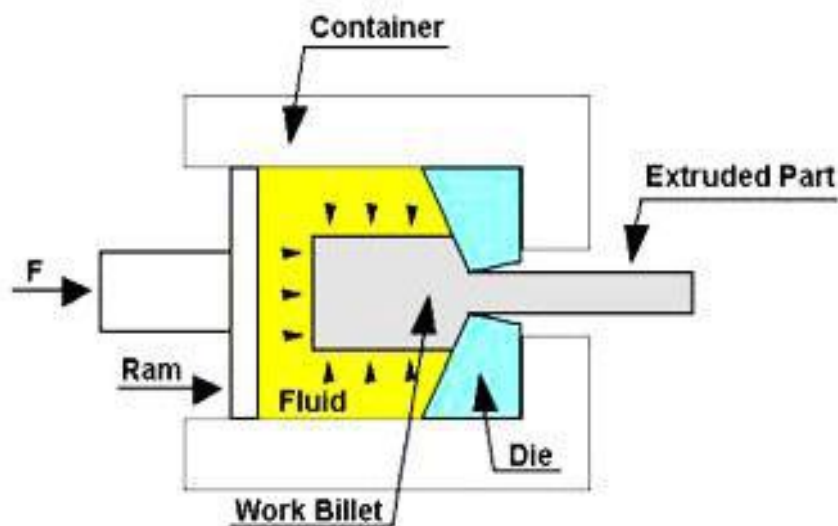


Figure I.19 : Extrusion hydrostatique

## I.12 Les métaux et l'extrusion

Tous les métaux ne sont pas extrudables, cependant, il faut que le métal puisse au moins avoir une déformation à chaud

- ✓ **L'aluminium** : C'est le métal le plus facilement extrudable et par ailleurs le plus extrudé. En général, on chauffe une billette d'aluminium entre 400°C et 450°C.
- ✓ **Le cuivre** : Le cuivre seul et le cuivre allié sont largement répandus dans l'industrie des constructeurs. On les extrude généralement entre 750°C et 800°C
- ✓ **Les aciers** : Difficilement extrudables, car la matière est très dure. Il faut donc chauffer la billette entre 1000°C et 1250°C
- ✓ **Le Titane** : Le titane est difficilement extrudable, à cause de son oxydation rapide au-dessus de 700°C et l'absorption de gaz tel que l'hydrogène au-dessus de 1000°C.

### I.12.1 Le flux

L'écoulement dépend de plusieurs paramètres :

- Du matériau
- De la méthode d'extrusion
- Du frottement
- De la thermique dans le système.

**I.12.2 La température** : Un des paramètres important concernant l'extrusion des métaux est la température. En effet, elle a une influence sur la durée de vie de l'outillage et sur la qualité du produit filé. Une augmentation de la température d'extrusion permet un écoulement plus facile et une déformation des métaux plus aisée, cependant la vitesse d'extrusion maximale est réduite, à cause des pics de température élevés qui pourraient amener à un début de fusion du matériau utilisé.

Le chauffage de la billette peut s'effectuer

- Par induction
- Par gaz
- Combiné (gaz et induction)

Il est important de noter que la température à laquelle on chauffe la billette dépend de plusieurs paramètres :

- Le métal qui constitue la billette
- La force que la presse peut fournir

Le rapport de filage : Section de la billette/Section du produit filé. Plus ce rapport est grand, plus la température le sera.

Lors de l'extrusion, la billette, le conteneur et la filière changent de température, ce qui est dû à une génération de chaleur venant de la friction et de la déformation de la billette.

### I.12.3 Rapport d'extrusion R

C'est le rapport entre l'aire de la section initiale  $A_0$  de la billette et l'aire de la section finale après extrusion  $A_f$

$$R = \frac{A_0}{A_f}$$

R est d'environ  $\frac{40}{1}$  pour l'extrusion à chaud des aciers ; et de  $\frac{400}{1}$  pour l'extrusion de l'aluminium.

### I.12.4 Fraction de réduction en section, r

$$r = \frac{A_f}{A_0}$$

### I.12.5 Vitesse du produit extrudé

La vitesse du produit extrudé est égale à la vitesse du piston multipliée par le rapport d'extrusion R

$$V_{p.ext} = V_{pist} \cdot R$$

### I.12.6 Force d'extrusion

La force d'extrusion peut être exprimée par :

$$F_e = k \cdot A_0 \ln \frac{A_0}{A_f} \text{ Où :}$$

- **k** est une constante d'extrusion qui exprime le facteur global qui représente le flux de contraintes, la friction, et la déformation non-homogène pendant l'extrusion.

### I.12.7 Effet de la température sur l'extrusion à chaud

La température de la pièce à forger par extrusion, durant le processus de travail des métaux dépend de :

1. La température initiale de la filière et du matériau à travailler ;

2. La chaleur générée par la déformation plastique du matériau ;
  3. La chaleur générée par friction à l'interface filière/matériau (la plus élevée),
  4. Le transfert de chaleur entre le matériau à déformer, la matrice et le milieu environnant
- Habituellement, la température à l'interface matériau / outil est la plus élevée en raison de friction.

Si on néglige les gradients de température dues à la déformation du matériau et on considère le matériau comme une plaque mince, la température moyenne instantanée à l'interface est donnée par :

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp \left[ \frac{-h.t}{\rho.c.\delta} \right] \text{ Tel que :}$$

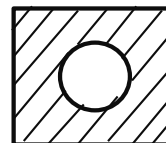
- $T_0$  : température de la pièce à travailler ;
- $T_1$  : température du moule (la filière) ;
- $h$  : coefficient de transfert de chaleur entre le matériau à travailler et le moule ( $\text{W.m}^2.\text{K}^{-1}$ ) ;
- $\delta$  : épaisseur du matériau entre les moules (mm) ;
- $\rho$  : masse volumique du matériau ( $\text{kg/m}^3$ ) ;
- $c$  : chaleur spécifique du matériau ( $\text{J/Kg/K}$ ) ;
- $t$  : le temps (min)

### Exemple d'application

- Calculer

La force d'extrusion, le rapport d'extrusion et la vitesse du produit extrudé pour les données suivantes :

- Diamètre du lopin à extruder  $D = 200 \text{ mm}$
- La forme et les dimensions de la section finale est un carré de de 50 mm de côté contenant un vide circulaire de rayon  $r = 10 \text{ mm}$  (Figure)
- $k = 1 \text{ N/mm}^2$  ;
- Vitesse du piston  $V_{\text{pist.}} = 2 \text{ m/min}$



### Réponse

La force d'extrusion :  $F = k \cdot A_0 \cdot \ln \frac{A_0}{A_f}$  ;

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times (200)^2}{4} = 31400 \text{ mm}^2$$

$$A_f = 50 \times 50 - (\pi r^2) = 2500 - [3,14(10^2)] = 2186 \text{ mm}^2;$$

$$\longrightarrow F = 1 \times 31400 \cdot \ln \frac{31400}{2186} = 83524 \text{ N}$$

$$\text{Rapport d'extrusion } R = \frac{A_0}{A_f} = \frac{31400}{2186} = 14,36$$

$$\text{Vitesse du produit extrudé : } V_{p,ext} = V_{p,ist} \cdot R = 2 \times 14,36 = 28,72 \text{ m/min} .$$

### I.13 Métallurgie des poudres : le frittage

En métallurgie des poudres, l'opération de traitement thermique permet, à partir de poudres métalliques préalablement agglomérées par compression disposées dans un moule, d'obtenir un matériau homogène et cohérent, par chauffage, généralement à l'abri de l'air, sous atmosphère de protection. À la différence des produits de fonderie obtenus par fusion et coulée de l'alliage, les produits frittés sont élaborés soit totalement à l'état solide, soit avec fusion partielle d'un constituant, mais sans fusion de l'ensemble des produits. La technique du frittage des poudres métalliques est dérivée de celle qui est employée depuis longtemps pour la cuisson des produits céramiques. Les phénomènes physico-chimiques qui interviennent au cours du traitement de frittage sont nombreux, complexes et interfèrent différemment suivant les caractéristiques des poudres et les conditions mêmes du traitement thermique. Au cours de l'élévation de température et durant son maintien, on distingue les stades successifs ou simultanés suivants :

- Contact initial des particules agglomérées qui facilite d'autant mieux le développement des liaisons métalliques, particulièrement par diffusion à l'état solide ;
- Grossissement des points de contact, les ponts, entre particules ;
- Fermeture de la porosité ouverte.

#### I.13.1 Théorie du frittage

Les mécanismes en jeu et les stades importants dans le processus du frittage dépendent du type de frittage :

- Frittage en phase solide ;
- Frittage activé ;
- Frittage en phase liquide ;
- Frittage sous pression.

Par contre, peu importe le type, le frittage est toujours caractérisé par le changement dimensionnel et de densité de l'agglomérat de poudre. Prenons une quantité de poudre donnée, mise en forme par injection de poudres. En bilan de masse, il y a 100% de poudre. Par contre, en termes de volume, la poudre peut occuper par exemple environ 70% du volume alors que le 30% restant correspond à des trous. Durant le frittage, des liaisons interparticulaires se forment et croissent aux contacts entre les poudres. Ces liaisons sont appelées soudures ou ponts métallurgiques (Figure 32).

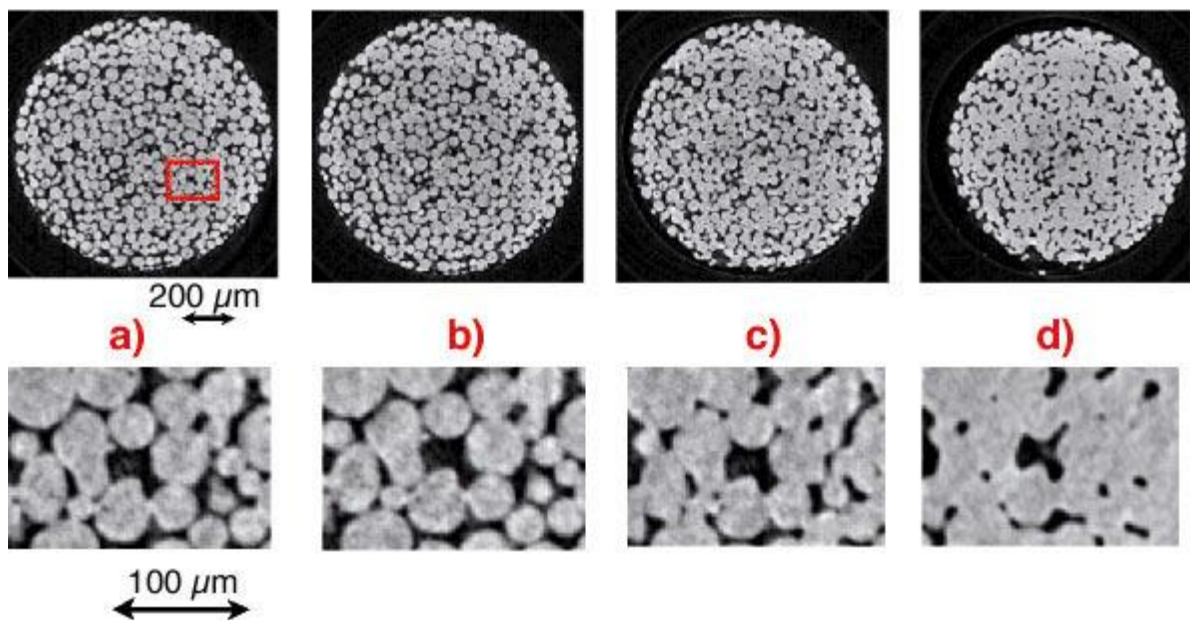


Figure I.20 : Évolution de la croissance des ponts durant le frittage.

Au cours du frittage, les particules de poudres se rapprochent les unes des autres et la quantité de trous diminue. Le volume et la masse de poudre ne changent pas, c'est le volume de trous qu'on appelle "pores" ou la porosité qui diminue. Par le fait même, la densité qui représente le rapport de la masse sur le volume apparent augmente durant le frittage.

Simultanément, il se produit un retrait dimensionnel dû à l'élimination de la porosité dans l'agglomérat de poudres.

On peut écrire la relation suivante :  $\rho = 1 - P$

Où  $\rho$  est la densité relative et P est la porosité.

Le retrait dimensionnel est défini comme la variation de longueur  $\Delta L = L - L_0$  divisée par la longueur initial  $L_0$ . Si le retrait dimensionnel est isotropique, c'est-à-dire le même dans toutes les directions, la relation entre la densité et le retrait dimensionnel est :

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)^3} \quad \text{Où } \rho_0 \text{ est la densité relative initiale.}$$

L'énergie totale d'un agglomérat de poudres dépend beaucoup de l'énergie de surface puisque les particules sont très fines.

$$E_{tot} = \gamma A + uV$$

Où  $E_{tot}$  est l'énergie total du système,  $\gamma$  est l'énergie de surface,  $A$  est la surface totale,  $u$  est l'énergie interne du système par unité de volume et  $V$  le volume.

En considérant les particules sphériques :

$$\frac{E_{tot}}{V} = \frac{6\gamma}{D} + u$$

On remarque que la diminution de la taille des poudres ( $D$ ) augmente l'énergie totale du système par unité de volume. Ainsi, la diminution de la taille des poudres augmente la force motrice du frittage.

La force motrice du frittage vient d'une réduction de l'énergie libre du système par une diminution de l'énergie de surface des poudres. Au départ, la surface spécifique de l'agglomérat de poudre est égale à la somme de toutes les surfaces des particules.

Ensuite, durant le frittage, l'énergie du système diminue en remplaçant les interfaces solide-vapeur aux profits des joints de grains, beaucoup moins énergétiques. Ainsi l'énergie globale de l'agglomérat de poudres est diminuée.

### **I.13.2 Frittage en phase solide**

Le frittage en phase solide est le plus utilisé dans l'industrie. Il permet la densification, l'augmentation des propriétés mécaniques par la diffusion à l'état solide et la conservation de la stabilité dimensionnelle.

### **I.13.3 Stades de frittage en phase solide**

Le frittage en phase solide peut être divisé en trois stades.

#### **I.13.4 Stade initial : la croissance des ponts**

Durant le frittage, des liaisons interarticulaires se forment et croissent aux contacts entre les poudres. Ces liaisons sont appelées soudures ou ponts métallurgiques

Le premier stade du frittage est caractérisé par la croissance des ponts entre les particules. Les particules étant déjà très près les unes des autres, les premiers contacts se font avec les forces de Van Der Waals. Avec la montée en température, les mécanismes de transport



de masse agissent selon la force motrice et le contact s'agrandit. C'est ce qu'on appelle la croissance des ponts.

### **I.13.5 Stade intermédiaire : diminution de la porosité**

Durant le deuxième stade du frittage, le transport atomique des surfaces convexes vers les ponts se poursuit. De plus, les pores passent d'une géométrie angulaire et irrégulière à une forme plus ronde. La porosité est encore ouverte, c'est-à-dire qu'il existe encore des canaux poreux qui passent d'un bout à l'autre de la pièce. Les grains croissent et la pièce se densifie. C'est au cours de ce stade que la densification devient importante et du même coup l'augmentation des propriétés mécaniques.

### **I.13.6 Stade final**

Durant le dernier stade, la porosité se ferme et devient sphérique. Les pores cylindriques s'amincissent constamment jusqu'à devenir instable pour donner lieu à des pores fermés lenticulaires ou sphériques. D'un point de vue microscopique, les pores en réseau cylindriques seront présents aux joints de grains triples tant que l'angle dièdre entre les surfaces sera inférieur à  $120^\circ$ . La limite entre le stade intermédiaire et le stade final se situe à environ 92% de la densité théorique de l'alliage. On appelle pores lenticulaires les pores positionnés aux joints de grains tandis que les pores sphériques sont situés à l'intérieur des grains.

## **I.14 Le frittage flash par la technologie SPS (Spark Plasma Sintering)**

L'origine de cette technologie résulte des travaux de Taylor (Taylor, 1933) qui présentent l'utilisation d'un courant électrique continu pour l'activation des procédés de frittage.

### **I.14.1 Principe**

Un échantillon (en général cylindrique et sous forme de poudre mais aussi sous forme d'éléments massifs en cas d'assemblage) est confiné au sein d'une matrice à l'aide de deux pistons. L'outillage constitué de la matrice et des pistons contenant l'échantillon est placé entre deux pistons d'une machine de compression. La technologie SPS permet d'appliquer à l'ensemble, simultanément ou séparément, un courant électrique et une contrainte axiale. Le chauffage est assuré par le passage d'un courant électrique, de forte intensité et de faible tension, à travers les électrodes de la presse, les pistons, la matrice (généralement en graphite) et également l'échantillon lui-même lorsque celui-ci est conducteur.

Cette théorie est basée sur la création de plasma entre les particules favorisant la formation de ponts ce qui crée, entre les grains, des zones portées à haute température locales qui seront à l'origine de la vaporisation et de la fusion de la surface des poudres activant la création des ponts.

### I.15 Matériaux composites

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

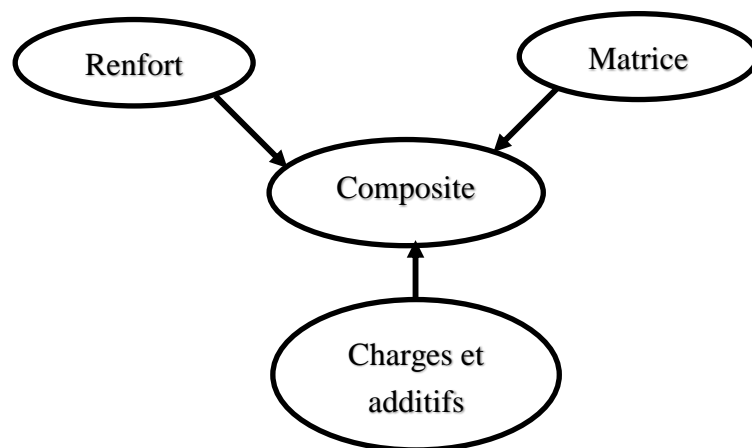


Figure I.21 : Principe d'un matériau composite

#### I.15.1 Quelques définitions

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

La matrice peut être constituée de :

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

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

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

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

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

### 1- Fibre de verre

Très populaire, la fibre de verre est fréquemment utilisée dans l'industrie du transport. Généralement associée avec les polymères, la fibre de verre est un matériau composite très léger qui est particulièrement apprécié pour la réduction de poids qu'il apporte sans aucune perte de performance, bien au contraire. De plus, la fibre de verre contient des propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation très élevées.

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

### 2- Fibre de carbone

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

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

### 3- Fibre de Kevlar

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

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

### I.16.1 Moulage au contact

Le procédé consiste à déposer sur la forme :

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

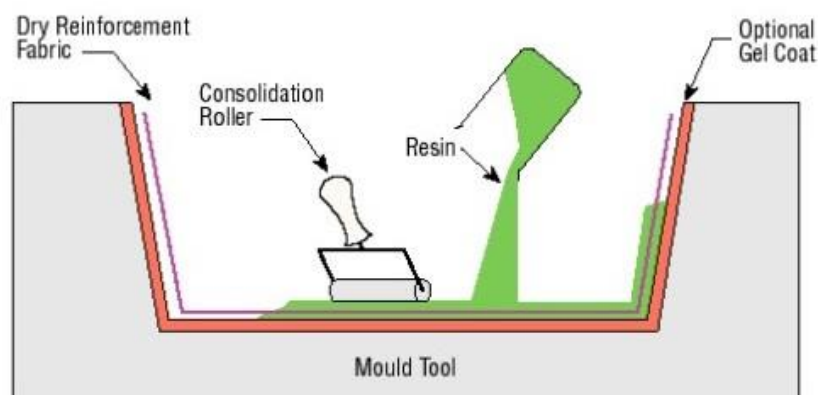


Figure I.22 : Moulage au contact des composites

### I.16.2 Moulage par projection

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

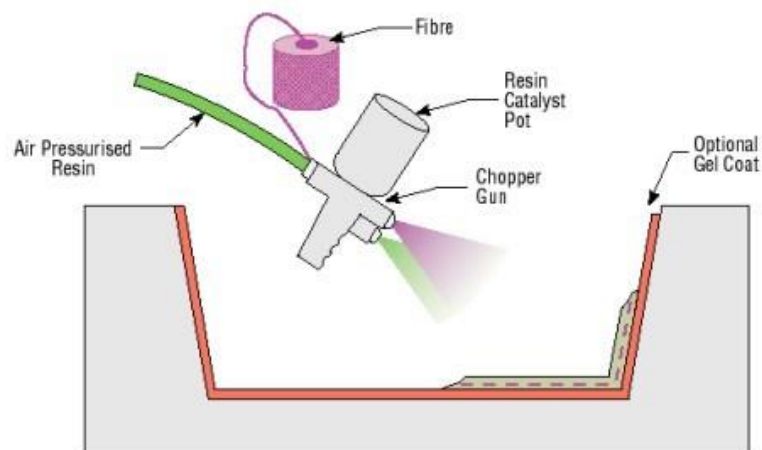


Figure I.23 : Moulage par projection des composites

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

#### Principe :

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

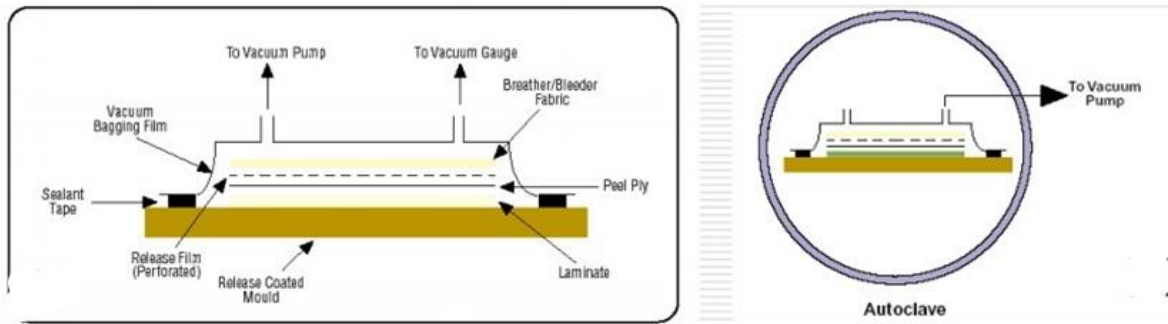


Figure I.24 : Moulage sous vide ou «au sac »

### I.16.4 Enroulement filamentaire

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

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

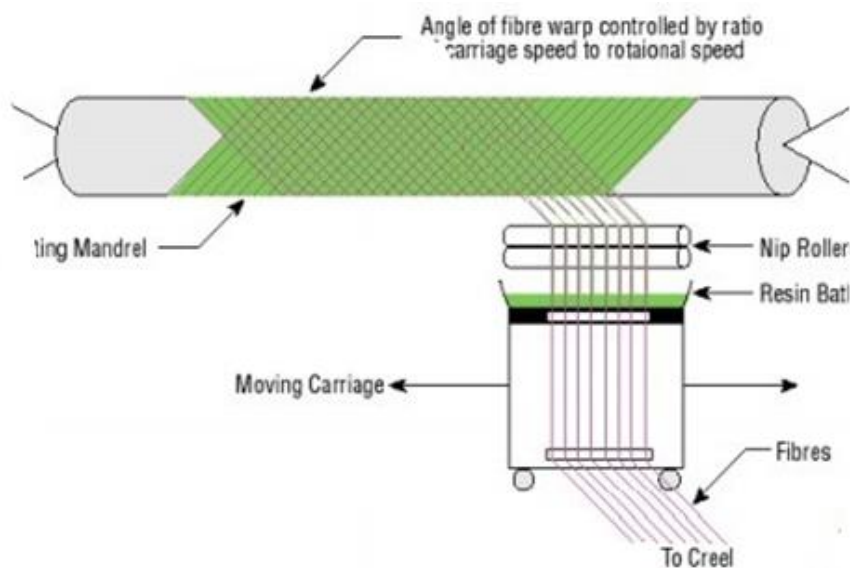


Figure I.25 : Enroulement filamentaire

### I.16.5 RTM (Resin Transfer Moulding)

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

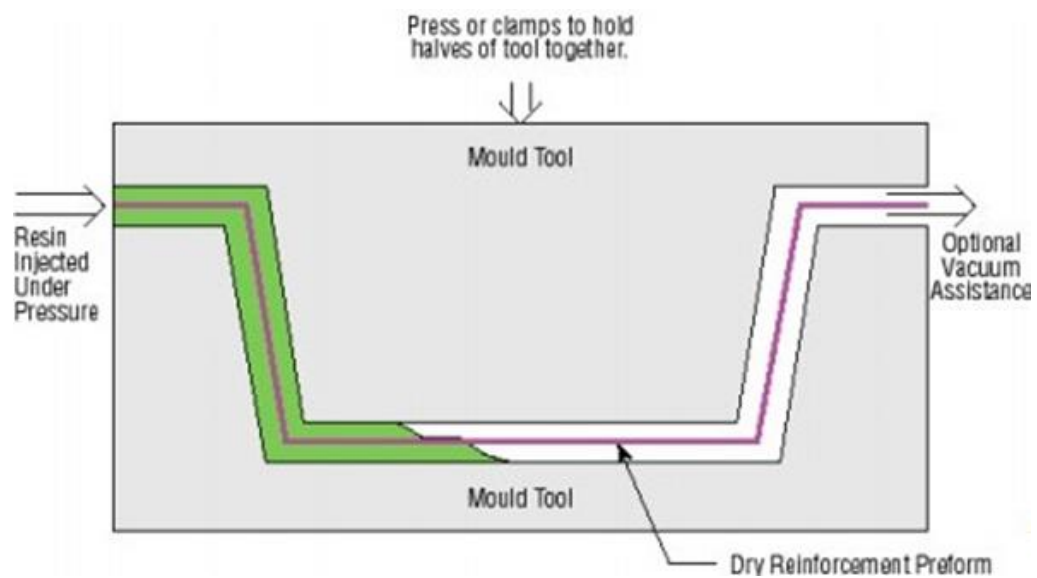


Figure I.25 : RTM (Resin Transfer Moulding)

## II. Procédés de fabrication par enlèvement de matière

### II.1 Introduction

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

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

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

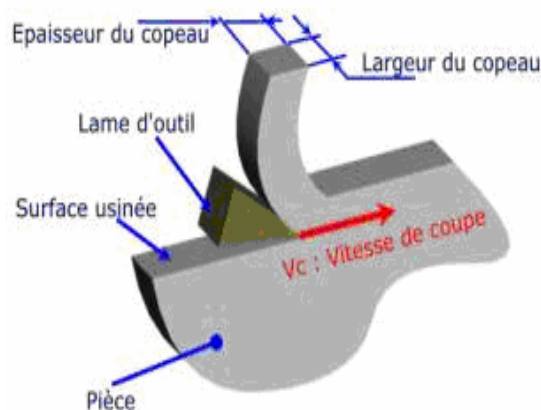


Figure II.1 : Configuration d'usinage

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

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

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

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

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

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

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

En résumé, nous avons la configuration suivante :

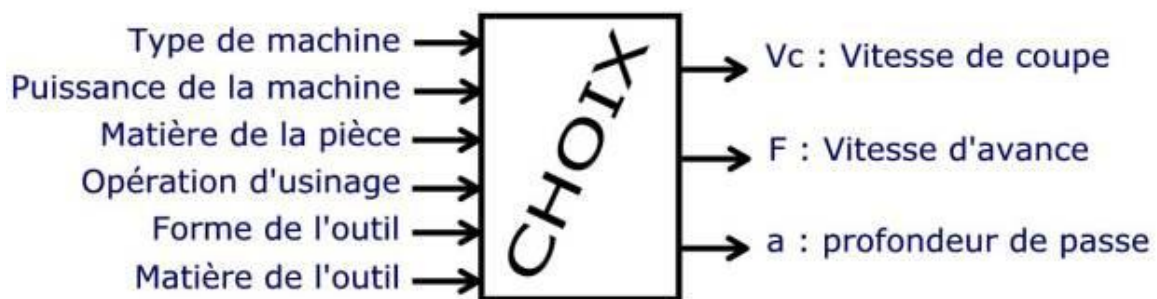


Figure II.2 : Critères définissant les paramètres de coupe

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

## II.2 Le tournage

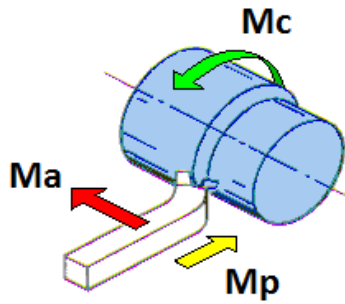
### II.2.1 Définition du procédé

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

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (figure 1).

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





Mc : Mouvement de coupe

Ma : Mouvement d'avance

Mp : Mouvement de pénétration

Figure II.3 : Mouvements en tournage

La combinaison de ces deux mouvements, associés à un mouvement de pénétration définissant la quantité de matière à enlever (profondeur de passe), ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes)

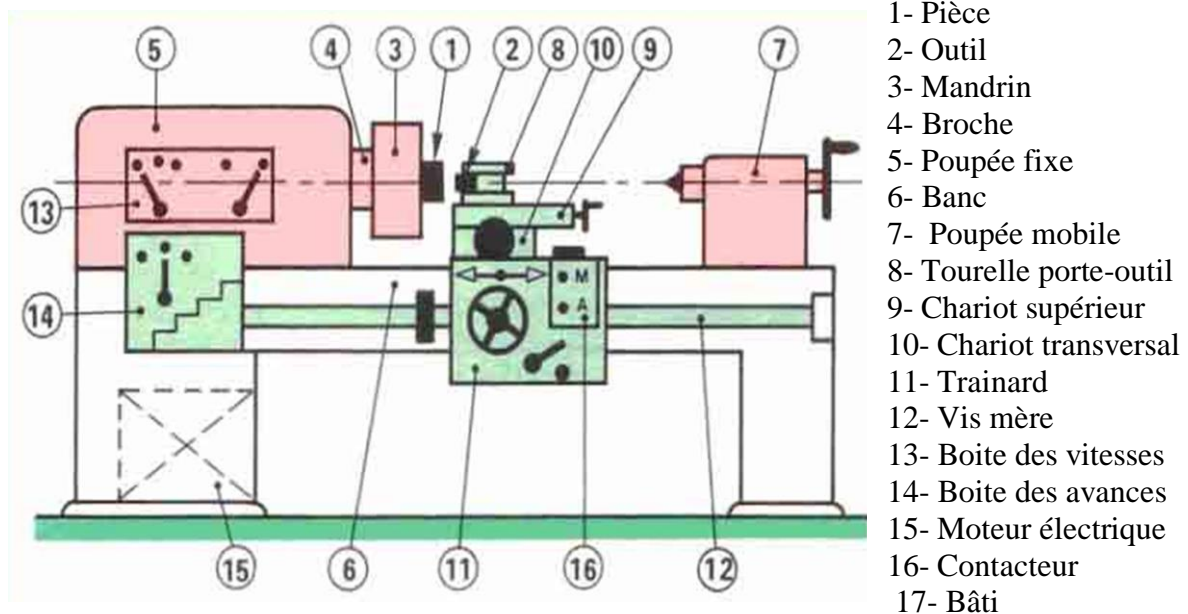


Figure II.4 : Terminologie des organes principaux du tour parallèle.

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

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

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

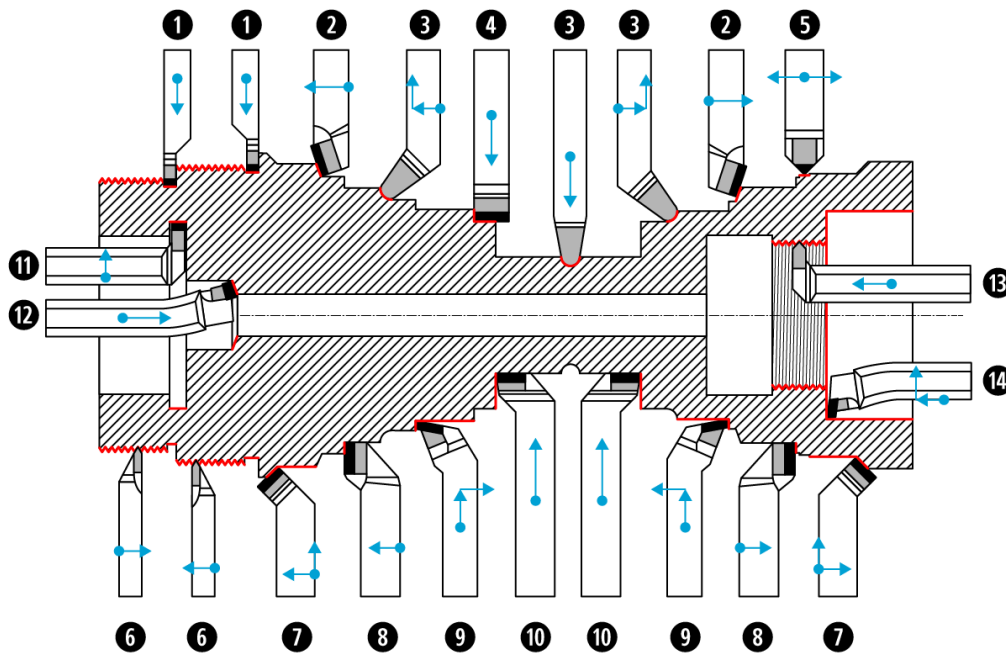


Figure II.5 : Principales opérations de tournage et outils associés.

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

Tableau II.1 : Operations de tournage et outils associés

### II.3 La vitesse de coupe : $V_c$ [m/min]

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

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

Unité :  $V_c$  en m/min.

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

Les valeurs des vitesses de coupes correspondant aux différents matériaux à usiner ont été déterminées expérimentalement par des laboratoires spécialisés dans les essais de coupe.

Le choix de la vitesse de coupe dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont :

- a. La durée de l'outil entre deux affûtages ;
- b. La nature et l'état du métal à usiner ;
- c. La nature de l'outil ;
- d. La lubrification ;
- e. Le mode de travail de l'outil, pour un outil de rabotage travaillant dans les mêmes conditions, on choisira une valeur de  $V_c$  plus faible pour limiter les effets néfastes du choc à chaque passe.
- f. La section du copeau ( $S \text{ (mm}^2\text{)} = f \text{ (mm)} \times a \text{ (mm)}$ ).
- g. La profondeur de passe  $a$  ;
- h. L'avance  $f$ .

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

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

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

1. On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre  
 $D = \text{diamètre du cylindre}$  ;
2. On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan  
 $D = 2/3 \text{ diamètre maxi du plan}$ .

#### II.4 La vitesse d'avance en tournage : $F$ [mm/min]

Elle correspond à la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée.  $F = f \cdot N = \text{mm/tr}$   
L'avance  $f$  est choisie en fonction du type d'usinage (ébauche, finition ou demi-finition).

## II.5 Le fraisage

### II.5.1 Définition du procédé

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière réalisé sur une machine-outil appelée fraiseuse faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil appelé fraise à plusieurs arêtes (Mouvement de coupe) et l'avance rectiligne de la pièce à usiner (Mouvement d'avance) (figure 25). Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des rainures, contournage, etc. (Figure 27).

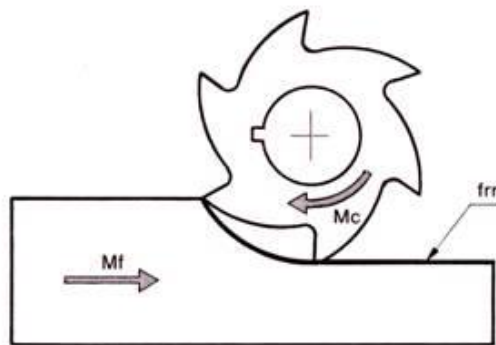


Figure II.6 : Mouvements en tournage

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

1. Bâti
2. tête
3. Broche
4. Outil (Fraise)
5. Pièce
6. Table longitudinale
7. Table transversale
8. table verticale

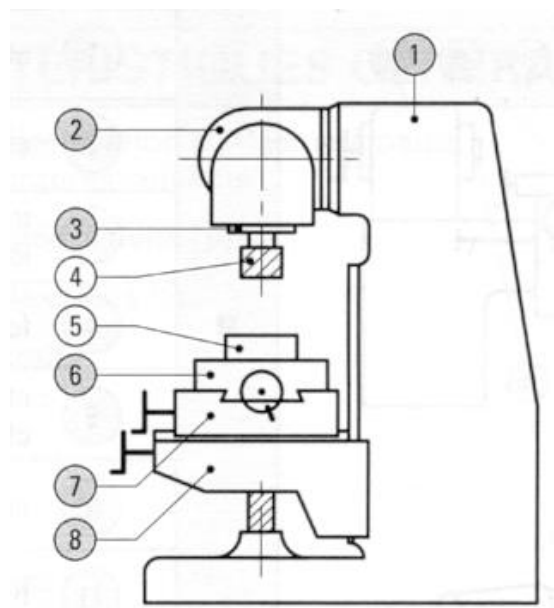


Figure II.7 : Terminologie des organes principaux d'une fraiseuse

### II.5.2 Les principales opérations de fraisage

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

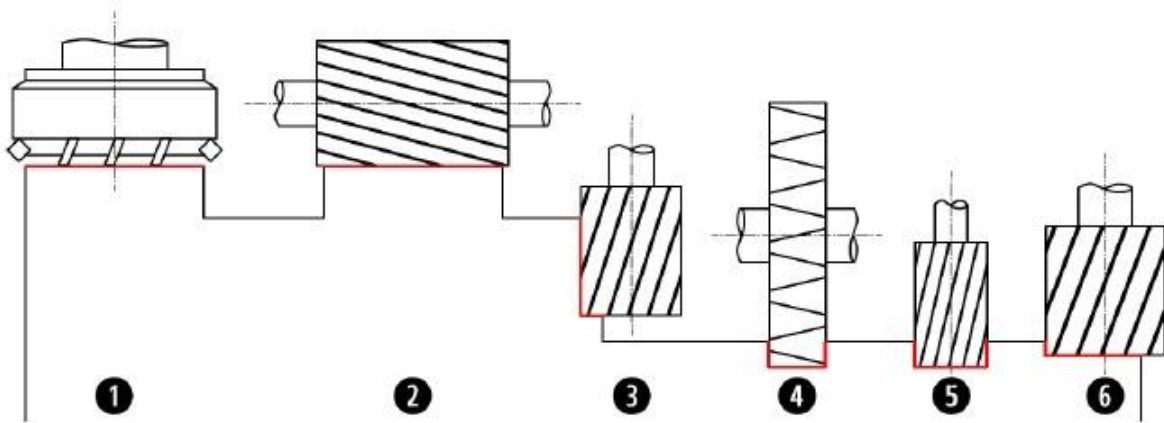


Figure II.8 : Principales opérations de fraisage et outils associés.

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

Tableau II.2 : Opérations de fraisage

### II.5.3 La vitesse de coupe pour le fraisage ( $V_c$ en m/min)

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

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

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

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

### II.5.4 La vitesse d'avance en fraisage

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

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

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

$Z$  : nombre de dents de la fraise ;

$N$  : fréquence de rotation en tr/min

### II.6 Le perçage

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

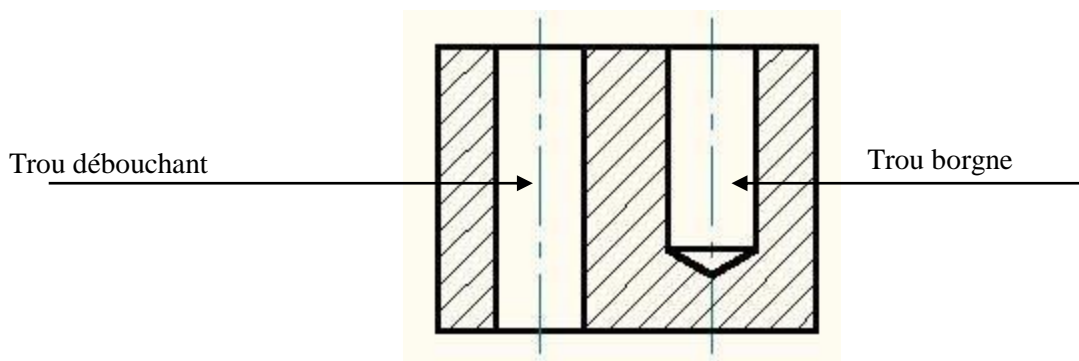


Figure II.9 : Perçage

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

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

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

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

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

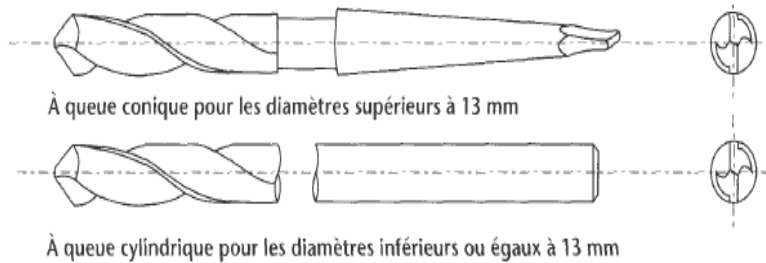


Figure II.10 : Outils de perçage

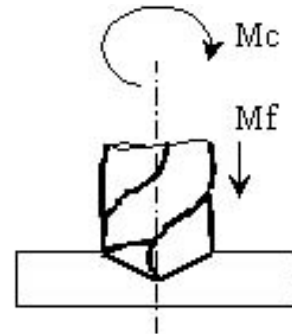


Figure II.11 : Mouvements en perçage

Ces deux mouvements sont caractérisés par :

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

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

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

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

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

### II.6.1 Choix de l'avance : (en mm/tr)

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

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

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

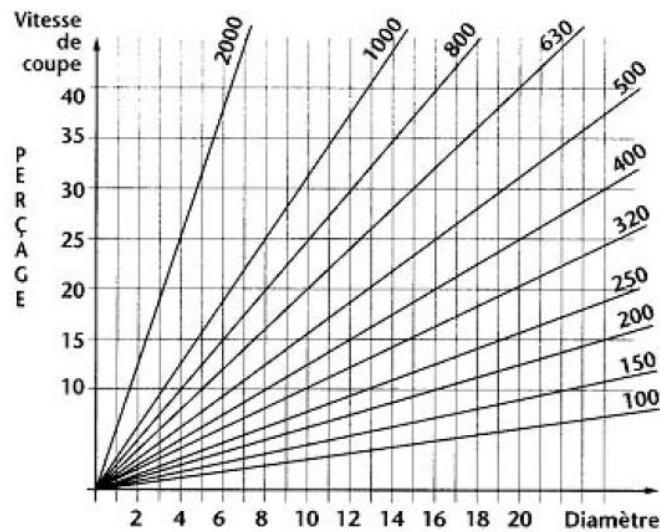


Figure III.12 : Abaque reliant la vitesse de coupe et le diamètre de l'outil de coupe

### Exemple d'application

Durant l'usinage par enlèvement de matière, la vitesse de coupe dépend de plusieurs paramètres : Citer au moins cinq de ces paramètres.

Calculer la fréquence de rotation, et la vitesse d'avance pour les deux cas suivants :

1. Tournage : Dressage de face et chariotage
  - Diamètre de la pièce à usiner : 40 mm ;
  - Vitesse de coupe 80 m/min ;
  - $f = 0,1$  mm/tr
2. fraisage : surfacage
  - Fraise de diamètre 100 mm et un nombre de dents égal à 12
  - L'avance mm/tr. Dent = 0,2
  - Vitesse de coupe 120 m/min

### Réponse

Tournage : dressage de face

$$\text{Fréquence de rotation } N = \frac{1000V_c}{\pi \cdot \frac{2}{3} D} = \frac{1000 \times 80}{3,14 \times \frac{2}{3} \times 40} = 955 \text{ tr/min}$$

$$\text{Vitesse d'avance: } F = f \cdot N = 0,1 \times 955 = 0,0955 \text{ m/min}$$



Tournage : Chariotage

$$\text{Frequence de rotation } N = \frac{1000V_c}{\pi D} = \frac{1000 \times 80}{3,14 \times 40} = 637 \text{ tr/min}$$

$$\text{Vitesse d'avance: } F = f \cdot N = 0,1 \times 637 = 0,0637 \text{ m/min}$$

Fraisage : surfaçage

$$\text{Frequence de rotation } N = \frac{1000V_c}{\pi D} = \frac{1000 \times 120}{3,14 \times 100} = 382 \text{ tr/min}$$

$$\text{Vitesse d'avance: } F = f_z \cdot Z \cdot N = 0,2 \times 12 \times 382 = 0,916 \text{ m/min.}$$

### **III.1 Machines-outils à commande numériques**

#### **III.1.1 Généralités**

La commande numérique est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. A ce titre, la commande numérique constitue l'un de meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

#### **III.1.2 Justification de la commande numérique**

#### **III.1.3 Automaticité**

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un très haut niveau d'automaticité. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimée.

#### **III.1.4 Flexibilité**

Puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les MOCN peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement appelé lorsque la même série se présente.

Une MOCN se caractérise en outre par des temps de réglage très courts qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus.

La grande souplesse d'utilisation de la CN entraîne un nombre importants d'autres avantages :

- Changement aisé du programme d'usinage des pièces ;
- Réduction des en-cours de fabrication ;
- Réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- Réduction des temps de préparation et de réglage ;
- Prise en compte rapide des modifications d'usinage ;
- Possibilité de réalisation de pièces complexes ;
- Contrôle automatiques des outils et des dimensions des pièces.

#### **III.1.5 Sécurité**

La CN a beaucoup contribué à améliorer la sécurité des machines :

- Par connaissance d'une façon plus précise de l'environnement où évoluent les outils ;
- Par simulation graphique hors usinage des programmes nouvellement créés ;

- Par surveillance permanente et automatique de l'usinage en cours et d'alerter l'opérateur ou d'arrêter l'usinage en cas d'incident.

### III.1.6 Constitution d'une MOCN

D'une manière générale, une MOCN est équipée des éléments suivants :

- 1- Organes asservis assurant les mouvements d'avance (pièce ou outil ; selon la machine) précis, rapides et stables ;
- 2- Approvisionnement en outil sous forme de changeurs automatiques d'outils et d'un dispositif de transfert chargé de véhiculer l'outil du magasin vers le poste de travail de la machine et vice-versa ;
- 3- Approvisionnement en pièces : plusieurs solutions sont retenues pour ce type d'organe.
  - Bras manipulateur situé à l'extérieur de la machine ;
  - Robot manipulateur pouvant desservir plusieurs machines ;
  - Portique conçu pour le transfert de pièces par la partie supérieure du poste de travail.
- 4- Evacuation des copeaux sous forme de :
  - Bancs inclinés sur les tours horizontaux ;
  - Carénage conçu de manière à canaliser à la fois le liquide de refroidissement et les copeaux ;
  - Buses de levage orientées pour éviter l'accumulation des copeaux ;
  - Convoyeur mécanisé, à vis sans fin ou à chaîne ; pour évacuer les copeaux hors de la machine

#### III.1.6.1 Arrosage et soufflage

Un arrosage abondant doit être prévu pour refroidir la pièce et évacuer les copeaux. Le liquide d'arrosage est stocké dans un banc ou dans un réservoir muni d'une pompe puissante.

#### III.1.6.2 Guidage

Une MOCN se caractérise essentiellement par la précision de déplacement de ses organes mobiles et par des efforts d'usinage importants. L'assurance d'un asservissement précis ; rapide et stable de la position des différents chariots a conduit à concevoir de nouvelles solutions pour les guidages :

- Lubrification automatique et sous pression des guidages à l'aide d'un lubrifiant spécial ;
- Développement de guidage hydrostatique ou magnétique ;
- Adoption de matériaux à faible coefficient de frottement pour les guidages

### III.2 Usinage par ultrasons

#### III.2.1 Définition

Les ultrasons sont des vibrations à hautes fréquences et non audibles par l'homme.

Les ultrasons ont plusieurs applications industrielles :

- Contrôle non destructif des pièces, mais aussi des êtres vivants (échographie) ;
- Chirurgie ;
- Mélange de fluides difficilement miscibles ;
- Nettoyage de pièces ;
- Soudage de matières plastiques et de métaux ;
- Usinage.

### III.2.2 Usinage par abrasion ultrasonore

#### III.2.2.1 Principe

L'usinage abrasif ultrasonore consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner à l'aide d'une sonotrode vibrant à fréquence ultrasonore (20kHz ou plus). Les particules sont amenées dans la zones de travail par un fluide porteur, de l'eau en général, (Figure III.1) La matière est enlevée par le cisaillement, l'érosion et l'abrasion provoqués par les grains abrasifs. Cette action se traduit par un enlèvement de matière sur la pièce, une usure de la sonotrode et une usure des grains.

Deux mécanismes principaux sont reconnus pour l'enlèvement de matière :

- Une action mécanique due à la projection et au martèlement des grains abrasifs contre la surface de la pièce ;
- Une érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par la vibration de la sonotrode.

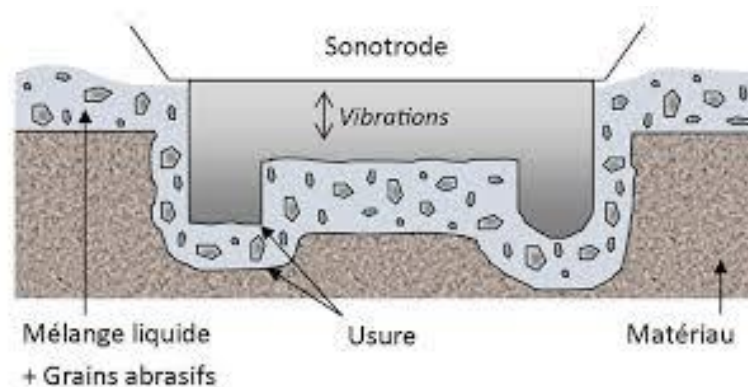


Figure III.1 Principe de l'usinage par ultrason

#### III.2.3 Matériaux et usinabilité

Les matériaux répondent différemment au procédé, et ce en fonction de leurs caractéristiques physiques ou mécaniques telles que dureté, fragilité, porosité. Il est possible de les classer en trois catégories :

1. La première catégorie comprend les matériaux qui conviennent particulièrement bien au procédé : ils sont très fragiles ou très poreux, tels que verre, graphite, germanium silicium...
2. La deuxième catégorie concerne les matériaux qui sont plus difficile à usiner, car ils sont moins fragiles et moins poreux (céramiques, carbures, nitrures, pierres précieuses...)
3. La troisième catégorie englobe les matériaux qui ne répondent pas bien au principe à cause des faibles débits de matières obtenus et une importante usure de la sonotrode.

### III.2.4 Matériaux de sonotrodes et abrasifs.

Les véritables outils de coupe sont les **particules abrasives**. La nature et les dimensions des grains doivent être adaptées au matériau à usiner et au type d'usinage envisagé.

- Plus le matériau à usiner est compact et dur, plus les grains doivent être durs ;

Abrasif	Dureté Knoop	Pouvoir de coupe relatif
Diamant	6500 à 7000	1
Nitride de bore cubique	4700	0,95
Carbure de bore	2800	0,50 à 0,60
Carbure de silicium	2500	0,25 à 0,45
Alumine	2000 à 2100	0,14 à 0,16

Tableau III.1 : Dureté et pouvoir de coupe des grains abrasifs

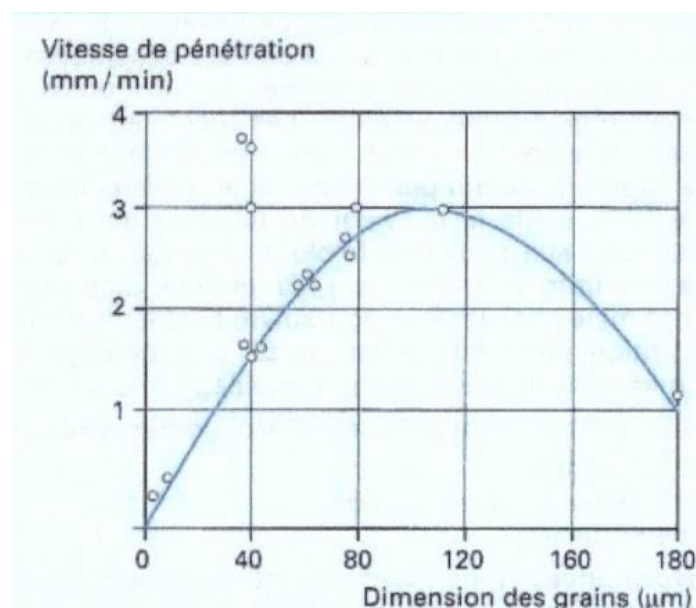


Figure III.2 : Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage de verre)

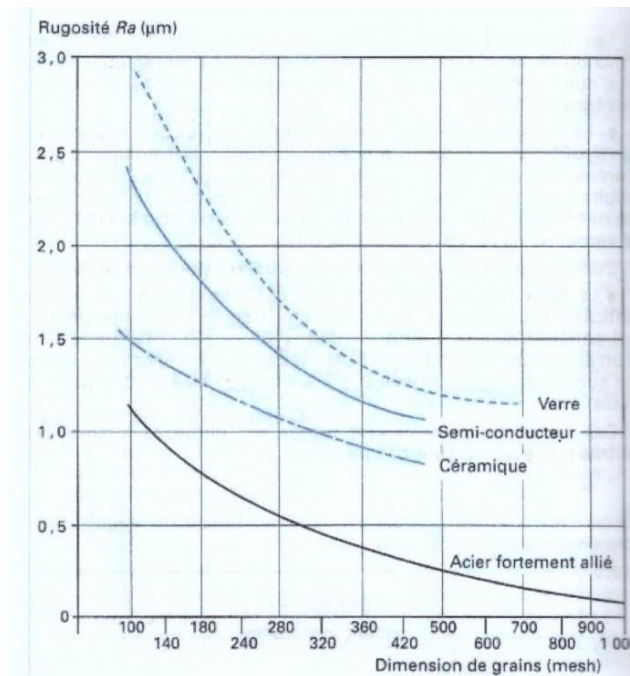


Figure III.3 : Qualité de surface ou rugosité en fonction de la dimension des grains pour différents matériaux

### III.2.5 Influence des paramètres

#### III.2.5.1 Concentration

Le pourcentage de grains abrasifs présents dans la zone de travail a une incidence sur la vitesse d'usinage (ou vitesse de pénétration). Si la concentration en grains est insuffisante, le débit est faible ; si la vitesse est trop élevée, les grains sont moins libres et donc moins actifs. En général, la concentration volumique est fixée entre 20 et 30%.

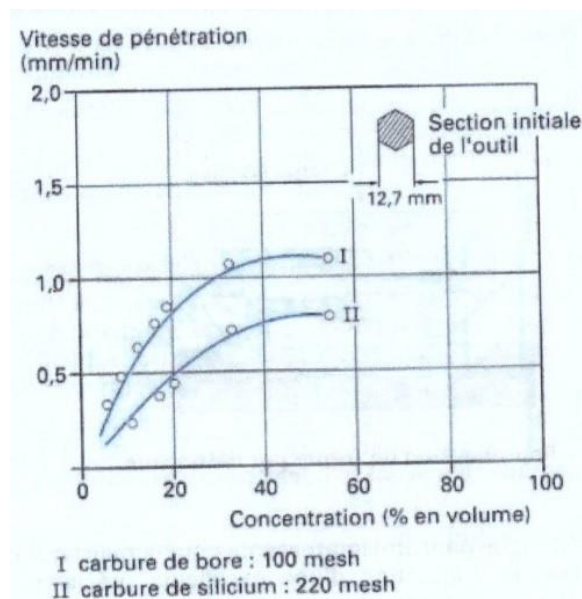


Figure III.4 : Usinage du verre : vitesse de pénétration en fonction de la concentration des grains

### III.2.6 Paramètres ultrasonores

L'amplitude et la fréquence des vibrations et la charge statique ont une grande influence sur les résultats de l'usinage. En ce qui est de la fréquence de vibration qui est un paramètre important pour l'efficacité du procédé, cependant il est à noter que toute augmentation de la fréquence est accompagnée :

- D'une diminution des dimensions des éléments acoustiques et donc d'une diminution des usinages ;
- D'une augmentation des sollicitations en fatigues de la tête acoustique.

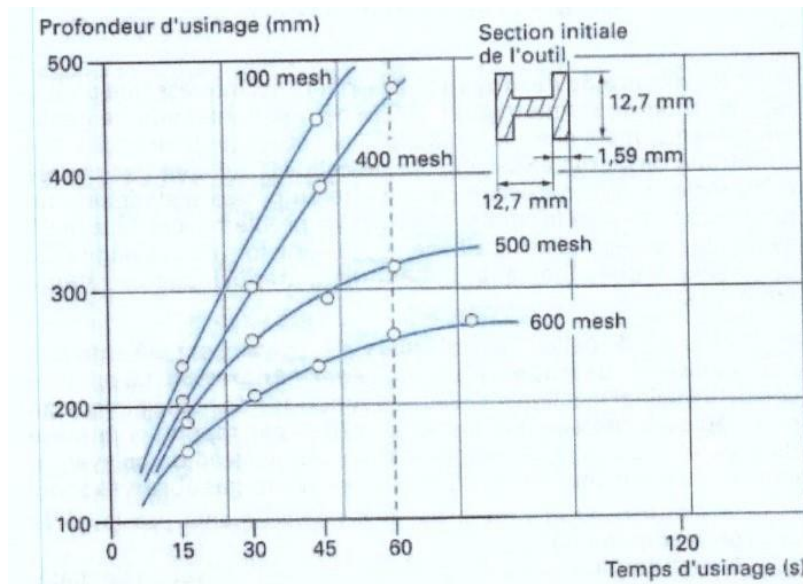


Figure III.5 : Profondeur d'usinage en fonction du temps d'usinage pour différentes tailles de grains

## III.3 Usinage par électroérosion

### III.3.1 Définition

L'usinage par électroérosion est une technique procédant par fusion, vaporisation et éjection de la matière. L'énergie est apportée par des décharges électriques passant entre deux électrodes, la pièce et l'outil.

### III.3.2 Principe

#### III.3.2.1 Mécanismes d'enlèvement de matière

L'érosion des matériaux, due à des décharges électriques. L'usinage par électroérosion s'opère dans liquide diélectrique : on applique entre les électrodes une tension qui est plus grande que la tension de claquage, fixée par le pouvoir isolant du diélectrique et la distance des électrodes.

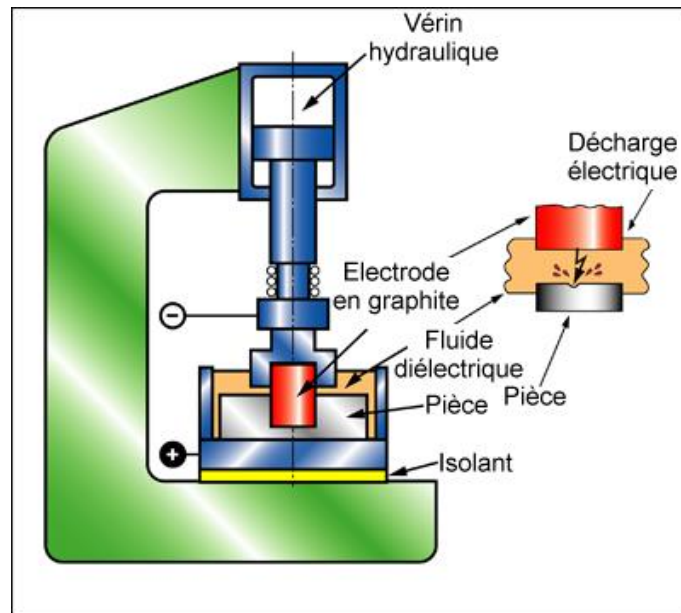


Figure III.5 : principe de l'usinage par électroérosion

Durant cette technique, on observe trois phases :

- **L'initiation de la décharge**, appelée phase d'ionisation. Sous l'action du champ électrique, il se forme, par ionisation du diélectrique, un canal conducteur entre les deux électrodes. L'ionisation a lieu là où le champ électrique atteint une intensité maximale.
- **La fusion et la vaporisation de la matière**. Pendant cette phase active, l'intensité du courant croît et la tension diminue. Les particules positives et négatives se dirigent respectivement vers la cathode et l'anode. La décharge est fortement concentrée dans un canal de petite section, et il en résulte des densités de courant très élevées entraînant des phénomènes physico-chimiques : L'échauffement local des électrodes, la fusion et la vaporisation des matériaux qui les constituent, la dégradation du diélectrique. Des poches de matière fondue apparaissent aux deux électrodes.
- **L'éjection de la matière** : Le circuit électrique est coupé, le métal fondu éjecté se retrouve au sein du diélectrique sous la forme de petites sphérules et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie du métal non arrachée se solidifie sur place.

### III.3.3 Matériaux usinables.

Le passage de la décharge électrique ne se fait que pour des matériaux ayant une conductivité électrique suffisante (de l'ordre de  $10^{-2} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). Le procédé est apte à usiner :

- Les alliages métalliques (aciers, alliages réfractaires à base de nickel, cobalt, titane, alliages à base d'aluminium, cuivre etc...);
- Les graphites ;



- Les céramiques conductrices ou semi/conductrices ;
- Certains matériaux composites ;
- Certains matériaux semi-conducteurs (silicium, germanium etc...) ;
- Des matériaux supraconducteurs ;
- Le diamant polycristallin.

### III.3.4 Matériaux pour électrodes.

Les qualités essentielle d'un matériau d'électrode sont de permettre un bon débit de matière sur la pièce, un faible enlèvement sur l'électrode (faible usure) et d'être usiné ou fabriqué à bas prix. Ces matériaux doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Difficile à usiner par électroérosion pour qu'ils résistent à l'usure ;
- Faciles à usiner par les procédés conventionnels

Ils doivent avoir aussi les propriétés suivantes :

- Hautes températures de fusion et de vaporisation, pour résister le plus possible à l'effet thermique des décharges ;
- Haute diffusivité thermique, pour évacuer le plus possible d'énergie par conduction ;
- Bonne usinabilité à l'outil coupant, pour être facilement usiné lors de la fabrication de l'électrode.

Le compromis entre ces propriétés conduit à utiliser les matériaux suivants :

- Les graphites ;
- Le cuivre et ses alliages ;
- Des matériaux plus résistants, le molybdène, le tungstène et ses alliages ;

### III.3.5 Matériaux pour diélectriques.

Le diélectrique est généralement un liquide, il doit assurer plusieurs fonctions :

- Etre suffisamment isolant pour s'opposer au passage massif de la décharge ;
- Etre capable de devenir conducteur localement pour laisser passer la décharge et la concentrer sur une petite surface ;
- Permettre l'évacuation des particules érodées ;
- Participer à l'évacuation de l'énergie thermique produite ;
- Et ne doit pas être agressif pour l'opérateur et la machine.

Les fluides utilisés sont :

- Des hydrocarbures ;

- Des huiles minérales ;
- Des produits de synthèse ;
- Des solutions aqueuses ;
- L'eau désionisée.
- 

### **III.3.5 Commande des machines**

Les machines sont équipées de systèmes qui permettent l'entière automatisation du procédé. Il s'agit de contrôler la distance inter-électrode, à l'aide d'une commande adaptative basée sur la lecture des signaux électriques fournis par le générateur.

### **III.3.6 Limites de l'usinage par électroérosion**

Les principaux paramètres définissant l'influence du régime d'usinage sur le débit de matière et sur l'état de surface obtenu sont la durée de l'impulsion et son intensité : une durée d'impulsion et une intensité élevée créent des cratères de grande dimension, ce qui conduit à un débit de matière élevé et un état de surface grossier. Inversement, une faible durée de décharge et une faible intensité créent des cratères de petite taille, ce qui est traduit par un faible débit de matière et un meilleur état de surface.

## **III.4 Découpage par fil**

### **III.4.1 Principe**

Le découpage par fil consiste à utiliser un fil tendu et à le déplacer à l'aide de mouvements gérés par une commande numérique 2 axes ou 4 axes. La matière est enlevée progressivement, et le fil reproduit petit à petit la forme programmée, avec une usure un peu plus grande que son diamètre. Cette technique ne nécessite pas la fabrication préalable d'une ou plusieurs électrodes, et est donc naturellement flexible.

Son intérêt principal est de permettre de réaliser des coupes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm). La technique est utilisée pour l'usinage des formes complexes, à condition qu'elles soient formées de surfaces réglées (génératrices rectiligne). En effet, le fil, qui est une corde vibrante soumise à des sollicitations électriques à haute fréquence, doit être bien tendu pour éviter les débattements trop importants.

### III.4.2 Performances

#### III.4.2.1 Epaisseur de coupe et vitesse de coupe.

Le débit de matière est exprimé par la surface coupée par minute (produit de l'épaisseur à découper et de la vitesse de coupe). Il n'est pas constant et dépend de l'épaisseur : l'efficacité est maximale pour des épaisseurs de 50 à 150 mm.

La vitesse de coupe dépend du matériau à usiner, de l'épaisseur de la pièce, du diamètre et de la nature du fil, des conditions d'arrosage et de la machine.

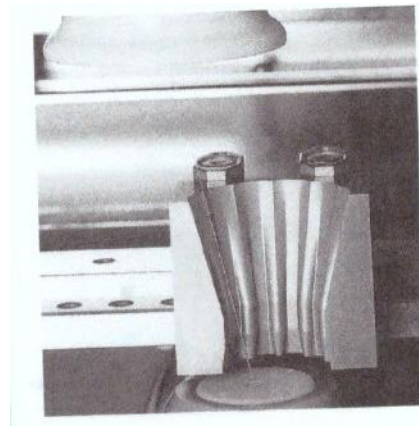
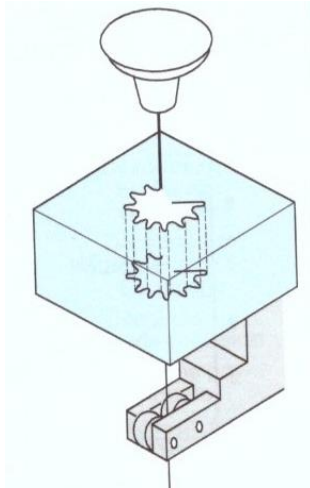


Figure III.6 : Principe de la découpe par fil      Figure III.7 : Appareillage de la découpe par fil.

Matériau	Vitesse relative (%)
Acier traité	100
Acier rapide	90 à 100
Acier inoxydable	90 à 100
Alliage d'aluminium	150 à 250
Cuivre	90 à 100
Graphite	40 à 50
Carbure métallique	40 à 50
Cupro-tungstène	50 à 60
Alliage base nickel	90 à 100
Fonte	30 à 50
Céramique semi-conductrice	60 à 80

Tableau III.2 Vitesse de découpe selon le matériau considéré par rapport à l'acier pris comme référence.

#### III.4.3 Matériaux pour fils

Pour éviter la rupture du fil, il faut utiliser un matériau à haute résistance. Cette qualité permet aussi une meilleure rigidité du fil entre les guide-fils

Matériau de fil (1)	Limite élastique (MPa)	Conductivité électrique (%) (Cu=100)	Efficacité au lavage	Applications (2)
Cuivre	450 à 900	100	Pauvre	
Laiton	900 à 1 050	26 à 28	Bonne	Découpe pm Surfaçage Dépouille
Laiton étiré	1 800 à 1 950	26 à 28	Bonne	Découpe pm Haute performance Surfaçage
Alliage Cu-Zn-Al-Ti	2 100 à 2 150	26 à 28	Bonne	Découpe pm Grande précision
Laiton revêtu zinc	1 050 à 1 950	26 à 28	Très bonne	Découpe pm Rapide
Âme Cu Env. laiton	1 050	80	Bonne	Découpe pm Rapide
Âme acier, liaison cuivre Env. laiton	2 025	42 à 45	Bonne	Découpe pm Grande précision Rapidité Dépouille
Molybdène	4 200	34	Pauvre	Travail fin Rainures étroites « Angles vifs »
Molybdène graphité	4 200	34	Bonne	Travail fin Rainures étroites « Angles vifs »

Tableau III.3 : Matériaux pour électrodes fils

### III.5 Coupage au jet d'eau

#### III.5.1 Introduction

L'oxycoupage, le coupage plasma et le coupage laser sont basés sur la fusion ponctuelle du matériau à découper (sur toute l'épaisseur) et sur le déplacement du front de fusion selon une trajectoire qui définit la forme de la coupe.

Le coupage au jet d'eau n'est pas basé sur la fusion et ne serait être qualifié de coupage thermique mais il est mis en œuvre par des moyens similaires et sur un certain nombre d'applications proches.

#### III.5.2 Principe

##### III.5.2.1 Le coupage au jet d'eau

Il met en œuvre un « simple » jet d'eau très fin (quelques dixièmes de millimètres de diamètre), mais animé d'une vitesse très élevée résultant de la très haute pression d'injection, soit  $3 \times 10^6$  à  $5 \times 10^6$  hPa (3000 à 5000 bar). L'énergie cinétique de ce jet d'eau est alors susceptible d'exécuter de fines saignées sur des produits très divers. Cette action cinétique de l'eau pure est souvent renforcée – pour le coupage de métaux ou alliages très durs – par l'addition de produits abrasifs dans l'eau.

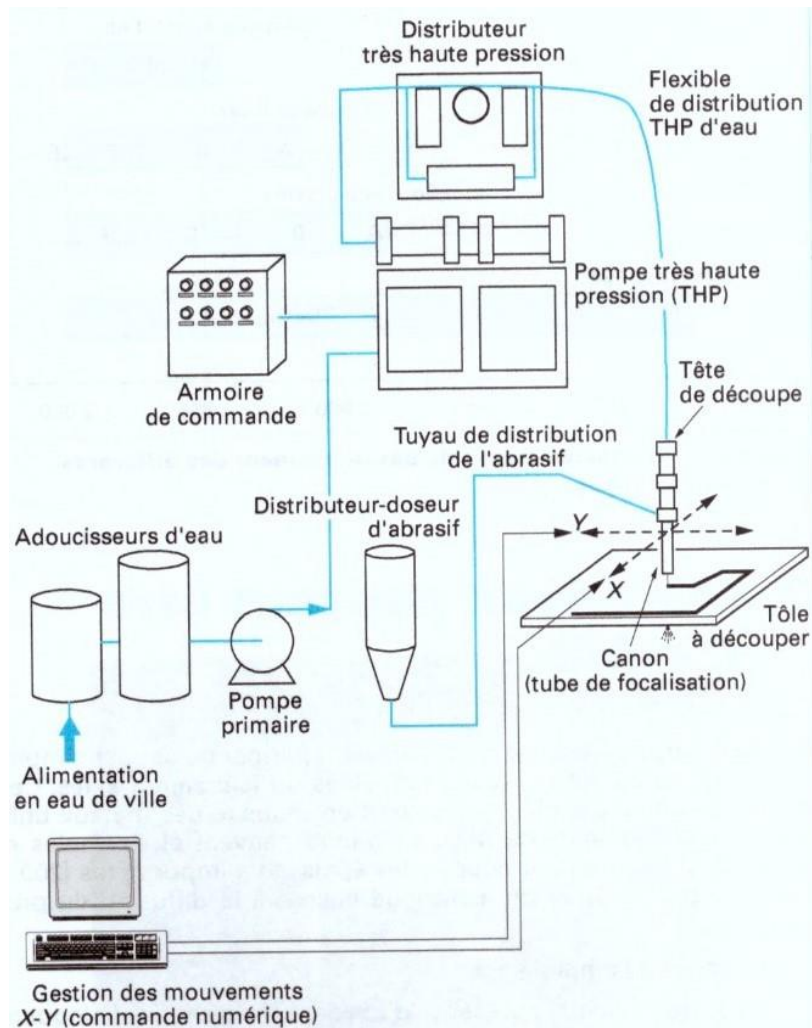


Figure III.8 : Schéma de principe d'une installation de découpe au jet d'eau.

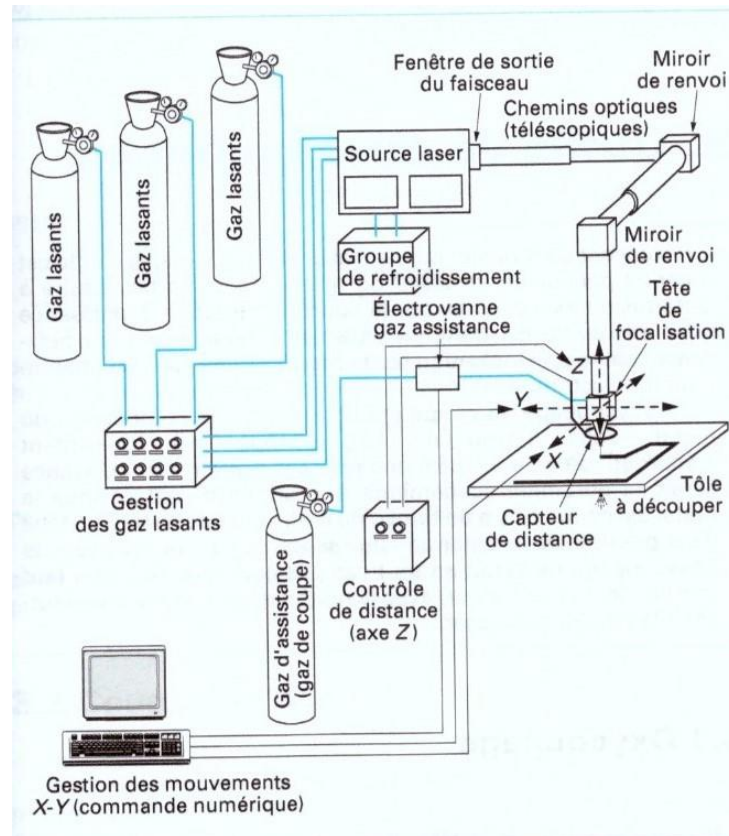
### III.5.2.2 Coupage laser (Light Amplification by Stimulated Emission of radiation)

Ce procédé met en œuvre une énergie de rayonnement par émission photonique, sous forme d'un faisceau concentré de lumière cohérente et monochromatique, c'est-à-dire d'une seule longueur d'onde.

Le laser CO<sub>2</sub>, couramment utilisé en découpe, a une longueur d'onde de 10,6 μm.

L'absorption de cette énergie par la pièce à l'impact du faisceau, focalisé par une lentille ou miroir (en général la dimension de la tache focale est inférieure à 0,2 mm<sup>2</sup> et la densité de puissance en ce point est de 1000 à 6000 kW/cm<sup>2</sup>), provoque une fusion/vaporisation du matériau, les fumées et éléments liquéfiés étant expulsés de la saignée par l'effet cinétique d'un jet de gaz de vitesse élevée injecté dans l'axe du faisceau au travers d'une buse de faible diamètre (0,7 à 2 mm).

La tête de découpe, communément appelée tête de focalisation, est alimentée par un source laser ainsi que par une source de gaz d'assistance.

Figure III.9 : Schéma de principe d'une installation de coupure laser CO<sub>2</sub>.

## III.6 Machine de prototypage rapide - Imprimante 3D

### III.6.1 Définition

Le prototypage rapide regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre-eux, permettent d'aboutir à des projets de représentation intermédiaire de la conception de produits : les modèles numériques (au sens géométrique du modèle), les maquettes, les prototypes et les préséries.

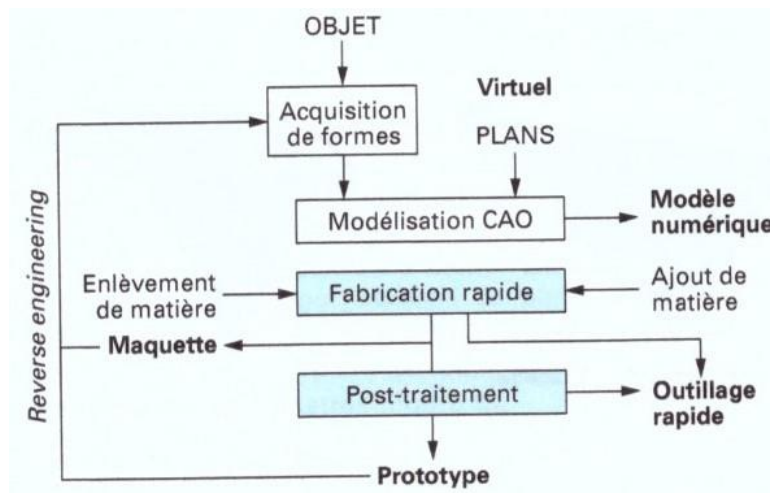


Figure III.10 : Processus de prototypage rapide

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

Les moyens informatiques intervenant aujourd'hui dans le prototypage rapide sont :

- Le revers engineering (systèmes d'acquisition de formes associés aux logiciels de reconstruction de surfaces) ;
- La conception assistée par ordinateur (CAO), les procédés de fabrication par ajout et par enlèvement de matière ;
- Des post-traitements, tel que la duplication par moule à la silicone, la fonderie à modèle perdu....

### III.6.2 Différentes catégories de maquettes et de prototype

La conception de produit requiert deux grands types de représentation physique :

- Des représentations permettant de visualiser l'objet ;
- Des représentations permettant de valider les fonctions (par exemple sous la forme de tests ergonomiques)

### III.6.3 Maquette ou modèle de conception

Pour juger la forme d'un objet (par exemple, l'aspect esthétique), il n'est pas toujours utile que le matériau du modèle soit identique à celui du produit final. On privilégiera l'emploi de matériaux peu coûteux.

Type	Propriétés	Fonction au cours du développement
Maquette ou modèle de conception (1 pièce)	Tout matériau (peu cher) Qualités d'esthétique	- visualisation du dessin - tests d'ergonomie - étude de marché - définition des options technologiques de base
Prototype géométrique (1 pièce)	Matériau bon marché suffisamment solide Géométrie exacte	- faisabilité - tests d'emballage - modèle pour moules et outillages de production
Prototype fonctionnel (2 à 5 pièces)	Proche bonne matière Fonction de base	- tests fonctionnels - optimisation des principes d'assemblage et de fonctionnement - conception des outils et outillages
Prototype technologique (5 à 50 pièces)	Proche bonne matière ou bonne matière Fabrication proche des moyens de séries	- validation et choix des opérations de fabrication et moyens de production - fabrication des outils et des outillages
Préséries (jusqu'à 500 pièces)	Bonne matière Réalisé suivant le procédé de fabrication en série	- détermination et validation des paramètres du process - βtests (qui correspondent aux dernières pièces prototypes avant la production finale) - mise en place et réglage de l'outil de production série

Figure III.11 : Types de maquettes et de prototypes utilisés au cours du développement d'un produit

### III.6.4 Donnée numériques

Les données numériques ont un rôle central dans le prototypage rapide. Dans un tel processus, il est essentiel que les transferts de données entre les différents outils soit correctement effectués, afin d'éviter toute perte d'information.

Les outils de numérisation (systèmes d'acquisition de formes) ont pour objectif de recueillir des informations sur la topologie de l'objet à reproduire. Celles-ci se présentent sous forme de nuages de points dont on connaît les coordonnées  $x,y,z$  au format ASCII ou binaire. Ces nuages de points traités par les logiciels de construction de surfaces permettent d'aboutir à des modèles surfaciques exportables à d'autres formats (IGES, VDA, SET ...)

### III.6.5 Outils de prototypage rapide

Dans le cadre de la fabrication rapide, on distingue deux voies principales :

1. Les procédés basés sur l'ajout de matière ;
2. Les procédés basés sur l'enlèvement de matière.
- 3.

### III.6.6 Procédés de fabrication par couches

Les procédés de fabrication par couches utilisent tous le même principe de fabrication : l'objet à réaliser est conçu en utilisant la CAO (conception assistée par ordinateur) ou les outils de numérisation, puis il est facetté au format STL.

#### III.6.6.1 Procédé liquide/solide

Les procédés liquide/solide utilisent le principe de **stéréolithographie**. Ils se caractérisent par l'emploi d'une résine photosensible liquide qui se solidifie sous l'action d'une source lumineuse.

En l'absence de rayonnement, la solidification cesse instantanément. Il est possible de classer ces procédés en deux catégories selon le mode d'éclairage :

- Solidification par faisceau laser,
- Solidification par flashage, c'est-à-dire par utilisation d'un masque et d'une lampe à ultraviolet, dite stéréolithographie par couches entières.



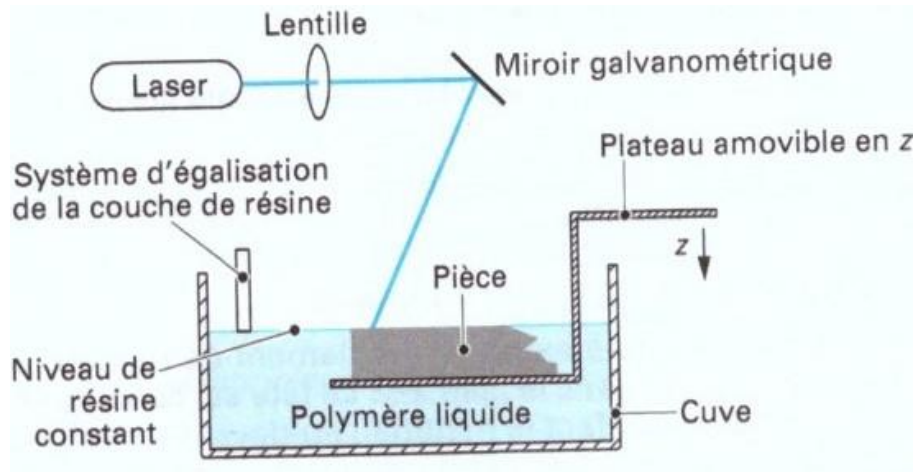


Figure III.12 : Principe de stéréolithographie

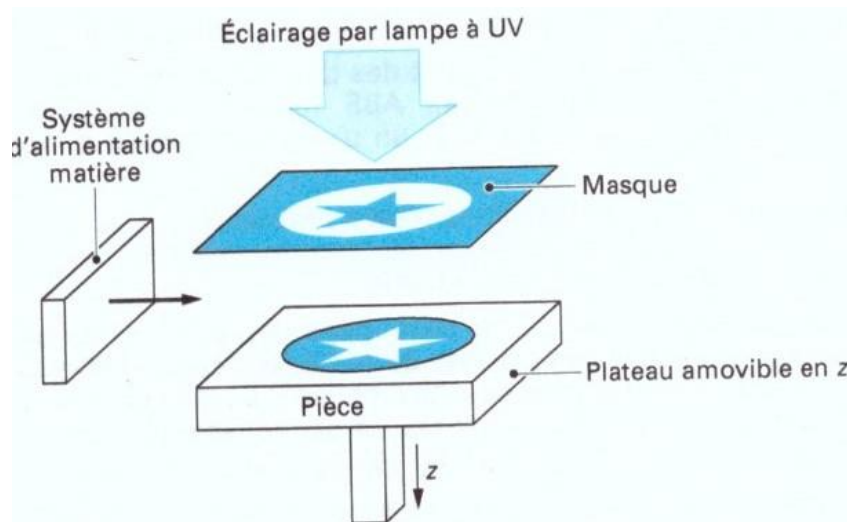


Figure III.13 : Principe du, flashage de couches

### III.6.6.2 Procédé solide/solide

Le procédé solide/solide se décline en trois classes :

- Extrusion et laminage d'un filament ;
- Découpage et collage de strates ;
- Projection de matière.

### III.6.6.3 Extrusion et laminage d'un filament

Le principe consiste à extruder un filament de matière à l'aide d'une tête se déplaçant dans le plan  $x,y$ . La tête est constituée d'une chambre chauffant le matériau au-dessus de son point de fusion, et d'une buse qui permet de déposer et laminier le filament entre la couche précédente et sa surface plane.

Le filament au contact de la couche précédente se solidifie instantanément. Chaque couche est remplie par des balayages successifs de la tête.

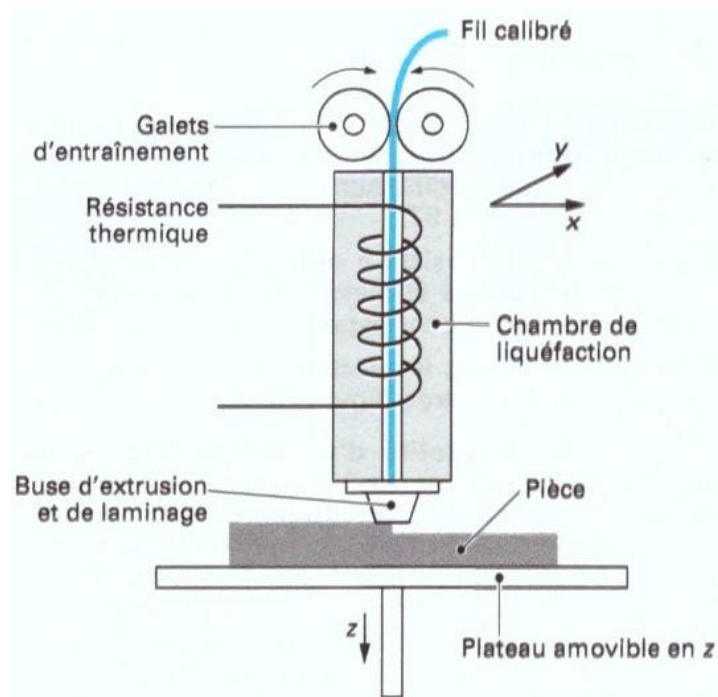


Figure III.14 : Principe du procédé Extrusion et laminage d'un filament.

#### III.6.6.4 Découpage et collage des strates

Le principe repose sur le découpage des sections des pièces dans des plaques ou dans des feuilles de matériau calibré. L'assemblage est réalisé par collage, par fusion des matériaux ou mécaniquement.

Le découpage peut être réalisé par laser, un couteau, une fraise (fraisage à commande numérique), ou par jet d'eau.

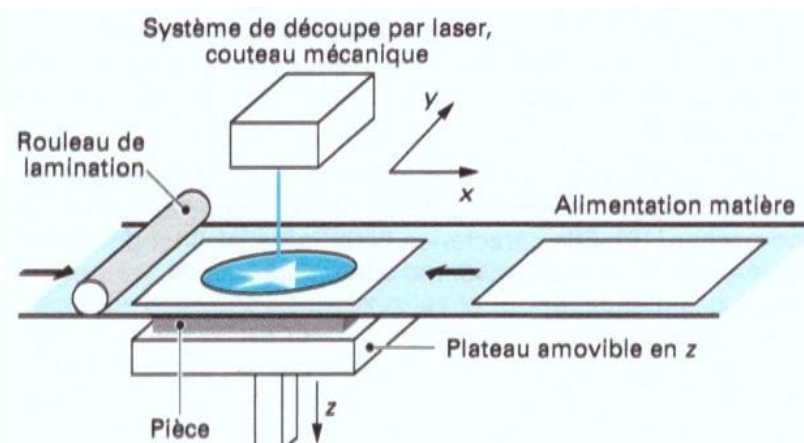


Figure III.15 : Principe du procédé de la fabrication par découpage et collage de strates.

### III.6.6.5 Projection de matière

Le principe utilisé peut être comparé avec la technologie des imprimantes à jet d'encre. Une tête se déplaçant dans le plan  $x,y$  projette des gouttes de matière liquide à une température au-dessus du point de fusion du matériau.

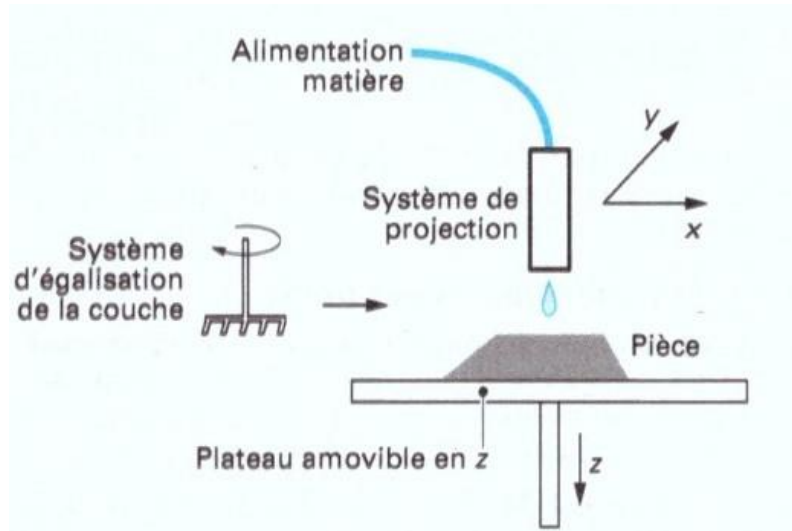


Figure III.16 : Principe du procédé de la fabrication de couches par projection

## III.7 Métrologie tridimensionnelle

### III.7.1 Généralités

Les moyens de mesure classiques sont aujourd'hui complétés par les techniques de mesure tridimensionnelles qui permettent d'accéder à la géométrie des pièces complexes avec une grande précision et une grande rapidité.

### III.7.2 Constitution d'une MMT

Une MMT est constituée de 4 sous-ensembles distincts :

- La structure de déplacement
- Le système de palpage
- Le système électronique
- Le système informatique et le pupitre de commande.

### III.7.3 La structure de déplacement

Elle comprend 3 guidages en translation orthogonaux deux à deux notés  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Ces guidages, sans jeu ni frottements, permettent d'atteindre tous les points d'un volume parallélépipédique.

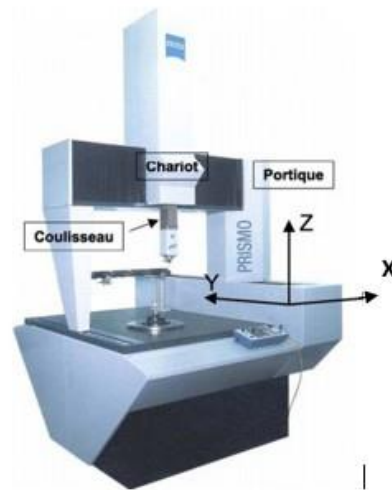


Figure III.17 : Machine à mesurer tridimensionnelle à portique

### III.7.4 Le système de palpage

Son rôle est de détecter le contact entre le stylet et la pièce et, à cet instant, d'envoyer une impulsion au système électronique pour qu'il lise les coordonnées du point de contact sur les systèmes de mesure.

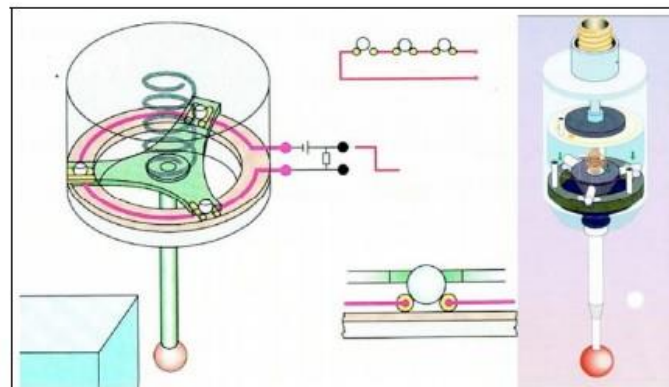


Figure III.18 : Palpeur à contact dynamique

### III.7.5 Le système électronique

Il a plusieurs fonctions essentielles :

- Recevoir les impulsions de contact en provenance de la tête de palpage
- Envoyer les ordres de lecture sur les 3 systèmes de mesure au moment du contact
- Recevoir du système informatique les ordres de mouvement pour la commande des moteurs d'axes (Machines à CN)
- Gérer les sécurités telles que pression d'air mini sur les patins aérostatiques, fins de courses des mouvements etc.

### III.7.6 Le système informatique et le pupitre de commande

- Acquisition et mise en mémoire des gammes de contrôle des pièces
- Exécution des gammes de contrôle
- Traitement des informations et édition des résultats
- Logiciel conversationnel permettant l'utilisation de la machine

### III.7.7 Mode de fonctionnement de la machine à mesure tridimensionnelle

Une MMT matérialise un repère orthonormé à 3 dimensions (O, x, y, z). Pour chaque point palpé, on recueille les coordonnées du centre du palpeur :  $O_i (X_i, Y_i, Z_i)$

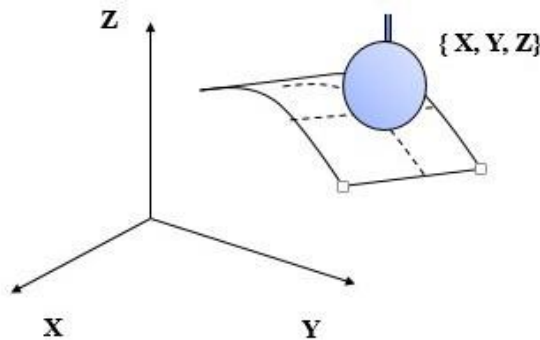


Figure III.19 : Principe du palpé

La pièce à mesurer est ensuite modélisée à l'aide des éléments géométriques définis par le préparateur (points, droites, plans, cercles, cylindres, cônes et sphères). A partir du nuage de points palpés, un traitement suivant la règle des moindres carrés permet de définir quantitativement les éléments géométriques. Pour définir un élément géométrique sur la machine à mesure tridimensionnelle, le logiciel demande de palper le nombre de points minimum +1.

### III.7.8 Méthode de mesure

Le contrat à remplir par les ateliers de fabrication est l'obtention d'un produit conforme au dessin de définition. C'est donc à partir de celui-ci que l'on définira les cotes fonctionnelles devant être mesurées. A partir de là, des travaux, d'une part d'aspect pratique, d'autre part d'aspect théorique peuvent être conduits parallèlement.

### III.7.9 Aspect pratique

- a. Position de la pièce dans le repère machine : Il sera nécessaire de définir une seule position possible pour la pièce, à quelques dixièmes de mm près, si l'on veut la mesurer en automatique en exécutant une gamme de mesure. Cette position sera définie dans le repère machine.
- b. Définition du système de palpé :

Il est nécessaire de définir tous les systèmes de palpé (Angles de la tête motorisée, longueur des stylets et des rallonges) qui sont nécessaires à la mesure d'une pièce et de les étalonner sur la sphère étalon.

### III.7.10 Aspect théorique

Le préparateur devra définir à partir du plan les éléments géométriques qui seront définis lors des palpées . D'autre part, la définition des repères de dégauchissage est nécessaire pour une expression correcte des résultats de mesure. Ensuite, seulement on pourra créer la gamme de palpée de la pièce, puis la gamme de vérification des cotes fonctionnelles qui conduira à l'édition du procès-verbal de contrôle.

La méthode de mesure d'une pièce peut être schématisée par le synoptique ci-dessous.

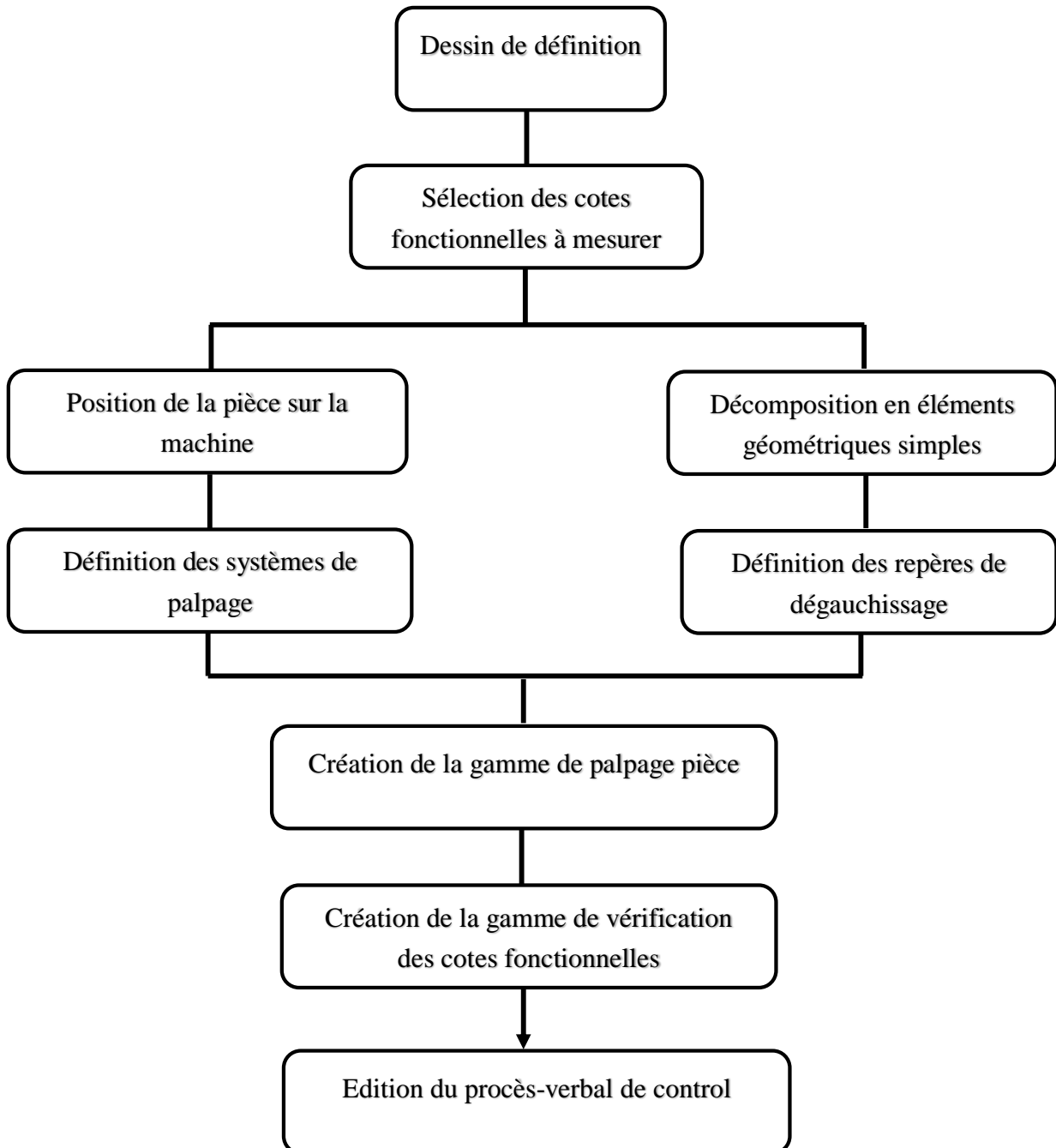


Figure III.20 : Méthode de mesure d'une pièce

### III.8 Usinage à grande vitesse (UGV)

#### III.8.1 Introduction

L'usinage à grande vitesse (UGV) est souvent présenté comme le fruit d'une merveilleuse découverte. Si l'on augmente la vitesse de coupe au-delà des limites habituelle, on commence par traverser une zone de vitesse inutilisables et on entre dans une gamme de vitesses où les énergies et les efforts spécifiques de coupe diminuent, les états de surfaces deviennent excellents les durées de vie des outils augmentent.

#### III.8.2 Définition

À partir de quelles vitesses entre-t-on dans le domaine de l'UGV ?

La question, plus délicate qu'il n'y paraît, se subdivise comme suit :

- De quelle vitesse s'agit-il ?
- Quelle est sa valeur limite ?

Dans l'esprit de nombreux usineurs, la vitesse concernée est la vitesse de coupe. Mais, il s'est aperçu que les grandes fréquences de rotation de broche présentaient en elles-mêmes un grand intérêt d'où la distinction de l'usinage à grande vitesse (de coupe) de l'usinage à grande fréquence (de rotation). La tendance actuelle est de réunir les deux techniques sous la même appellation : usinage à grande vitesse (UGV).

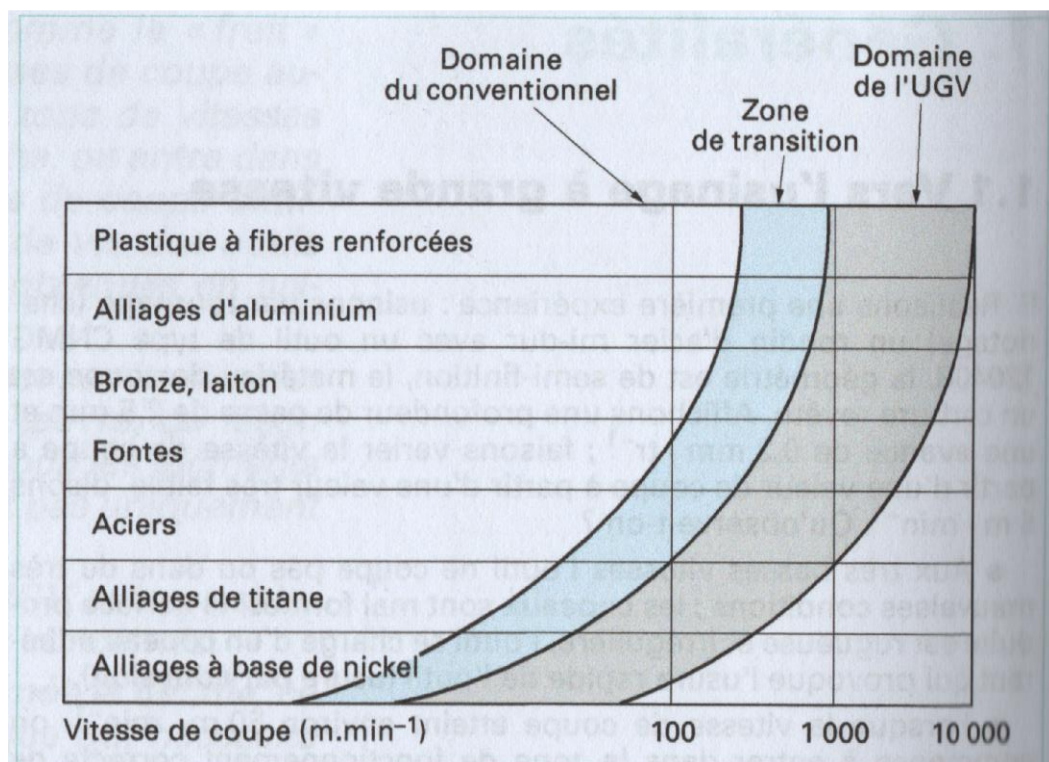


Figure III.21 : Vitesse de coupe selon les matériaux usinés

### III.8.3 Techniques concernées par l'UGV

Toutes les techniques par enlèvement de matière sont concernées par l'usinage à grandes vitesses, mais deux facteurs interviennent pour favoriser l'entrée d'une technique à l'UGV :

1. L'importance économique de cette technique ;
2. La facilité relative de l'accession de cette technique à l'UGV.

### III.8.4 Matériaux usinés

Comme pour les techniques, les critères d'entrée des matériaux dans le domaine de l'UGV sont l'importance économique et la facilité. Ainsi, les usinages en UGV porte principalement sur :

- Les alliages légers d'aluminium ;
- Les aciers faiblement alliés pour traitements thermiques à l'état traité ;
- Les fontes à graphite lamellaire ou sphéroïdal ;
- Les alliages réfractaires (base Nickel)
- Les alliages à base titane.
- 

### III.8.5 Etat de la technique

#### III.8.5.1 Fraisage des métaux tendres

Cette technique concerne principalement l'usinage des panneaux aéronautiques. Le critère d'optimisation est le coût de production très directement lié au temps d'usinage. Les durées de vie des outils sont très importantes (plusieurs heures de coupe).

Les principales contraintes sont relatives :

- Au respect des tolérances dimensionnelles ;
- Aux limites imposées par la technique à la conception ;
- Aux déformations macro géométriques dues à l'usinage ;
- A la nécessité d'organiser les opérations en conséquences (groupement d'opérations effectuées avec le même outil, à la même fréquence de rotation).



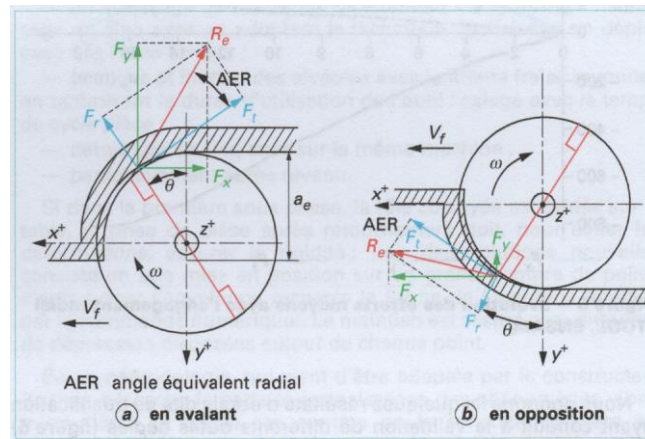


Figure III.22 : Axes et référentiel mesure d'efforts : travail en avalant et en opposition dans le cas de l'usinage des matériaux tendres

### III.8.5.2 Fraisage des fontes : c'est le cas de l'UGV par changement de matériau de l'outil

L'usinage conventionnel utilise des fraises tourteaux de grands diamètres (300 à 400 mm) munis d'un grand nombre de dents. L'UGV utilise des fraises dites homothétiques de diamètres plus faibles (80 à 100 mm) équipées de plaquettes rondes ou carrées, pour des opérations d'ébauche ou de finition dans une plage de vitesse de coupe comprise entre 1000 et 2000 m/min.

### III.8.5.3 Usinage des formes complexes : application aux outillages

Sous cette appellation, il est désigné l'usinage, sur fraiseuse trois axes (et cinq axes), des surfaces définissant la forme extérieure des moules et des modelés, comme par exemple :

- Des éléments constitutifs d'un outillage d'emboutissage ;
- Des empreintes de moule pour injection plastique.

## III.8.6 Eléments du système

### III.8.6.1 Broche

Les broches à grandes vitesses sont des électro-broches ; elles sont construites selon trois principes différents :

1. Les électro-broches à roulements à billes
2. Les électro-broches à paliers magnétiques dont le fonctionnement repose sur la création d'un champ magnétique ;
3. Les électro-broches à paliers hydrostatiques

### III.8.6.2 Moteurs d'axes et leurs asservissements

La chaîne cinématique classique du mouvement d'axe comporte les éléments suivants :

- Un moteur du type asynchrone sans balais ;

- Un réducteur ;
- Une vis à billes ;
- Un écrou.

### III.8.6.3 Commande numérique

Outre la fonction programmation, une commande numérique dédiée grande vitesse ayant ses propres spécificités liées au type d'usinage réalisé.

À partir d'un système CFAO, la commande numérique doit répondre à quelques exigences :

- Vitesse de traitement des blocs suffisante (de l'ordre de la milliseconde)
- Erreur de poursuite nulle
- Accélération contrôlée et modulée
- Analyse de la trajectoire en amont
- Correction des défauts perceptibles à chaque changement
- 

### III.8.6.4 Outils

Un outil d'usinage se définit par un grand nombre de paramètres (nature des matériaux, géométrie ...) en interaction complexes et imparfaitement maîtrisées. Le choix des produits des matériaux des outils reste jusqu'à présent un sujet de recherches incessantes qui font évoluer ces produits, en particulier en matière de revêtements.

Les produits utilisés sont en général, les diamants, les nitrures de bore cubique, carbures métalliques (revêtus et non revêtus), les aciers rapides (revêtus et non revêtus), les cermets, les ARS frittés, les céramiques ...

### III.8.6.5 Porte-outils ; les rattachements

Entrainer un outil à une haute vitesse de rotation qui supporte des efforts dissymétriques impose une qualité d'attachement irréprochable :

- Serrage efficace pour transmission de couple élevé ;
- Centrage parfait, très haute précision, sans balourd ;
- Rigidité maximale en statique comme en dynamique ;
- Stabilité identique quel que soit la sollicitation