

USINAGE

- METHODES ET FABRICATIONS**
- GENERATION DES SURFACES PAR USINAGE**
- LA MISE EN POSITION DES PIECES MECANQUES**
- MACHINES-OUTILS A COMMANDE NUMERIQUE**
- PROGRAMMATION DES MACHINES-OUTILS A COMMANDE NUMERIQUE**
- LES OUTILS DE COUPE**
- LA COUPE DES METAUX**

METHODES

ET

FABRICATIONS

1 Consignes de sécurité relatives aux travaux sur machines

1.1 Protection passive

Les machines par leurs mouvements peuvent :

- projeter des copeaux brûlants ou des liquides corrosifs ou gras,
- entraîner vêtements, doigts ou cheveux.

Protection du corps : blouse ou combinaison et tablier de surprotection en soudage, pantalon

Protection des yeux : lunettes.

Protection des mains :

- ôter toute bague et bracelet, mettre des gants,
- les copeaux sont coupants et chauds, ne pas les manipuler à mains nues.

Protection des pieds : chaussures fermées à semelles épaisses.

Protection des cheveux : les attacher.

1.2 Protégez-vous et protégez les autres

Utilisez obligatoirement les protections installées sur les machines (écrans, capots,...).

Assurez-vous que les pièces et outillages sont bien positionnés et fixés avant de lancer la fabrication.

Assurez-vous que les personnes situées à proximité sont elles-mêmes protégées

Attendez l'arrêt de la machine pour toute intervention.

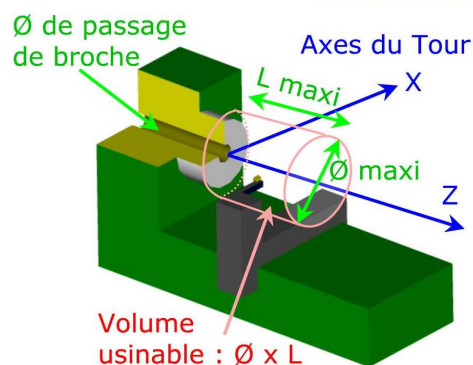
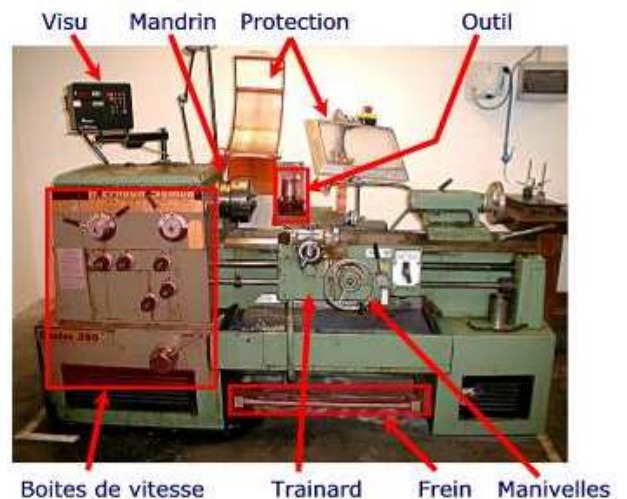
Evacuez tous déchets (copeaux, chutes de métal, outillages inutiles) en vous protégeant les mains (gants, balais, crochets,...).

2 Les différents types de machines

2.1 Type de machine

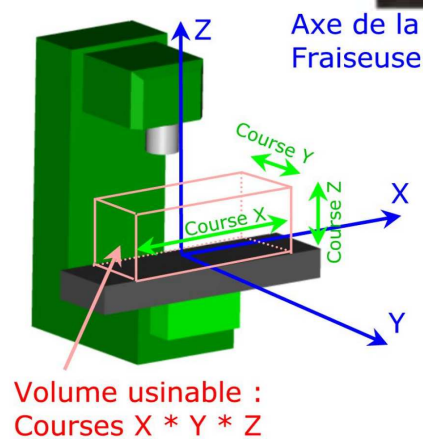
2.1.1 Le tour

Cette machine sert principalement à usiner des pièces de révolution. La pièce est fixée dans le mandrin. Celui-ci est mis en rotation par le moteur de broche. L'outil suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux. Ces petits éléments de matière sont appelés les copeaux.



2.1.2 La fraiseuse

Cette machine sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux.



2.2 Type de commande

2.2.1 Manuelle ou conventionnelle

Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est réalisé par un opérateur. Pour cela, il utilise les manivelles permettant de générer les mouvements suivant les axes. Les mouvements ne sont possibles que sur un seul axe à la fois.

Manivelles



Des moteurs permettent aussi de choisir des vitesses d'avance suivant les axes de déplacements. Le choix de ces vitesses s'effectue par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses mécanique.

Boîte de vitesses



2.2.2 Machine-outil à commande numérique

Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est décrit par l'opérateur à l'aide d'un programme. On utilise pour cela les coordonnées des différents points de passage de l'outil par rapport à la pièce. Les mouvements sont possibles sur plusieurs axes simultanément.

Les mouvements sur les axes sont générés par des moteurs qui permettent aussi de choisir des vitesses d'avance. Le choix de ces vitesses s'effectue par un variateur. On dispose donc d'un large choix de vitesses.

Commandes numériques



3 Les axes de déplacements

Afin de décrire la trajectoire suivie par l'outil pour usiner la pièce, un système d'axe est normalisé. Ces axes seront notamment utilisés pour écrire des programmes de commande numérique. Un programme sera très facilement transposable sur une autre machine CN.

Vous devez toujours savoir reconnaître la broche d'une machine afin de placer correctement les axes : l'axe de broche correspond à l'axe Z de la machine.

3.1 Tournage

En tournage, l'axe de la broche correspond à l'axe de rotation du mandrin et de la pièce : c'est donc l'axe Z. L'axe X correspond à l'axe perpendiculaire à Z.

Le sens positif est donné suivant cette règle : la pièce étant la référence, l'outil s'éloignant de la pièce est en mouvement suivant le sens positif des axes.

Les axes Z et X définissent un plan. Cela est suffisant pour décrire une trajectoire plane, et donc générer un volume de révolution autour de l'axe de révolution (qui est l'axe de broche).



3.2 Fraisage

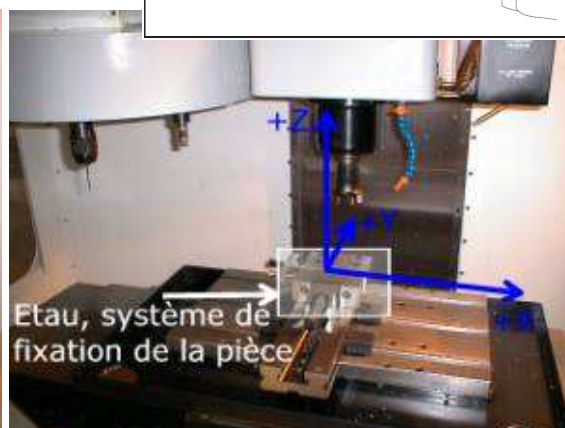
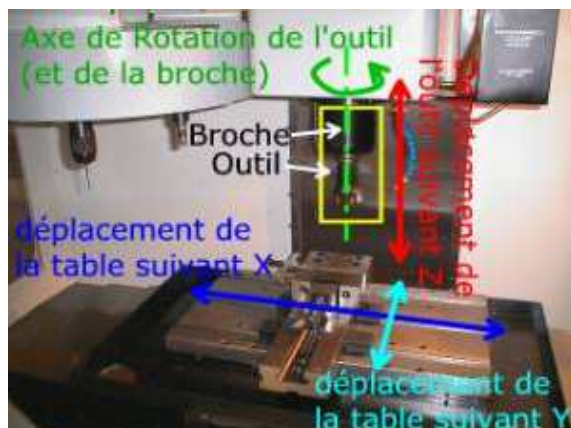
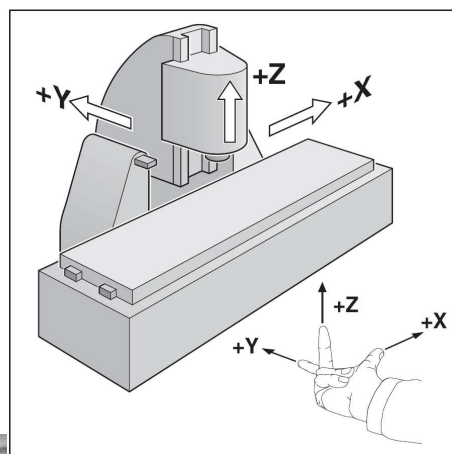
En fraisage, l'axe de broche correspond à l'axe de rotation de l'outil : c'est l'axe Z.

L'axe X correspond à l'axe perpendiculaire à Z qui permet la plus grande course.

L'axe Y correspond à l'axe perpendiculaire à Z et X.

Le sens positif est donné suivant cette règle : la pièce étant la référence, l'outil s'éloignant de la pièce est en mouvement suivant le sens positif des axes.

Les axes Z, X et Y définissent une base en 3 dimensions.

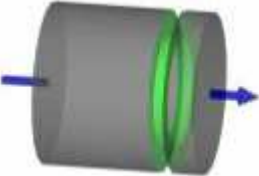

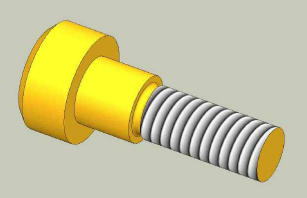


4 Les formes simples usinables



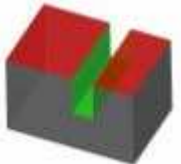
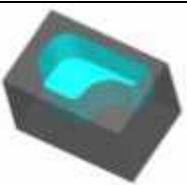

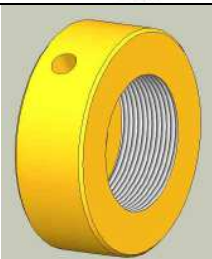
Le déplacement de l'outil suivant les axes définis précédemment permet de générer des formes usinées. Dans le tableau ci-dessous sont rappelées les opérations élémentaires courantes. On trouve aussi le vocabulaire technique qui est associé à ces usinages.

4.1 Tournage

Dessin	Opération
	Dressage C'est la réalisation d'un plan perpendiculaire à l'axe de la pièce. (surface rouge)
	Chariotage C'est la réalisation d'un cylindre ayant le même axe que celui de la pièce. (surface grise)
	Plan épaulé C'est l'association d'un dressage et d'un chariotage. (surface verte)
	Perçage C'est un trou dans la pièce. Il peut être débouchant ou borgne. Attention en tournage, l'axe du trou est confondu avec l'axe de la pièce.

Dessin	Opération
	Gorge C'est l'association de 2 plans parallèles avec un cylindre (surface vertes)
	Surfaces quelconques C'est l'association de plusieurs surfaces élémentaires : sphère, cylindre, plan, cône ...
	Filetage Réalisation d'une hélice extérieure : le pas peut être quelconque. La section peut être différente d'un filetage classique (triangulaire).

4.2 Fraisage

Dessin	Opération
	Surfaçage Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (surface rouge)
	Plans épaulés C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes)
	Rainure C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (surfaces vertes)
	Poche La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan)
	Perçage Ce sont des trous. Ils sont débouchants (surface bleue) ou borgnes (surface jaune).
	Taroudage Filetage intérieur; standard jusqu'à un diamètre de 20mm. Pas spéciaux possibles au-delà. Les diamètres standards sont : 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20mm.

5 Les différents types d'outils

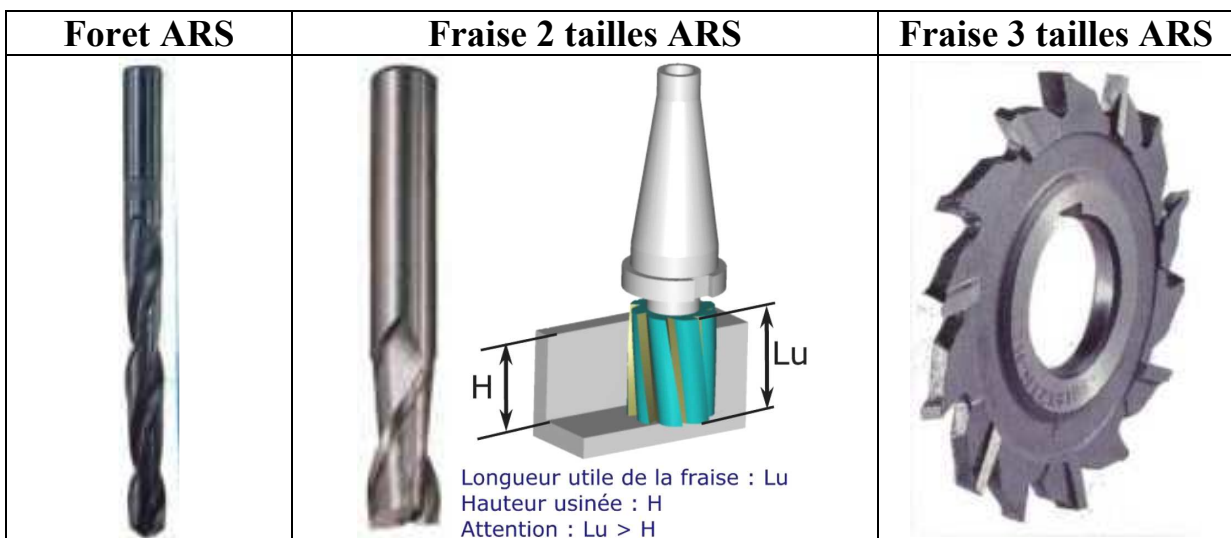
Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce. Ceci vous sera présenté plus loin. Tout d'abord, on va s'attarder sur les outils eux-mêmes.

5.1 Les matériaux à outil

5.1.1 Outils ARS = acier rapide supérieur

Les outils en ARS sont constitués le plus souvent d'un barreau monobloc en acier rapide supérieur, l'arête de coupe est affûtée. Si l'outil est usé, il suffit de réaffûter l'arête de coupe.

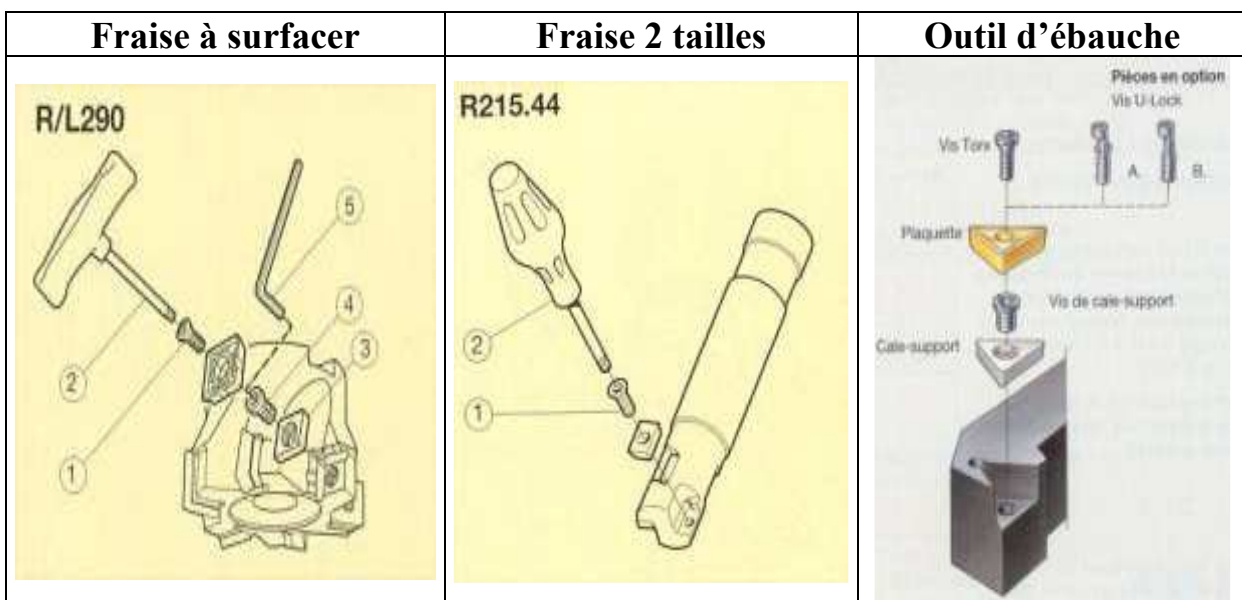
Dans l'atelier, les outils suivant sont en ARS : les forets et les fraises 2 tailles...



5.1.2 Outils carbure

Pour améliorer les performances des outils, l'arête de coupe est placée sur une plaquette amovible en carbure. Ce matériau est très résistant par rapport à ARS. La plaquette carbure est obtenue en compressant différentes poudres de carbure. Dès que l'arête de coupe est usée, il suffit de changer la plaquette.

Dans l'atelier, les outils suivant sont à plaquettes carbures : fraise à surfacer Ø63, fraise 2 tailles Ø16, outil de tournage d'ébauche et de finition.

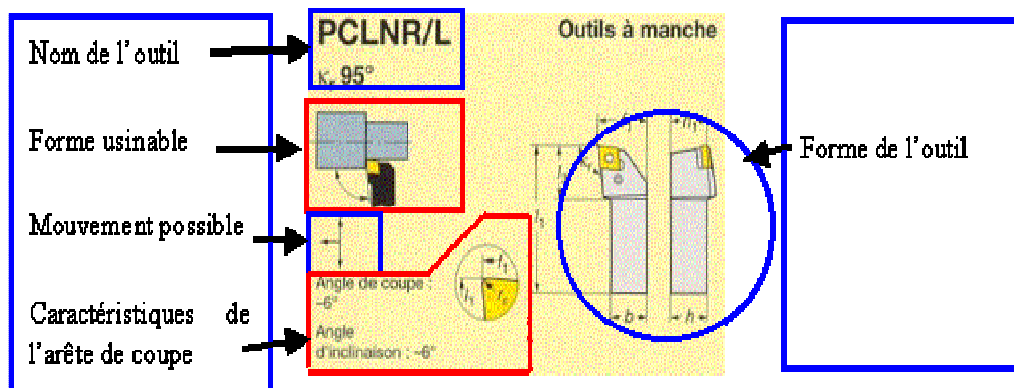


5.2 Outils de perçage

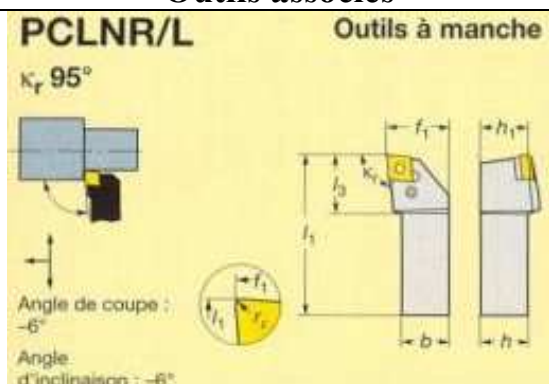
Cette opération définit l'obtention d'un trou quelconque dans une pièce. On y associe des outils de perçage : les forets.

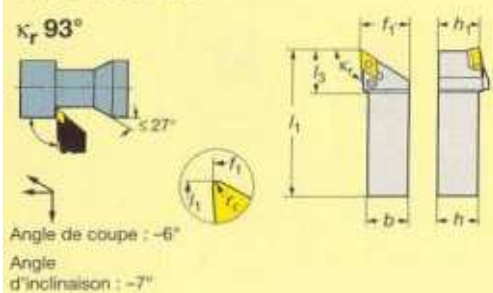

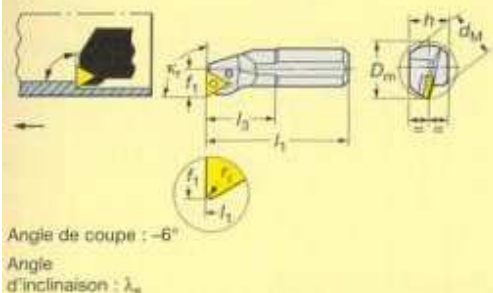

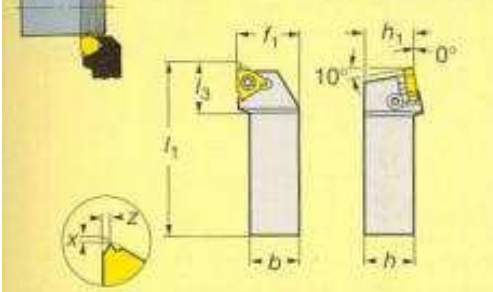
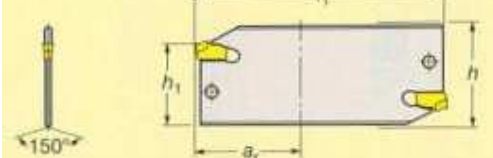
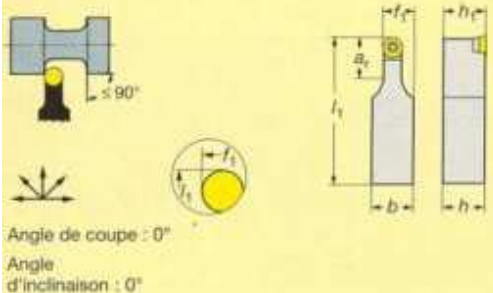
Foret à centrer	Foret à pointer	Foret	Alésoir	Fraise à lamer
				
A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage	A utiliser pour positionner un perçage	Pour percer des trous (tolérance H10)	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7)	Pour noyer une tête de vis Chc

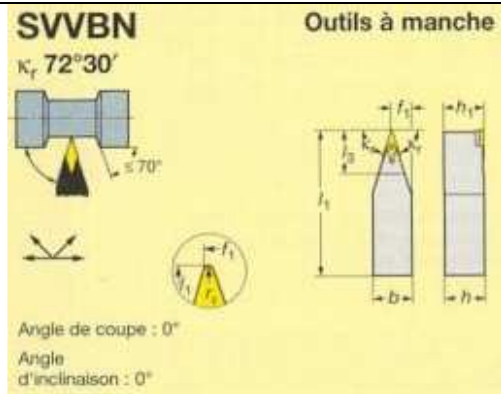
5.3 Outils de tournage




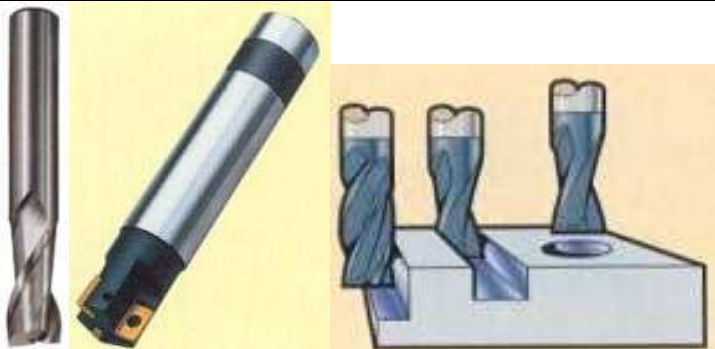


Voici un tableau récapitulatif des outils que l'on retrouve à l'atelier. Vous trouverez la forme générale de l'outil, un schéma définissant succinctement les formes réalisables par l'outil et des flèches correspondant aux mouvements d'usinage possibles.

Type d'opération	Outils associés
Ebauche L'ébauche permet d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps. Cet outil devra résister à d'importants efforts de coupe. Il est donc massif.	

Type d'opération	Outils associés
<p>Finition La finition est le dernier usinage d'une surface. On cherche le plus souvent une bonne qualité de surface : dimensions, forme et rugosité dans les tolérances de la fabrication. Les efforts sont plus faibles que pour une ébauche, l'outil est donc plus mince.</p>	<p>PDJNR/L R/L 171.35 Outils à manche</p>  <p>$\kappa_r 93^\circ$ $\leq 27^\circ$ Angle de coupe : -6° Angle d'inclinaison : -7°</p>
<p>Perçage Cette opération définit l'obtention d'un trou quelconque dans une pièce. On y associe des outils de perçage : les forets.</p>	
<p>Alésage Cette opération définit l'obtention d'un trou de qualité dans une pièce. On y associe des outils de perçage bien précis : les alésoirs ou les outils à aléser et dresser.</p>	<p>PTFNR/L Barre d'alésage</p>  <p>$\kappa_r 91^\circ$ Angle de coupe : -6° Angle d'inclinaison : λ_s</p> 
<p>Filetage / taraudage ou gorge intérieure / extérieure On utilise un porte outil commun pour réaliser des filetages (taraudages), seule la plaquette carbure change en fonction du pas de filetage à obtenir ou de la largeur de la gorge à réaliser.</p>	<p>R/L166.4FG Outil à manche</p>  <p>10° 0°</p>
<p>Tronçonnage Cet outil permet de couper une pièce en 2 parties. On utilise une lame à tronçonner.</p>	 <p>150°</p>
<p>Finition pastille ronde Cet outil permet de réaliser des formes complexes telles que les sphères ou des rainures.</p>	<p>SRDCN Outils à manche</p>  <p>Angle de coupe : 0° Angle d'inclinaison : 0°</p>

Type d'opération	Outils associés
<p>Finition pastille pointue</p> <p>Cet outil permet de réaliser des formes complexes telles que les sphères, des rainures des angles vifs. Cet outil est bien plus fragile qu'une pastille ronde, l'état de surface obtenu est souvent moins bon qu'avec une pastille ronde.</p>	 <p>SVVBN KV 72°30' Angle de coupe : 0° Angle d'inclinaison : 0°</p> <p>Outils à manche</p>

5.4 Outils de fraisage

Type d'opération	Outils associés
<p>Surfaçage</p> <p>Le surfaçage est l'opération qui consiste à obtenir un plan en fraisage. La fraise à surfacier permet donc de générer un plan qui sera perpendiculaire à l'axe de rotation de la fraise.</p>	
<p>Plan épaulé</p> <p>Les plans épaulés sont l'association de deux plans usinés (parfois par le même outil) qui sont perpendiculaires entre eux.</p>	
<p>Perçage</p> <p>Cette opération définit l'obtention d'un trou quelconque dans une pièce. On y associe des outils de perçage : les forets.</p>	
<p>Alésage</p> <p>Cette opération définit l'obtention d'un trou de qualité dans une pièce. On y associe des outils permettant de terminer un perçage : les alésoirs.</p>	

5.5 Outils manuels

5.5.1 Filetage

On peut obtenir un filetage en utilisant des outils manuels. On utilise des filières au diamètre souhaité qui sont placées dans un porte-filière.



5.5.2 Taraudage

On peut obtenir un taraudage en utilisant des outils manuels. On utilise des tarauds au diamètre souhaité qui sont placés dans un tourne à gauche.



6 Les porte-pièces

Les portes-pièces permettent de maintenir la pièce sur la machine pendant les phases d'usinage. Il existe plusieurs types de porte pièce.

La compréhension de la mise en position de la pièce sur la machine (par l'intermédiaire du porte-pièce) est impérative. En effet, il est désagréable de voir voler le matériel à travers l'atelier. L'étude de la mise en position s'appelle : Isostatisme.

6.1 Tournage

6.1.1 Le mandrin

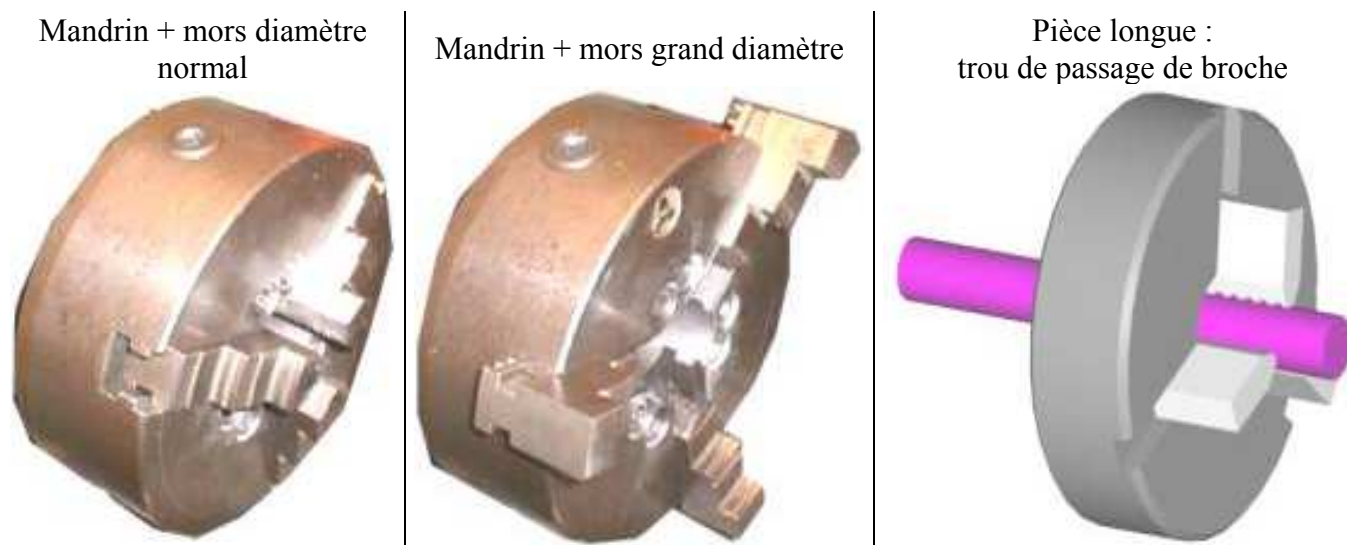
On l'utilise pour les pièces de révolution.

La pièce est placée entre les mors du mandrin. Un serrage concentrique des 3 mors permet de maintenir la pièce. Il est possible d'interchanger les mors en fonction de la morphologie de la pièce. De même, il existe un « trou de passage de broche » qui permet de mettre en place des pièces longues qui traversent le mandrin.

Le mandrin est installé sur la machine, il est entraîné en rotation par le moteur de broche.

Pendant l'usinage de la pièce, l'axe des surfaces générées est confondu avec l'axe de broche (et donc avec l'axe de rotation du mandrin)

ATTENTION, il existe différent type de mors :



6.1.2 Mors durs / mors doux

Au moment du serrage de la pièce, les mors durs déforment la pièce. Donc l'axe de la pièce n'est pas confondu avec l'axe du porte-pièce (et donc de la broche).

La surface de contact des mors durs au niveau de la pièce est composée de dents. La déformation de la pièce a lieu, car la pression exercée par les mors dépasse la pression admissible par la pièce. Pour éviter les déformations, il faut donc diminuer la pression exercée par les mors. Ci-contre, une représentation de mors dur.



Comme $P = \frac{F}{S}$ il suffit pour un effort de serrage constant, d'augmenter la surface de contact mors/pièce.

D'où l'utilisation de mors doux, ces mors sont usinés afin d'augmenter la surface de contact mors/pièce. De plus étant usiné, l'axe de la surface usinée sur les mors correspond à l'axe de broche. La dispersion de reprise sur ce type de montage est donc minimale. Ci-contre, une représentation de mors doux.



Montage en mors dur	Montage en mors doux

6.2 Fraisage

6.2.1 L'étai

On l'utilise pour les pièces prismatiques. Ce porte-pièce est composé de 2 mors. Le mors fixe est lié au bâti. Le mors mobile, en liaison glissière avec le bâti permet le serrage de la pièce. La pièce est donc placée entre les deux mors de l'étai. En fonction de la morphologie de la pièce, il peut être nécessaire de placer des cales pour surélever les surfaces à usiner.



6.2.3 La plaque support pour fraiseuse

Elle permet de fixer les pièces minces grâce aux trous taraudés M8 situés tous les 30 mm. La plaque est ensuite mise en position dans l'étai de la fraiseuse pour l'usinage. Plaque : 250x150 (8 trous x 5 trous), trous distants de 30mm et taraudés M8



6.2.3 Le mandrin

On l'utilise pour les pièces de formes extérieures cylindriques. Cela permet de monter des pièces cylindriques sur une fraiseuse pour usiner des poches, ou des trous de passage pour les vis (4 trous à 120°).

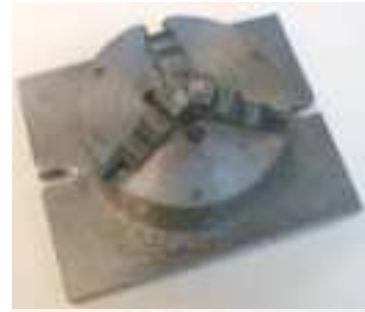
Diamètre maxi :

- avec mors Ø normal = Ø120mm
- avec mors grand Ø = Ø220mm

Le mandrin dédié au perçage sur une machine conventionnelle On l'utilise pour les pièces de formes extérieures cylindriques. On usine une succession de trou situé sur un Ø fixe et espacé d'un angle constant (multiple de 45° ou 60°).




Diamètre maxi :

- avec mors Ø normal = Ø80mm



7 Les porte-outils

Il existe différents systèmes pour placer les outils sur la machine, voici un petit récapitulatif non exhaustif.

Nom / utilisation	Photos
<p>Tourelle porte-outil (Tournage CN) Les outils de tournage sont placés sur la tourelle. La tourelle tourne afin de placer l'outil choisi en position d'usinage</p>	
<p>Porte-outil de tournage conventionnel (Tournage) L'outil est placé dans un support amovible. Ce support se fixe sur la machine. Ne pas oublier de serrer les vis de fixation du support sur la machine avant un usinage.</p>	
<p>Poupée mobile (Tournage conventionnel) Elle sert à mettre en place les forets et les alésoirs pour le perçage. L'axe défini par la poupée mobile est confondu avec l'axe de broche.</p>	

Nom / utilisation	Photos
<p>Porte-fraise (Fraisage CN) Les fraises et les forets sont placés dans leur porte-outil respectif dans le magasin à outils. A chaque appel de l'outil, celui-ci est mis en place automatique dans la broche.</p>	
<p>Porte-pince (Tournage / fraisage) Cela permet de monter une fraise ou un foret sur une machine. L'outil est placé dans la pince. La forme conique de la pince associée au serrage d'une bague permet le serrage de l'outil. ATTENTION, la pince est choisie en fonction du diamètre de l'outil à maintenir. On utilise la clé à ergots pour serrer la bague de maintien.</p>	
<p>Mandrin de perçage (Tournage / fraisage / perçage) Cela permet de monter un foret sur une machine. On utilise la clé de mandrin pour serrer le foret. On retrouve ce système sur les perceuses portatives.</p>	
<p>Adaptateur de cône (tournage / fraisage / perçage) Certains outils comme les forets de diamètre supérieur à 13 mm ont des embases coniques. Ces cônes nécessitent parfois des adaptateurs suivant les machines. Il suffit d'enfoncer l'embase du foret dans l'adaptateur. Pour désolidariser le cône et le foret, on utilise un chasse-cône. Il suffit de l'enfoncer dans la lumière latérale et de frapper à l'aide d'un maillet. On utilise ces adaptateurs pour la poupée mobile, en tournage conventionnel.</p>	

8 Les paramètres de coupe

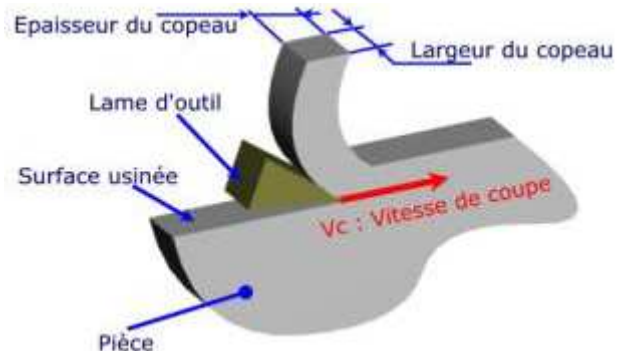
8.1 Principe

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

Une lame d'outil pénètre dans la matière 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 régler les paramètres de la coupe.

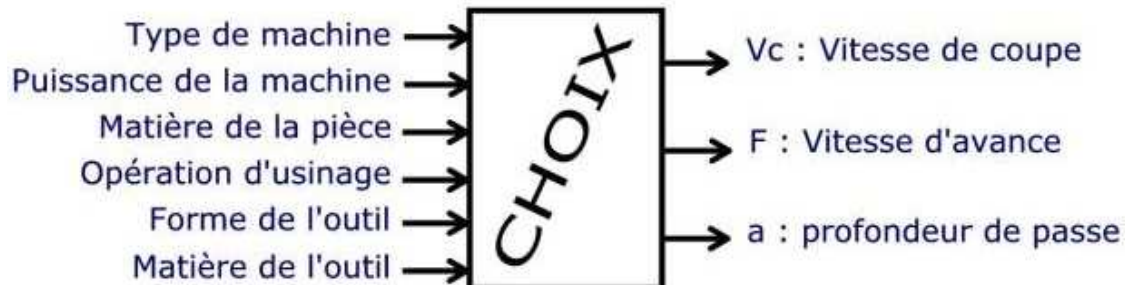


Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, notamment :

- Le type de machine (tournage, fraisage, perçage)
- La puissance de la machine
- La matière usinée (acier, aluminium)
- La matière de l'outil (ARS, carbure)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage)

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

- La vitesse de coupe : V_c
- La vitesse d'avance : F
- La profondeur de passe : a



8.2 Explications des critères de choix

Tous ces critères sont intimement liés.

8.2.1 Type de machine

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser. Donc il faut choisir entre tournage, fraisage ou perçage. Naturellement il y a souvent plusieurs possibilités pour réaliser un même type d'usinage.

8.2.2 Puissance de la machine

La puissance de la machine influe donc sur les performances. Pour l'usinage, il y a deux grands cas de figure :

- Usinage en ébauche : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps, l'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux. Mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut 'caler' ou la pièce peut voler.

- Usinage en finition : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes... Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

8.2.3 Matière de la pièce

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

8.2.4 Matière de l'outil

C'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse ! Donc cela influe sur l'usure de l'outil et sa durée de vie.

8.3 Les paramètres de coupe

8.3.1 La vitesse de coupe : V_c [m/min]

Cela correspond au déplacement de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Il ne faut pas confondre V_c et F .
Unité : V_c en m/min

8.3.2 La vitesse d'avance : V_f [mm/min]

Cela 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.
Unité : V_f en mm/min

8.3.3 La profondeur de passe : a [mm]

La combinaison de V_f et a permet de déterminer le volume du copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau.
Unité : a en mm

8.4 Réglage des conditions de coupe

Maintenant il faut régler les conditions de coupe sur la machine. En fait on n'agit que sur 3 paramètres :

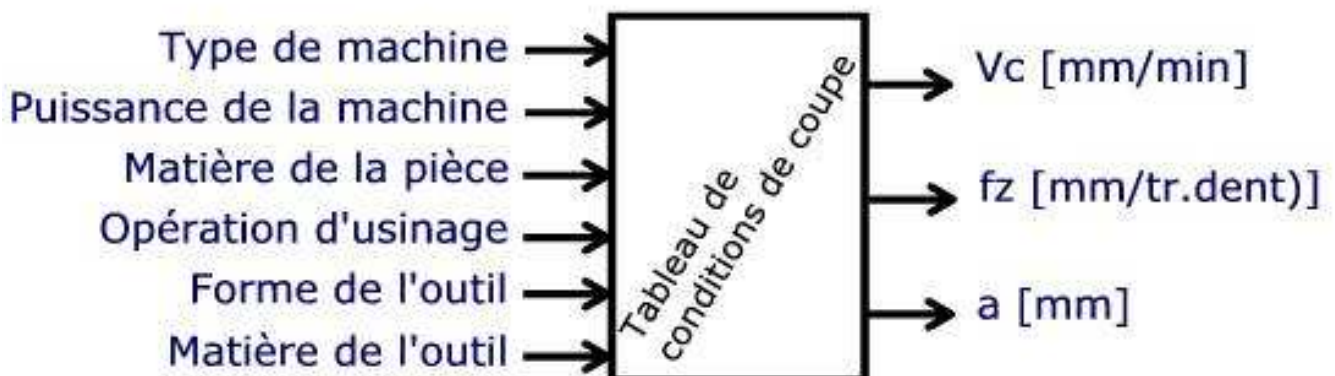
N : le taux de rotation de la pièce en tournage, ou de l'outil en fraisage

V_f : la vitesse d'avance suivant la trajectoire d'usinage, en fait on détermine d'abord f_z

a : la profondeur de passe

Il est donc nécessaire de déterminer les relations entre V_c , V_f et N . A notre niveau, on fixera la profondeur de passe, a , suivant une valeur maximum donnée par le tableau.

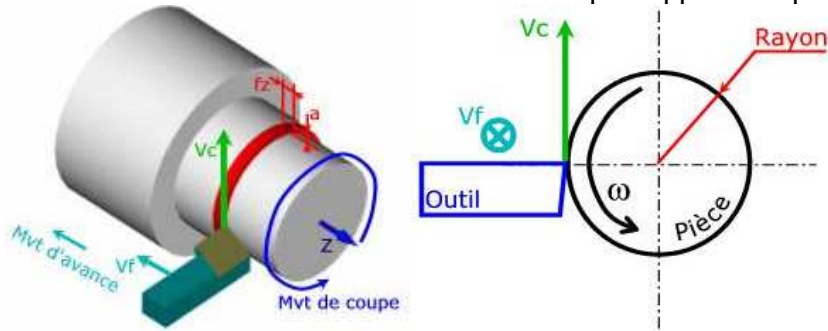
Vous disposerez d'un tableau de caractéristiques de coupe. Il permet de définir V_c , f_z et a en fonction du type de machine, de l'outil, de la matière.



8.5 Le cas du tournage

Le mouvement de coupe anime la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe V_c .

Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil par rapport à la pièce, On en déduit V_f .



8.5.1 La vitesse de coupe

On cherche à déterminer la relation entre la vitesse de coupe, V_c , et le taux de rotation, ω de la pièce. C'est une formule que vous connaissez bien.

Relation entre ω et V_c en utilisant les unités internationales : $V_c = R\omega \Rightarrow m = \frac{V_c}{K}$ avec V_c en m/s, R en m et ω en rd/s

Cependant, en usinage, on utilise les unités suivantes

- V_c en m/min, D en mm et N en tr/min
- On utilise le diamètre au lieu du rayon
- On utilise un taux de rotation, N , exprimé en tour par minute au lieu de, ω , en rd/s

La formule devient : $N = \frac{1000V_c}{\pi D}$

Le diamètre correspond à la position de la pointe de l'outil.

Il y a 2 cas de figure :

- On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre
 $\Rightarrow D = \text{diamètre du cylindre}$
- On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan
 $\Rightarrow D = \text{env. } 2/3 \text{ diamètre maxi du plan... à voir au cas par cas...}$

8.5.2 La vitesse d'avance

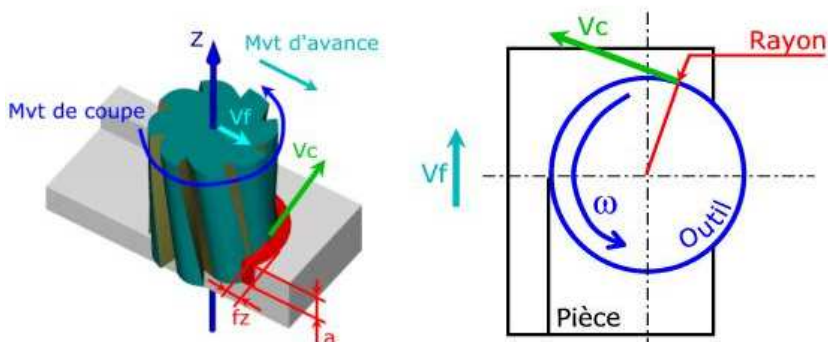
Voici maintenant la relation entre la vitesse d'avance et le taux de rotation : $V_f = f_z \cdot N$

V_f en mm/min, f_z en mm/(tr.dent) et N en tr/min

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

8.6 Cas du fraisage.

Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil.



8.6.1 La vitesse de coupe

On cherche à déterminer la relation entre la vitesse de coupe, V_c , et le taux de rotation, ω , de la fraise. C'est une formule que vous connaissez bien.

Relation entre ω et V_c en utilisant les unités internationales : $V_c = R\omega \Rightarrow \omega = \frac{V_c}{R}$ V_c en m/s, R en m et ω en rd/s

Cependant, en usinage, on utilise les unités suivantes

- V_c en m/min, D en mm et N en tr/min
- On utilise le diamètre au lieu du rayon
- On utilise un taux de rotation, N , exprimé en tour par minute au lieu de, ω , en rd/s

La formule devient : $N = \frac{1000V_c}{\pi D}$

D correspond au diamètre de la fraise

8.6.2 La vitesse d'avance

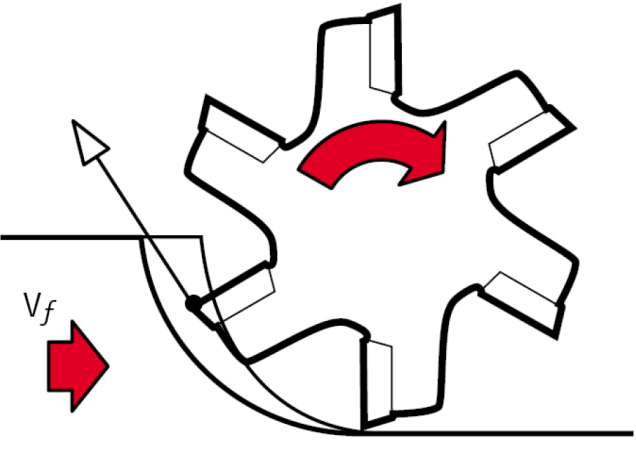
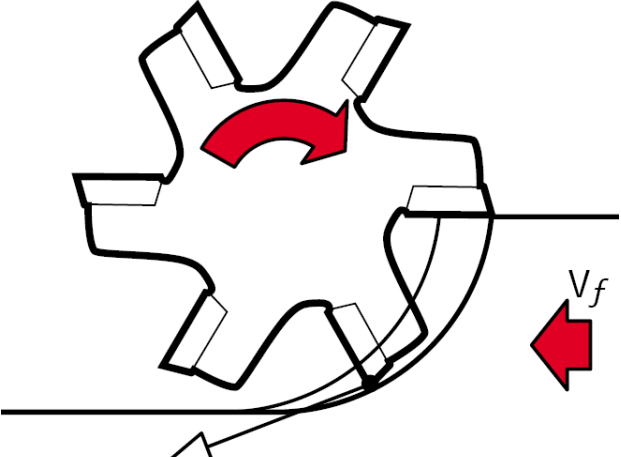
Voici maintenant la relation entre la vitesse d'avance et le taux de rotation : $V_f = z \cdot f_z \cdot N$

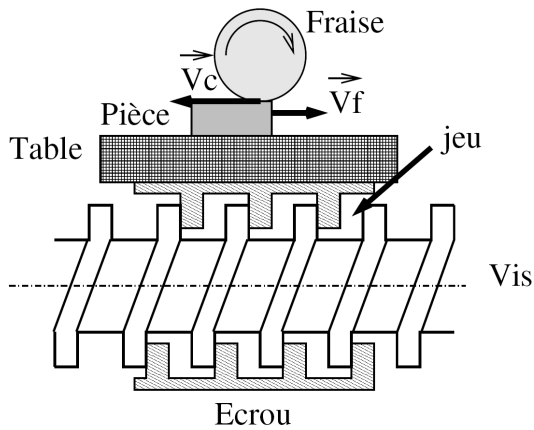
z est le nombre de dents de la fraise, V_f en mm/min, f_z en mm/(tr.dent) et N en tr/min

f_z correspond à la capacité de coupe de l'arête de coupe (la dent) pour une rotation de 1 tour de l'outil. En d'autre terme, f_z correspond à la distance que la dent va parcourir à chaque tour de la fraise.

Sur une fraise il peut y avoir plusieurs dents, donc plusieurs arêtes de coupe. On prend donc en compte ce nombre : z .

8.7 Fraisage en opposition ou en avalant (en concordance)

Fraisage en opposition	Fraisage en avalant (ou en concordance)
	
<p>Les vecteurs vitesse de coupe et vitesse d'avance sont opposés.</p>	<p>Les vecteurs vitesse de coupe et vitesse d'avance sont dans la même direction.</p>
<p>Avantages : Ce type de fraisage ne nécessite pas de vis à compensation de jeu. Sur les machines conventionnelles qui n'ont pas de rattrapage de jeu, ce mode de fraisage est impératif.</p>	<p>Avantages : La formation du copeau est optimale: on commence le copeau par une forte section perpendiculairement à la matière.</p>
<p>Inconvénients : La formation du copeau débute avec une épaisseur nulle et tangentielle à la matière, ce qui engendre un refoulement de la matière par l'outil. L'état de surface n'est pas optimal.</p>	<p>Inconvénients : La fraise tend à entraîner la pièce, s'il y a du jeu dans le mouvement de translation, la fraise va faire avancer la pièce de la valeur du jeu : on risque de casser les dents de la fraise.</p>



En fraisage en opposition (figure ci-contre), la fraise s'oppose au mouvement de la pièce : les vecteurs vitesse de coupe et vitesse d'avance sont opposés. Les efforts de coupe ont donc tendance à plaquer l'écrou de la table contre les filets de la vis. Le jeu n'intervient donc pas.

Si on fraisait en avalant, la fraise entraînerait brutalement la pièce de la valeur du jeu, en déplaçant la table et l'écrou en appui sur le second flanc des filets de la vis. L'épaisseur du copeau serait alors très importante d'où risque de casse l'outil.

8.8 Tableau des conditions de coupe

TOURNAGE (Attention : pour les gorges et le tronçonnage : prendre 50% des valeurs de tournage ci dessous)													
Matières	Rr MPa	Outil ARS						Outil Carbone					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr		V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr
Acier S235	500	18°	30	2	0.1	45	>0.04	14°	150	2	0.2	250	>0.10
Acier INOX	500	14°	27	2	0.1	32	>0.04	6°	105	2	0.2	115	>0.10
Acier 35CD4	1100	10°	20	2	0.1	28	>0.04	0°	100	2	0.2	160	>0.10
PVC	60	15°	90	4	0.3	150	>0.10	8°	100	4	0.3	150	>0.20
Nylon PA6	80	15°	90	2	0.2	120	>0.05	5°	100	2	0.35	180	>0.12
Plexi PMMA	78	15°	75	2	0.2	90	>0.10	10°	100	2	0.25	150	>0.12
Laiton UZ30	400	10°	70	1	0.3	110	>0.02	20°	200	2	0.3	230	>0.10
BronzeUE12P	200	10°	32	2	0.2	43	>0.02	20°	90	2	0.3	120	>0.10
Dural AU4G	280	22°	200	2	0.3	250	>0.02	25°	400	3	0.4	500	>0.10

FRAISAGE EN BOUT (surfaçage)													
Matières	Rr MPa	Fraises ARS						Plaquettes Carbone					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	29	2	0.11	40	>0.06	20°	100	2	0.2	120	>0.07
Acier INOX	500	20°	18	2	0.08	22	>0.05	15°	72	2	0.15	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	12°	20	2	0.06	25	>0.04	12°	80	2	0.12	90	>0.07
PVC	60	20°	200	4	0.2	300	>0.50	20°	800	4	0.3	1000	>0.07
Nylon PA6	80	20°	100	2	0.15	200	>0.20	20°	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	0°	60	2	0.15	80	>0.20						
Laiton UZ30	400		72	1	0.09	95	>0.07		130	2	0.5	180	>0.16
BronzeUE12P	200		23	1	0.07	31	>0.06		60	2	0.2	82	>0.16
Dural AU4G	280	20°	150	1	0.07	190	>0.06	20°	500	3	0.1	800	>0.08

FRAISAGE EN ROULANT (rainurage, combiné...)													
Matières	Rr MPa	Fraises A.R.S. ($\varnothing > 20$)						Fraises A.R.S. ($\varnothing < 20$)					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	25	2	0.08	32	>0.05	20°	19	2	0.03	22	>0.03
Acier INOX	500	20°	24	2	0.06	28	>0.04	20°	16	2	0.03	18	>0.03
Acier 35CD4	1100	20°	18	2	0.04	24	>0.03	12°	16	2	0.03	20	>0.03
Laiton UZ30	400	10	72	2	0.16	90	>0.03		41	3	0.01	46	>0.01
BronzeUE12P	200	10	30	2	0.18	35	>0.03		18	3	0.01	22	>0.01
Dural AU4G	280	20°	240	2	0.07	270	>0.06	20°	95	5	0.05	105	>0.03

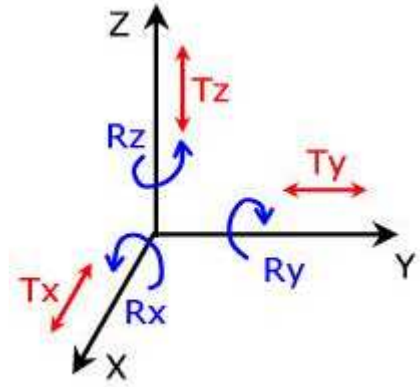
PERÇAGE, ALÉSAGE															
Matières	Rr MPa	Forets et alésoirs ARS									Tarauds A.R.S.				
		γ	Perçage			$\varnothing < 10$		$\varnothing > 10$		Alésage $\varnothing < 20$			V60 m/min	Lubrifiant	
			V60 m/min	angle pointe	angle hélice	f mm/tr	f mm/tr	V60 m/min	a mm	f mm/tr	V60 m/min	a mm	f mm/tr		
Acier S235	500	25°	25	135°	30°	0.025 \varnothing	>0.05	12.5	>0.20	0.3	12	>0.20	0.3	12	Huile de coupe
Acier INOX	500	25°	20	120°	30°	0.02 \varnothing	>0.04	8	>0.20	0.15	6	>0.20	0.15	6	Huile soluble
Acier 35CD4	1100	25°	22	120°	30°	0.012 \varnothing	>0.03	9	>0.20	0.17	10	>0.20	0.17	10	Huile de coupe
PVC	60		60	135°	30°	0.02 \varnothing		non	non	non	15	non	non	15	Air comprimé
Nylon PA6	80	0°	30	100°	30°	0.02 \varnothing		non	non	non	15	non	non	15	Air comprimé
Plexi PMMA	78	0°	40	140°	30°	0.02 \varnothing		non	non	non	10	non	non	10	Air comprimé
Laiton UZ30	400	18°	45	120°	15°	0.03 \varnothing	>0.03	30	>0.20	0.4	13	>0.20	0.4	13	a sec
BronzeUE12P	200	10°	20	120°	30°	0.037 \varnothing	>0.03	12	>0.20	0.9	7	>0.20	0.9	7	Huile de coupe
Dural AU4G	280	35°	65	140°	30°	0.032 \varnothing	>0.06	30	>0.20	0.4	18	>0.20	0.4	18	Pétrole

9 L'isostatisme

Le mouvement d'un solide dans l'espace peut se décrire suivant la combinaison de 3 translations et de 3 rotations par rapport à une base orthogonale. Ces 6 mouvements représentent les 6 degrés de liberté du solide. Pour immobiliser un solide dans l'espace, il suffit de supprimer ces 6 degrés de liberté.

En fabrication, l'isostatisme, c'est l'étude de la suppression des degrés de liberté d'un solide. Il est en effet préférable que la pièce soit bien mise en place pendant les opérations d'usinage.

Il ne faut pas confondre la mise en position (qui correspond à l'isostatisme) et le maintien de la pièce par un serrage.

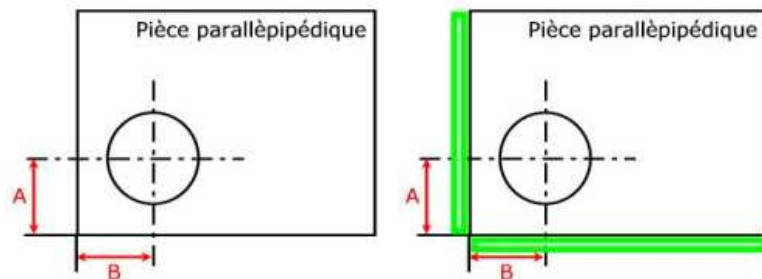


Pour supprimer les degrés de liberté, il suffit d'utiliser une ou plusieurs liaisons qui s'opposent au mouvement.

On verra par la suite que sur une pièce prismatique on peut supprimer facilement les six degrés de liberté. Donc on cherchera à réaliser une liaison encastrement entre la pièce et le porte pièce (attention il s'agit de mise en position). Sur une pièce de révolution, on peut supprimer facilement cinq degrés de liberté, le dernier correspond à la rotation suivant l'axe de révolution. Donc on cherchera à réaliser une liaison pivot entre la pièce et le porte pièce (attention, il s'agit de mise en position).

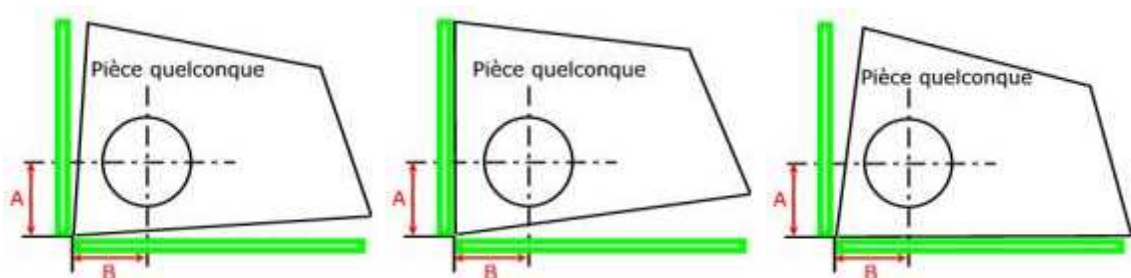
9.1 Mise en place du problème

Sur une série de pièce parallélépipédique, il faut percer un trou respectant les cotes A et B.



On positionne donc la pièce sur la machine par rapport aux surfaces de référence de la pièce, ici ce sont les surfaces de départ des cotes A et B (en vert) ainsi que le plan inférieur de la pièce (avec la liaison appui plan qui correspond au plan de la feuille).

Si on met en place une nouvelle pièce. Cette pièce n'est pas identique à la précédente, on va exagérer ces défauts et regarder ce qu'il se passe. La position de la pièce par rapport aux surfaces de mise en position peut varier de plusieurs façons, donc la mise en position n'est PAS UNIQUE. Ainsi la position du trou usiné n'est pas unique, et on ne respectera pas les cotes A et B.



La mise en position doit impérativement permettre d'avoir une position de pièce UNIQUE.
ATTENTION, on ne doit pas supprimer plusieurs fois le même degré de liberté.

Il faut donc trouver une mise en position unique pour les pièces. Donc pour usinage sur des séries de pièces, les surfaces réalisées sont positionnées de la même façon par rapport à leur surface de référence.
On étudiera plus tard le choix des surfaces de référence. On va étudier pour le moment la mise en position.

9.2 Liaisons utilisables

On va associer plusieurs liaisons simples pour supprimer les 6 degrés de liberté :

Liaison	Rotation supprimée	Translation supprimée
Ponctuelle	0	1
Linéaire rectiligne	1	1
Appui plan	2	1
Linéaire annulaire	0	2
Pivot glissant	2	2

Voici le tableau ci-dessous présente les liaisons associées à des réalisations concrètes :

Nom	Représentation	Exemples
Appui ponctuel : élimine 1 degré de liberté		
Liaison linéaire rectiligne : élimine 2 degrés de liberté		
Liaison linéaire annulaire : élimine 2 degrés de liberté		
Appui élimine 3 degrés de liberté		
Liaison pivot Glissant élimine 4 degrés de liberté		

On va étudier les deux cas classiques que vous rencontrerez à l'atelier : les pièces prismatiques et les pièces de révolution.

9.3 Règles d'isostatisme

On cherche à placer la liaison qui supprime le plus grand nombre de degré de liberté sur la plus grande surface ou sur la surface qui sert de référence aux spécifications géométriques des surfaces usinées.

Les degrés de liberté ne sont supprimés qu'une seule fois. On ne peut donc pas mettre en place un isostatisme avec 3 liaisons appui plan, cela enlèverait $3 \times 3 = 9$ degrés de liberté sur un total de 6 maximum.

9.4 Cas des pièces de révolution

Soit une pièce de diamètre D et de longueur L .

On ne peut pas supprimer le degré de liberté correspondant à la rotation sur l'axe de révolution. On doit donc supprimé 5 degrés de liberté. Il y a deux cas de figure, pour les pièces de type rondelle et les pièces de type axe.

9.4.1 Centrage court : $D > 1.5 L$

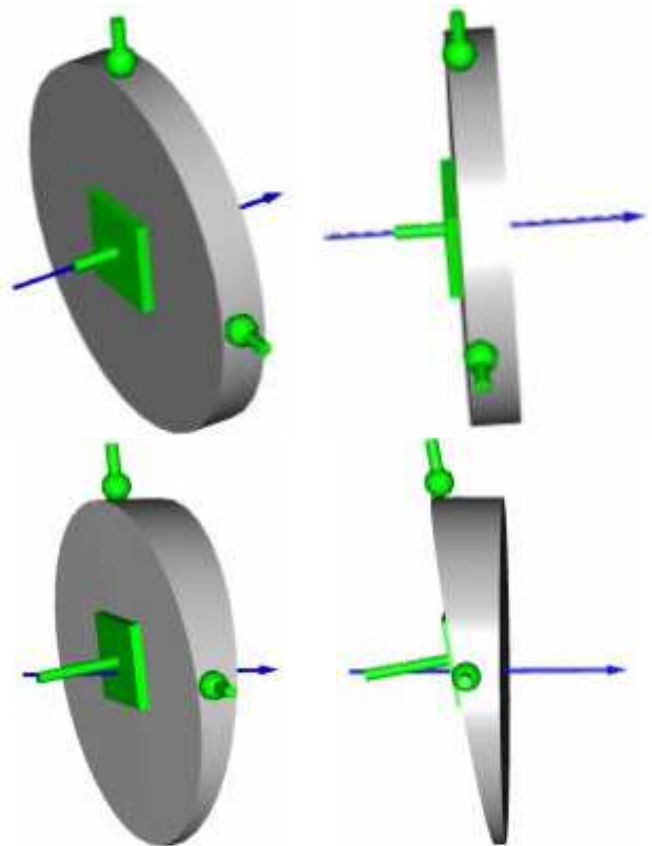
Si $D > 1.5 L$, la pièce est de type rondelle.

L'isostatisme est du type centrage court.

La surface la plus importante est le plan perpendiculaire à l'axe de révolution. Pour éliminer le maximum de degré de liberté on lui associe une liaison appui plan. Il reste $(5-3=2)$ degrés de liberté qui correspondent à 2 translations.

Pour éliminer les 2 degrés de liberté restant (2 translations), on utilise une liaison linéaire annulaire sur la surface cylindrique.

Cet isostatisme permet une mise en position unique, même pour une pièce aux formes quelconques.



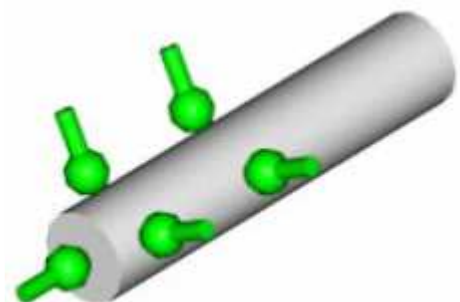
9.4.2 Centrage long : $D < L < 10 D$

Si $D < L < 10 D$, la pièce est de type axe.

L'isostatisme est du type centrage long.

La surface la plus importante est la surface cylindrique. Pour éliminer le maximum de degré de liberté on lui associe une liaison pivot. Il reste $(5-4=1)$ degré de liberté qui correspond à 1 translations.

Pour éliminer la translation restante, on utilise une liaison ponctuelle sur le plan perpendiculaire à l'axe de révolution.



9.5 Cas de pièces prismatiques

Comme la pièce est composée de plans. On choisit de supprimer un maximum de degré de liberté sur une surface plane. On utilise la liaison appui plan qui supprime 3 degrés de liberté.

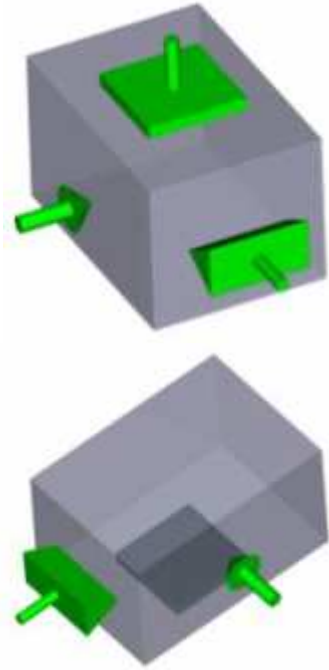
Il reste donc $6-3=3$ degrés de liberté : 2 translations et une rotation.

Sur une autre surface perpendiculaire à l'appui plan précédent, on peut enlever 2 degrés de liberté supplémentaire (1 translation et 1 rotation) : donc liaison linéaire rectiligne.

Il reste donc $3-2=1$ degré de liberté (1 translation).

Attention, la 'ligne' de la liaison rectiligne est parallèle à la surface de la liaison appui plan.

Sur une surface perpendiculaire aux 2 précédentes, on place une liaison ponctuelle.

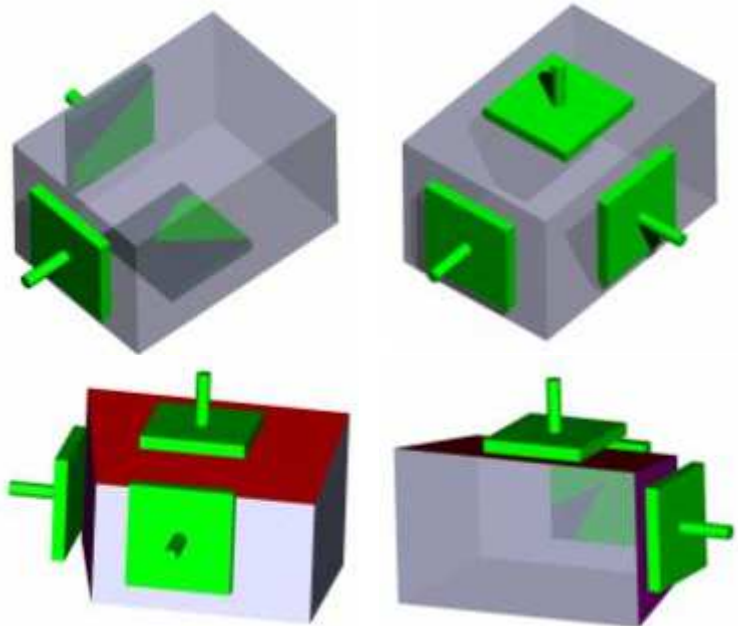


Maintenant examinons ce qu'il se passe pour une pièce non parallélépipédique.

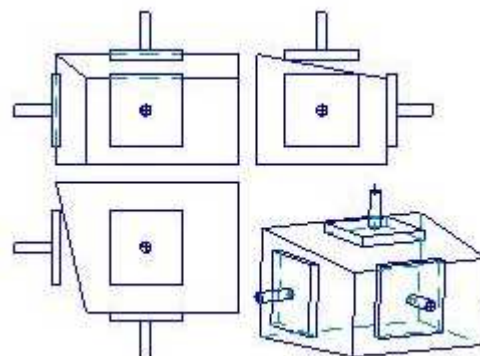
Ce qu'il ne faut pas faire :

Imaginons, que vous utilisez 3 liaisons appuis plan pour la mise en position de cette pièce.

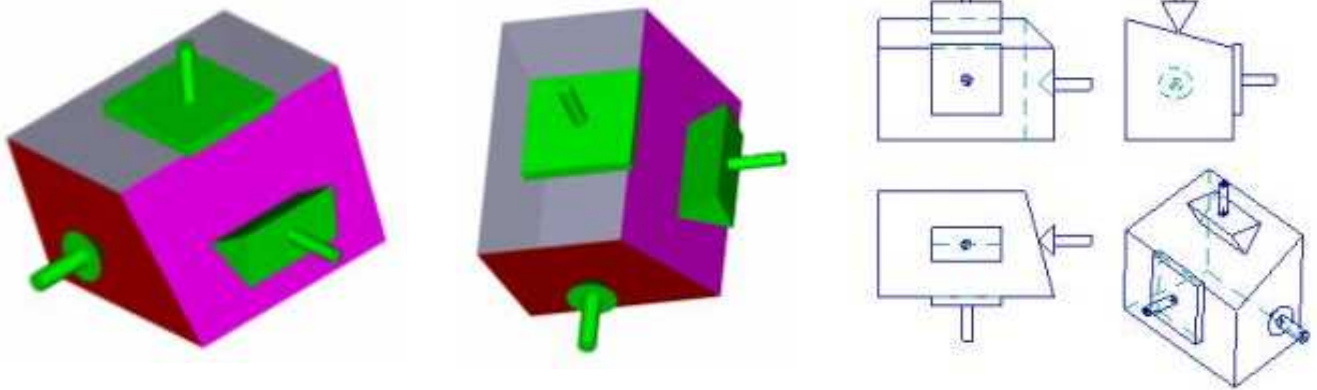
Si la pièce est parallélépipédique, on ne voit pas de problème. Les liaisons appuis plan sont en contact avec les surfaces.



Si la pièce n'est pas parallélépipédique, là, il y a quelque chose de pas normal. En effet, tous les appuis ne sont pas complètement en contact avec les surfaces du prisme.



Voici ce que cela donne avec l'isostatisme associant appui plan + linéaire rectiligne + ponctuelle :



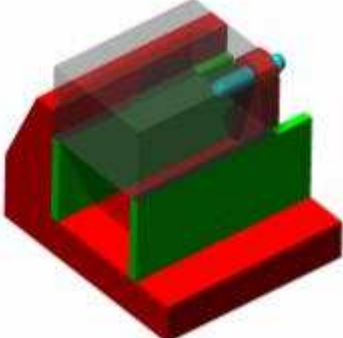
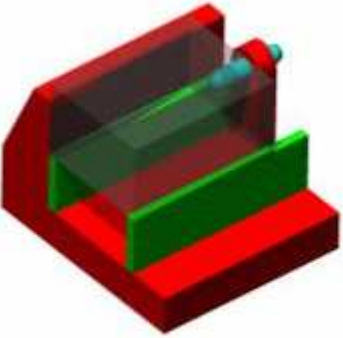
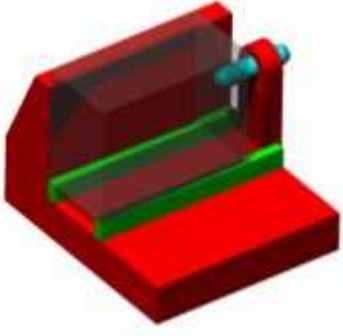
Toutes les liaisons sont bien en contact avec les surfaces de la pièce.

9.6 Respect des surfaces d'appui

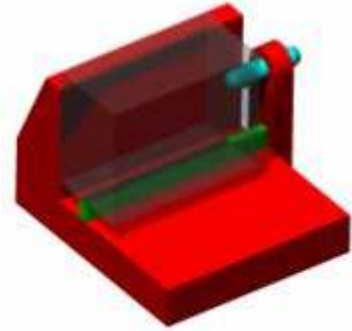
Quand vous avez choisi un isostatisme, il faut le mettre en place sur la machine. Vous disposez des portes-pièces et d'éléments interchangeables tels que les cales et la butée.

Pour un prisme, on choisi l'isostatisme classique : appui plan + linéaire + ponctuelle

On va étudier différents cas de figure pour la mise en place la pièce dans l'étau :

<p>Appui plan sur le plan inférieur Linéaire rectiligne sur le plan latéral Butée sur le coté Rien à signaler : La surface utilisée pour l'appui plan a une dimension bien supérieure à celle utilisée pour la liaison linéaire rectiligne.</p>	
<p>Appui plan sur le plan inférieur Linéaire rectiligne sur le plan latéral Butée sur le coté Même cas que précédemment : La surface utilisée pour l'appui plan a une dimension bien supérieure (mais moins que ci-dessus) à celle utilisée pour la linéaire rectiligne. Il n'y a tout de même pas d'ambiguïté entre l'appui plan et la linéaire rectiligne.</p>	
<p>Appui plan sur le plan inférieur Linéaire rectiligne sur le plan latéral Butée sur le coté GROS PROBLEME: La surface utilisée pour l'appui plan a une dimension inférieure à celle utilisée pour la linéaire rectiligne. Il y a ambiguïté entre les dimensions des surfaces correspondant à l'appui plan et la liaison linéaire rectiligne et l'isostatisme préconisé.</p>	

Appui plan sur le plan latéral
 Linéaire rectiligne sur le plan inférieur
 Butée sur le coté
 Rien à signaler :
 La surface utilisée pour l'appui plan a une dimension bien supérieure à celle utilisée pour la linéaire rectiligne.
 Cette fois tout correspond au niveau de la dimension des surfaces avec l'isostatisme préconisé.



10 Cotes fabriquées / cotes du dessin de définition

10.1 Définition

Pour usiner une pièce, il faut savoir les dimensions à obtenir : ce sont les cotes de fabrication. On appelle cote fabriquée les cotes qui sont réalisées pendant un usinage sans démontage de la pièce. Elles relient :

- soit une surface de mise en position avec une surface usinée.
- soit deux surfaces usinées dans la même phase.

On va essayer de présenter la différence entre les cotes fabriquées et les cotes placées sur un dessin de définition.

10.2 Première étude de cas

On va étudier la réalisation d'un plan sur un prisme. On part d'une pièce brute, dont les surfaces ne sont pas parfaites. On étudie la réalisation de la cote entre A et B sur l'axe vertical.

La pièce est mise en position dans le porte-pièce. La surface A n'est pas parfaitement en contact sur la surface d'appui (cela est du entre autre, au fait que la surface A est une surface brute). On retrouve aussi ce type d'erreur de positionnement avec une surface usinée, la variation étant alors plus faible. On appelle cette variation les dispersions de remise en position.

La fraise est en position pour l'usinage. Or la position de l'outil peut varier en fonction de plusieurs paramètres tels que l'opérateur (utilisation de la manivelle) ou bien l'usure des arêtes de coupe. Donc la position de surface usinée B peut varier.

La cote fabriquée entre les surfaces A et B est donc liée aux variations de la position de la fraise et de la surface de référence.

Exemple concret :

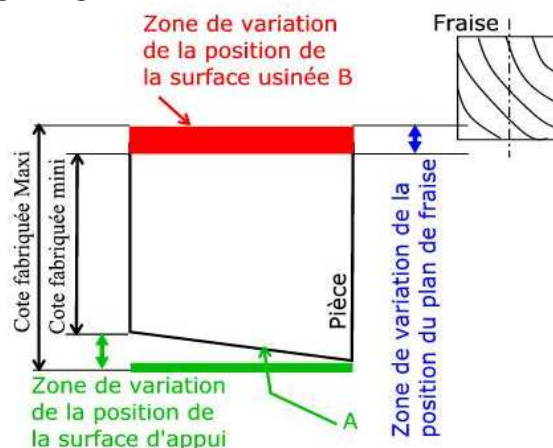
Variation du plan de fraise = 0.1 mm

Variation de la surface d'appui = 0.2 mm

Donc variation totale = 0.3 mm

On peut donc en déduire que l'intervalle de tolérance minimal de la cote fabriquée = 0.3 mm

Dans ce cas de figure, on n'est pas capable de réaliser une cote du dessin de définition si son $IT < 0.3$ mm.



10.3 Deuxième étude de cas

Cette fois, on réalise sans démontage de la pièce l'usinage d'un plan épaulé avec le même outil.

On étudie la réalisation de la cote entre B et C sur l'axe vertical.

La pièce est mise en position dans le porte-pièce. La surface A n'est pas parfaitement en contact sur la surface d'appui (cela est du entre autre, au fait que la surface A est une surface brute). On retrouve aussi ce type d'erreur de positionnement avec une surface usinée, la variation étant alors plus faible. On appelle cette variation les dispersions de remise en position.

La fraise est en position pour l'usinage. Or la position de l'outil peut varier en fonction de plusieurs paramètres tel que l'opérateur (utilisation de la manivelle) ou bien l'usure des arête de coupe. Donc la position de surface usinée B peut varier. Actuellement il existe un décalage de la fraise égal à d . On retrouve ce même décalage pour l'usinage de la surface C. Donc la cote fabriquée entre les surfaces B et C comprend uniquement les erreurs de repositionnement de la fraise au niveau de plan C : Δ .

La cote fabriquée entre les surfaces A et B est donc liée aux variations de la position de la fraise et de la surface de référence.

Au final : l'IT de la cote fabriquée B-C est plus petit que l'IT de la cote A-B.

On obtient la règle d'usinage : Il faut usiner un maximum de surfaces sans démonter la pièce.

Exemple concret :

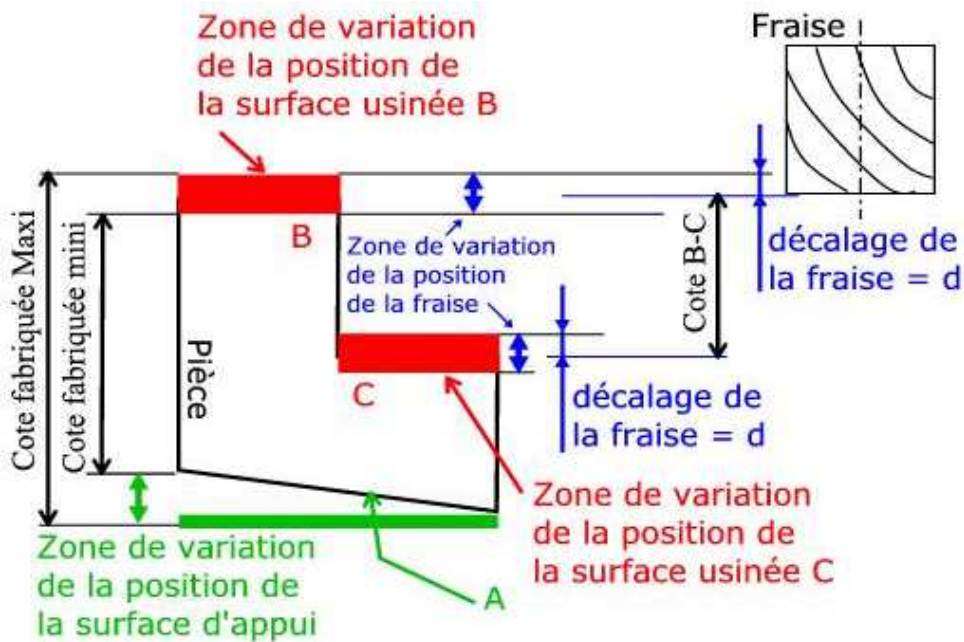
Variation du plan de fraise = 0.1 mm

Variation Δ = 0.05 mm

Variation de la surface d'appui = 0.2 mm

IT cote A-B = 0.3 mm

IT cote B-C = 0.05 mm



10.4 Troisième étude de cas

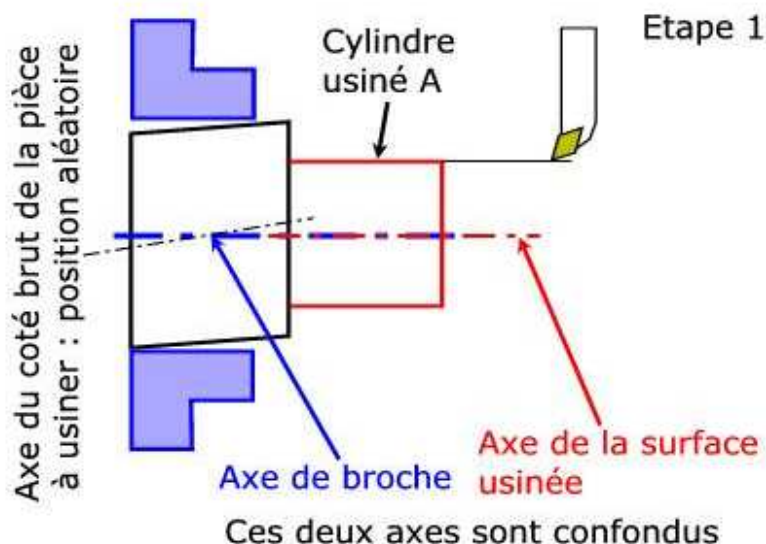
Cette fois, on réalise sans démontage de la pièce l'usinage d'un plan épaulé avec le même outil.

10.4.1 On étudie l'usinage d'un cylindre en tournage

Etape 1 : on usine le coté droit de la pièce (cylindre A).

La pièce est mise en position dans le porte-pièce (le mandrin). La position de l'axe de la pièce brute est mal défini (ce sont les dispersions de remise en position pour une pièce brute). Par contre, l'axe de la surface usinée A correspond à l'axe de broche.

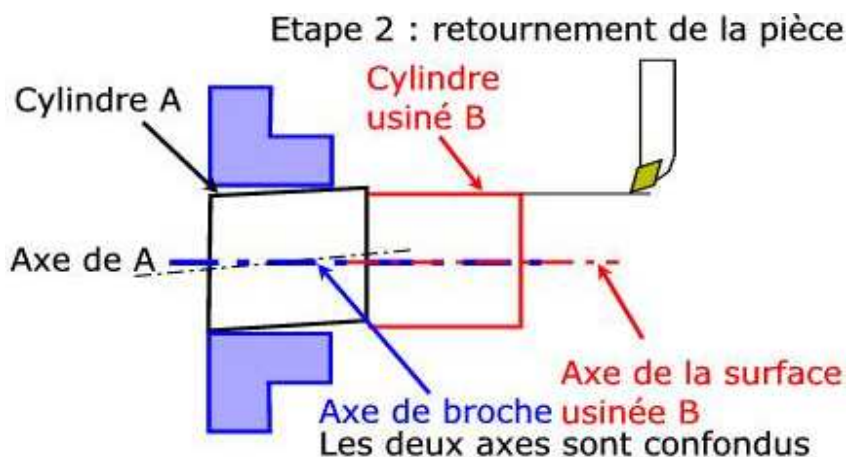
On remarque que l'axe de la surface usinée est différent de l'axe de la partie brute de la pièce.



Etape 2 : après retournement de la pièce, on usine le cylindre B

La pièce est mise en position dans le porte-pièce (le mandrin). La position de l'axe de A est mal définie (ce sont les dispersions de remise en position pour une pièce usinée). Par contre, l'axe de la surface usinée B correspond à l'axe de broche.

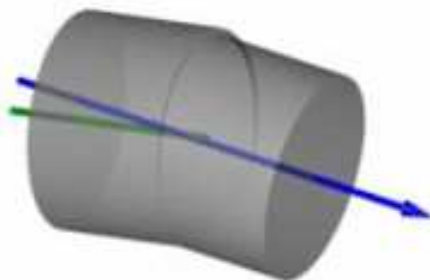
On remarque que l'axe de la surface usinée A est différent de l'axe de la surface usinée B.



ATTENTION :

Axe cylindre usiné A non confondu avec
axe cylindre usiné B

On obtient donc une pièce qui est composée de 2 cylindres NON coaxiaux.



Pour diminuer les dispersions de remise en position, il faut utiliser comme porte-pièce un mandrin équipé de mors doux.

11 Règles d'usinage

11.1 En premier lieu

Afin de réussir un usinage, il faut vérifier son matériel. Donc, la pièce doit être bien serrée dans le porte-pièce, l'outil aussi doit être bien fixé. Il faut parfois régler les outils (hauteur de pointe en tournage) ou les porte-outils (dégauchissage en fraisage).

Il faut aussi vérifier l'état de l'outil. Les arêtes de coupe sont-elles en bon état ? Eventuellement il faut changer les plaquettes carbure.

Utilisez le tableau des conditions de coupe pour obtenir V_c , f_z et a . Veuillez calculer les conditions de coupe : N , F .

11.2 Pour le début d'un perçage

Le foret est un outil relativement flexible. Afin de percer à l'endroit souhaité il faut marquer le trou à percer.

Utilisation du foret à pointer afin de bien marquer la position pour le foret suivant.

11.3 Pour des perçages : Diamètres $D > 10$ mm

On ne perce pas directement les gros diamètres. Il faut procéder par étape.

$D < 15$: faire des trous tous les 6 mm

$15 < D < 24$: faire des trous tous les 4 mm

$24 < D < 30$: faire des trous tous les 3 mm

11.4 Pour des alésages, qualité du trou H7 ou H8 à l'alésoir machine

Pour réaliser un alésage de $\varnothing D$ H7 avec un alésoir machine.

11.4.1 Alésages de Diamètres $D < 20$ mm

L'ébauche consiste en la réalisation d'un trou : $\varnothing D - 2$

La $\frac{1}{2}$ finition consiste en la réalisation d'un trou : $\varnothing D - 0.25$

La finition consiste en la réalisation de l'alésage : $\varnothing D$

11.4.2 Alésages de Diamètres $D > 20$ mm

L'ébauche consiste en la réalisation d'un trou : $\varnothing D - 0.5$

La finition consiste en la réalisation de l'alésage : $\varnothing D$

11.5 Tournage de pièces longues

Le problème vient principalement de la mise en position. Il faut éviter le fléchissement de la pièce à cause des efforts de coupe.

11.6 Réalisation d'une cote

Veuillez à viser la réalisation de la cote moyenne.

Cote du type : $L \pm a$ (20 ± 0.5), il faut viser la cote de L : 20.

Cote du type : $\begin{matrix} L+b \\ \pm a \\ 20 \end{matrix} \begin{matrix} -f \\ -f \\ -f \end{matrix}$, il faut viser la cote de $[(L+b)+(L-a)]/2$: (20.5)

11.7 Taraudage à main

Voir le tableau suivant qui indique le diamètre de perçage avant le taraudage.

Diamètre de la vis	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Pas	0,5	0,7	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,5	2,5	2,5	3
Diamètre perçage	2,5	3,2	4,1	4,9	6,6	8,4	10,1	11,8	13,8	15,3	17,3	19,3	20,8
Profondeur filet	0,31	0,43	0,49	0,61	0,77	0,92	1,07	1,23	1,23	1,53	1,53	1,53	1,84
Diamètre du lamage CHc	6	8	9	11	14	16	18	22	25	28	31	34	37
Profondeur du lamage CHc	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24

12 Création de gammes de fabrication

12.1 Définitions

12.1.1 Opération d'usinage

C'est le fait de réaliser l'usinage d'une surface sur une pièce (dressage, chariotage, perçage, surfacage...)

12.1.2 Phase d'usinage

C'est le regroupement d'une ou plusieurs opérations réalisées sur la pièce. La mise en position sera unique, et la pièce ne DOIT PAS être démontée entre les opérations.

On change de phase à chaque démontage de pièce.

Le contrat de phase est le document qui décrit la phase d'usinage. Les informations devant apparaître sur ce contrat de phase sont :

- dans le cartouche du haut :

- le numéro de gamme choisie, le nom de l'ensemble, le nom de la pièce, la matière de la pièce, le type de machine-outil utilisée...

- dans la partie dessin : la pièce est toujours dessinée dans la position d'usinage.

- le dessin de la pièce après cette phase d'usinage (les surfaces non usinées en noir, les surfaces usinées en rouge), les cotes de fabrication, l'isostatisme ou mise en position (en vert), le dessin des outils en position d'usinage (en bleu).

- dans le cartouche du bas :

- la désignation des opérations dans l'ordre d'usinage, le nom des outils utilisés pour chaque opération, les conditions de coupe (vitesse de coupe V_c en m/mn, avance par tour et par dent f en mm/(tr.dent) et fréquence de rotation N en tr/mn.

12.1.3 Gamme d'usinage

C'est le regroupement de l'ensemble des phases d'usinage.

La gamme d'usinage est le document qui décrit la méthode complète d'obtention de la pièce. Les informations devant apparaître sur cette gamme d'usinage pour chaque phase d'usinage sont :

- le dessin de la pièce après cette phase d'usinage (les surfaces non usinées en noir, les surfaces usinées en rouge), l'isostatisme (en vert). La pièce est toujours dessinée dans la position d'usinage.

- la désignation des opérations dans l'ordre d'usinage, le nom des outils utilisés pour chaque opération.

12.2 Règles principales

12.2.1 Choix du brut

A partir du dessin définition, donc de la forme générale de la pièce il faut choisir le brut de départ. On essaiera de limiter le volume de matière à enlever par usinage, on limite les surépaisseurs d'usinage.

12.2.2 Association des surfaces

On réalise dans la même phase les surfaces liées entre elles par des « cotes serrées » ou des spécifications géométriques (coaxialité, perpendicularité...).

On a vu précédemment qu'il est préférable d'usiner un maximum de surfaces sans démontage. Cela permet d'éviter l'accumulation des erreurs de mise en position et d'usinage.

Il faut donc essayer d'usiner 'en même temps' les surfaces liées les unes aux autres par des cotes aux IT les plus faibles.

De même, on essaiera dans la mesure du possible de réaliser la pièce en minimisant le nombre de montages/démontages de la pièce.

Attention, il ne faut pas démonter une pièce pour vérifier une cote qui vient d'être usinée. Il faut prévoir un moyen de mesure approprié, pour un contrôle sur porte pièce.

12.2.3 Création des phases

On minimise le nombre de montages/démontages de la pièce. On réalise un maximum de surfaces pour une mise en position donnée.

12.2.4 Mise en position sur surfaces usinées

L'isostatisme sera mis en place afin que la mise en position de la pièce soit unique, surtout si vous devez réaliser plusieurs fois la même pièce.

Pour mettre la pièce en position sur le porte-pièce choisi, on s'appuie sur des surfaces usinées.

On élimine le plus grand nombre de degré de liberté sur les plus grandes surfaces.

12.2.5 Choix des machines pour réalisation

Par rapport aux associations de surfaces définies, il faut choisir la machine qui permet de réaliser les usinages définis

12.3 Démarche d'ordonnement d'une gamme

Comment choisir la ou les premières surfaces à usiner ?	<ul style="list-style-type: none">* La première surface usinée (ou groupement de surfaces) doit servir d'appui principal pour la suite des usinages.* La première surface usinée (ou groupement de surfaces) doit présenter une bonne stabilité de reprise.* La première surface usinée (ou groupement de surfaces) doit pouvoir recevoir un ablocage efficace.
Comment choisir les surfaces de mise en position de la première phase ?	<ul style="list-style-type: none">* En première phase, la mise en position de la pièce doit si possible s'effectuer sur des surfaces brutes restant brutes après l'usinage complet de la pièce. Ces surfaces doivent être de bonne qualité.* En première phase, la mise en position de la pièce doit permettre un balancement correct de la matière autour des usinages pour la phase suivante.* En première phase, la mise en position de la pièce doit permettre de garantir une bonne stabilité sous les efforts de coupe.
Comment effectuer des groupements de surfaces ?	<ul style="list-style-type: none">* Deux surfaces liées par une ou plusieurs spécifications délicates doivent être réalisées dans la même phase ou sous-phase.* On usine souvent dans la même phase ou sous-phase toutes les surfaces accessibles par l'outil en fonction du type de machine-outil utilisée.* Certaines surfaces ne peuvent être réalisées séparément, elles sont regroupées par obligations technologiques (rainures, lamages).

Comment ordonner les phases ?	<p>* Dans le cas où deux surfaces appartenant à des phases différentes sont positionnées entre elles et réalisables l'une par rapport à l'autre, il faut réaliser en premier la surface qui offre la meilleure stabilité de reprise et qui permet un ablocage correct.</p> <p>* Eviter les reprises sur brut au-delà de la phase 30.</p> <p>* Il faut repousser le plus loin possible, dans la suite des phases, l'usinage des surfaces fragiles, précises et ce celles qui affaiblissent la pièce (filetage, rectification, rainurage...).</p>
Comment optimiser le nombre de phases sur MOCN ?	<p>* Rechercher une prise de pièce judicieuse (stable et fiable) permettant la réalisation de la pièce ne un minimum de phases.</p> <p>* Réaliser l'usinage de plusieurs pièces du même lot dans des positions différentes sur le même montage.</p>

* Spécification du dessin de définition de la pièce.

Plus la spécification est précise plus le nombre d'opérations élémentaires augmente.

Spécification	Intervalle de tolérance			Qualité			Rugosité		
	IT>0.5	0.05<IT<0.5	IT<0.05	12-13	8 à 11	6-7	Ra>6.3µm	0.8µm<Ra<6.3µm	Ra<0.8µm
Opérations									
Ebauche									
½ Finition									
Finition									

* Caractéristiques du brut

Plus le volume d'excédent de matière est important, plus les défauts de forme risquent d'être conséquents ce qui entraînent une augmentation du nombre d'opérations élémentaires.

* Caractéristiques intrinsèques

Plus la pièce est fragile et déformable, plus le nombre d'opérations élémentaires augmente pour minimiser les défauts.

La variation peut être due:

- aux variations de l'intensité des forces de coupe,
- à l'intensité de la force de bridage,
- à la rigidité de la pièce,
- aux libérations de tensions internes au matériau.

* Nature de l'outil

Les outils de finition doivent attaquer des surfaces saines (donc écrouées).

* Mode de génération

En travail de forme, il faut augmenter le nombre d'opérations élémentaires.

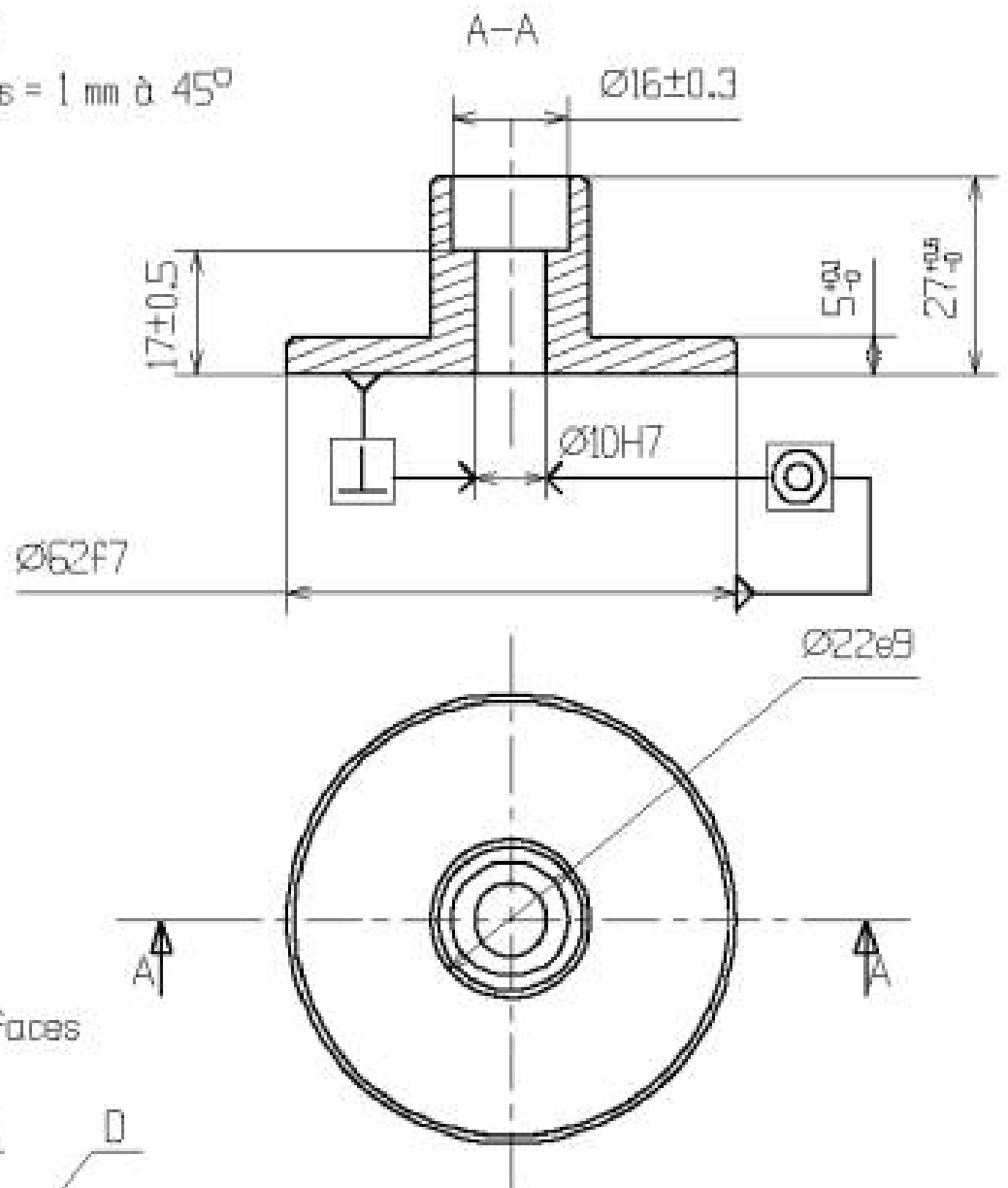
La longueur de contact outil/pièce étant importante, il sera nécessaire de multiplier le nombre d'opérations d'ébauche afin de minimiser les problèmes de flexion d'outil, d'usure d'échauffement et de vibrations.

12.4 Application

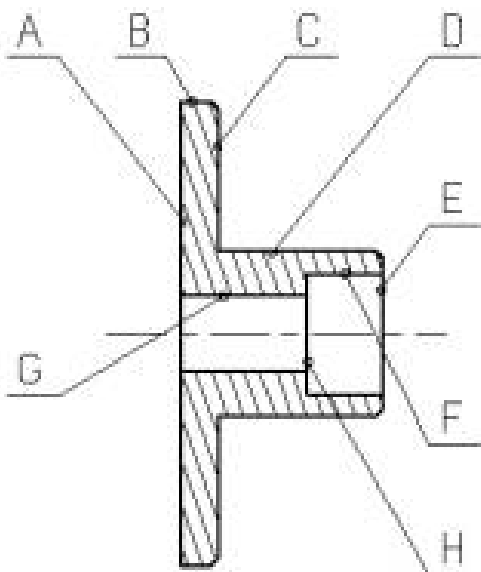
A partir du dessin de définition du piston, il faut écrire sa gamme d'usinage.

Dessin de définition

Tous les chanfreins = 1 mm à 45°



Repérage des surfaces



Contraintes géométriques :

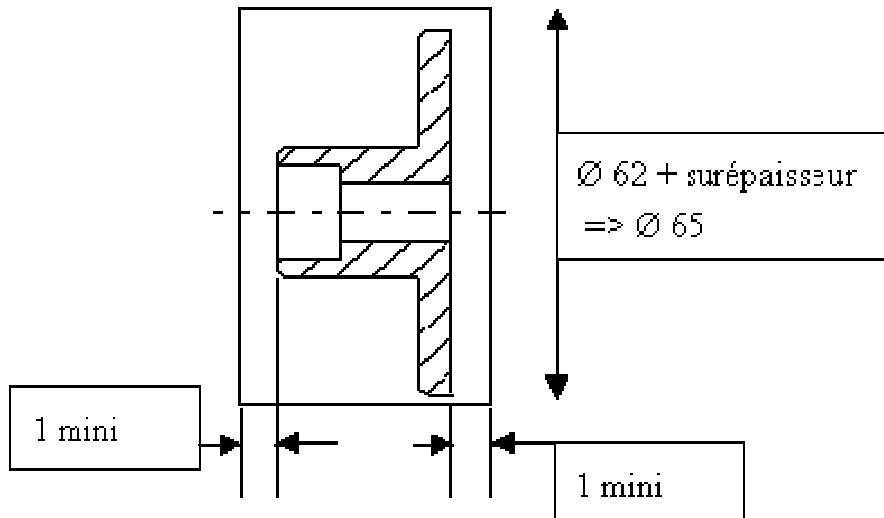


: Coaxialité entre l'axe de B et l'axe de G



: Perpendicularité entre le plan A et l'axe de G

12.4.1 Etape 1 : choix du brut



On doit vérifier qu'il existe ce type de matière au magasin : soit une barre pleine de $\varnothing 65$ dont on coupera une longueur de 30 mm

12.4.2 Etape 2 : association des surfaces

Coaxialité	Perpendicularité	Ebauche extérieure	Alésage

12.4.3 Etape 3 : création des phases en associant un maximum de surfaces

On met la pièce en position d'usinage, d'où l'orientation de la pièce en phase 20. Attention, le dessin représente ci dessous représente la pièce finale (toutes surfaces usinées).

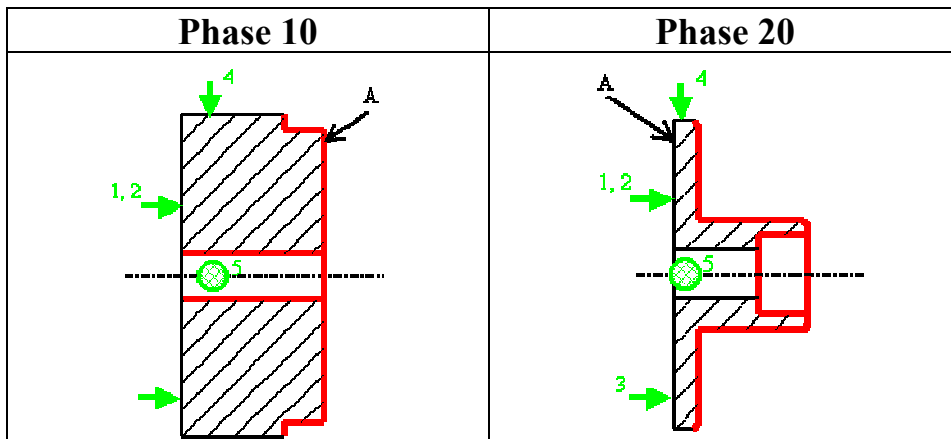
Phase 10	Phase 20

A chaque opération, il faut bien choisir l'outil. Suivant la qualité désirée, réaliser les surfaces en ébauche, $\frac{1}{2}$ finition et finition (exemple cas de réalisation d'un \varnothing de tolérance H7).

12.4.4 Etape 4 : mise en position de la pièce

Attention, la pièce est en cours d'usinage, dessiner la pièce correspondant aux usinages à réaliser :

- dans la phase 10 : les appuis sont sur du brut,
- dans la phase 20 : les appuis sont sur des surfaces usinées.



12.4.5 Etape 5 : rédaction de la gamme d'usinage

Gamme d'usinage		
Ensemble : Vérin	Pièce : piston	Matière AU4G
Phase 10		
Machine : tour conventionnel		
Opérations	Outils	Dessin + mise en position
<ul style="list-style-type: none"> - Dressage de A en finition - Chariotage de B en finition - Perçage ébauche de G - Perçage ½ finition de G - Alésage de G 	<ul style="list-style-type: none"> Outil d'ébauche carbure Outil d'ébauche carbure Foret à pointer Foret ARS Alésoir 	
Phase 20		
Machine : tour conventionnel		
Opérations	Outils	Dessin + mise en position
<ul style="list-style-type: none"> - Dressage chariotage de C, D, E en ébauche - Dressage de E en finition - Dressage de C en finition - Chariotage de D en finition - Alésage et dressage de F, H 	<ul style="list-style-type: none"> Outil d'ébauche carbure Outil de finition carbure Outil de finition carbure Outil de finition carbure Outil à aléser dresser carbure 	

15.4.6 Contrat de phase

PARTIE A		DOCUMENT REPONSE N°3				
Nom :	Prénom :	Groupe :				
QUESTION 2 : ETUDE DU CONTRAT DE PHASE N°10 Pour la Gamme N° : 1	Ensemble : Vérin de Fixation	Date: / /		IDMT		
	Pièce : Piston supérieur	BUREAU DES METHODES		1 / 1		
	Matière : S235 (E24)					
Machine-Outil : Tour conventionnel						
DESIGNATION DES OPERATIONS	OUTILS	V _c m/min	F _{théorique} mm/l.tr. dent.1	S _{théorique} tr/mm	F _{réglée} mm/l.tr. dent.1	S _{réglée} tr/mm
Dressage de A	Outil d'ébauche carbure	150	0.15	770	0.16	100/520
Chariotage de B	Outil d'ébauche carbure	150	0.15	770	0.16	520
Trou de centre de G	Foret à centrer ARS	25				10/40
Perçage de G	Foret de 9.5	25	0.25	840	0.32	10/40
Alésage de G	Alésoir 10H7	12.5	0.3	400	0.32	520

**GENERATION DE
SURFACES
PAR USINAGE**

- TOURNAGE**
- FRAISAGE**
- PERCAGE**
- ALESAGE**
- TARAUDAGE**

GÉNÉRATION DE SURFACES TOURNAGE

1) - GÉNÉRALITÉS :

La plupart des pièces mécaniques comportent des surfaces géométriques élémentaires :

- **Plans.**
- **Cylindres.**
- **Cônes.**
- **Hélicoïdes.**

La réalisation de ces surfaces résultera de la combinaison de deux mouvements :

- le mouvement de coupe **Mc** (rapide),
- le mouvement d'avance **Mf** (lent).

Suivant le type de procédé d'usinage, l'outil et la pièce seront affectés de l'un ou l'autre de ces mouvements et inversement :

- **outil (Mc) et pièce (Mf)** : fraisage, rabotage, rectification.
- **outil (Mf) et pièce (Mc)** : tournage.

Les opérations de perçage, filetage, taraudage peuvent être effectuées dans les deux configurations.

On distinguera les outils suivant leur mode d'action et ils peuvent être classés de la façon suivante :

- **outils coupants** :

- outils de tour,
- fraises,
- forets,
- etc..

- **outils abrasifs** :

- meules,
- grattoir,
- etc..

La surface réalisée par un outil est la surface enveloppe des différents points occupés par l'outil le long d'une trajectoire.

La forme de la surface sera donc fonction du profil de la partie active de l'outil et du mouvement de cet outil.

Les outils utilisés peuvent être :

- **à tranchant unique** :

- outil de tour, de rabotage.

- à tranchants multiples :

- rectiligne (broches),
- circulaire (fraises, forets),
- hélicoïdale (tarauts, filières).

Il y a dépendance entre la forme de l'arête tranchante et le profil de la surface engendrée par l'outil, on distinguera :

- **les outils de forme**, où le profil de l'arête de coupe va engendrer directement le profil de la surface à obtenir (Ex : rainure à Té, **Fig. 1**).

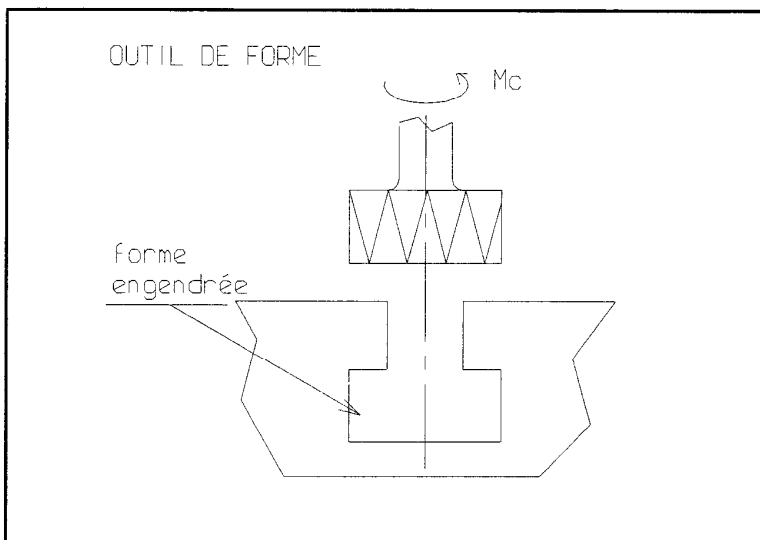


Figure 1

- **Les outils d'enveloppe**, le profil de la surface engendrée n'est pas lié au profil de l'arête de coupe de l'outil (Ex : outil de tournage, **Fig. 2**).

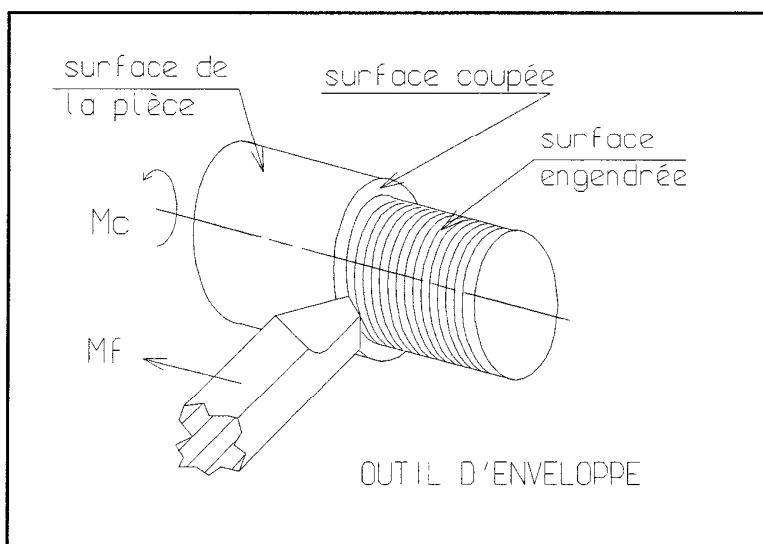


Figure 2

2) - OBTENTION DES SURFACES PAR OUTILS D'ENVELOPPE :

2-1) Le tournage :

L'obtention des surfaces par outils d'enveloppe se fera par la conjugaison de deux mouvements :

- **mouvement de coupe M_c** (rapide) affecté à la pièce,
- **mouvement d'avance M_f** (lent) affecté à l'outil. (**Fig. 2**)

Il faut se rendre compte que la surface obtenue ne sera pas parfaite, ceci étant dû à la géométrie de l'arête de coupe. Afin de mieux cerner le problème, analyser la Figure 3 où l'on peut voir une surface engendrée en tournage (on rencontrera ce même problème pour tous les procédés de fabrication).

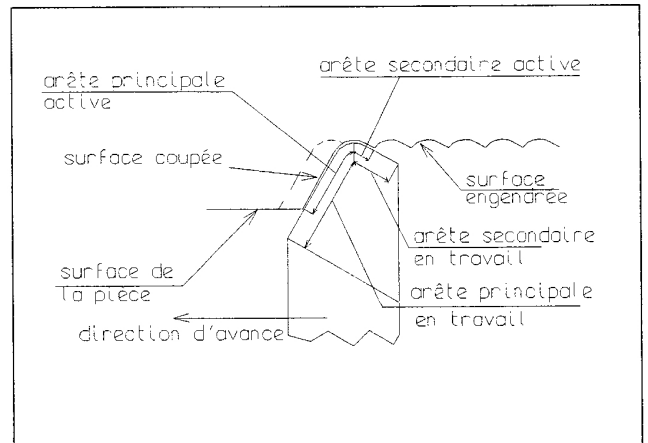


Figure 3

Cette analyse montrera que la qualité de la surface engendrée va dépendre du rayon du bec d'outil et de l'avance f de l'outil.

2-2) Relation entre les mouvements :

Le mouvement de coupe sera représenté par la vitesse de coupe, V_c , qui est la vitesse tangentielle relative entre la pièce et l'outil de coupe, au point considéré, (**Fig. 4**)

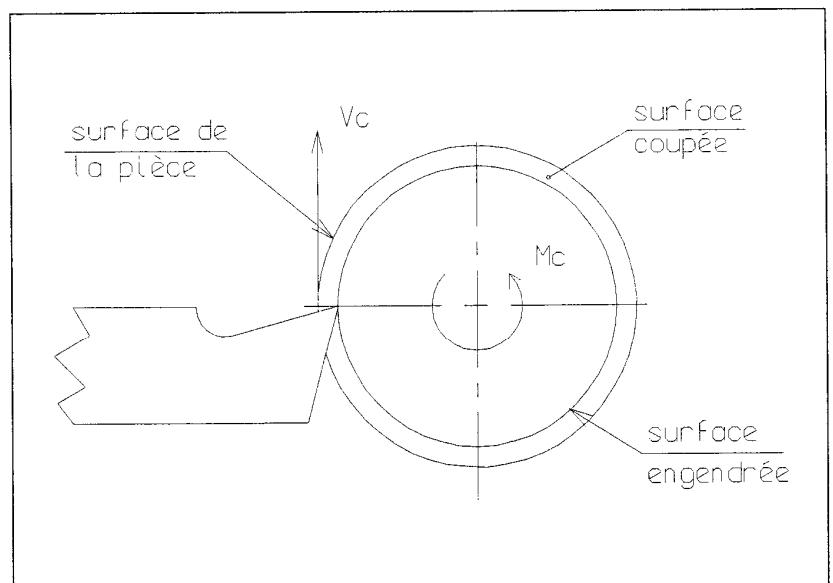


Figure 4

Le mouvement d'avance est représenté par l'avance, f , qui est le déplacement relatif de l'outil pour un tour de pièce, (Fig. 5).

Les unités pour ces deux mouvements sont les suivantes :

- V_c exprimé en m / mn (mètres par minute),
- f exprimé en mm / tr (millimètres par tour de pièce).

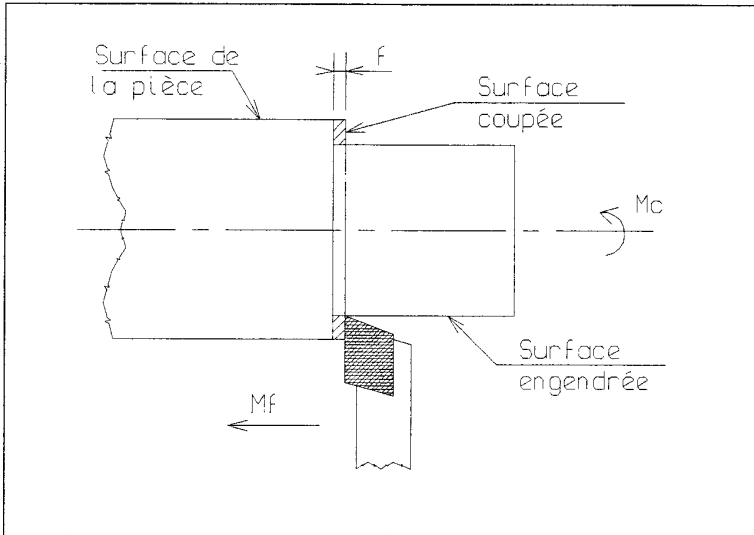


Figure 5

En tournage, le mouvement de coupe est donc donné à la pièce, mais sur les machines, le mouvement sera transmis par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses mécanique (pour les machines conventionnelles) ou d'un variateur de vitesses (pour les machines à commande numérique) dont le régime de rotation est exprimé en tr / mn (tours par minute). Il est donc nécessaire d'établir la relation entre la vitesse de coupe V_c et N la vitesse de rotation de la broche de la machine.

Cette relation est la suivante :

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

On arrondit N à l'unité près.

- N vitesse de rotation de la broche de la machine en tr / mn .
- V_c vitesse de coupe en m / mn .
- $\pi = 3,14$.
- $D =$ diamètre de la pièce usiné en mm .

ATTENTION : Pour le calcul de N , D représente le diamètre usiné sur la pièce.

Dans les livres de normes, on trouve parfois que D représente le diamètre initial, il est cependant plus logique de calculer avec le diamètre usiné surtout si on utilise machine à commande numérique.

Pour ce qui concerne les avances f , les machines de tournage possèdent (en général) une boîte de vitesses mécanique où l'on pourra choisir directement la valeur de l'avance f (en mm / tr). Mais dans certains cas, nous aurons besoin de définir une vitesse d'avance en mm / mn. Cette vitesse d'avance se notera V_f .

Relation entre f en mm / tr et V_f en mm / mn :

$$V_f = f \cdot N$$

- V_f en mm / mn
- f en mm / tr
- N en tr / mn

Exemple 1 :

Soit une pièce en XC 42 de diamètre $\varnothing 80$ mm que l'on veut usiner à un diamètre de $\varnothing 75$ mm. Après avoir choisi un outil, nous trouvons dans un fichier $V_c = 65$ m / mn et $f = 0,12$ mm / tr.

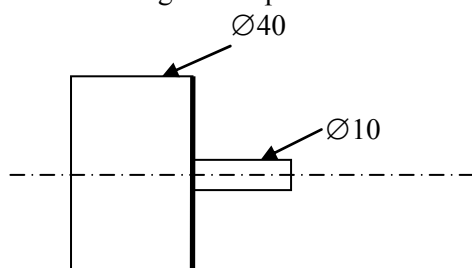
1) Calculer N et V_f ?

La machine propose les fréquences de rotation de broche suivantes: $N = 250$ tr/min et $N = 315$ tr/min.

2) Quelle fréquence de rotation choisissez-vous ?

Exemple 2 :

Nous voulons effectuer un dressage sur la pièce suivante:



Le document constructeur des outils préconise une vitesse de coupe V_c de 65 m/min.

1) Calculer la fréquence de rotation à sélectionner sur la machine.

2) La vitesse de coupe sera t-elle constante au cours de l'usinage ? Quelles sont les vitesses de coupe mini et maxi ?

3) - LES OUTILS EN TOURNAGE :

Parmi les outils de tournage, nous trouverons des outils en aciers rapides, en carbures, en céramiques, en cermets.

Nous allons nous intéresser principalement aux outils en carbures à plaquettes amovibles qui représentent actuellement le type d'outils le plus utilisé.

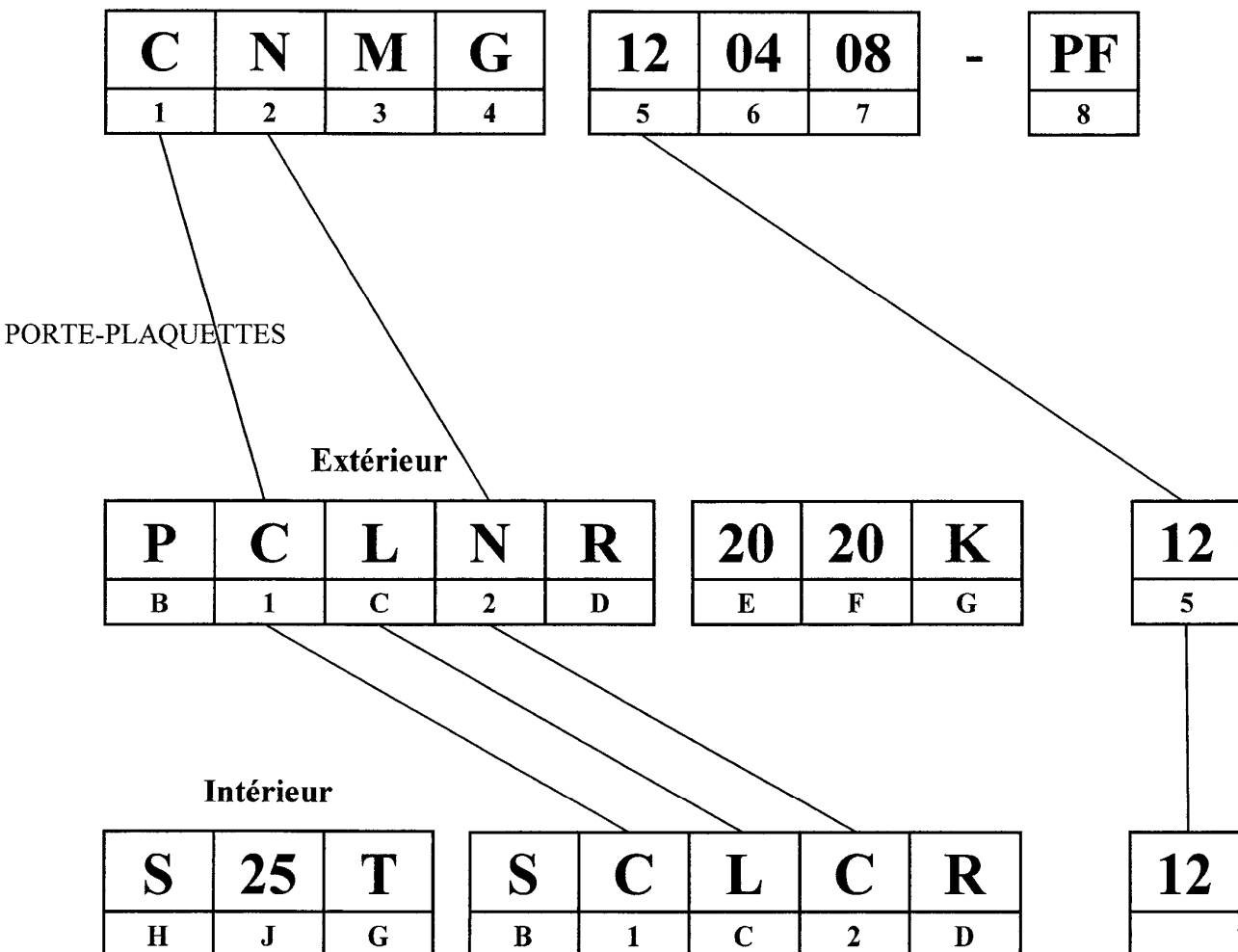
3-1) Les outils carbures à plaquettes amovibles :

Les outils carbures à plaquettes amovibles sont composés de deux parties :

- un **porte-plaquette** (corps d'outil) sur lequel vient se loger la plaquette.
- une **plaquette** (arête(s) de coupe).

3-2) Code de désignation des plaquettes et porte-plaquettes :

PLAQUETTES



Désignation normalisée des plaquettes

Extrait de la norme ISO 1832 - 1991

1. FORME DE LA PLAQUETTE						
C	D	R	S	T	V	W

2. ANGLE DE DEPOUILLE			3. TOLERANCES DIMENSIONNELLES		
	N		C		B
A, F, C, H, E, G, J, K, L, M, U					
de ± 0,025 à ± 0,38 mm					

4. TYPE DE PLAQUETTE			
A	M	G	T

5. TAILLE DE PLAQUETTE = LONGUEUR D'ARETE DE COUPE							
l mm							
	06-25	07-15	08-12	09-25	06-22	11-16	06-08

6. EPAISSEUR DE PLAQUETTE					
01	02	03	04	05	06
1.59	2.38	3.18	4.76	5.56	6.35

7. RAYON DE BEC					
	04	08	12	16	24
	$r_e = 0,4$	$r_e = 0,8$	$r_e = 1,2$	$r_e = 1,6$	$r_e = 2,4$

Rayons de bec recommandés en priorité : données SANDVIK		
	T-MAX P	T-MAX U
EBAUCHE	12	08
SEMI-FINITION	08	08
FINITION	08	04

8. GEOMETRIE - SYMBOLE PROPRE AU FABRICANT
Le code ISO est constitué de neuf symboles, dont les deux derniers ne s'utilisent que si nécessaire. Le fabricant peut y ajouter deux symboles
- PF = ISO P Finition
- MR = ISO M Ebauche

Désignation normalisée des porte-plaquettes extérieurs

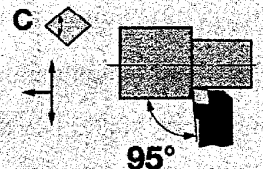
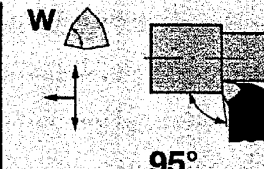
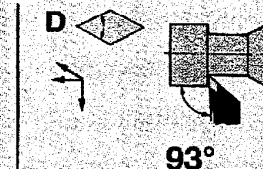
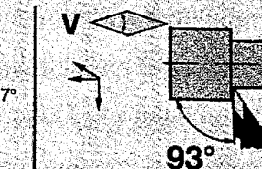
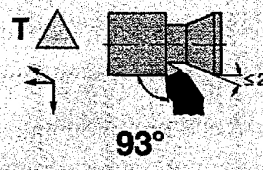
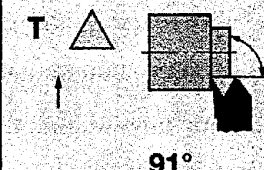
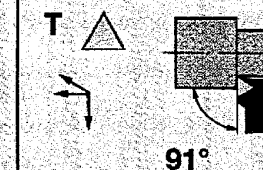
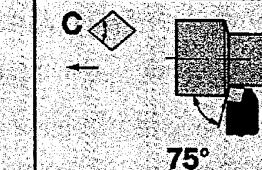
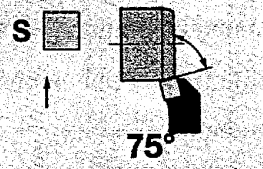
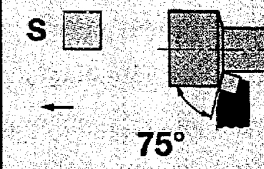
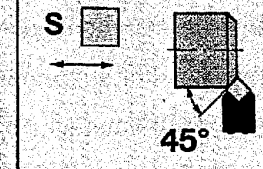
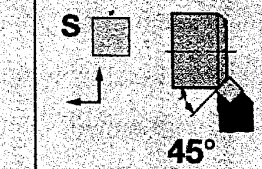
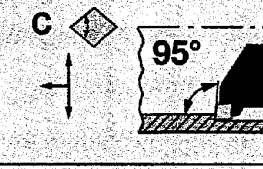
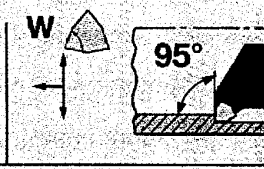
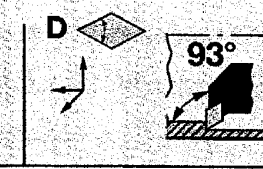
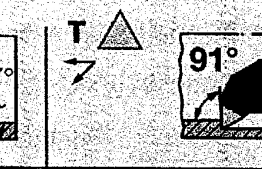
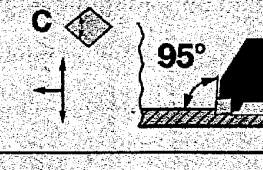
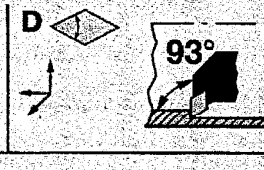
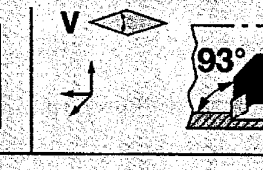
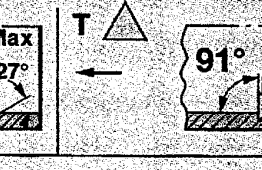
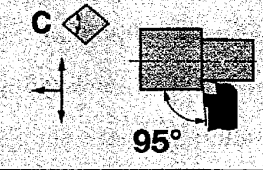
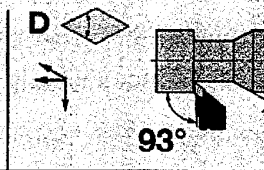
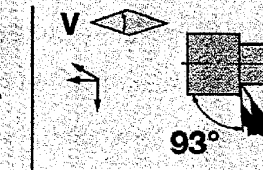
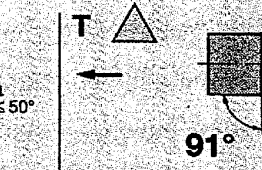
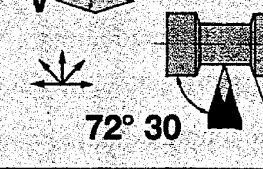
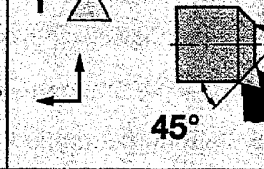
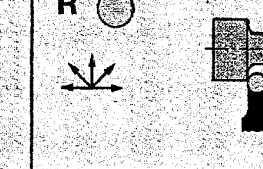
1 - Système de fixation Bride C		Trou central et tirée M		Trou central P		Vis S					
2 - Forme de plaquette et angle de dégagement E₁ 80° C		55° D		35° V		80° W					
3 - Type de porte-plaquette 75° B		45° D		60° E		90° F					
107,5° H		93° J		75° K		95° L					
117,5° Q		75° R		45° S		60° T					
72,5° V		63° N		90° G		90° G					
4 - Angle de dépouille de la plaquette α° 5° B				7° C				0° N			
20° E				11° P				Description spécifique O			
5 - Direction de coupe Avance R				Avance L				Avance N			
6 - Hauteur h ₁ Les unités doivent être précisées d'un 0 ex.: h=8,5 signifie 08				7 - Largeur de queue b Les unités doivent être précisées d'un 0 ex.: b=8,5 signifie 08				10 - Options propres au fabricant Si nécessaire, un symbole supplémentaire de 3 lettres maxi. peut être ajouté à la fin du code ISO, après un tiret. (ex.: W pour le type à coin)			
8 - Longueur de l'outil, l mm Porte-plaquette à manche l A = 32 B = 40 C = 50 D = 60 E = 70 F = 80 G = 90 H = 100 J = 110 K = 125 L = 140 M = 150 N = 160 P = 170 Q = 180 R = 200 S = 250 T = 300 U = 350 V = 400 W = 450 Y = 500 X = special Remarque: La lettre peut être remplacée par un tiret pour les outils de longueur standard.				9 - Longueur d'arête de coupe, l mm l R S T W CDV K							

Désignation normalisée des porte-plaquettes intérieurs

1 - Type de barre A Barre en acier avec adduction interne de lubrifiant E Barre renforcée de carbure F Barre antivibratoire S Barre en acier monobloc		2 - Diamètre de barre d		3 - Longueur de l'outil, l₁ mm l ₁ F = 80 H = 100 K = 125 M = 150 P = 170 Q = 180 R = 200 S = 250 T = 300 U = 350 V = 400 W = 450 Y = 500 X = special	
4 - Mode de fixation Bride C		Trou central et bride M		Vis S	
5 - Forme de plaquette 80° C		55° D		35° V	
55° K		80° R		80° W	
90° F		93° J		75° K	
95° L		107,5° Q		93° U	
6 - Type de barre 90° F		93° J		75° K	
95° L		107,5° Q		93° U	
7 - Angle de dépouille plaquette 5° B		7° C		0° N	
20° E		11° P		Description spécifique O	
8 - Direction de coupe R		L		9 - Longueur d'arête de coupe, l en mm l en mm R S T W CDV K	
10 - Options propres au fabricant Si nécessaire, un symbole supplémentaire de 3 lettres maximum peut être ajouté au code ISO, séparé de ce dernier par un tiret. Exemple: R = queue cylindrique, W = type à coin X = alésage en tirant					

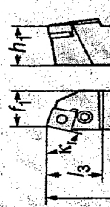
4) - POSSIBILITES D'USINAGES ET EXEMPLES D'OUTILS :

Tournage avec outils T-MAX P et T-MAX U dans les aciers, les aciers inoxydables et les fontes.

USINAGE EXTÉRIEUR (Pages 44 - 51)				T-MAX P à bride
				
				
				
USINAGE INTÉRIEUR (Pages 52 - 55)				
				
USINAGE INTÉRIEUR (Pages 80 - 91)				T-MAX U à vis
				
USINAGE EXTÉRIEUR (Pages 84 - 87)				
				
				

Outils à queue

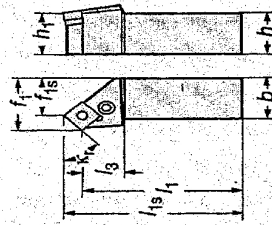
PSBN
 $\kappa_r 75^\circ$



MWLN
 $\kappa_r 95^\circ$



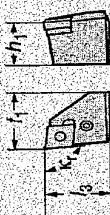
PSSN
 $\kappa_r 45^\circ$



PLAQUETTES / C	RÉFÉRENCE DE COMMANDE	h	h ₁	b	l ₁	l _{1s}	l ₃	f ₁	f _{1s}	r _e ¹⁾
09 S 12	PSSNR/L 2020K09	20	20	20	125	-	23	17	-	0,8
	2525M09	25	25	25	150	-	24	22	-	0,8
	2020K12	20	20	20	125	-	27,5	17	-	0,8
	2525M12	25	25	25	150	-	27,5	22	-	0,8
	3225P12	32	32	25	170	-	27,5	22	-	0,8
15	3225P15	32	32	25	170	-	32	22	-	1,2
	3232P15	32	32	32	170	-	32	27	-	1,2
	3232P19	32	32	32	170	-	39,2	27	-	1,2
09 S 12	PSSNR/L 2020K09	20	20	20	125	131,1	21,9	25	19,3	0,8
	2525M09	25	25	25	150	156,1	23	32	26,3	0,8
	2020K12	20	20	20	125	133,3	29,3	25	17	0,8
	2525M12	25	25	25	150	156,3	29,3	32	24	0,8
	3225P12	32	32	25	170	178,3	29,3	32	24	0,8
	3225P15	32	32	25	170	180,2	34	32	22,1	1,2
	3232P15	32	32	32	170	180,2	34	40	30,1	1,2
3232P19	32	32	32	170	182,5	41,3	40	27,9	1,2	
06 W 08	MWLN/L 2020K06	20	20	20	125	-	26,2	25	-	0,8
	2525M06	25	25	25	150	-	26,2	32	-	0,8
	2020K08	20	20	20	125	-	30	25	-	0,8
08	2525M08	25	25	25	150	-	35	32	-	0,8
	3225P08	32	32	25	170	-	35	32	-	0,8

Outils à queue

PCLN
 $\kappa_r 95^\circ$



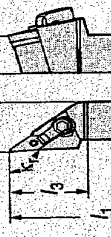
MTJN
 $\kappa_r 93^\circ$



PDJN
 $\kappa_r 93^\circ$



MVJN
 $\kappa_r 93^\circ$



Version à droite illustrée

PLAQUETTES / C	RÉFÉRENCE DE COMMANDE	h	h ₁	b	l ₁	l ₃	f ₁	r _e ¹⁾
09 C 12	PCLNR/L 2020K09	20	20	20	125	27	25	0,8
	2525M09	25	25	25	150	27	32	0,8
	2020K12	20	20	20	125	29,4	25	0,8
	2525M12	25	25	25	150	30	32	0,8
16	3225P12	32	32	25	170	30	32	0,8
	3225P16	32	32	25	170	32,6	32	1,2
	3232P16	32	32	32	170	32,6	40	1,2
19	3232P19	32	32	32	170	38	40	1,2
	PDJNR/L 2020K11	20	20	20	125	30	25	0,8
		2525M11	25	25	25	150	30	32
3225P11		32	32	25	170	30	32	0,8
15	2020K15	20	20	20	125	34,7	25	0,8
	2525M15	25	25	25	150	34,7	32	0,8
	3225P15	32	32	25	170	34,7	32	0,8
16	MTJNR/L 2020K16M1	20	20	20	125	30,8	25	0,8
	2525M16M1	25	25	25	150	30,8	32	0,8
	3225P16M1	32	32	25	170	30,8	32	0,8
22	3225P22M1	32	32	25	170	34,8	32	0,8
	MVJNR/L 2020K16	20	20	20	125	41	25	0,8
2525M16		25	25	25	150	42	32	0,8
3225P16		32	32	25	170	42	32	0,8

Barres d'alésage		SDUC $\kappa_r 93^\circ$		SCLC $\kappa_r 95^\circ$		Version à droite illustrée		
PLAQUETTES /C	RÉFÉRENCE DE COMMANDE	Dimensions, mm		Alésage mini		f_1	f_3	
		$d_{m, \min}$	h	$D_{m, \min}$	r_e			
06 C	S08K -SCLCR/L 06	8	7	125	16,8	9	10	0,4
	S10M -SCLCR/L 06	10	8,5	150	16,8	9	12	0,4
	S12M -SCLCR/L 06	12	11	150	24,5	9	16	0,4
	S16R -SCLCR/L 09-M	16	15	200	32,5	11	20	0,8
	S20S -SCLCR/L 09-M	20	18	250	30,7	13	25	0,8
	S25T -SCLCR/L 12	25	23	300	45	17	32	0,8
12	S32U -SCLCR/L 12	32	30	350	50	22	40	0,8
	S10K -SDUCR/L 07	10	9	125	19,8	7	13	0,4
07 D	S12M -SDUCR/L 07	12	11	150	22	9	16	0,4
	S16R -SDUCR/L 07	16	15	200	27	11	20	0,4
11	S20S -SDUCR/L 11-M	20	18	250	30,4	13	25	0,8
	S25T -SDUCR/L 11-M	25	23	300	46	17	32	0,8

Outils à queue		SDJC $\kappa_r 93^\circ$		SVJB $\kappa_r 93^\circ$		SWB $\kappa_r 72^\circ 30'$		Version à droite illustrée	
PLAQUETTES /C	RÉFÉRENCE DE COMMANDE	Dimensions, mm		r_e		f_1	f_3	f_1	r_e
		h	h_1	b	b				
09 C	SCLCR/L 1616H09 2020K12 2525M12	16	16	16	100	18	20	0,8	0,8
		20	20	20	125	25	25	0,8	0,8
		25	25	25	150	26	32	0,8	0,8
11 D	SDJCR/L 1616H11 2020K11 2525M11	16	16	16	100	24	20	0,8	0,8
		20	20	20	125	24	25	0,8	0,8
		25	25	25	150	28	32	0,8	0,8
16 V	SVJBR/L 2020K16 2525M16 3225P16	20	20	20	125	31,5	25	0,8	0,8
		25	25	25	150	31,5	32	0,8	0,8
		32	32	32	170	31,5	32	0,8	0,8
16 V	SWBN 2020K16 2525M16 3225P16	20	20	20	125	31,5	10,6	0,8	0,8
		25	25	25	150	31,5	13,1	0,8	0,8
		32	32	32	170	31,5	13,1	0,8	0,8

5) - SCHÉMA FONCTIONNEL D'UN TOUR :

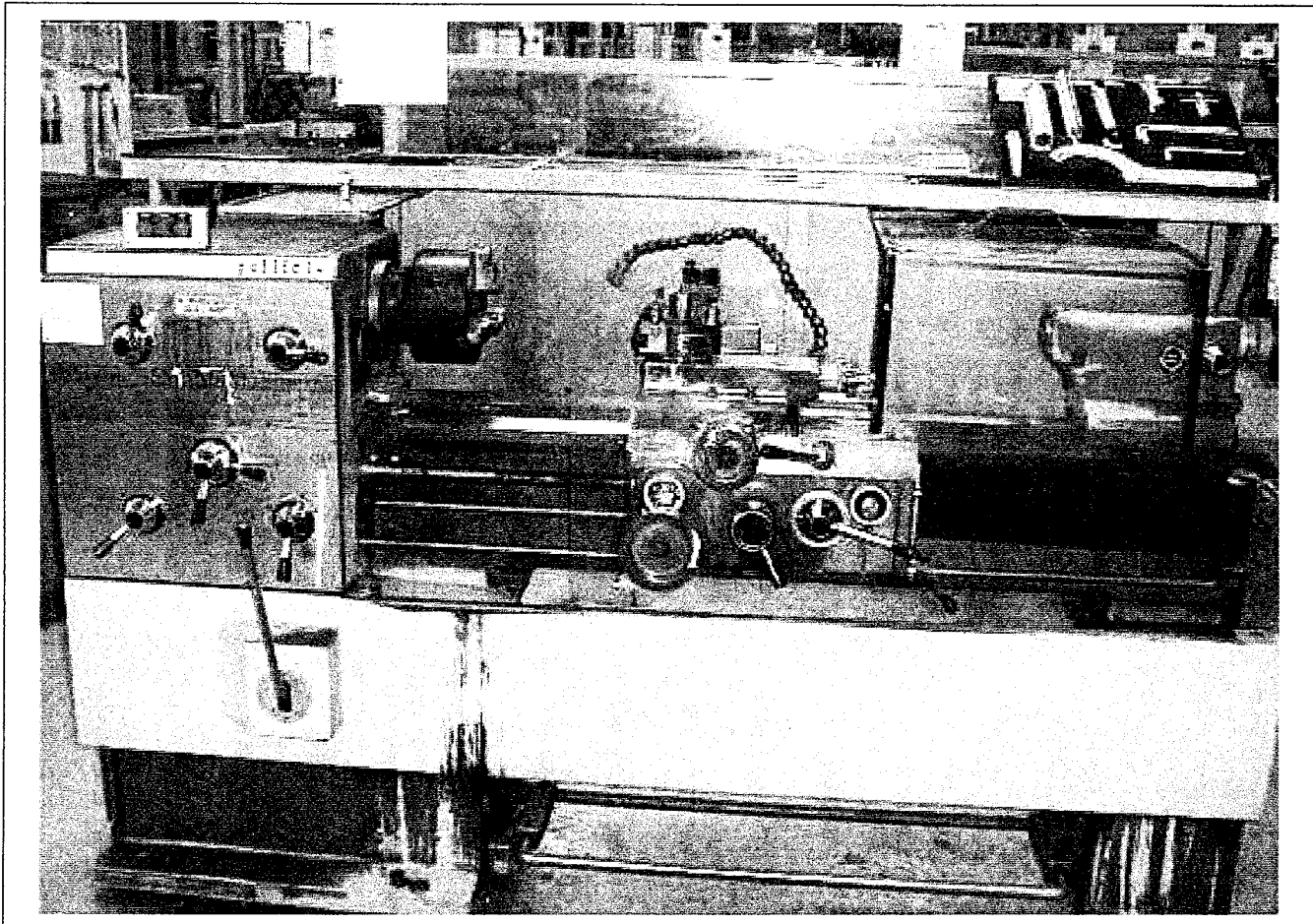
Les machines de tournage sont nombreuses et les principaux types sont :

- les tours parallèles,
- les tours à cycles automatiques,
- les tours à tourelle revolver,
- les tours automatiques travaillant dans la barre,
- les tours verticaux,
- les tours frontaux.

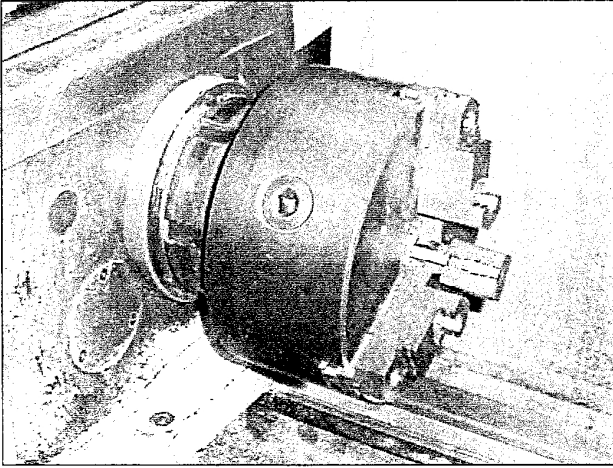
On s'intéressera aux tours parallèles parmi lesquels on distinguera :

- les tours parallèles à charioter (conventionnels),
- les tours parallèles à commande numérique.

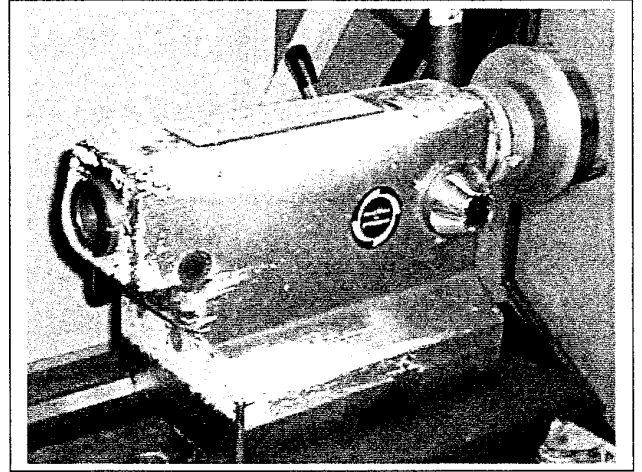
Détails des différents éléments d'un tour conventionnel :



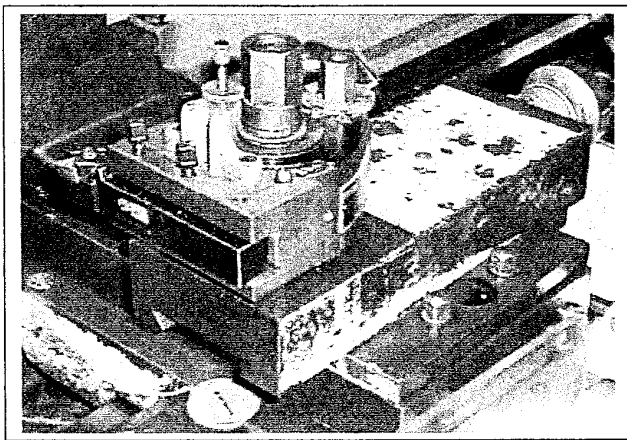
Tour parallèle conventionnel



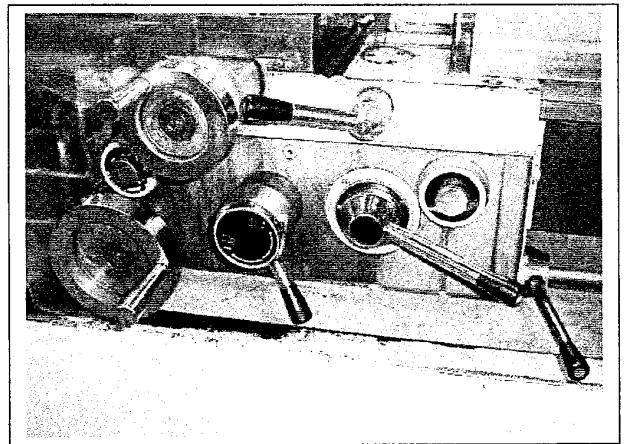
Mandrin 3 mors à serrage concentrique



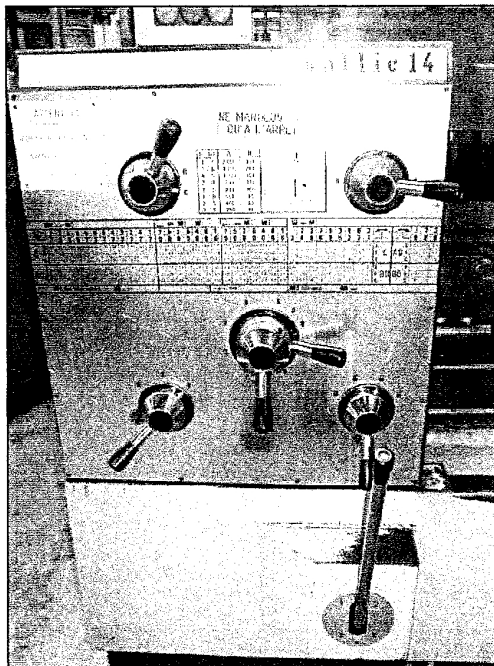
Corps de la poupée mobile



Tourelle porte-outil



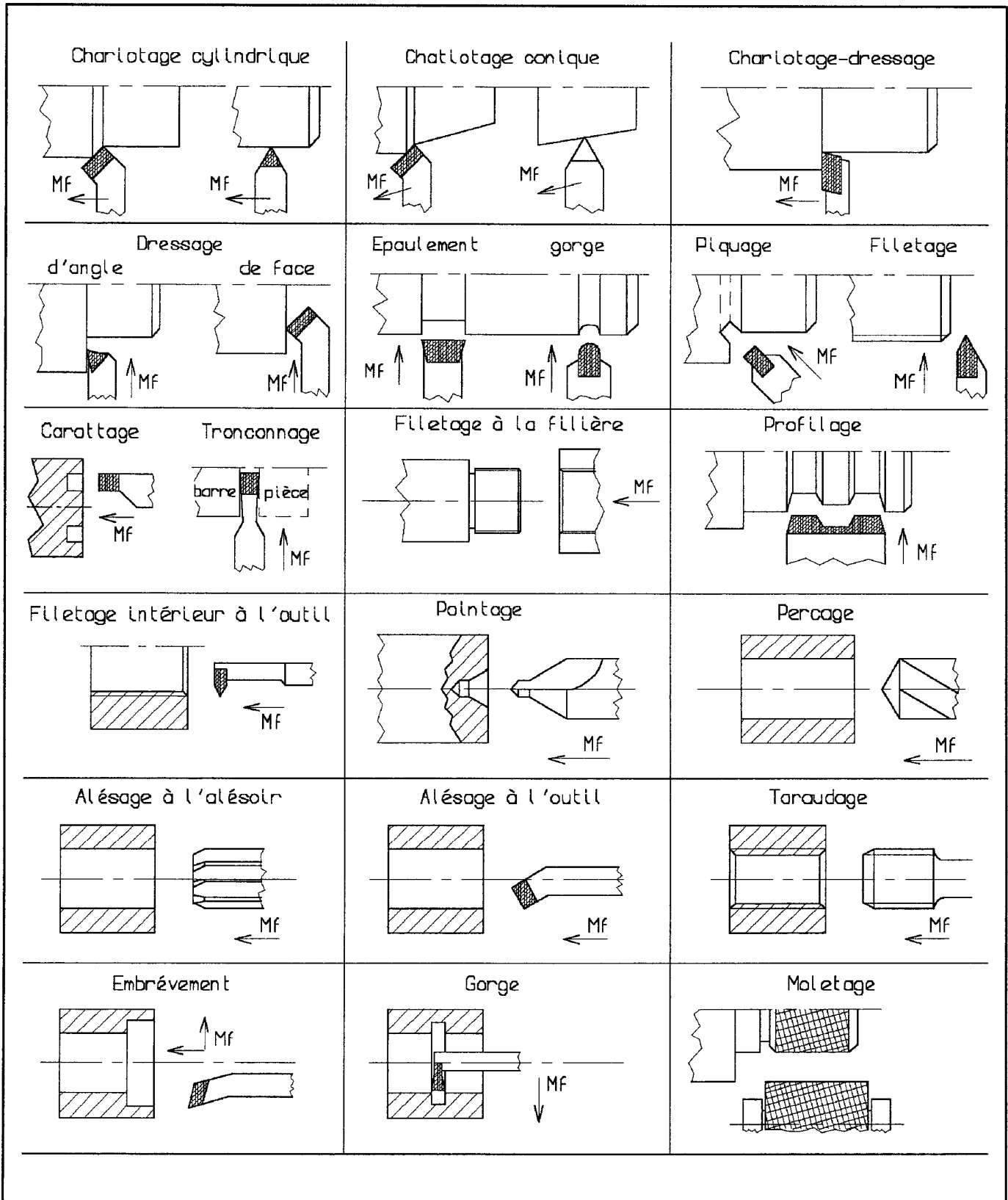
Manettes de commande (trainard)



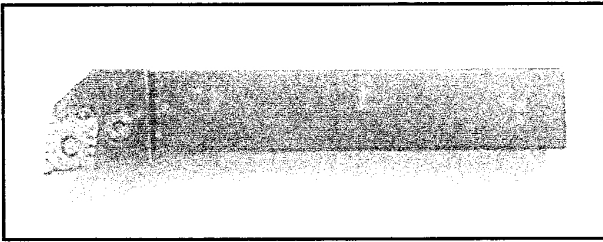
Sélecteurs vitesses broche et avances

6) - EXEMPLES DE SURFACES RÉALISÉES EN TOURNAGE :

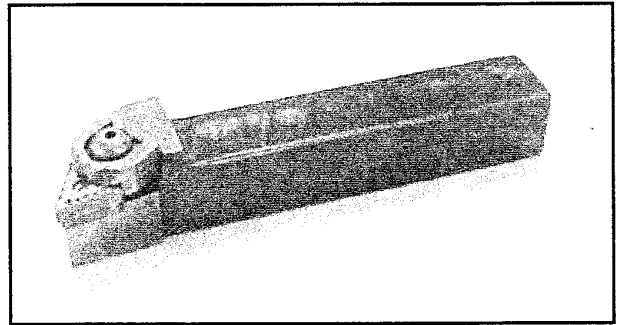
Sur la figure ci-après, vous trouverez des exemples de surfaces réalisées en tournage.



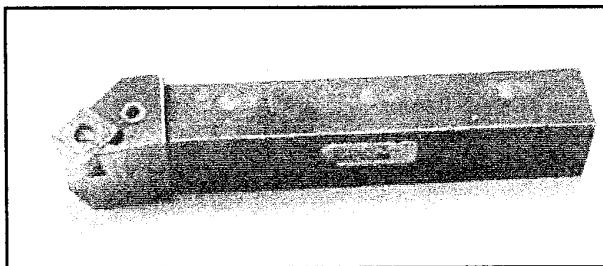
7) - QUELQUES OUTILS ET PLAQUETTES DE TOURNAGE :



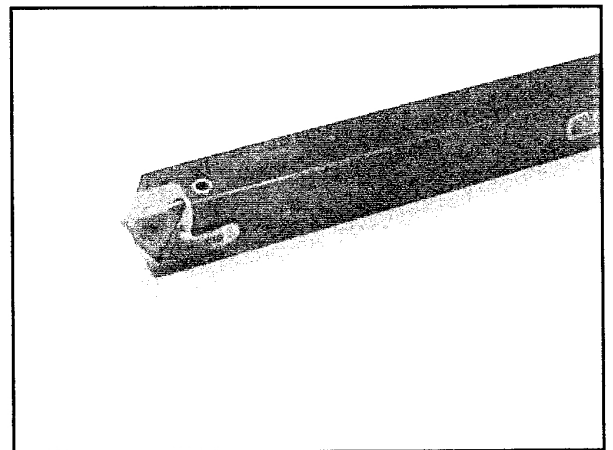
PCLNR



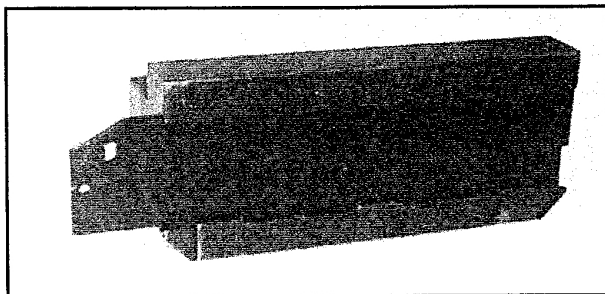
MTJNR



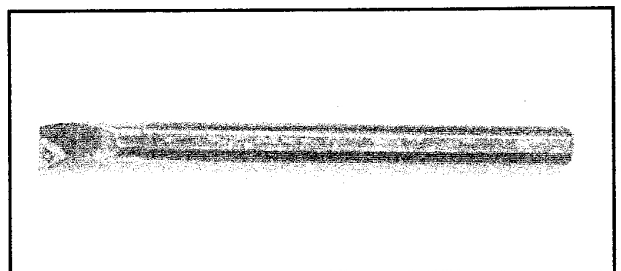
PSSNR



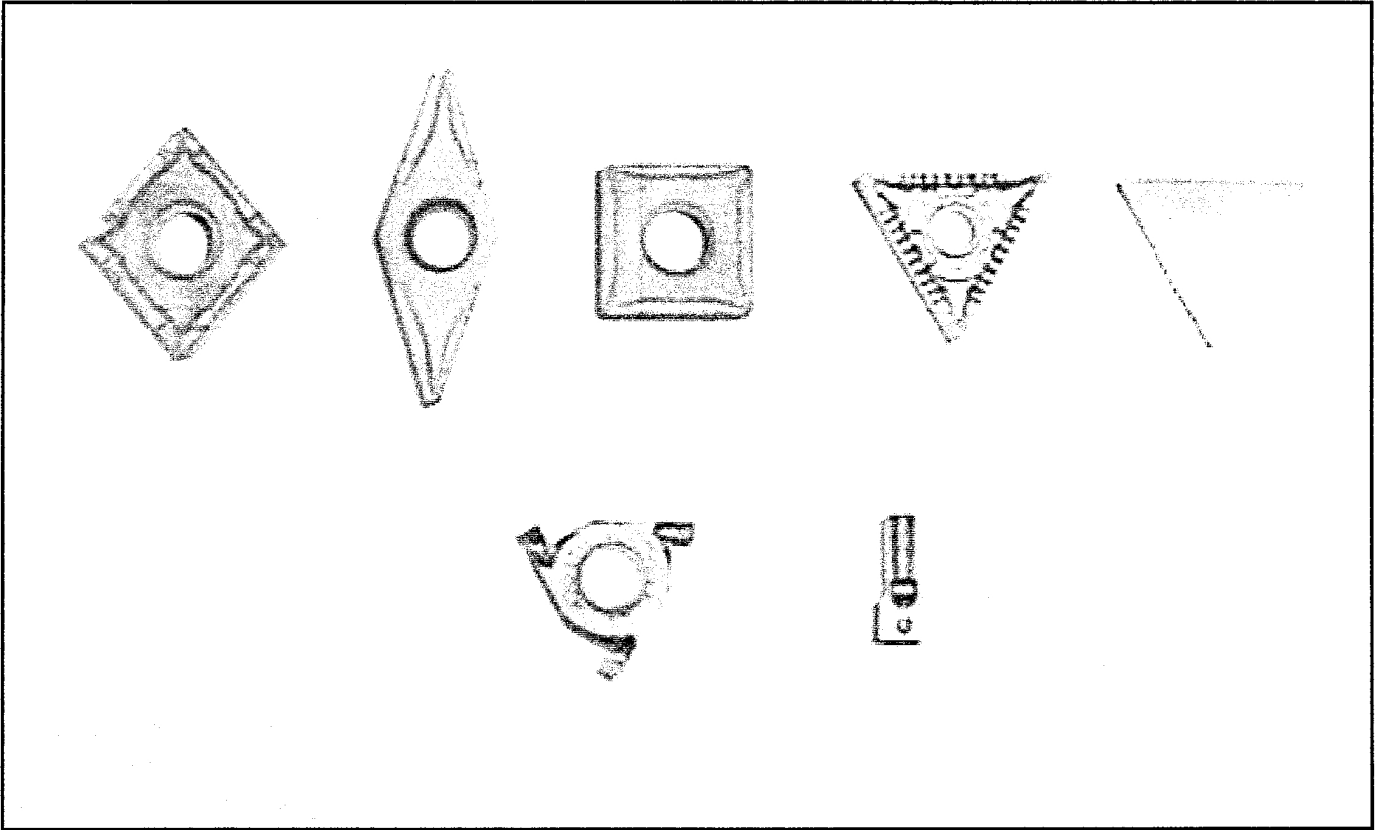
Outil pour gorge de circlips



Outil à tronçonner



Outil à aléser dresser S16R-STFCR



Différents types de plaquettes de tournage

GÉNÉRATION DE SURFACES

FRAISAGE

8) - OBTENTION DES SURFACES PAR OUTILS DE FORME :

8-1) Rappels :

L'obtention des surfaces est due à la conjugaison de deux mouvements :

- le mouvement de coupe **Mc**,
- le mouvement d'avance **Mf**.

Les outils de forme vont engendrer directement le profil de la surface à obtenir.

Parmi les différents procédés permettant d'obtenir des surfaces avec des outils de forme nous trouvons :

- le fraisage,
- le perçage,
- l'alésage,
- etc..

8-2) Le fraisage :

Le fraisage est un procédé de fabrication utilisant presque qu'exclusivement des outils de forme. On distingue en fraisage deux types d'usinage :

- le fraisage en bout (Fig. 6) où la surface à réaliser est perpendiculaire à l'axe de la fraise.
- le fraisage en roulant (Fig. 6) où la surface à réaliser est parallèle à l'axe de la fraise.
- le fraisage combiné (Fig. 6) mettant en oeuvre le fraisage en bout et le fraisage en roulant.

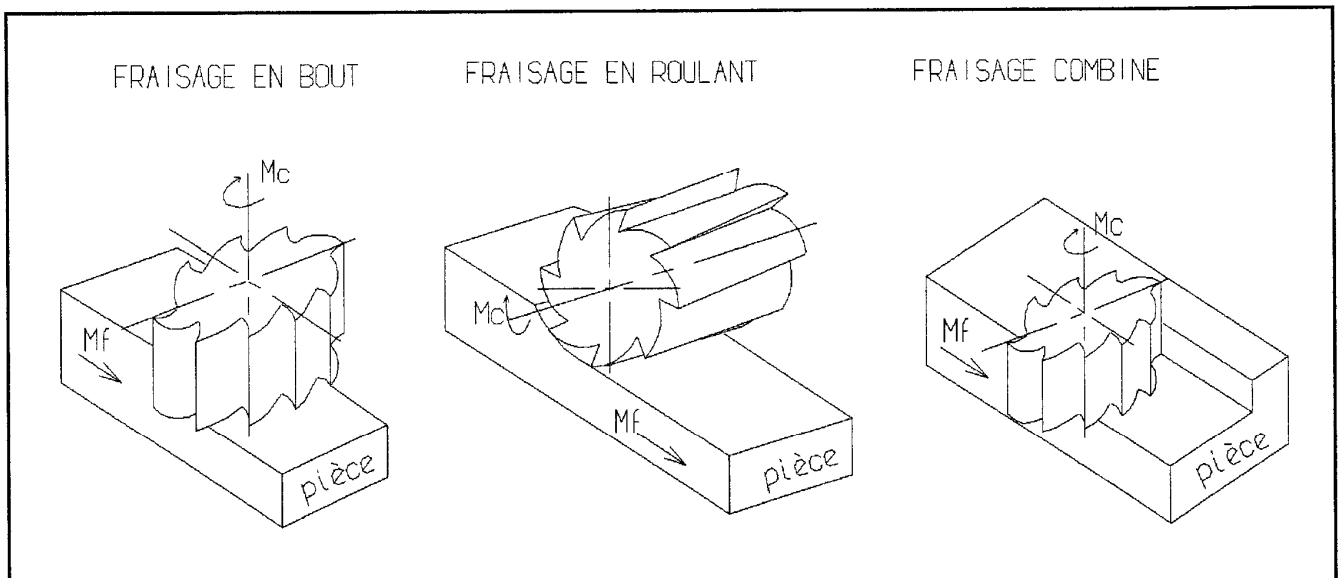


Figure 6

Les outils peuvent travailler :

- **en opposition (Fig. 7) :**

le copeau est minimum au début de la coupe et maximum à la fin.

- **en avalant (Fig. 8) :**

le copeau est maximum au début de la coupe et minimum à la fin.

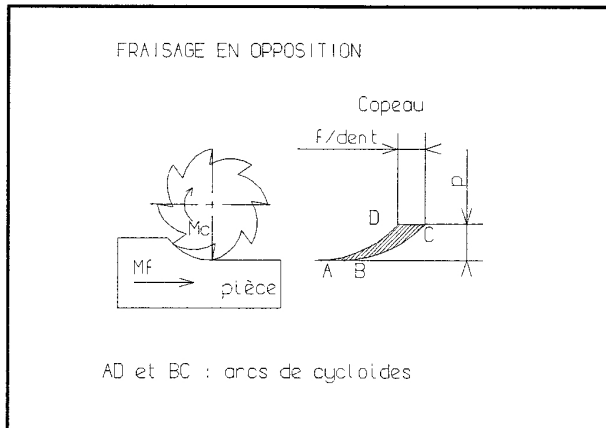


Figure 7

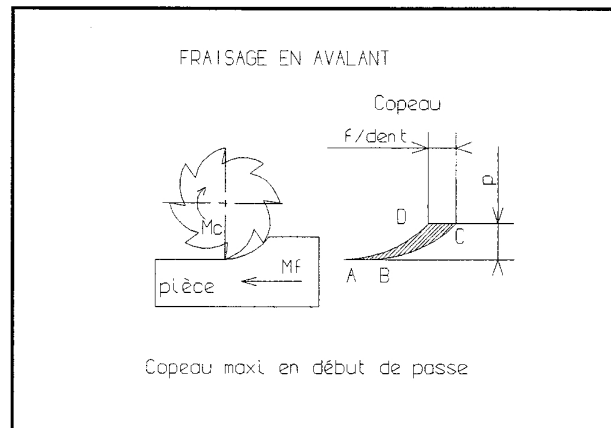


Figure 8

Les outils de fraisage (les fraises) ont la forme d'un solide de révolution ayant sur leur périphérie plusieurs outils élémentaires (dents).

On trouve des fraises :

- **monoblocs, en ARS ou en carbures,**
- **à plaquettes amovibles en carbures.**

On distingue deux types de fraises :

- **les fraises à queue :**

- **cylindriques**, lisse ou à méplat,
- **coniques**, à cône morse ou 7/24.

- **les fraises à trou :**

- **à alésage cylindrique lisse,**
- **avec clavetage,**
- **avec filetage et centrage arrière,**
- **à alésage conique.**

8-3) Relation entre les mouvements :

En fraisage, nous retrouvons le même principe qu'en tournage, mais ici le mouvement de coupe **M_c** est appliqué à l'outil et le mouvement d'avance **M_f** est appliqué à la pièce (**Fig. 1**). Or comme en tournage la fraiseuse (conventionnelle) sera dotée d'une boîte de vitesses, pour le mouvement de coupe, avec des rapports exprimés en tr / mn. Il va donc falloir convertir la vitesse de coupe (en m / mn) en vitesse de rotation de broche pour l'outil (en tr / mn).

La relation est la même qu'en tournage :

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

V_c : vitesse de coupe en m / mn.

D : diamètre de l'outil en mm.

Pour ce qui concerne les avances **f_z**, les machines de fraisage (conventionnelles) possèdent une boîte de vitesses et celles-ci sont exprimées en mm / mn. Or lorsque l'on cherche des conditions de coupe, pour un usinage, les fichiers ou abaques donnent, en général, des avances **f_z** exprimées en mm / tr pour une dent.

Il y a donc une relation entre le mouvement d'avance (vitesse d'avance **A**) et l'avance par dent **f_z**. Cette relation est la suivante :

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

- **V_f** : vitesse d'avance en mm / mn.

- **f_z** : avance par dent en mm / tr.

- **z** : nombre dents de l'outil.

- **N** : vitesse de rotation de l'outil en tr / mn.

Exemple :

On désire réaliser une surface plane sur une pièce en XC 42, diamètre de la fraise Ø 63 mm, vitesse de coupe $V_c = 120 \text{ m / mn}$, $f_z = 0,08 \text{ mm / tr}$ et nombre de dents $z = 8$.

1) Calculer N et V_f ?

Réponses :

9) - LES OUTILS DE FRAISAGE :

Comme en tournage, nous trouvons des fraises en aciers rapides (ARS monobloc), en carbures, en céramiques et en cermets. Nous allons nous intéresser aux fraises en ARS et en carbures à plaquettes amovibles.

Parmi les outils de fraisage on distinguera, du point de vue de la coupe, 3 catégories :

- les fraises 1 taille (Fig. 9),
- les fraises 2 tailles (Fig. 10),
- les fraises 3 tailles (Fig. 11).

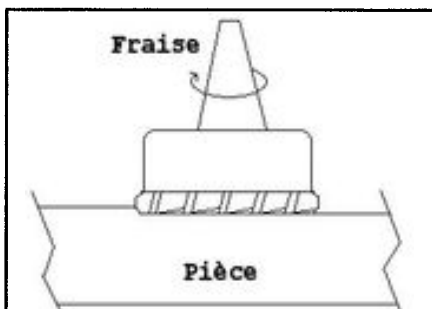


Figure 9

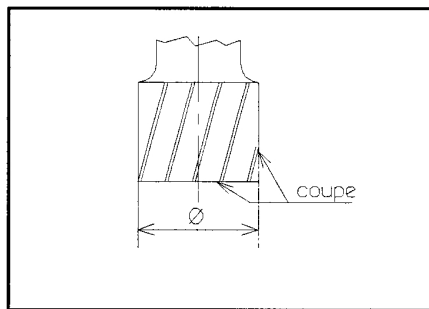


Figure 10

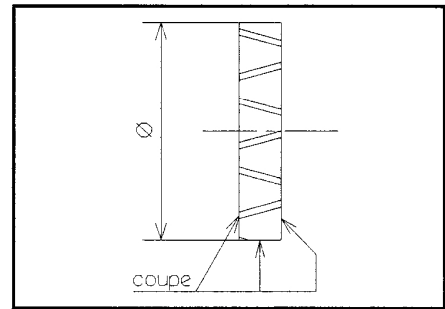


Figure 11

9-1) Les fraises A.R.S. :

On peut classer les fraises A.R.S. en 3 groupes :

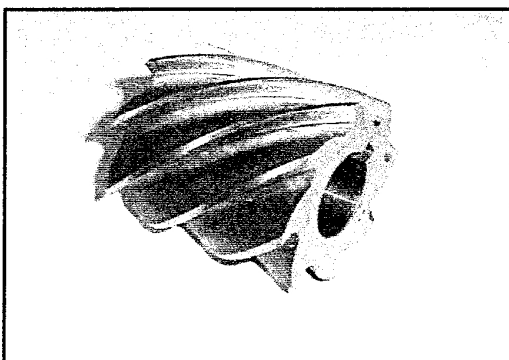
- les fraises à surfacer et à surfacer et dresser,
- les fraises à rainurer,
- les fraises de formes.

9-1-1) Les fraises à surfacer et à surfacer et dresser :

9-1-1-1) Les fraises 1 taille :

- Fraise 1 taille à surfacer à entraînement par clavette (Fig. 12) :

Classe de diamètres d : 63 - 80 - 100 mm.



Utilisation : Tous travaux de surfacage, dans les limites des capacités dimensionnelles de la fraise. Elles sont robustes et permettent un grand rendement.

Figure 12

9-1-1-2) Les fraises 2 tailles :

On trouve des fraises 2 tailles :

- à queue,
- à trou.

- Les fraises 2 tailles à queue cylindrique (Fig. 13) :

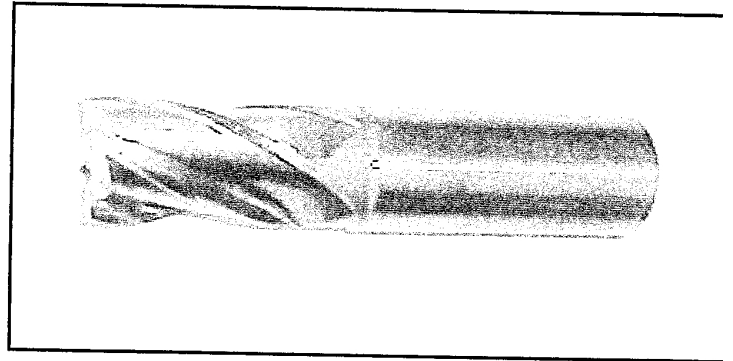


Figure 13

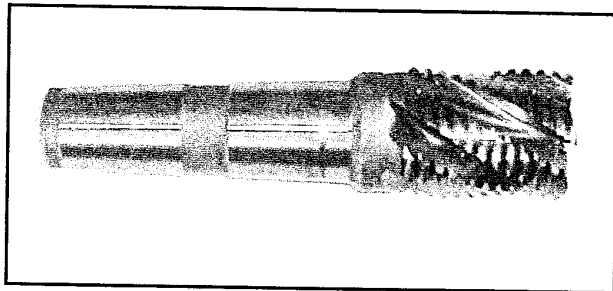
Classe de diamètres d : de 1,90 à 75,00 mm

Diamètres recommandés : 2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63.

Utilisation :

Elles sont utilisées pour tous travaux de fraisage en bout, en roulant ou combiné.

- Les fraises 2 tailles à queue cône morse (Fig. 14) :



Fraise 2 tailles ARS type « ravageuse »

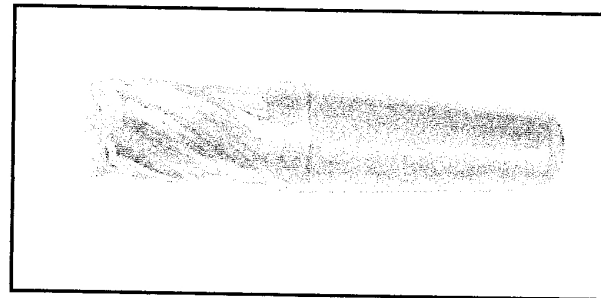


Figure 14

Classe de diamètres d : de 5,00 à 75,00 mm.

Diamètres recommandés : 6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63.

Utilisation :

Identique aux fraises 2 tailles à queue cylindrique.

- Les fraises 2 tailles cylindriques à entraînement par tenons (Fig. 15) :

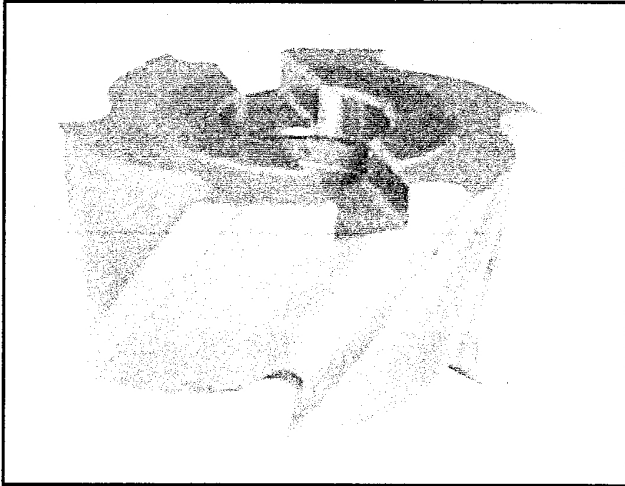
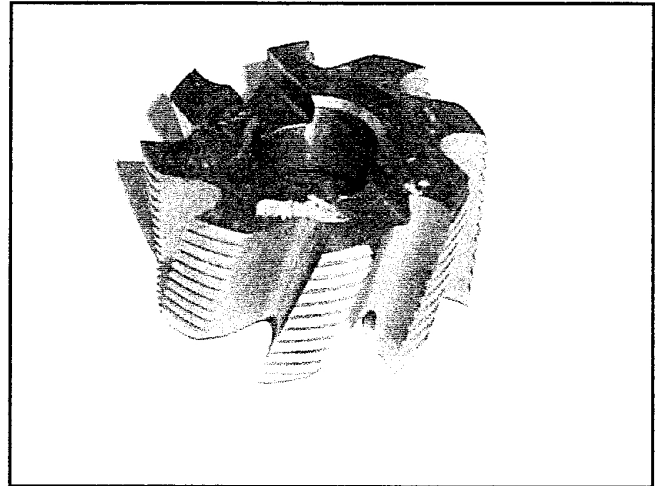


Figure 15



**Fraise 2 tailles à entraînement par tenons
type « ravageuse »**

Diamètres d : 40-50-63-80-100-125-160.

Utilisation :

- surfaces planes,
- épaulements,
- rainures larges.

- Les fraises cloches à entraînement par tenons (Fig. 16) :

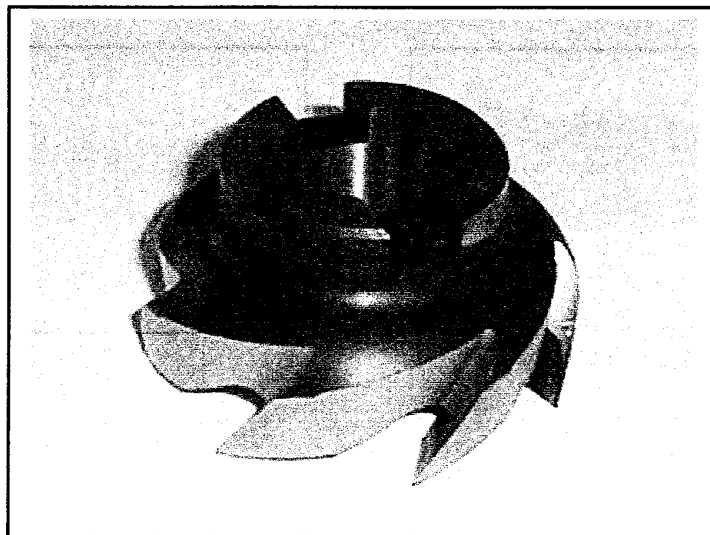


Figure 16

Diamètres d : 63-80-100-125-160.

Utilisation :

Le profil de la denture réduit la puissance absorbée. Elles ont un grand rendement. On les utilise principalement pour l'usinage des alliages légers.

9-1-2) Les fraises à rainurer :

9-1-2-1) Les fraises 2 tailles :

- Les fraises cylindriques 2 tailles, à rainurer, à queue cylindrique (Fig. 17) :

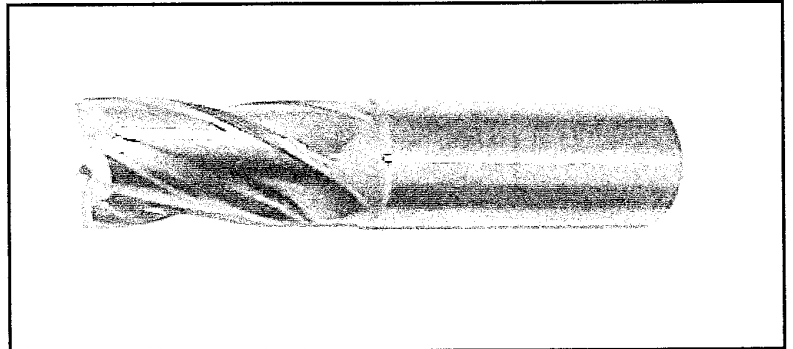


Figure 17

Classe de diamètres d : de 1,90 à 75,00 mm.

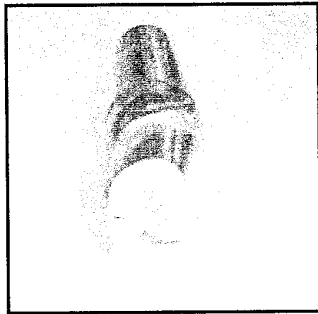
Diamètres recommandés : 2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63.

Utilisation :

Elles sont utilisées pour réaliser des rainures lorsqu'il est impossible d'utiliser une fraise 3 tailles.

Nota : Une des dents en bout ayant une dimension supérieure à $d/2$, elle permet le travail en plongée sans perçage préalable.

- Les fraises cylindriques 2 tailles, à rainurer, à queue cône morse (Fig. 18) :



Détail de la coupe au centre

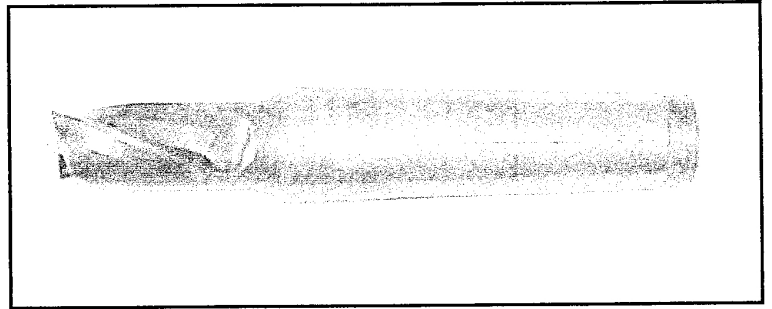


Figure 18

Classe de diamètres d : de 1,90 à 75,00 mm.

Diamètres recommandés : 2-2,5-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50-63.

Utilisation :

Idem aux fraises cylindriques 2 tailles, à rainurer, à queue cylindrique.

Nota : Idem aux fraises cylindriques 2 tailles, à rainurer, à queue cylindrique.

9-1-2-3) Les fraises-disques 3 tailles :

- Les fraises-disques 3 tailles, à denture droite, à entraînement par clavette (Fig. 19) :

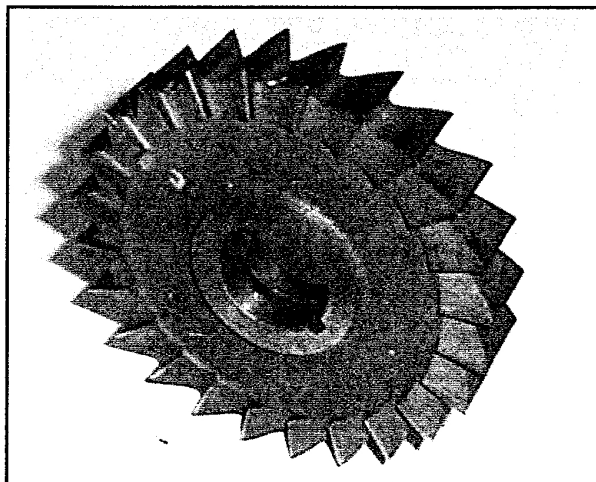


Figure 19

Diamètres d : 50-63-80-100-125-160-200.

Utilisation :

Réalisation de rainures en :

- ébauche,
 - finition.
- Les fraises-disques 3 tailles, à dentures alternées, à entraînement par clavette (Fig. 20) :

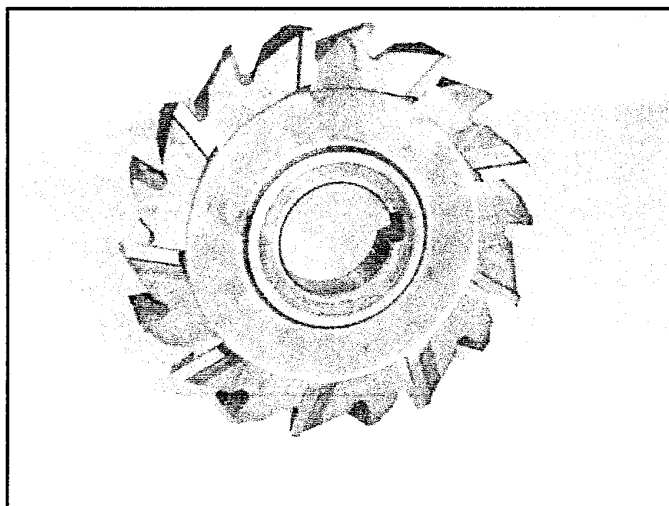


Figure 20

Diamètres d : 63-80-100-125-160-200 mm.

Utilisation :

Montées sur un arbre, elles sont souvent utilisées pour réaliser un train de fraises.

9-1-3) Les fraises de formes :

Parmi les fraises de forme, on trouvera :

- les fraises concaves $\frac{1}{2}$ cercle,
- les fraises convexes $\frac{1}{2}$ cercle,
- les fraises coniques 2 tailles à 45° (**Fig. 21**) et 60° ,
- les fraises pour rainures à Té à queue cylindrique et queue cône morse (**Fig. 22**).

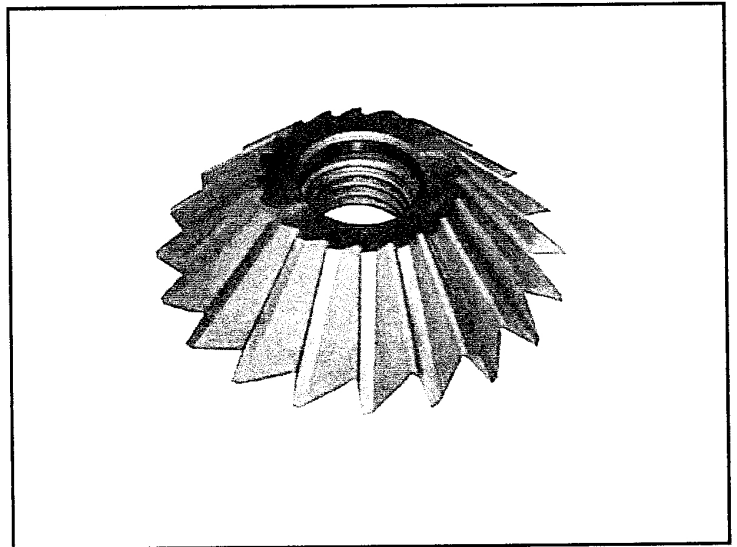


Figure 21

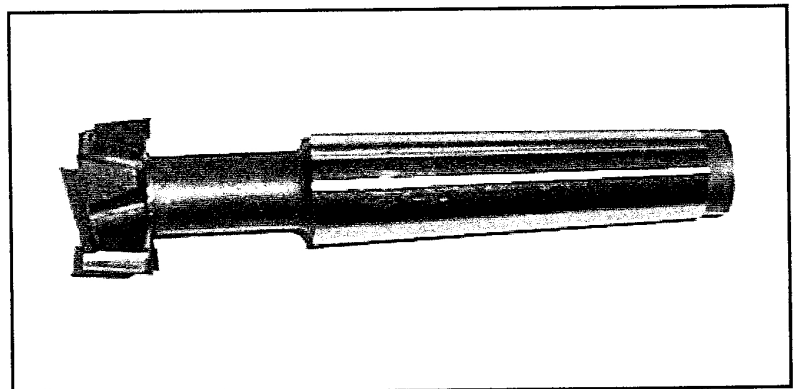
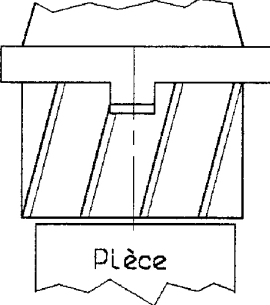
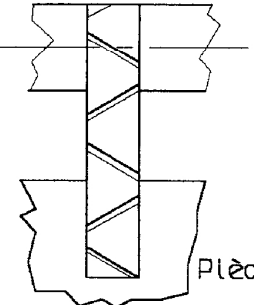
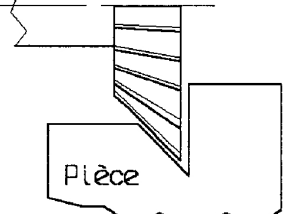
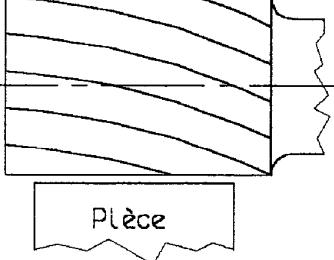
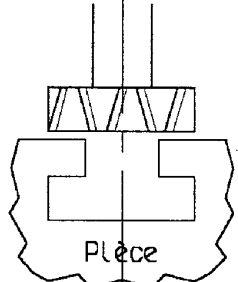
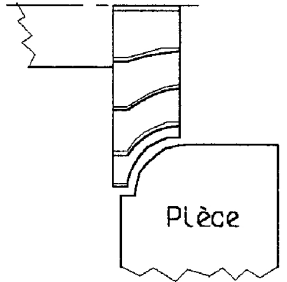
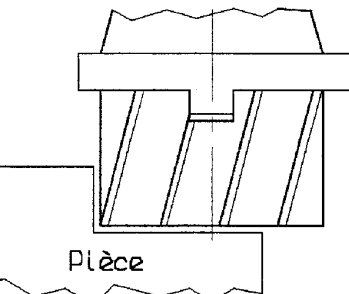
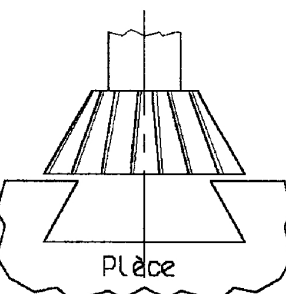
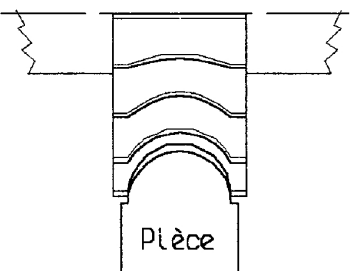
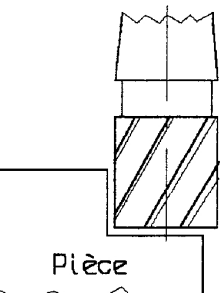
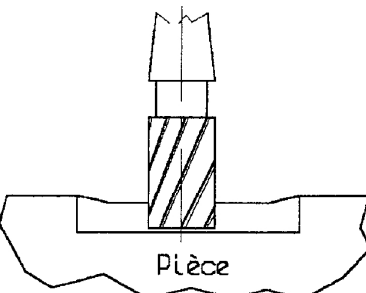
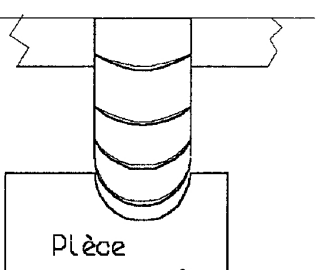


Figure 22

9-2) - EXEMPLES DE SURFACES RÉALISÉES EN FRAISAGE :

<p>SURFACAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>RAINURAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>PROFILAGE</p>  <p>Plèce</p>
<p>SURFACAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>RAINURAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>PROFILAGE</p>  <p>Plèce</p>
<p>SURFACAGE-DRESSAGE COMBINE</p>  <p>Plèce</p>	<p>RAINURAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>PROFILAGE</p>  <p>Plèce</p>
<p>SURFACAGE-DRESSAGE COMBINE</p>  <p>Plèce</p>	<p>RAINURAGE</p>  <p>Plèce</p>	<p>PROFILAGE</p>  <p>Plèce</p>

9-3) Les fraises carbures :

On distinguera les fraises carbures :

- **monoblocs,**
- **à plaquettes amovibles.**

Pour ce qui concerne les fraises carbures monoblocs, ce sont principalement des fraises à rainurer.

Nous allons nous intéresser maintenant aux fraises carbures à plaquettes amovibles. L'avantage de ce type d'outils par rapport aux outils monoblocs (A.R.S. ou carbures) est le non réaffûtage des arêtes de coupe. Lorsqu'une arête de coupe est usée, on la change et lorsqu'il n'y a plus d'arête neuve sur une plaquette, on la jette. Ceci est possible grâce à une fabrication en très grande série qui entraîne un prix de revient modique par arête (de plus le réaffûtage coûterait plus cher qu'une plaquette neuve).

Comme pour les fraises A.R.S., nous allons classer les fraises carbures en 3 groupes :

- **les fraises à surfacer et à surfacer et dresser,**
- **les fraises à rainurer,**
- **les fraises de formes** (pour le copiage principalement, non décrite dans ce chapitre).

La géométrie des fraises carbures à plaquettes amovibles n'est guère différente des fraises en A.R.S..

On peut les classer en **3 catégories** suivant la nature de l'usinage à effectuer :

- **ébauche, à coupe positive uniquement,**
- **demi-finition, à coupe positive ou négative,**
- **finition, à coupe positive ou négative.**

9-3-1) Les Fraises cylindriques 2 tailles, à surfacer :

Les fraises à surfacer peuvent être à coupe positive ou négative.

- Possibilités d'usinage des fraises carbure à plaquettes carrés à 45° (Fig. 23) :

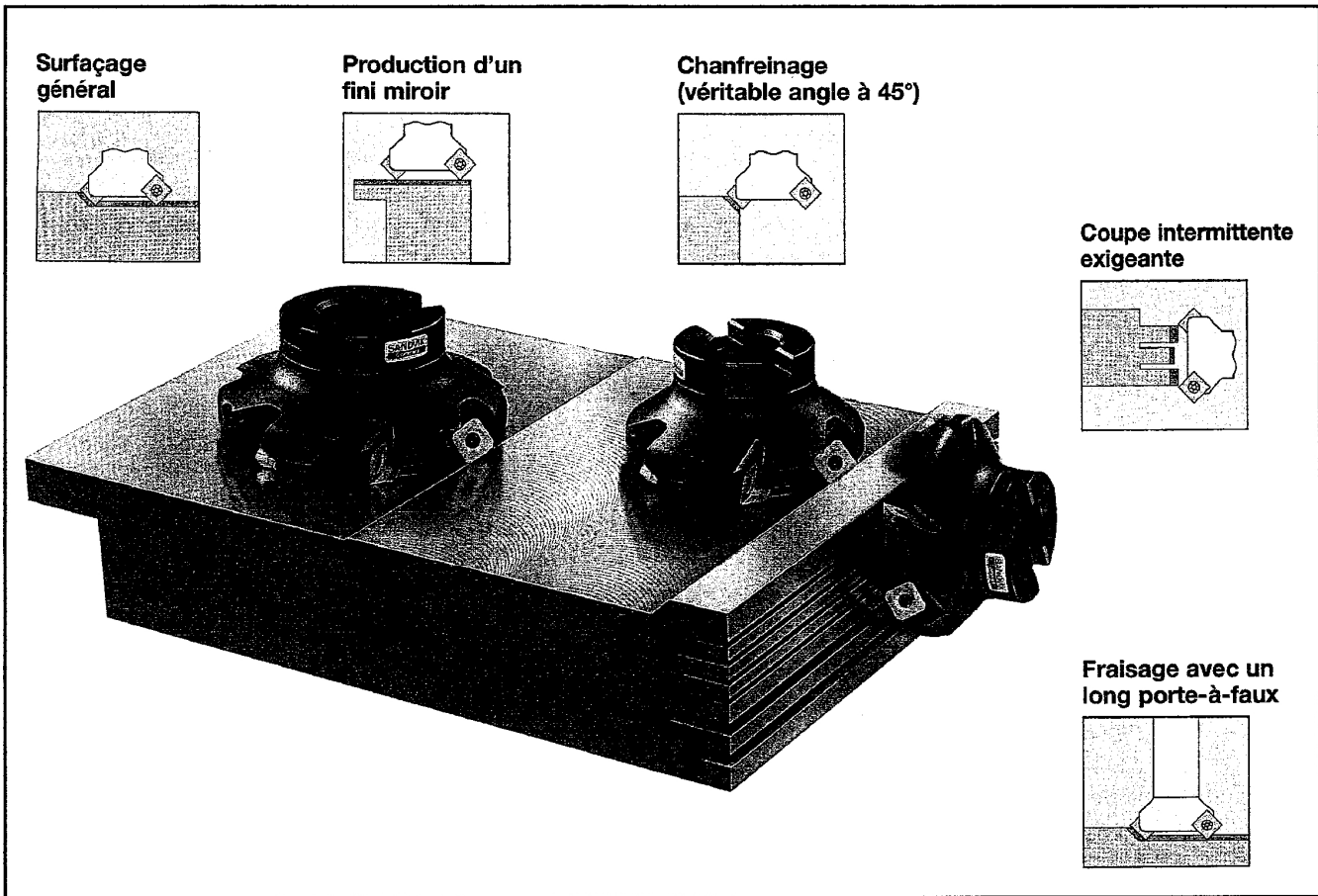


Figure 23

Géométrie et type de plaquettes (Fig. 24) :

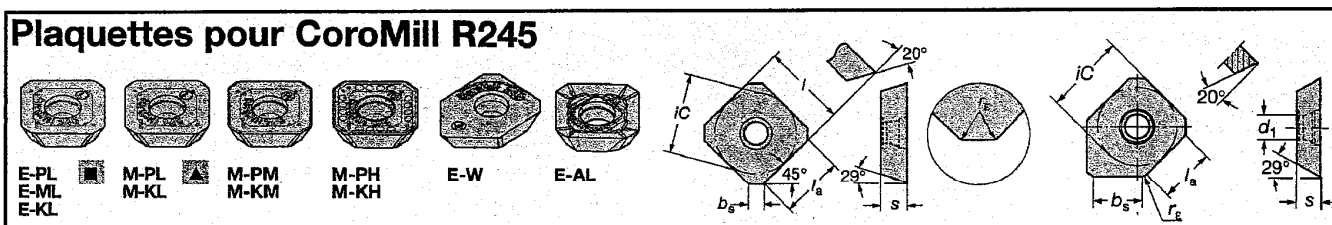


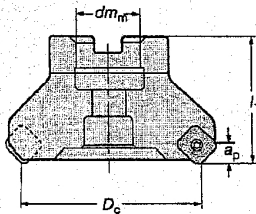
Figure 24

- Fraises à surfacer Coromill 245 (Fig. 25) :

Fraise à surfacer Coromill® 245

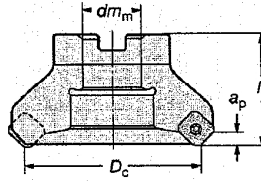
Plaquette standard:
R245-12 T3-..., max. a_p 6 mm

Montage sur mandrin selon ISO 6462



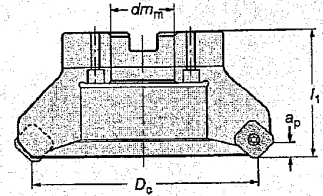
Version	D_c
A22	48-80
A27	54-100
A32	61-125

Montage sur mandrin selon ISO 6462



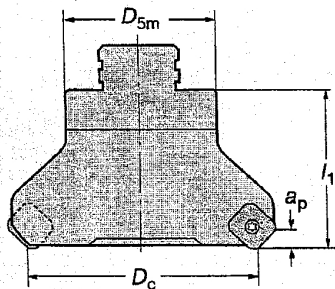
Version	D_c
B27	72-125
B32	79-150
B40	90-200

Montage sur mandrin selon ISO 6462



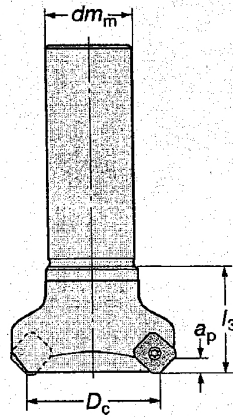
Version	D_c
C40	123-250
C60	163-254

Varilock



VL	D_c
50	58-80
63	71-100
80	88-125

Queue cylindrique PC



Taille	D_c
32	31,7-80
42	38,1-80

Figure 25

- Possibilités d'usinage des fraises carbure à plaquettes carrés $Kr = 90^\circ$ (Fig. 26) :

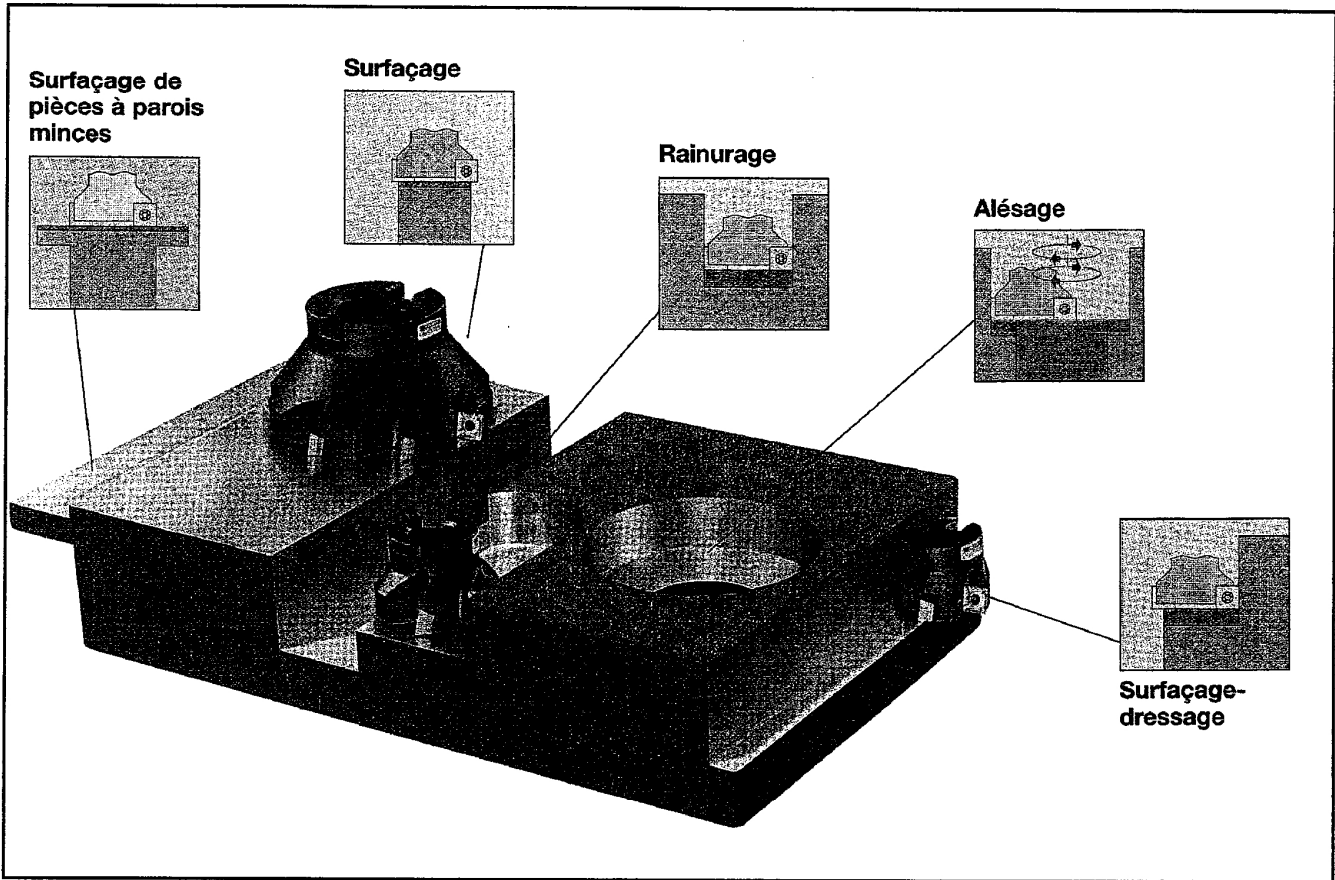


Figure 26

Géométrie et type de plaquettes (Fig. 27) :

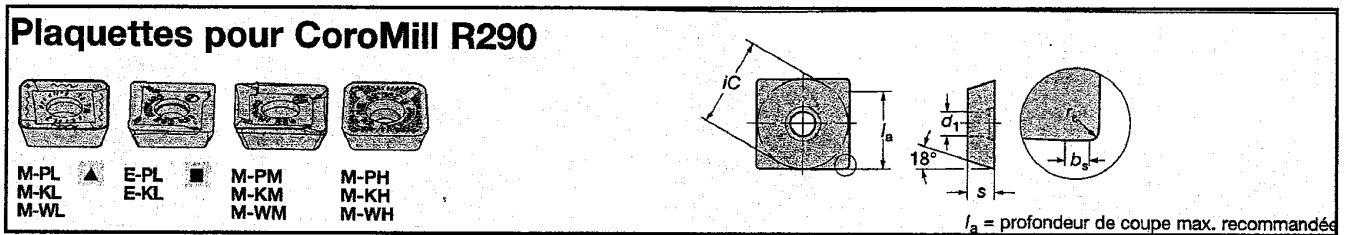


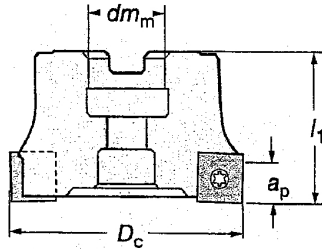
Figure 27

- Fraises à surfacer Coromill R290 (Fig. 28) :

Fraise à surfacer-dresser Coromill R290

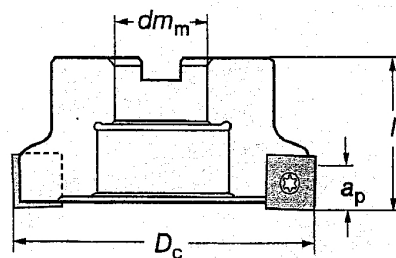
Plaquettes standard:
R290-12 T3., Max $a_p = 10,7$ mm
Plaquettes pour coupe à gauche
disponibles en standard.

Montage sur mandrin
selon ISO 6462



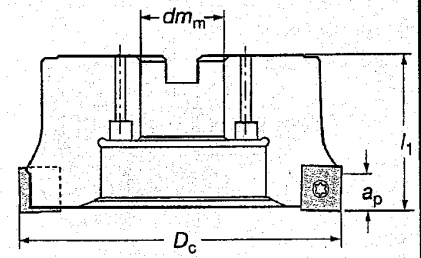
Version	D_c
A16	50-63
A22	50-105
A27	58-125
A32	73-160

Montage sur mandrin
selon ISO 6462



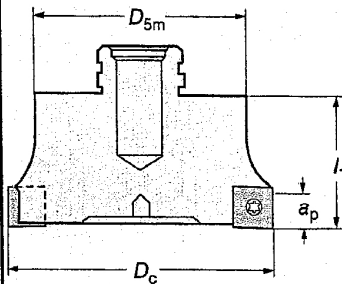
Version	D_c
B27	75-125
B32	82-160
B40	93-200

Montage sur mandrin
selon ISO 6462



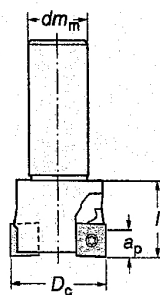
Version	D_c
C40	151-254
C60	191-254

Varilock; 50, 63, 80



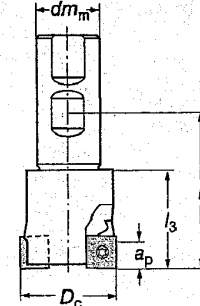
D_c 38,1-160

Queue cylindrique PC
32, 42



D_c 38,1-101,6

Weldon; 32 40 50



D_c 38,1-101,6

Figure 28

9-3-2) Les fraises à rainurer :

Parmi les fraises à rainurer on distingue :

- les fraises 2 tailles ,
- les fraises-disques 3 tailles.

9-3-2-1) Les fraises à rainurer 2 tailles :

- Possibilités d'usinage des fraises à rainurer (Fig. 29) :

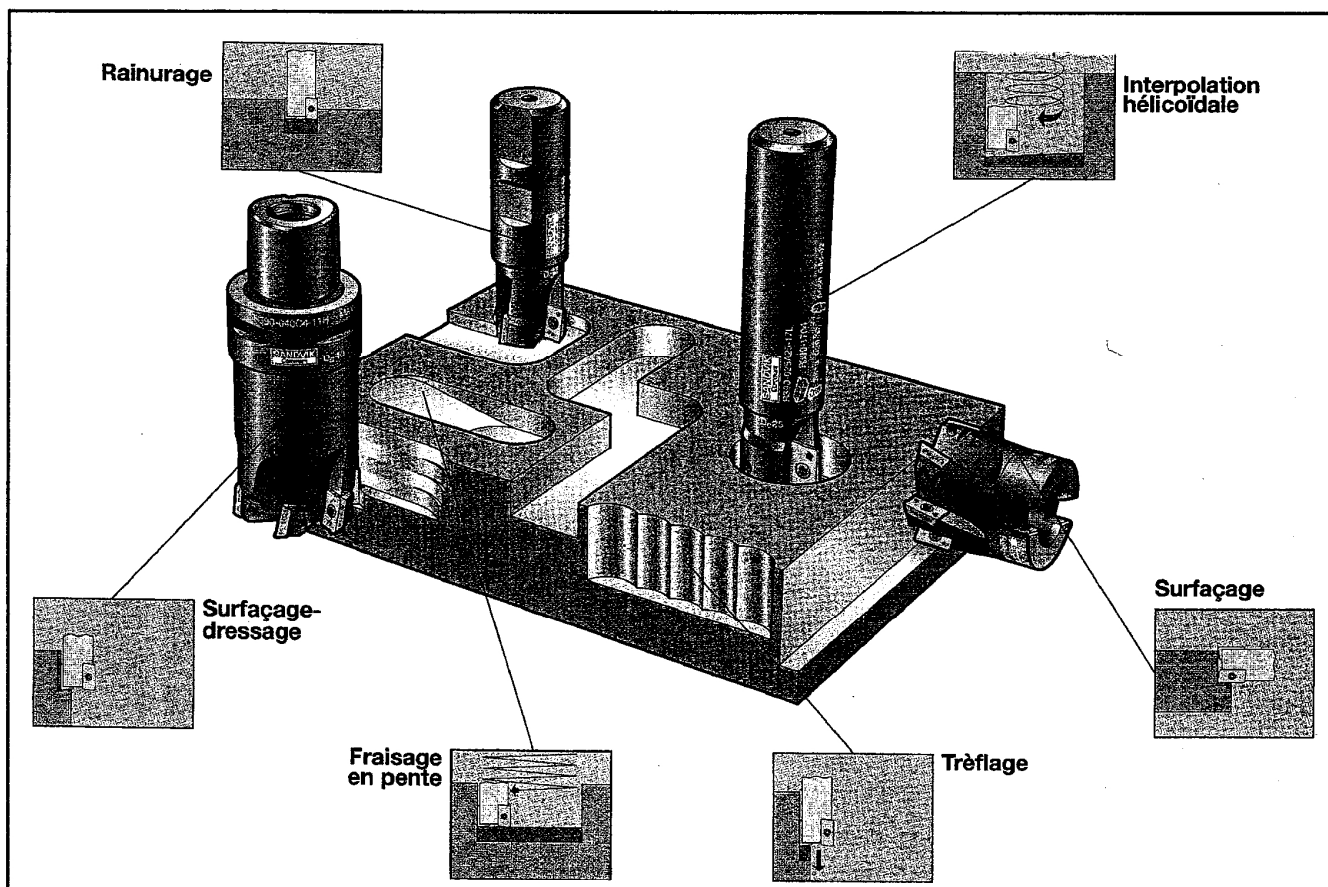


Figure 29

Géométrie et type de plaquettes (Fig. 30) :

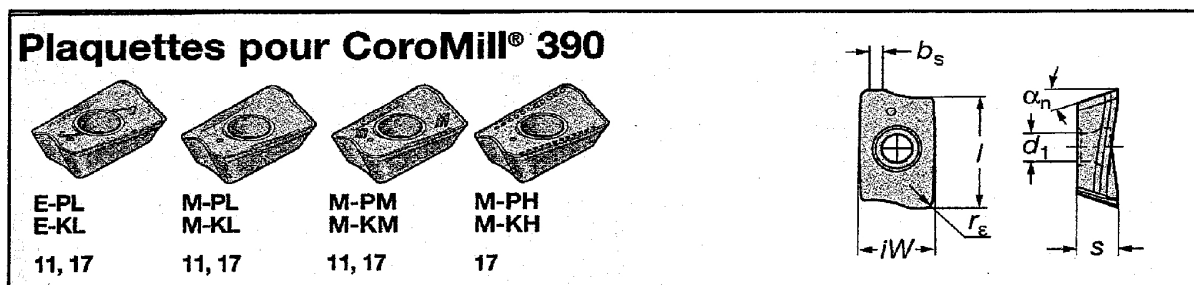


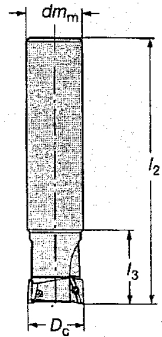
Figure 30

- Fraises à rainurer Coromill R390 (Fig. 31) :

Fraise à rainurer CoroMill® R390

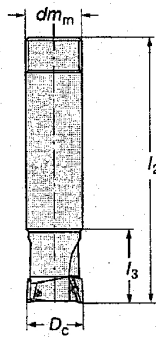
Plaquette standard:
R390 11 T3 ..., max. a_p 10,0 mm
R390 17 04 ..., max. a_p 15,7 mm

Queue cylindrique



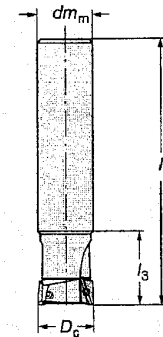
Taille	D_c
12	15,5 -20
16	15,5 -25,4
20	15,5 -40
25	19,05 -50,8
32	25 -80
40	31,75 -80

Queue cylindrique filetée



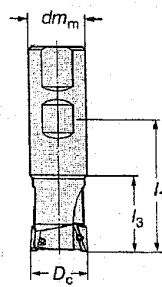
Taille	D_c
12	15,5 -20
16	15,5 -25,4
20	15,5 -40
25	19,05 -50,8
32	25 -80

Queue cylindrique pour mandrin expansible



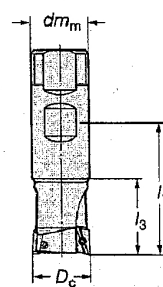
Taille	D_c
32	15,5 -80
42	19,05 -80

Weldon



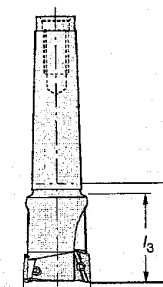
Taille	D_c
12	15,5 -20
16	15,5 -25,4
20	15,5 -40
25	19,05 -50,8
32	25 -80
40	31,75 -80

Queue Weldon filetée



Taille	D_c
16	15,5 -25,4
20	15,5 -40
25	19,05 -50,8
32	25 -80

Cône Morse



Taille	D_c
02	15,5 -32
03	15,5 -40
04	19,05 -50,8
05	25 -63,5

Figure 31

- Possibilités d'usinage des fraises à rainurer carbure monobloc (Fig. 32) :

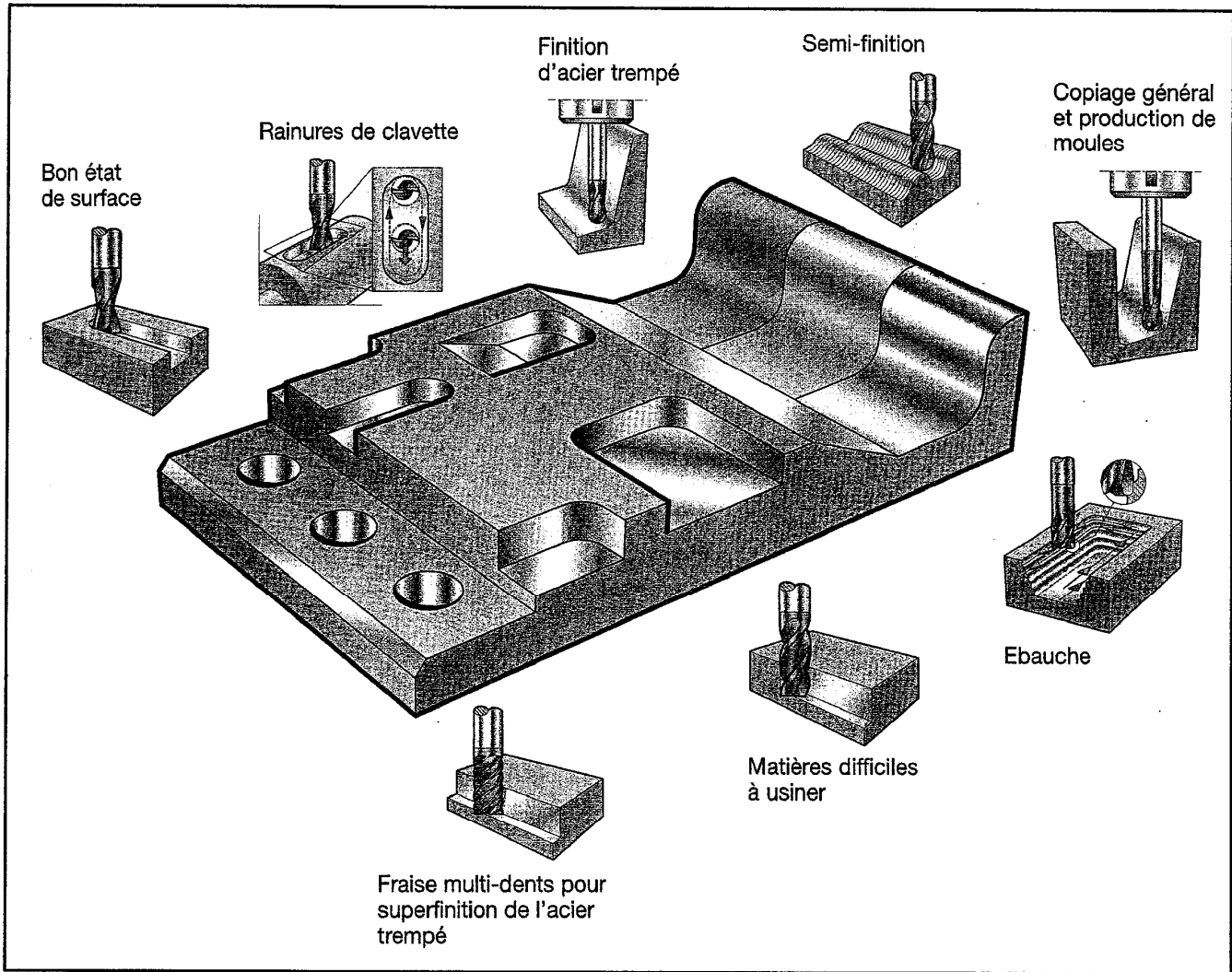


Figure 32

9-3-2-2) Les fraises à rainurer 3 tailles :

- Possibilités d'usinage des fraises à rainurer 3 tailles (Fig. 33) :

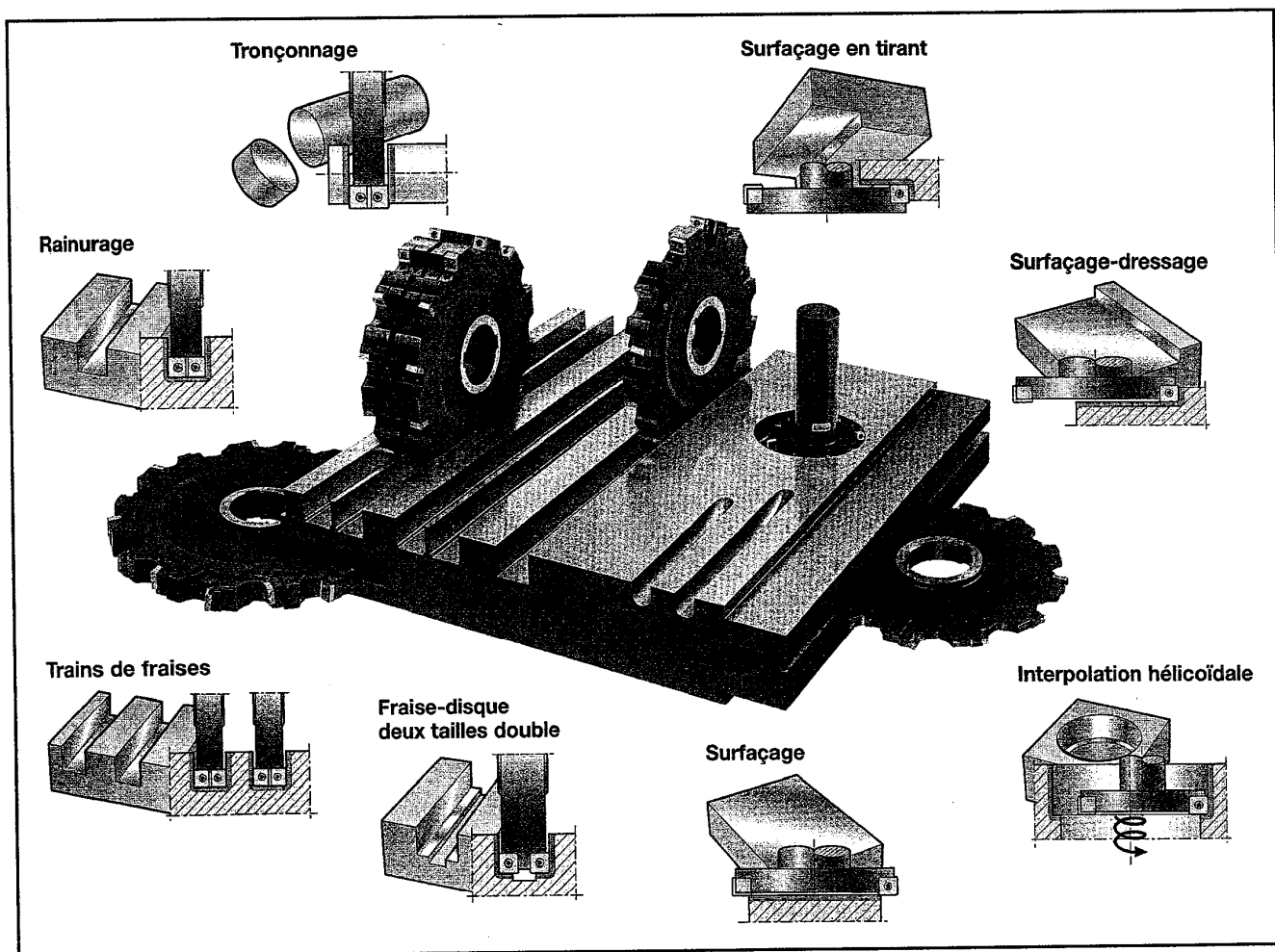


Figure 33

- Fraises à rainurer Coromill R331 (Fig. 34) :

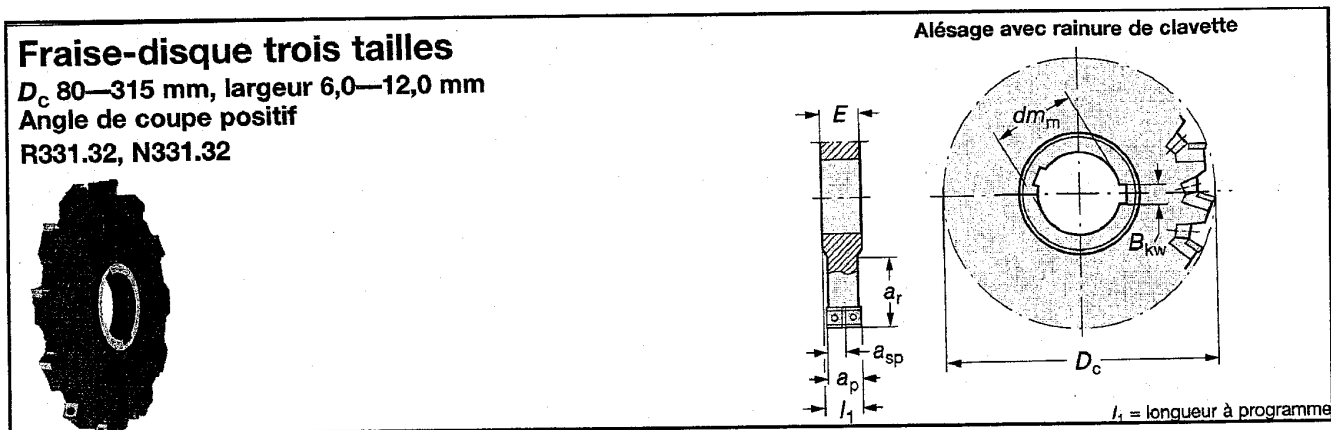


Figure 34

- attachement et plaquettes des fraises Coromill R331 (Fig. 34) :

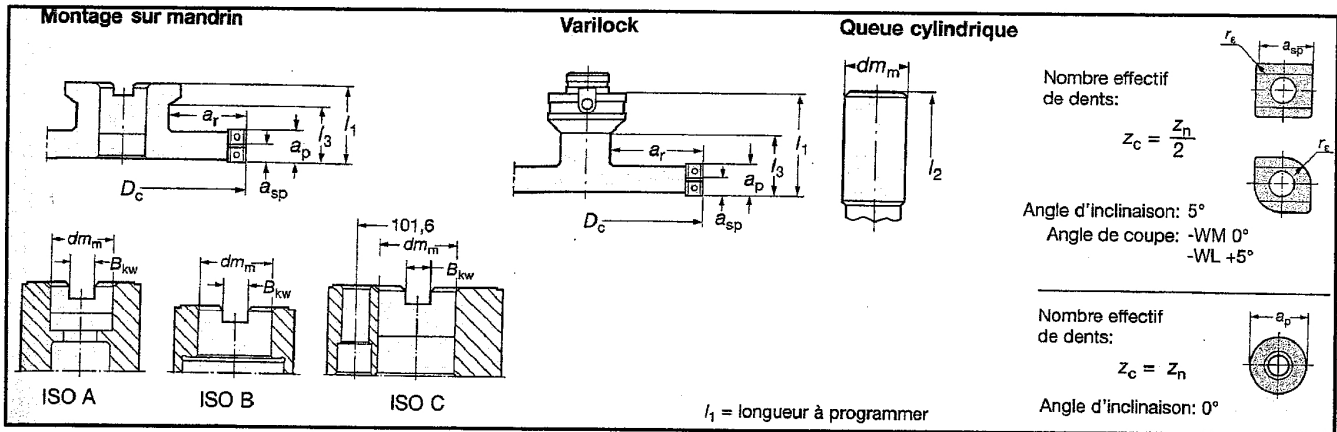


Figure 34

10) Schéma fonctionnel d'une fraiseuse :

Les machines de fraisage sont nombreuses et les principaux types sont :

- les fraiseuses universelles d'outillage,
- les fraiseuses verticales, horizontales ou universelles de production,
- les fraiseuses verticales, 1 ou 2 broches,
- les fraiseuses à rainurer,
- les fraiseuses verticales, horizontales, à 2, 3, 4 broches.

10-1) Les fraiseuses universelles d'outillage :

Elles sont adaptées aux fabrications unitaires ou de petites séries.

10-2) Les fraiseuses verticales, horizontales ou universelles de production :

- à cycles automatiques,
- à commande numérique.

Elles sont adaptées aux fabrications en séries (petites, moyennes et grandes séries).

10-3) Les fraiseuses verticales, 1 ou 2 broches :

Elles sont à table rotative, réservées aux travaux de surfacage en moyennes et grandes séries.

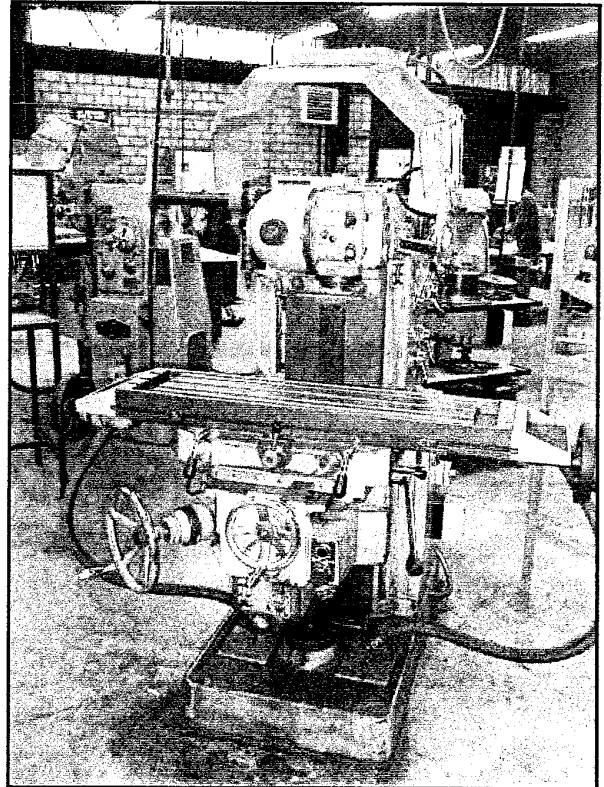
10-4) Les fraiseuses à rainurer :

Elles sont adaptées à des travaux de rainurages, de cannelures et de profilages.

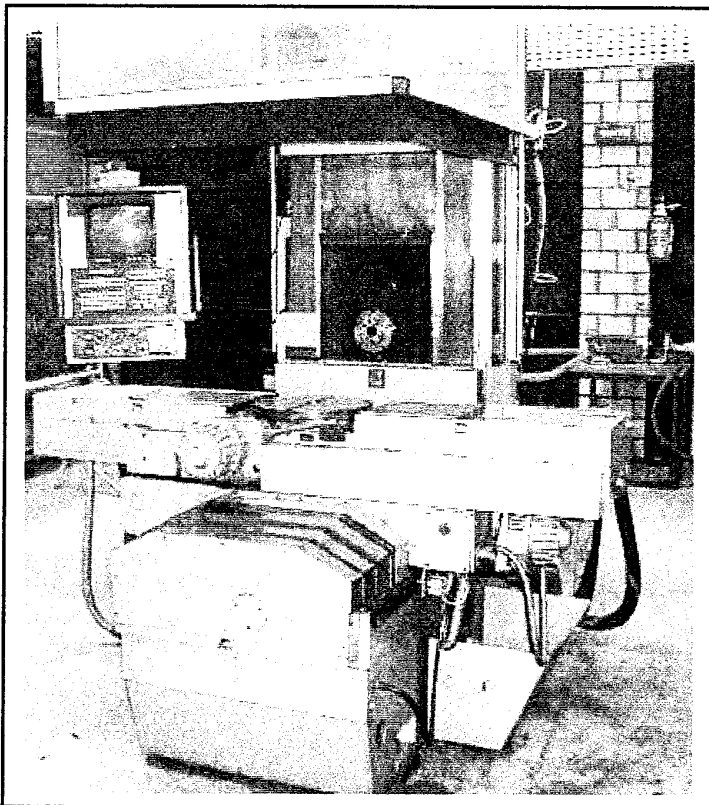
10-5) Les fraiseuses verticales, horizontales, à 2, 3, 4 broches :

Elles sont adaptées à des travaux en moyennes et grandes séries.

10-6) - Quelques types de fraiseuses :



Fraiseuse conventionnelle



Fraiseuse à commande numérique

GÉNÉRATION DE SURFACES (PERÇAGE - ALÉSAGE - TARAUDAGE)

11) - GÉNÉRATION DE SURFACES EN PERÇAGE-ALÉSAGE TARAUDAGE :

L'obtention des surfaces en perçage, alésage ou taraudage se fera grâce à des outils de forme ou des outils d'enveloppe. Ces outils utilisables en perçage - alésage peuvent donc être, suivant le procédé :

- des outils de forme :

- forets,
- tarauds,
- alésoirs monoblocs,
- alésoirs creux.

- des outils d'enveloppe :

- grains sur barre d'alésage.

La génération des surfaces s'obtient par la combinaison de 2 mouvements :

- le mouvement de coupe **Mc**,
- le mouvement d'avance **Mf**.

Or suivant le procédé de fabrication utilisé en perçage - alésage, cette combinaison sera différente :

- Tournage :

- **Mc à la pièce.**
- **Mf à l'outil.**

- Fraisage :

- **Mc à l'outil.**
- **Mf à la pièce.**

- Perçage - alésage sur perceuse :

- **Mc à l'outil.**
- **Mf à l'outil.**

- Perçage - alésage sur aléseuse :

- **Mc à l'outil**
- **Mf à l'outil ou à la pièce.**

La plupart des opérations de perçage, alésage, taraudage, lamage peuvent se faire en tournage et en fraisage.

11-1) Le perçage - alésage sur perceuse :

11-1-1) Les outils de perçage :

11-1-1-1) Les forets à centrer :

C'est un outil de perçage qui permet de réaliser des avant-trous coniques pour effectuer ensuite un perçage avec un foret cylindrique. Cette opération a pour but de définir l'axe du perçage devant être réalisé, car les forets cylindriques classiques ne peuvent pas percer directement en pleine matière.

Nous trouverons 3 types de forets à centrer :

- les forets à centrer sans chanfrein de protection (type A), (**Fig. 35**)
- les forets à centrer avec chanfrein de protection (type B), (**Fig. 36**)
- les forets à centrer à profil curviligne (type R), pour travaux de grande précision. (**Fig. 37**)

- Diamètres d : 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8 - 10 - 16 - 25 mm.

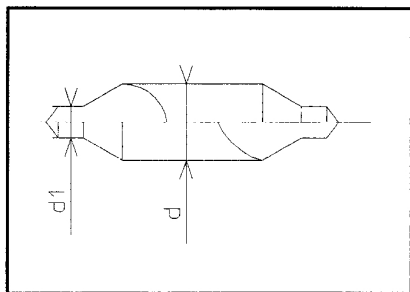


Figure 35

- Diamètres d : 4 - 6,3 - 8 - 10 - 11,2 - 14 - 20 - 31,5 mm.

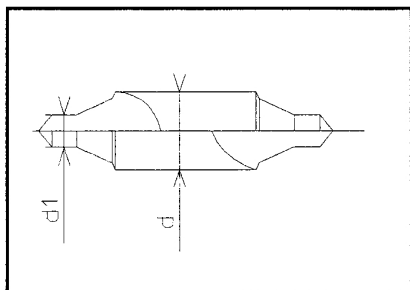


Figure 36

- Diamètres d : 3,15 - 4 - 5 - 6,3 - 8 - 10 - 16 - 25 mm.

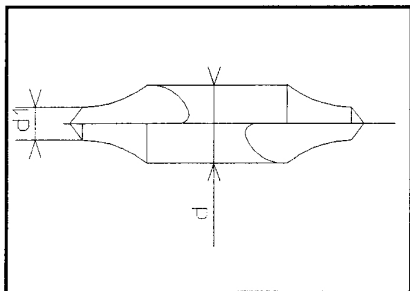


Figure 37

11-1-1-2) Les forets-aléseurs :

Ce sont des forets qui ont un mode d'action, en usinage, identique aux forets pour perçage. On les utilise :

- en demi-finition ou en finition, pour des alésages à obtenir à partir d'un perçage existant.
- pour réaliser des alésages à partir de trous bruts de fonderie ou de forge. Suivant les cas, la qualité obtenue varie de : $8 < \text{I.T.} < 11$.

On trouvera des forets-aléseurs :

- à queue cylindrique, (**Fig. 39**)
- à queue conique à cône morse, (**Fig. 40**).

- Diamètres d : 3 à 20 mm.

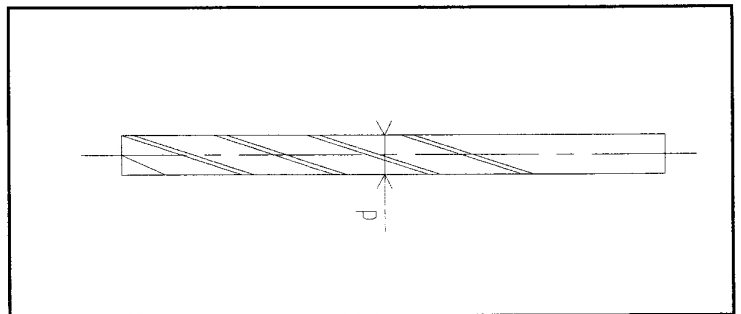


Figure 39

- Diamètres d : 7,8 à 32 mm.

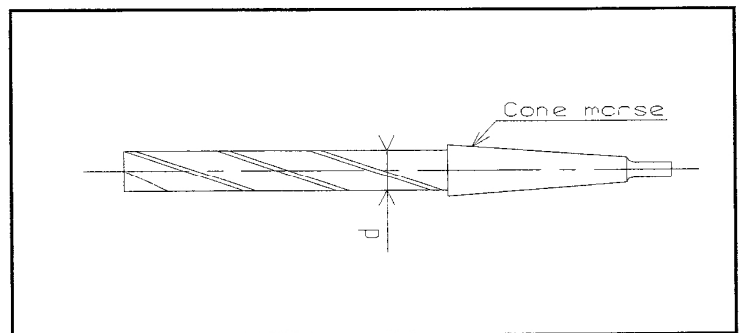


Figure 40

11-1-1-3) Les forets étagés :

Ce sont des forets qui permettent la réalisation de perçages étagés, de diamètres différents, sans démontage d'outils. On les utilise, principalement, pour l'obtention des avant-trous de taraudage avec un chanfrein d'entrée à 90° (**Fig 41**).

- Diamètres d :
- M8, $d_1 = 6,8$ mm, $d_2 = 9$ mm.
- ⋮
- ⋮
- M30, $d_1 = 26$ mm, $d_2 = 33$ mm.

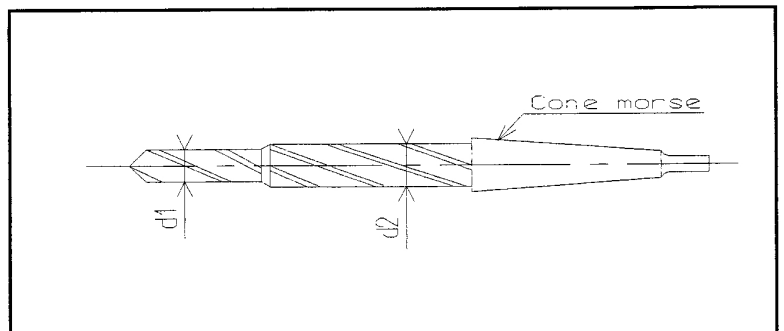


Figure 41

11-1-1-4) Les forets hélicoïdaux :

Les forets hélicoïdaux sont constitués :

- **d'un corps**, dont le diamètre d (qualité h8) comprend deux listels pour le guidage et deux goujures hélicoïdales pour l'évacuation des copeaux.
- **d'une pointe** avec un angle au sommet variable suivant la nature des matériaux à usiner.
- **d'une queue**, cylindrique ou conique à cône morse.

On classera les forets suivant leur forme :

- les forets à queue cylindrique dans les séries (**Fig. 42**) :
 - extra-courte,
 - courte,
 - longue,
 - courte à longueur taillée réduite.

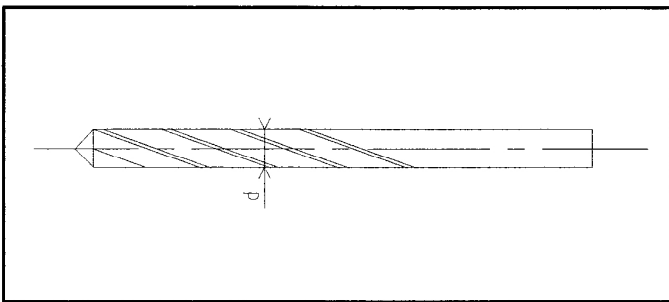


Figure 42

- les forets à queue conique à cône morse dans les séries (**Fig. 43**) :
 - courte,
 - longue,
 - extra-longue

Ces forets sont utilisés pour des travaux en séries et les hélices peuvent être :

- normales (perçage courant),
- longues (pour des matériaux à copeaux fragmentés),
- courtes (pour des matériaux à copeaux continus).

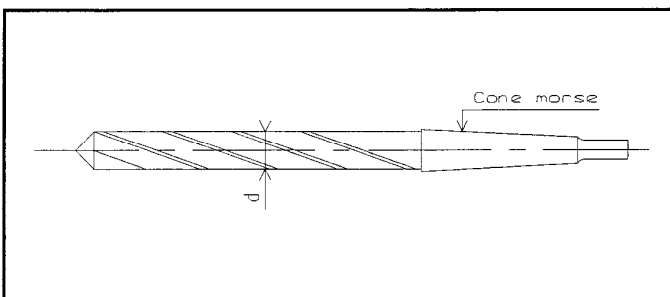


Figure 43

11-1-1-5) Les outils de taraudage (Fig. 44) :

Les tarauds permettent de réaliser des filetages intérieurs. Ils sont caractérisés par :

- leur diamètre nominal (ex : $d = 6$ pour M6),
- leur forme,
- le profil du filet.

Afin que l'axe du taraud soit confondu avec l'axe du perçage avant taraudage, les tarauds sont dotés d'une entrée conique facilitant le centrage de l'outil. Cette entrée peut être :

- **courte**, sur 2 ou 3 filets (pour trous borgnes),
- **longue**, sur 8 à 10 filets (pour trous débouchants).

Les goujures peuvent être droites ou hélicoïdales.

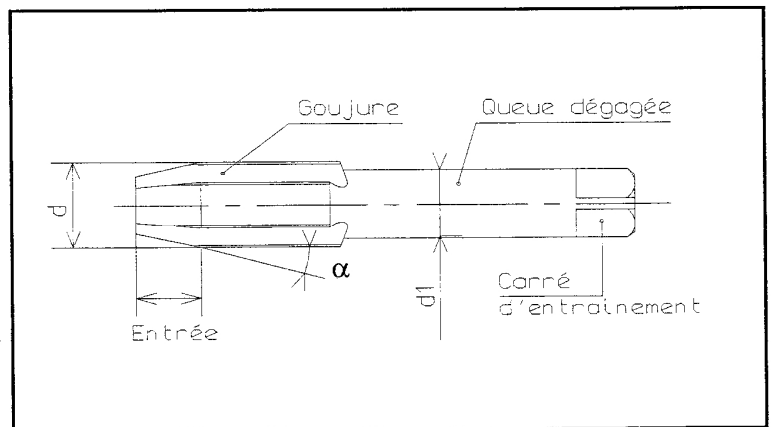


Figure 44

Les taraudages s'effectuent, en mécanique :

- manuellement,
- sur tour semi-automatique ou à décolleter,
- sur fraiseuse avec une tête à tarauder,
- sur perceuse,
- sur machine spéciale à tarauder.

Le diamètre de perçage d_1 avant taraudage dépendra de la nature du matériau à tarauder :

- | | | |
|---|---|---------------------------------------|
| - $d < \text{Ø } 8 \text{ mm}$ (pour tous métaux) | } | : $d_1 = d - \text{pas}$ |
| - Aciers de 40 à 60 daN/mm ² | } | : $d_1 = d - (1,06 \cdot \text{pas})$ |
| - Laitons | } | |
| - Alliages d'aluminium | } | |
| - Aciers de 60 à 80 daN/mm ² | } | : $d_1 = d - (1,1 \cdot \text{pas})$ |
| - Fontes | } | |
| - Bronzes | } | |
| - Aciers R > 80 daN/mm ² | } | : $d_1 = d - (1,2 \cdot \text{pas})$ |

11-1-2) Les outils d'alésage :

11-1-2-1) Les alésoirs (Fig. 45) :

En production, on utilise des alésoirs en A.R.S. ou en carbure à lames amovibles. Les alésoirs dits "machine" sont les suivants :

- **Creux à alésage conique** (ébauche et finition).

Paliers de diamètres d : 19,9 à 101,6 mm.

- **Monoblocs à queue cylindrique.**

Paliers de diamètres d : 1,32 à 6,70 mm.

- **Monoblocs à queue conique à cône morse.**

Paliers de diamètres d : 5,3 à 20 mm.

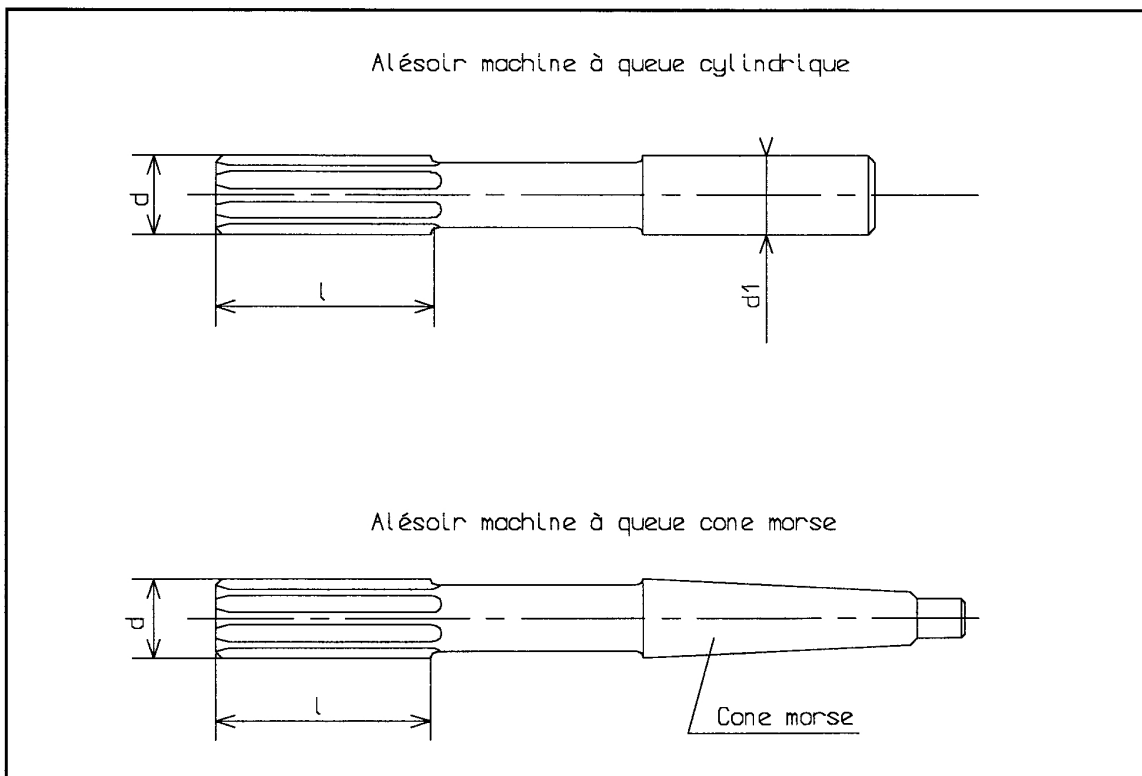


Figure 45

Les tolérances de fabrication sur le diamètre des alésoirs sont précises. La tolérance normalisée est m6. Les alésoirs courants permettent de réaliser des alésages dans les tolérances suivantes :

- H6 - H7 - H8 - H9 - H10.

11-1-2-2) Les outils de chanfreinage, chambrage et lamage (Fig. 46) :

Ces outils permettent de réaliser diverses opérations d'usinage une fois le perçage effectué. Nous trouverons :

- **Les fraises à chanfreiner (Fig. 46)** qui permettent l'obtention de chanfreins sur des perçages. Ces outils sont :

- **à queue cylindrique.**

Paliers de diamètres d : $\text{Ø } 8$ à 25 mm.

- **à queue conique à cône morse.**

Paliers de diamètres d : $\text{Ø } 16$ à 80 mm.

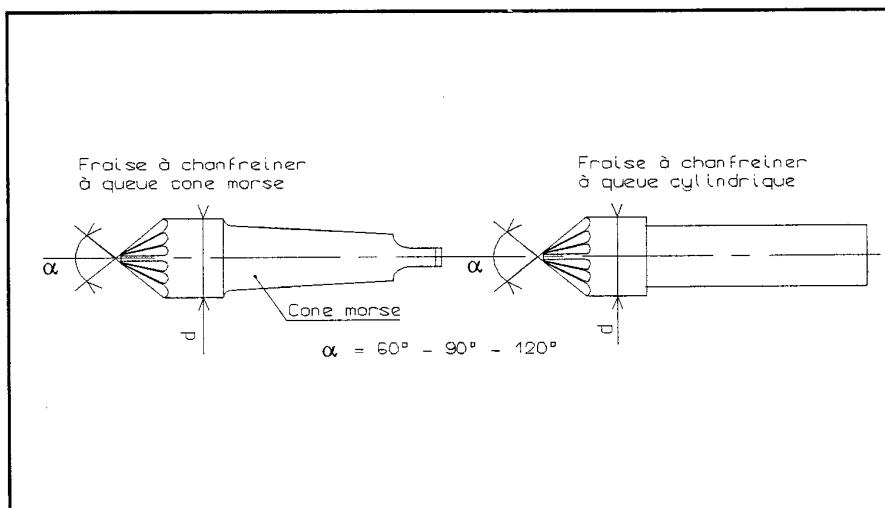


Figure 46

- **Les fraises à chambrer-lamer (Fig. 47)** qui permettent de réaliser des chambrages ou des lamages sur des perçages.

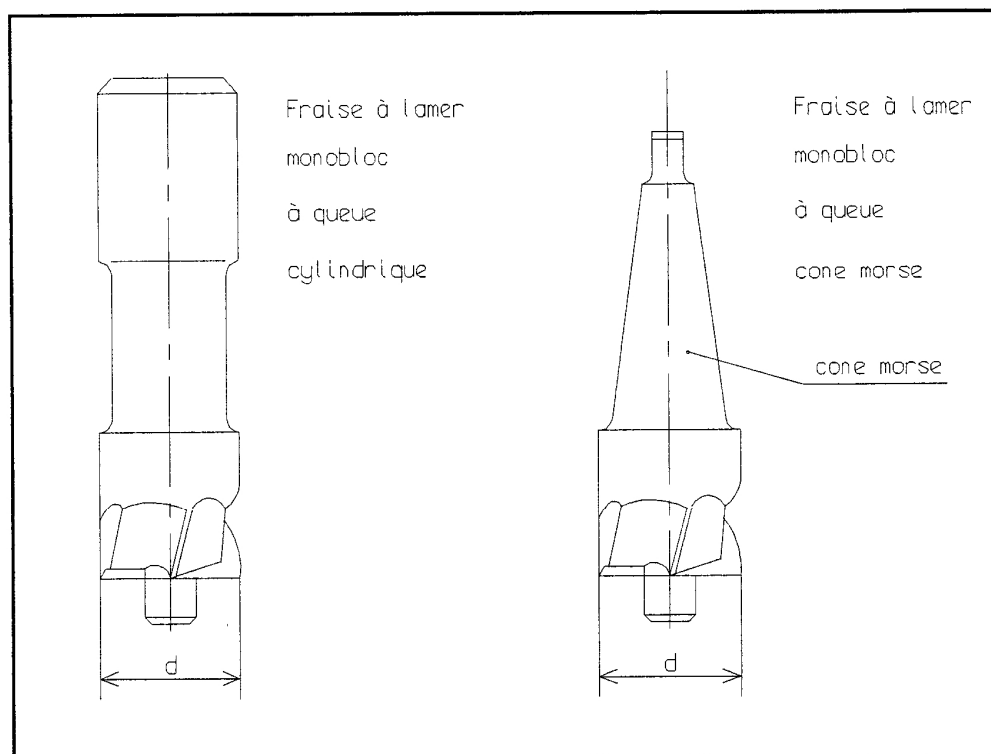


Figure 47

Ces outils sont :

- **les fraises à lamer avec pilote (amovibles ou monoblocs).**

Paliers de diamètres $d : \varnothing 10$ à 53 mm.

- **les fraises à lames amovibles montées sur mandrin avec pilote.**

On utilise ces outils :

- en tirant,
- en poussant.

Les outils sont en A.R.S. ou en carbure. Le mode opératoire pour les opérations de chanfreinage, chambrage et lamage est le suivant :

- Perçage -----> chanfreinage.
- Perçage -----> chambrage.
- Perçage -----> lamage.

Dans le cas où le perçage doit être alésé, l'opération d'alésage intervient après le chanfreinage, le chambrage ou le lamage suivant le cas.

11-2) Le perçage-alésage sur aléseuse :

11-2-1) Les outils de perçage :

Tous les outils décrits précédemment pour équiper les perceuses peuvent aussi s'utiliser sur les aléseuses.

11-2-2) Les outils d'alésage :

11-2-2-1) Les barres d'alésage avec grains (Fig 48) :

Les grains d'alésage sont de petits outils dont le corps est cylindrique avec un méplat. Ils sont monobloc ou à plaquettes amovibles. On les monte sur des barres cylindriques dont le diamètre permet le passage de l'outil dans le diamètre du perçage ébauché.

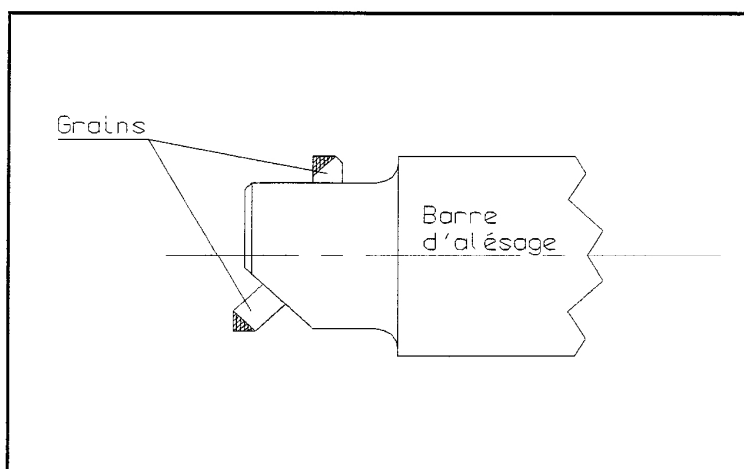


Figure 48

11-2-2-2) Les unités micrométriques (Fig. 49) :

L'unité d'alésage micrométrique, à plaquette carbure amovible, est un outil de grande précision. Cet outil se monte comme précédemment sur une barre et la précision du réglage en position peut atteindre 0,001 mm. Ces outils peuvent se monter :

- **droit** (alésages débouchants),
- **oblique** (alésages borgnes).

Dans tous les cas, il est possible de réaliser des alésages avec des faces dressées.

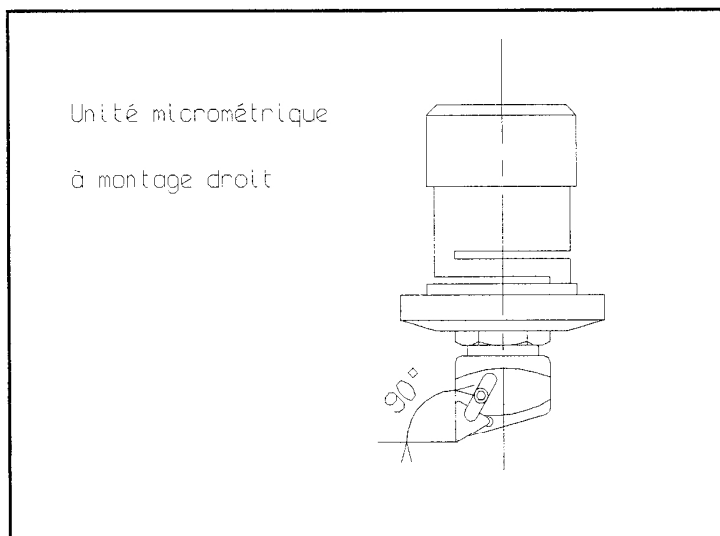


Figure 49

11-3) Les outils de perçage en carbure :

11-3-1) Les forets carbure à plaquettes amovibles (Fig. 50) :

Les forets représentés à la figure ont une capacité de perçage de 27 à 59 mm de diamètre et une profondeur maxi de perçage égale à 2.5 fois le diamètre du foret. Ce type d'outil est capable de percer la matière sans avant trou de centrage.

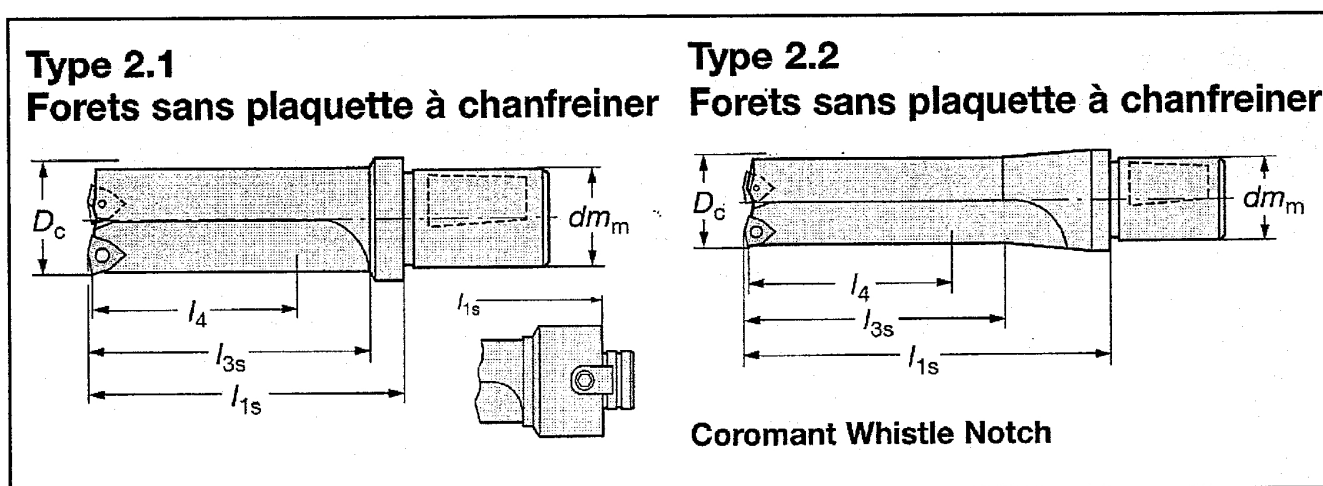


Figure 50

On trouve également ce type de foret avec possibilité de chanfreinage (Fig. 51) :

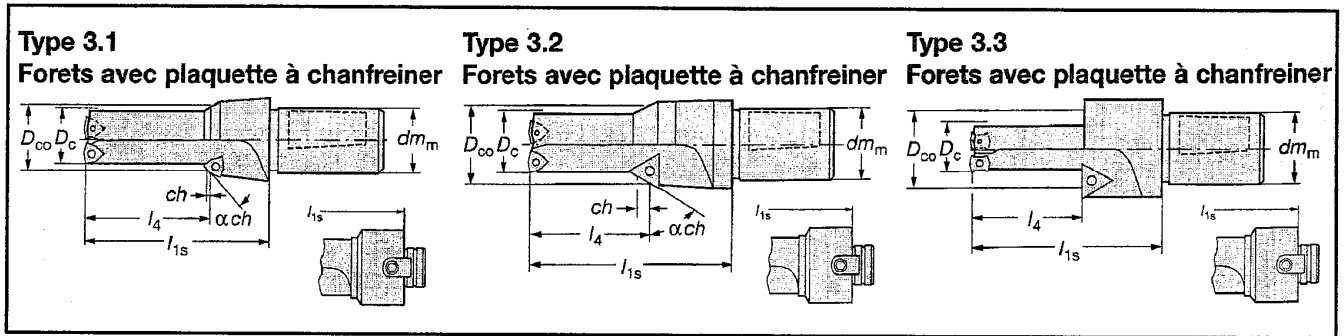


Figure 51

Formes et dimensions des plaquettes (Fig. 52 - 53) :

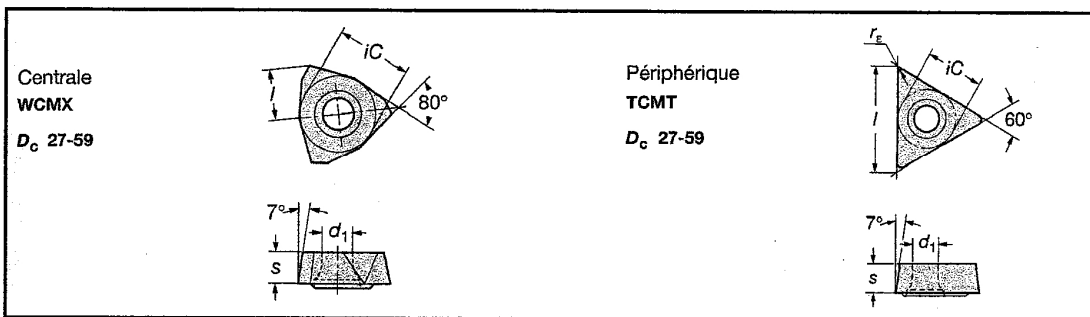


Figure 52

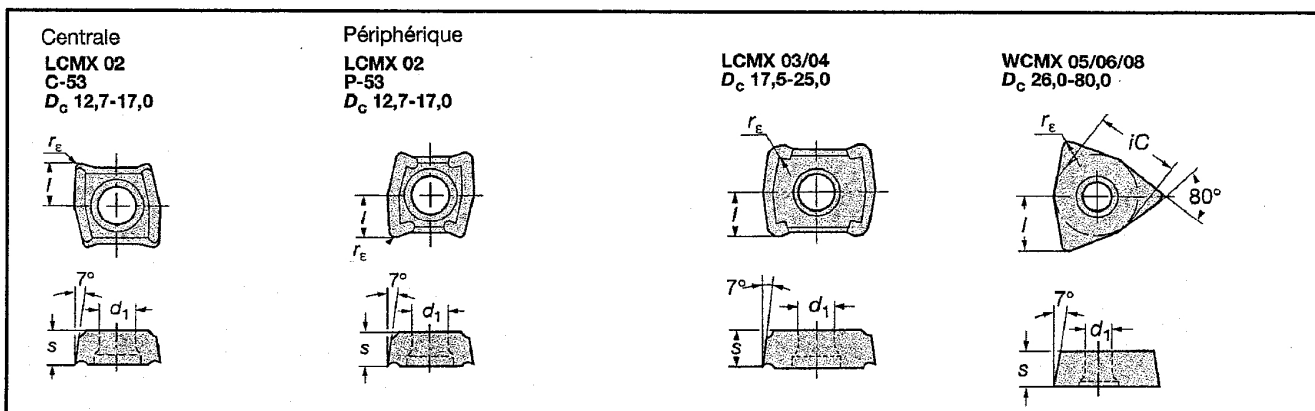


Figure 53

11-3-1) Les forets carbure monoblocs (Fig. 54) :

Ces forets sont autocentrants (pas d'avant-trou de centrage) comme les forets carbure à plaquettes amovibles. Capacité de perçage de 9.5 à 30.4 mm de diamètre et une profondeur maxi de perçage égale à 5 fois le diamètre du foret.

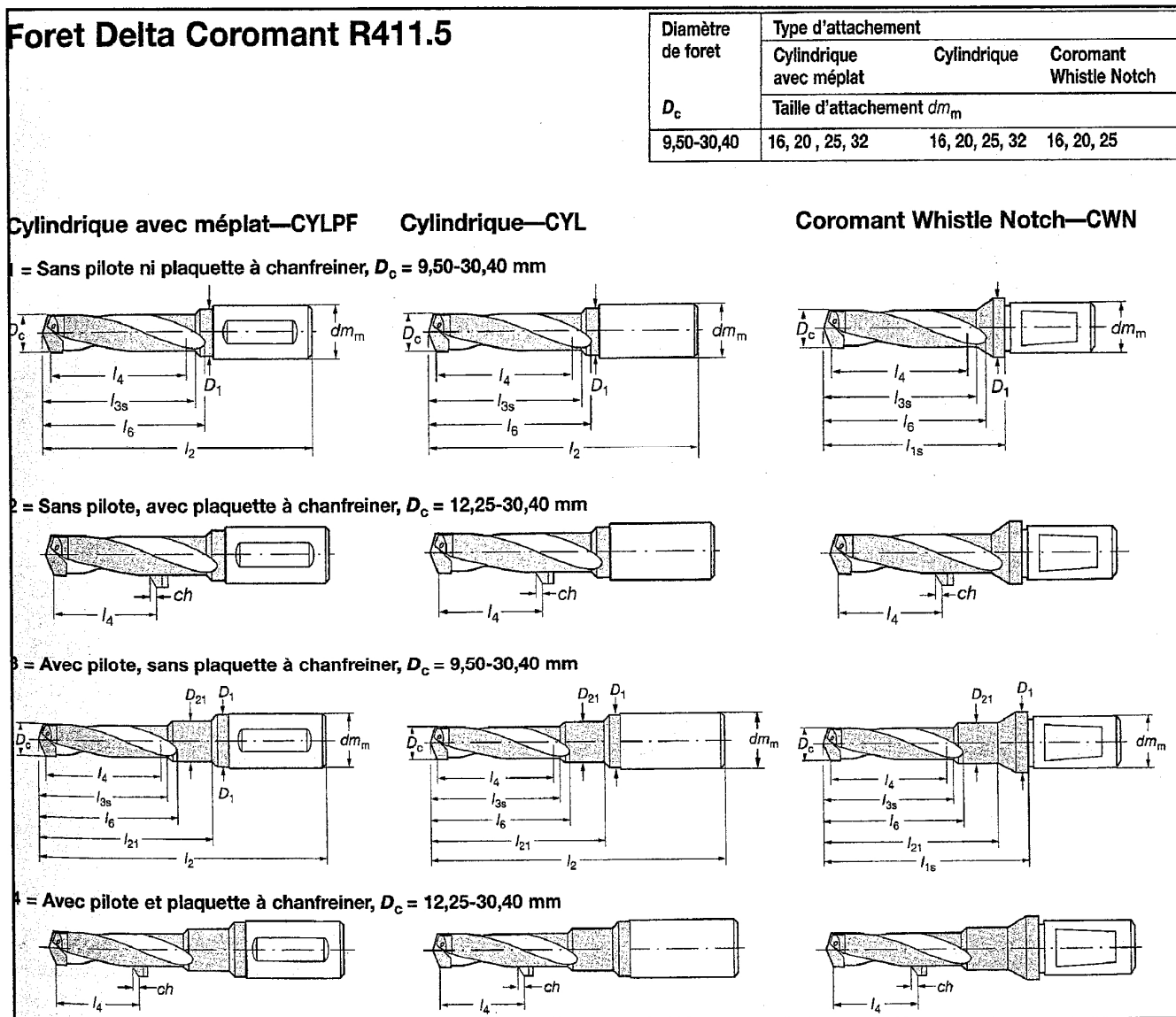


Figure 54

12) - CALCUL DES CONDITIONS DE COUPE :

Le calcul des conditions de coupe (N et Vf) se fait de la même façon qu'en tournage.

$$N = 1000 \cdot V_c / \pi \cdot D$$

$$V_f = f \cdot N$$

- N : vitesse de rotation de la broche en tr/min.
- Vc : vitesse de coupe en m/min.
- D : diamètre de l'outil en mm.
- Vf : vitesse d'avance en mm/min.
- f : avance en mm/tr.

Exemple :

13) - SCHEMA FONCTIONNEL D'UNE MACHINE DE PERCAGE ET D'ALÉSAGE :

13-1) Perceuse à table croisée (Fig. 55) :

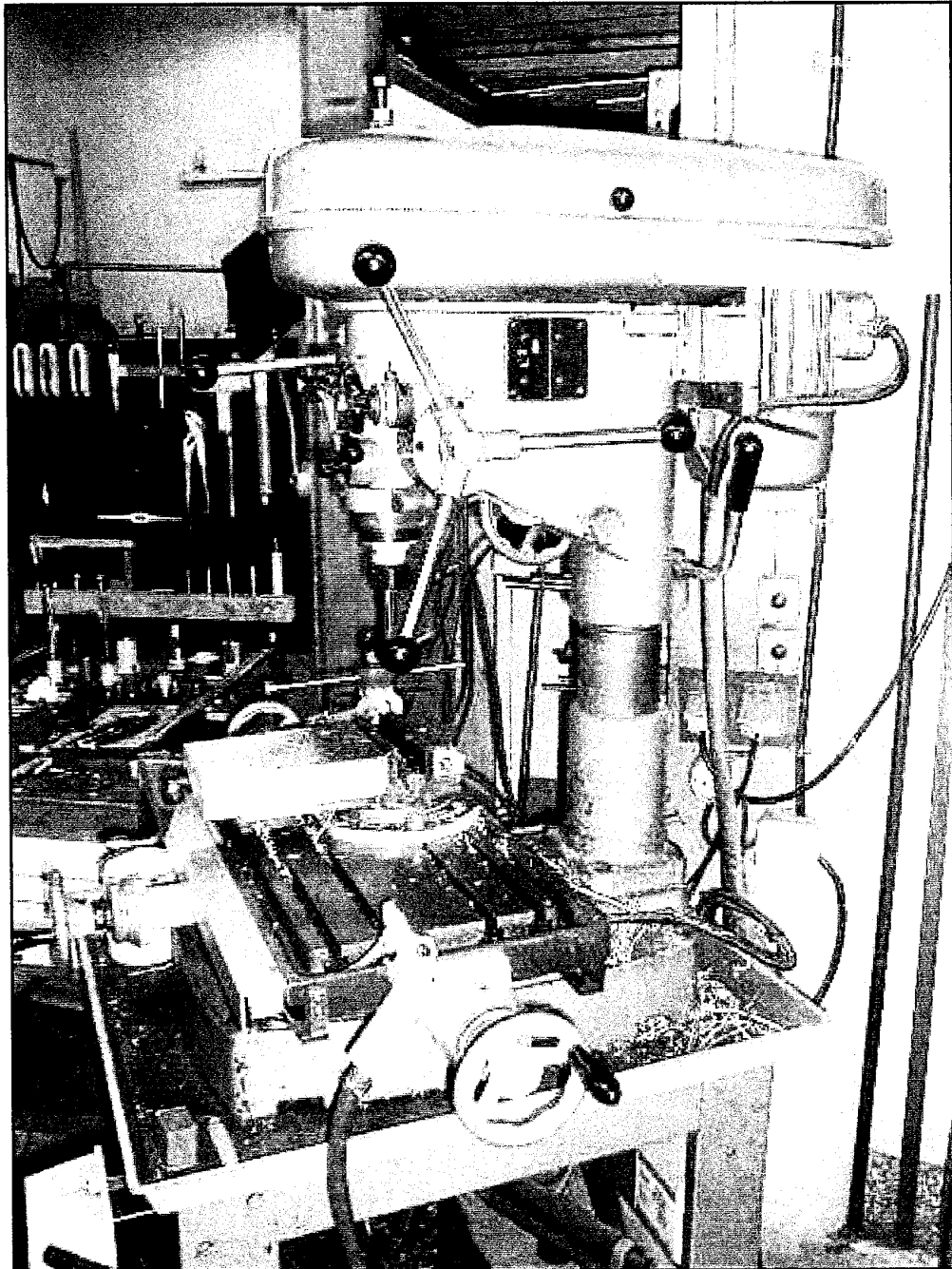
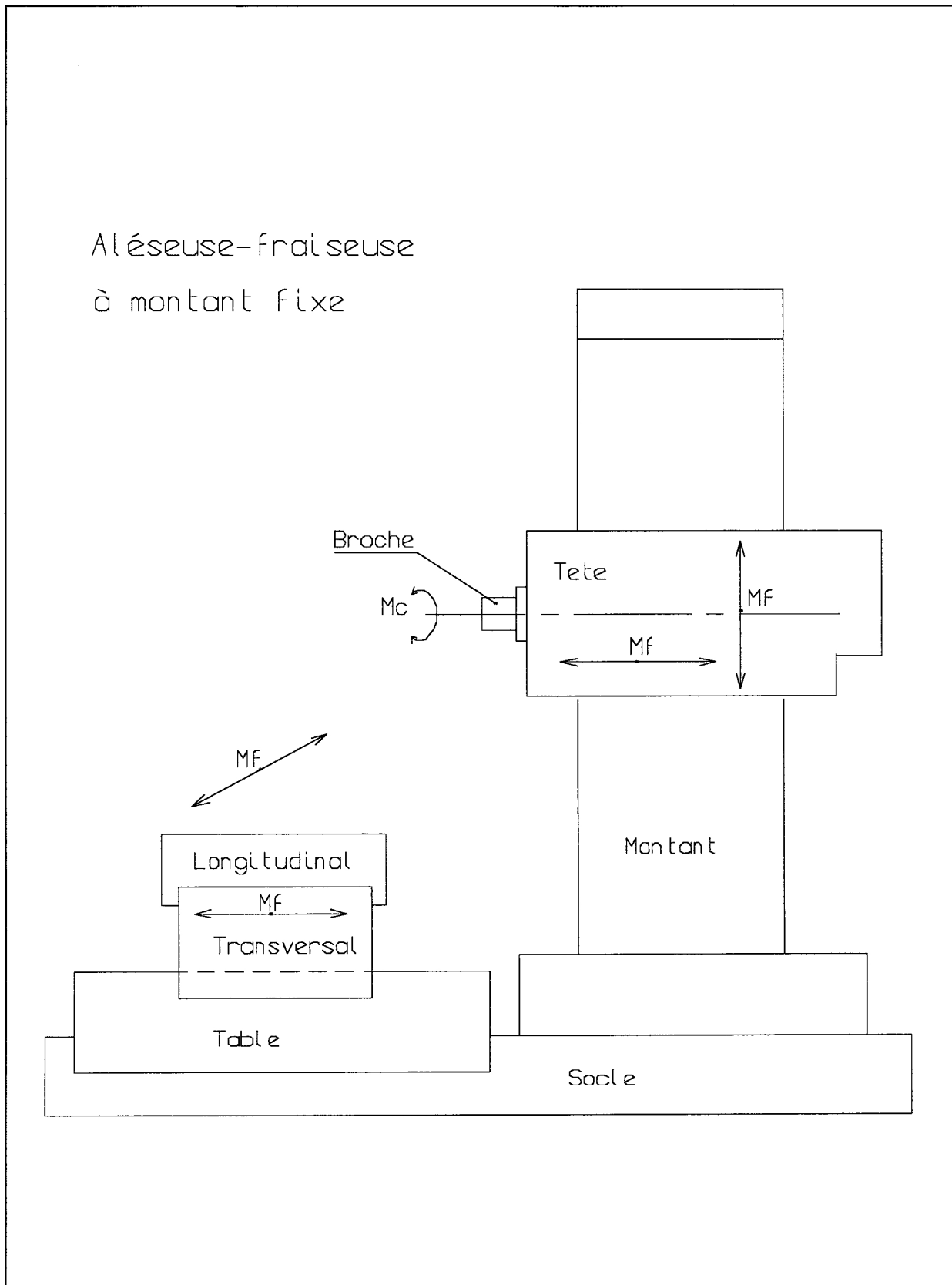


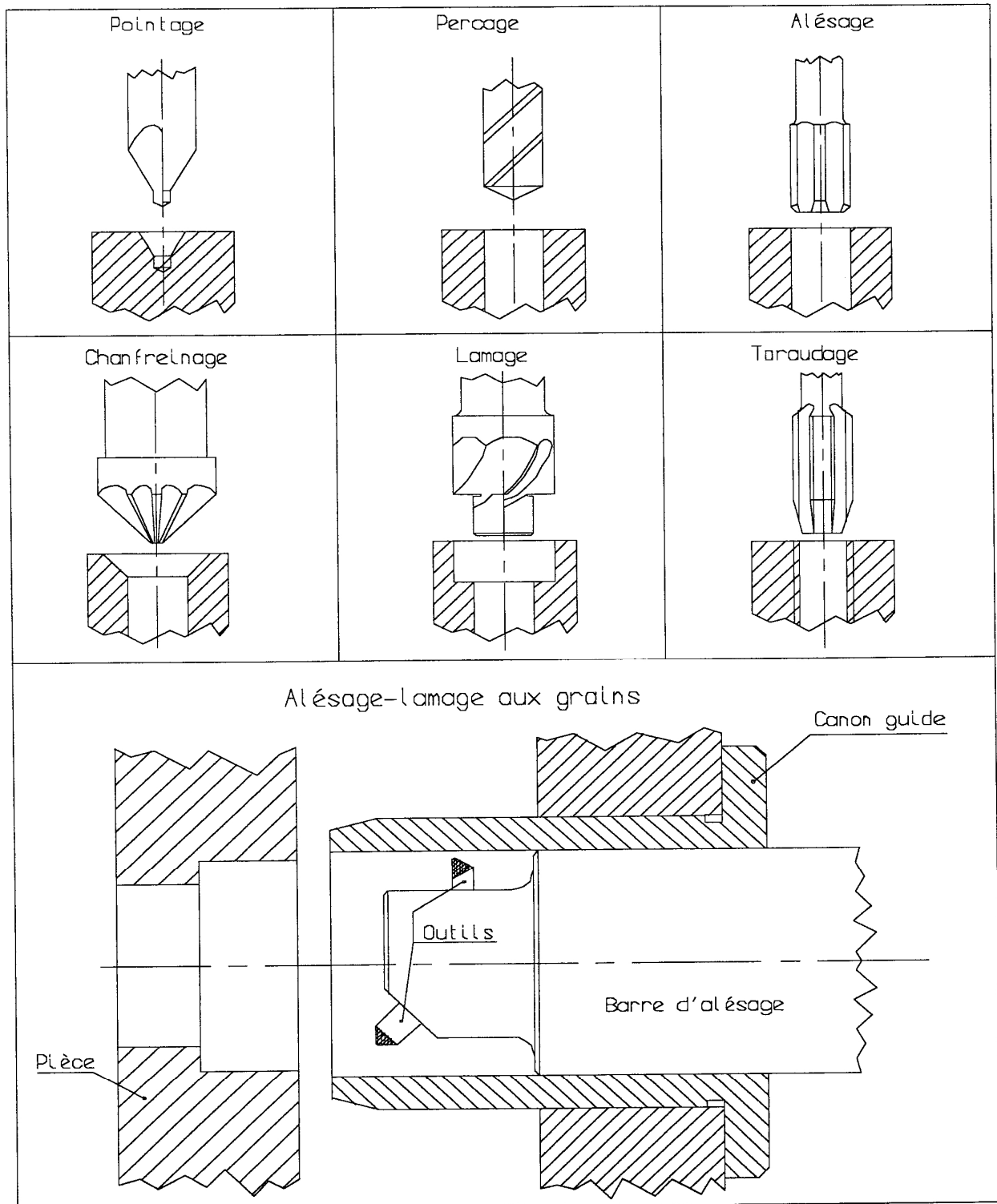
Figure 55

13-2) Schéma fonctionnel d'une aléreuse :

Aléreuse-fraiseuse
à montant fixe



14) - EXEMPLES DE SURFACES RÉALISÉES EN PERÇAGE - ALÉSAGE - TARAUDAGE :



GLOSSAIRE

Outils coupants : outils de tour, fraises, forets, alésoirs, etc..

Outils abrasifs : meules, grattoir, etc..

Outil à tranchant unique : outil de tour (outil à charioter).

Outil à tranchants multiples : broches (rectiligne), fraises (cylindrique), tarauds, filières (hélicoïdale).

Outil de forme : outil qui engendre directement une surface.

Outil d'enveloppe : outil qui engendre une surface grâce aux positions successives de l'arête de coupe.

Mc : mouvement de coupe.

Mf : mouvement d'avance.

Vc : vitesse de coupe en m/min.

f : avance en mm/tr.

Vf : vitesse d'avance en mm/min.

N : vitesse de rotation de la broche de la machine en tr/min.

Fraisage en bout : la surface réalisée est perpendiculaire à l'axe de la fraise.

Fraisage en roulant : la surface réalisée est parallèle à l'axe de la fraise.

Travail en opposition : Mc et Mf sont en sens opposé.

Travail en avalant : Mc et Mf sont dans le même sens.

Perçage : surface cylindrique réalisée par un foret.

Alésage : surface cylindrique de précision réalisée par un alésoir (pour les petits diamètres) ou par une barre d'alésage avec grains (pour les grands diamètres). L'alésage est réalisée une fois le perçage effectué.

Foret à centrer : foret spécial permettant de réaliser des avant-trous coniques. Ils servent à définir la position de l'axe d'un perçage.

Foret-alésoir : foret permettant de réaliser directement un alésage, qualité I.T. 8 à I.T. 11. Attention, un perçage ou un trou brut de fonderie ou de forgeage doivent exister auparavant.

Tarauds : outil permettant de réaliser des filetages intérieurs.

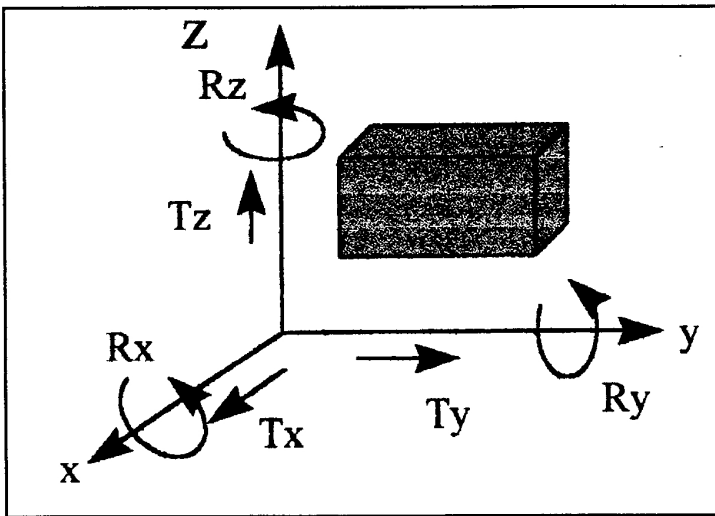
Grains d'alésage : outil d'usinage élémentaire monté sur une barre d'alésage en position droite ou oblique.

**MISE EN POSITION
DES PIÈCES
MECANIQUES**

LA MISE EN POSITION DES PIÈCES MÉCANIQUES

1) - MECANIQUE DU SOLIDE :

1-1) Degrés de liberté :

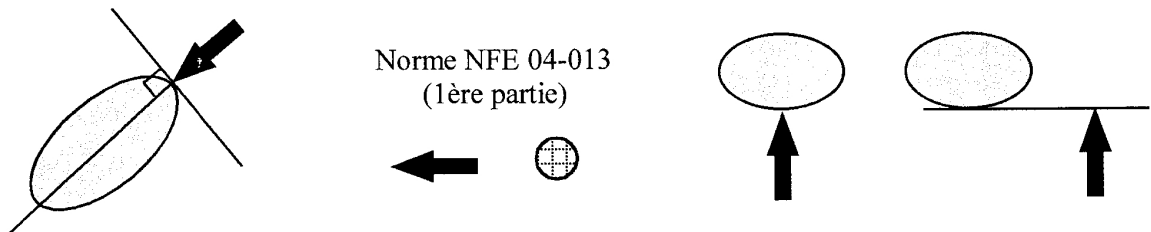


Tout mouvement d'un solide dans l'espace se décrit comme étant la combinaison de 3 translations d'axes orthogonaux et de 3 rotations autour de ces axes.

Ces 6 mouvements représentent les 6 degrés de liberté du solide.

1-2) Suppression des degrés de liberté :

Supprimer un degré de liberté, c'est supprimer une des composantes du mouvement en appliquant au solide **un contact ponctuel** (sans frottement). Ce contact sera normal à la surface du solide et sera repéré par **une normale de repérage**.



Lorsque l'on crée un point de contact pour supprimer un degré de liberté, cela s'appelle **un degré de liaison**.

Suivant la forme et l'étendue des surfaces géométriques de la pièce, il sera possible de mettre 1, 2, 3, 4, 5, 6 degrés de liaison.

1-3) Mise en position isostatique :

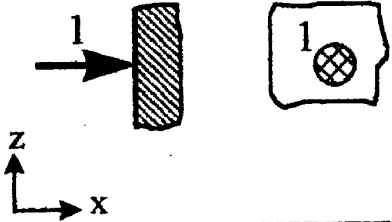

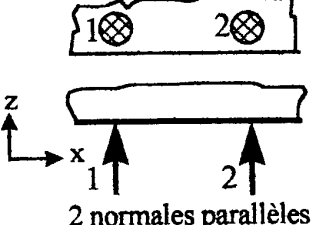
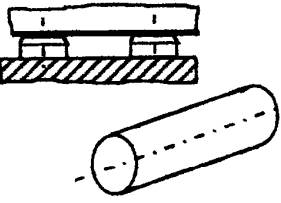
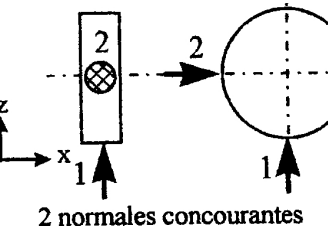
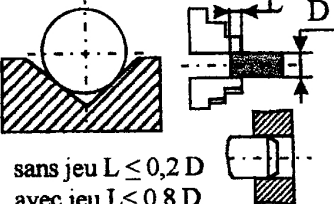
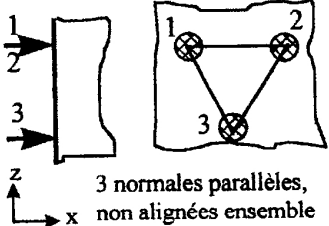
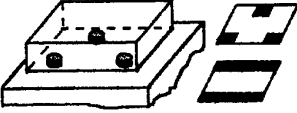
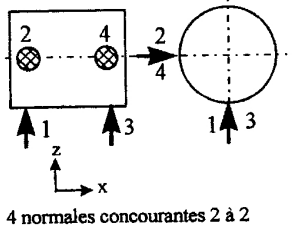
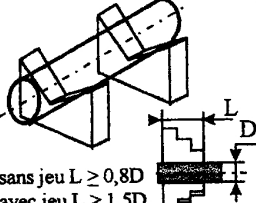
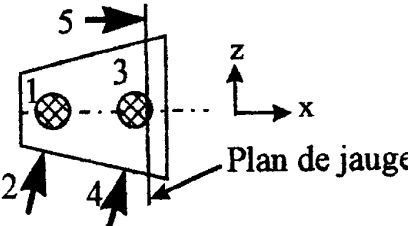
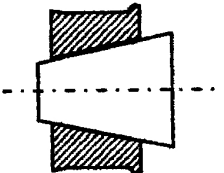
Iso : même statique : position

L'élimination des 6 degrés de liberté par 6 normales de repérage est appelé **mise en position isostatique**.

+ de 6 points de contacts : **mise en position hyperstatique**.

- de 6 points de contacts : **mise en position incomplète**.

1-4) Les différents types de liaison :

Nom de la liaison	Degrés de liberté supprimés	Représentation à l'aide des normales	Applications pratiques
Ponctuelle (Butée)			 <p>fixe réglable</p>
Linéaire rectiligne (Orientation)		 <p>2 normales parallèles</p>	
Linéaire annulaire (Centrage court)		 <p>2 normales concourantes</p>	 <p>sans jeu $L \leq 0,2 D$ avec jeu $L \leq 0,8 D$</p>
Plane (Appui plan)		 <p>3 normales parallèles, non alignées ensemble</p>	 <p>Pour une bonne stabilité, le triangle de sustentation devra être le plus grand possible</p>
Pivot glissant (Centrage long)		 <p>4 normales concourantes 2 à 2</p>	 <p>sans jeu $L \geq 0,8 D$ avec jeu $L \geq 1,5 D$</p>
Conique		 <p>Plan de jauge</p>	

2) - MISE EN POSITION DES PIÈCES MECANQUES :

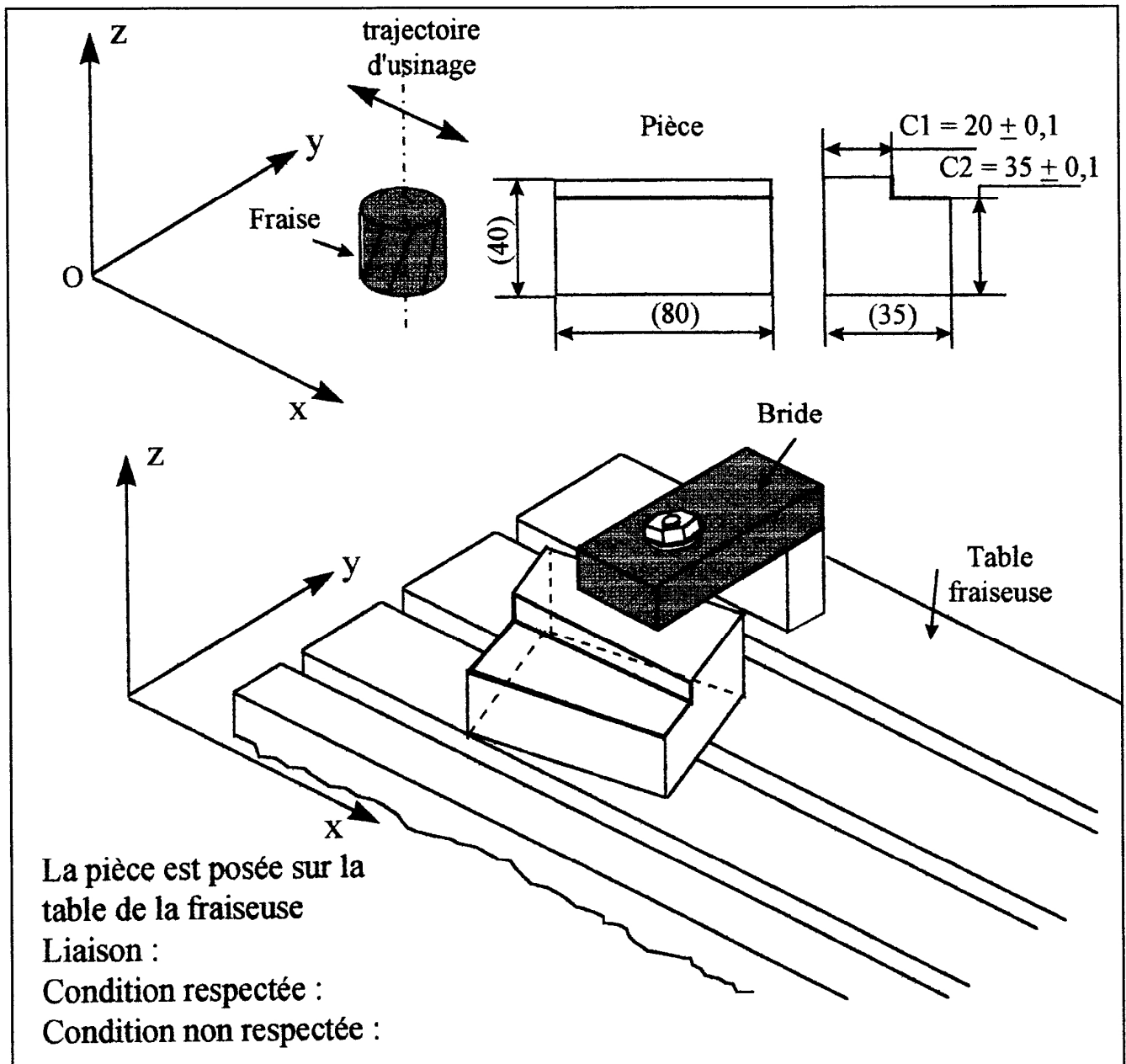
L'usinage d'une pièce sur une machine-outil impose lors de l'opération d'usinage :

- d'orienter la pièce par rapport à la trajectoire de l'outil.
- d'assurer une mise en position isostatique de la pièce pour une fabrication de série.
- de maintenir cette position au cours de l'usinage et cela quelque soit les efforts de coupe.

Ceci afin de respecter les cotes définies par le Bureau d'études lors de la fabrication de pièces en SERIE.

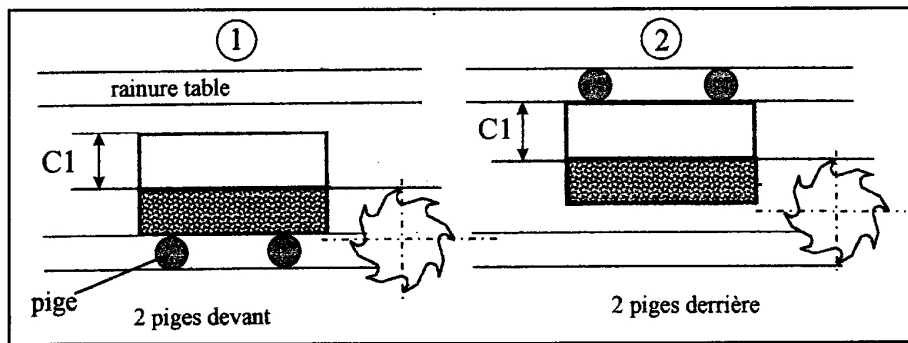
2-1) Etude de la mise en position sur une pièce :

On se propose de réaliser l'épaulement sur la pièce ci-dessous et de respecter les deux cotes C1 et C2. La fraiseuse utilisée possède un repère Oxyz dans lequel il s'agit de placer la pièce, connaissant la trajectoire d'usinage de la fraise.



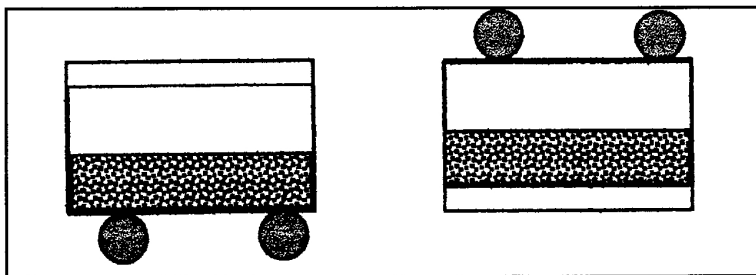
Solution : orienter la pièce par rapport aux rainures de la table

Liaison assurée :



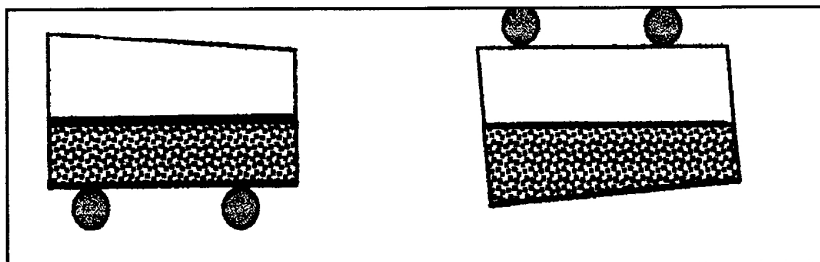
Influence des défauts des pièces brutes sur la condition C1 :

- largeur du brut : $\pm 0,3$



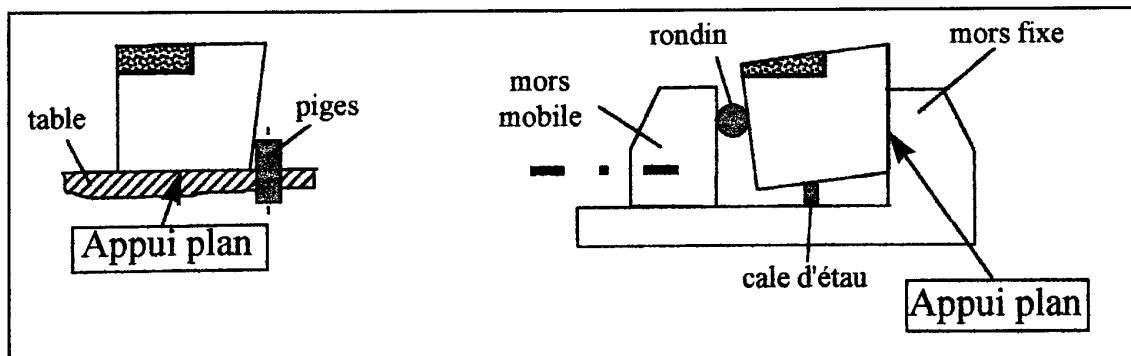
Solution retenue

- défaut de parallélisme des deux faces de 0,1



Solution retenue

- défaut de perpendicularité entre les deux faces perpendiculaires



Solution : exiger une perpendicularité de bonne qualité dans la phase précédente.
 Suivant la cotation de la pièce, choisir l'une ou l'autre des MEP.

2-2) Exemples de choix de Mise En Position :

①

②

③

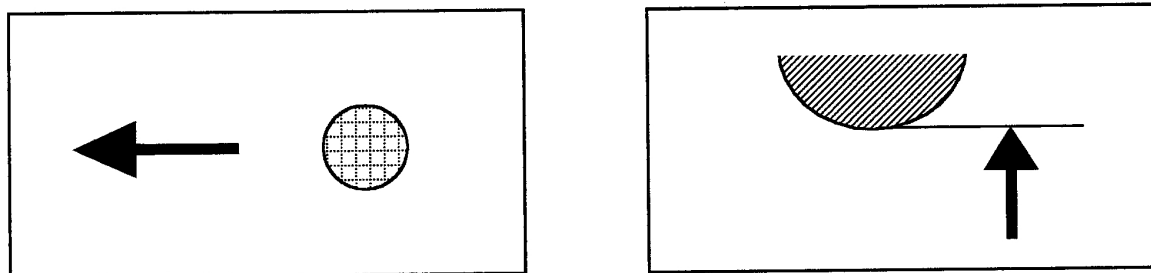
3) - SYMBOLISATION DE LA SUPPRESSION DES DEGRES DE LIBERTE :

3-1) But de la symbolisation :

La norme, pour la mise en position, dans sa première partie (ou 1er niveau) définit l'aspect qualitatif, c'est-à-dire l'aspect géométrique quant au choix des surfaces réalisant la mise en position de la pièce. Dans sa deuxième partie (ou 2e niveau) la norme définit l'aspect quantitatif, c'est-à-dire technologique quant aux choix définissant concrètement chacun des points de contact du repère de mise en position.

3-2) Le symbole de base :

Le symbole de base est une flèche avec un triangle noirci (pour qu'il soit plus visible). Le symbole de base est placé sur la surface qui servira de référence ou sur une ligne d'attache de la surface, du côté libre de la matière.



Le symbole doit toujours être perpendiculaire à la surface de référence (celle qui sert à la mise en position). Le symbole de base peut être vu en représentation projetée, dans ce cas, on le représente sous la forme d'un cercle, d'un carré ou d'un rectangle en trait fin, dont la surface est quadrillée.

3-3) Utilisation :

Le symbole de base s'utilise pour la réalisation des avant-projets de fabrication.

Un symbole de base élimine un degré de liberté, donc chaque surface recevra autant de symboles de base qu'elle pourra ou devra éliminer de degrés de liberté (dans les limites des possibilités des surfaces, plans : 3, 2 ou 1; cylindres : 4, 2 ou 1; etc...).

Commentaire :

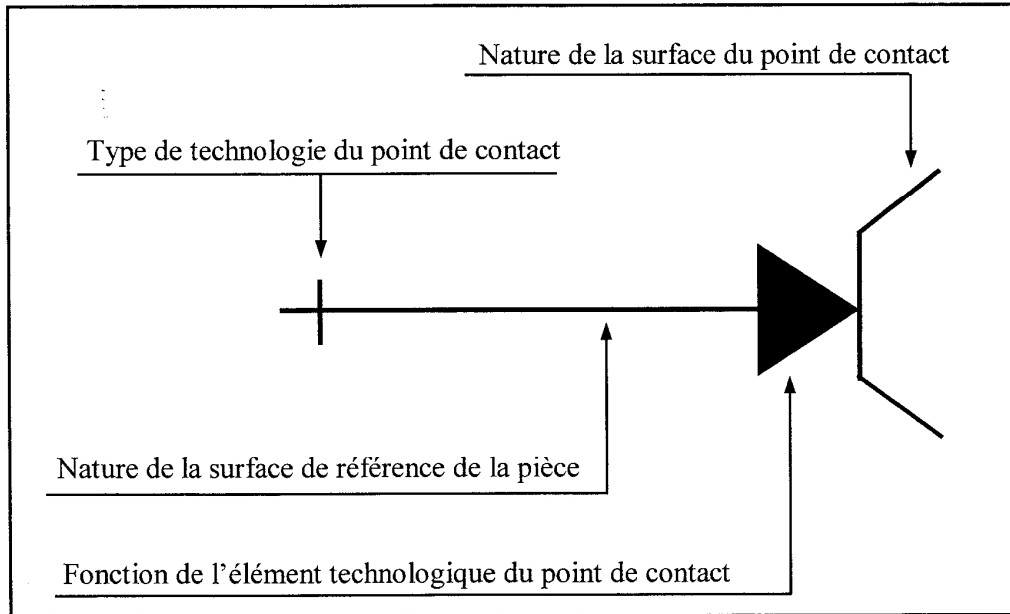
Le symbole de base est toujours représenté en trait plein (jamais de pointillé) même si celui-ci est situé derrière la pièce. On considérera que la pièce est transparente. **A partir du référentiel de mise en position, on cotera les surfaces à usiner.**

3-5) Symbolisation des éléments technologiques :

Le deuxième niveau de la norme va permettre de définir complètement le caractère physique de chacun des points de contact réalisant la mise en position en précisant :

- la fonction de l'élément technologique ,
- la nature de la surface du point de contact ,
- la nature de la surface de la pièce),
- le type de technologie .

Exemple :



La symbolisation de la deuxième partie de la norme est utilisée dans les contrats de phases (ce sont les diverses étapes explicitant la réalisation de la pièce) afin de définir totalement le processus de fabrication de la pièce.

3-5-1) Symbolisation de la fonction de l'élément technologique :

Fonction	Symbole	Représentation projetée	
Mise en position rigoureuse		Appui 	Centreur complet dégagé
Maintien en position Prépositionnement Opposition aux déformations			

3-5-2) Symbolisation de la nature de la surface de référence :

Nature de la surface de référence	Symbole du contact		
Surface usinée		un trait	
Surface brute		deux traits	

3-5-3) Symbolisation de la nature de la surface du point de contact :

Nature du contact	Symbole	Nature du contact	Symbole	Nature du contact	Symbole
Touche plate		Touche dégagée		Palonnier	
Touche striée		Pointe fixe		Cuvette	
Touche bombée		Pointe tournante		Vé	

3-5-4) Symbolisation du type de technologie du point de contact :

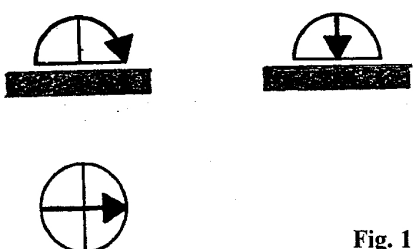
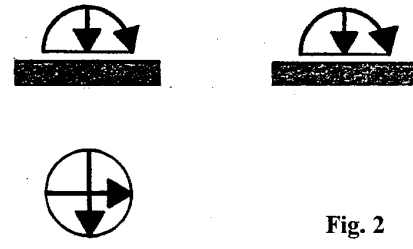
Type de technologie	Symbole	
Appui fixe		
Centrage fixe		
Système à serrage		
Système à serrage concentrique		
Système de soutien irréversible		
Système de soutien réversible		

Liaison particulière : liaison d'orientation

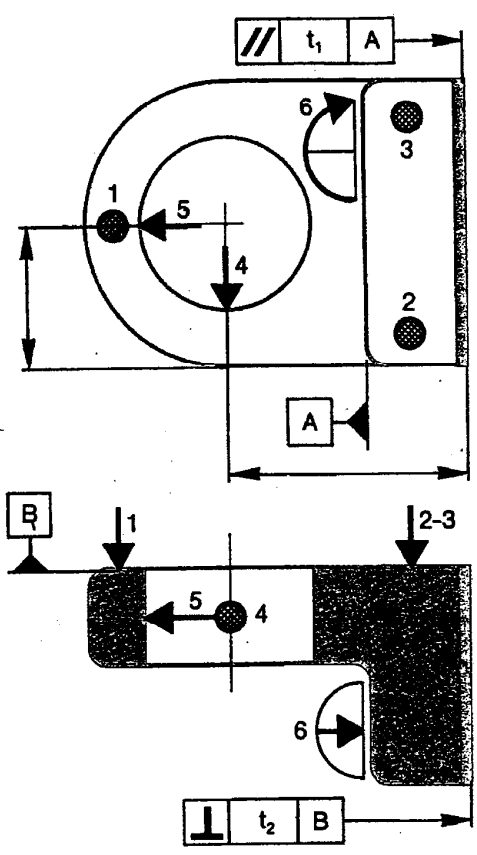
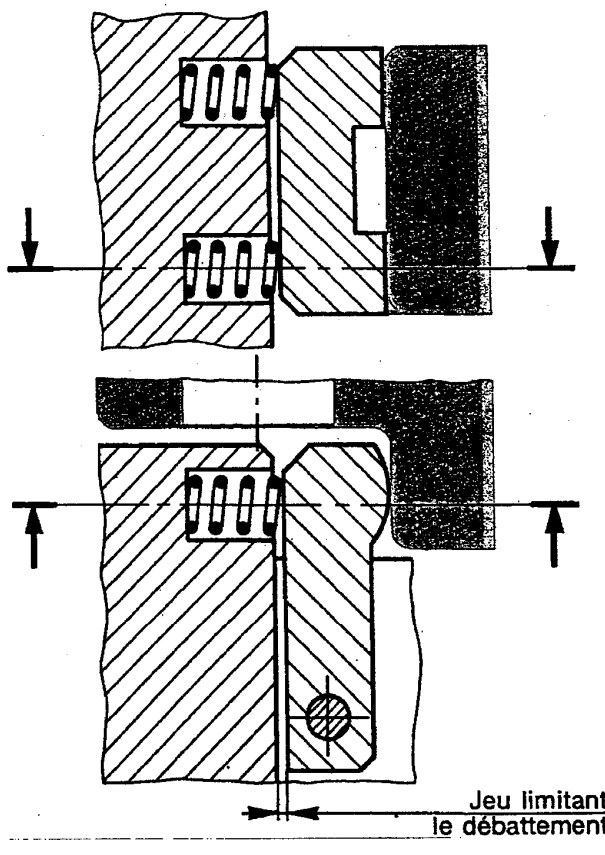
Cette liaison permet de respecter directement une cote angulaire ou une spécification géométrique d'orientation (inclinaison, parallélisme, perpendicularité). A elle seule, elle élimine un degré de liberté en rotation.

Le symbole (1ère partie de la norme) est représenté figure 1. Il se place du côté libre de la matière, sur la surface spécifiée ou éventuellement sur une ligne d'attache.

Pour l'orientation d'un plan, on peut indiquer, sur le même symbole, l'élimination des deux rotations orthogonales (figure 2).

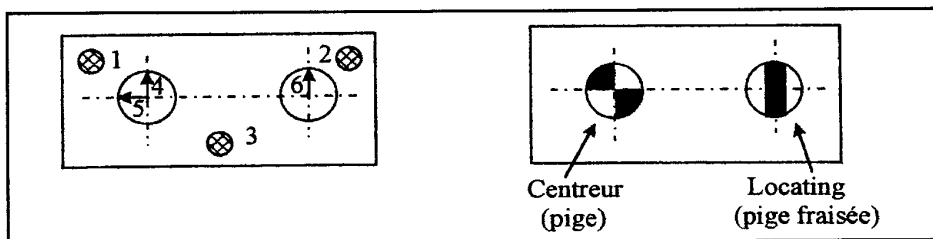
Symbolisation de l'élimination directe d'un degré de liberté en rotation	Symbolisation de l'élimination de deux degrés de liberté en rotation orthogonaux
 <p style="text-align: center;">Fig. 1</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. 2</p>

La symbolisation technologique (2ème partie de la norme) correspondante est un "orienteur".

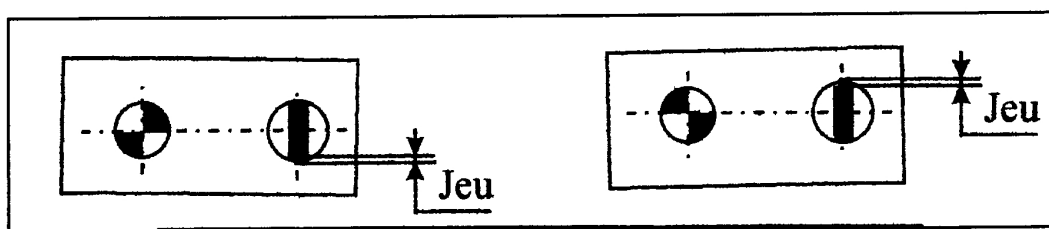
EXEMPLE D'APPLICATION	
Symbolisation	Exemple de solution technologique
	 <p style="text-align: right;">Jeu limitant le débattement</p>

Montage centreur-locating

Ce type de mise en position est couramment utilisé pour mettre une pièce en position. Il s'agit d'une mise en position par appui-plan, centrage court et liaison ponctuelle. Pour que le montage reste isostatique, il ne faut pas utiliser deux centreur, il faut une vraie liaison ponctuelle: pour cela il faut mettre un locating: c'est une pige fraisée qui assure un contact suivant une seule direction.



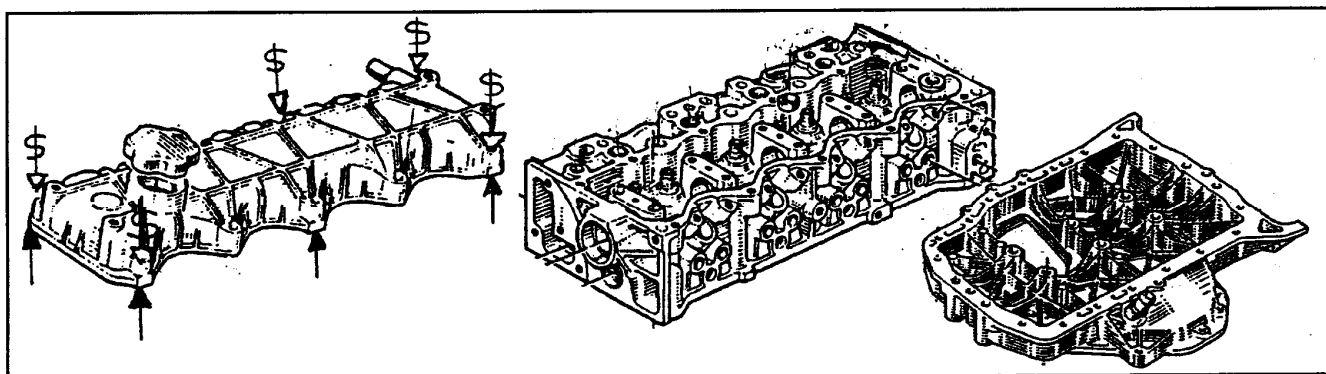
Compte-tenu des tolérances sur le diamètre des trous dans la pièce, il est difficile au locating de toucher des deux cotés (contact bilatéral). Il y a donc un jeu, on admet alors une position indifférente d'appui. Il y a donc une légère imprécision de mise en position (même chose pour le centreur).



5) - NOTION D'HYPERSTATISME :

Dans certains cas, on réalise volontairement des montages hyperstatiques.

Exemple 1 : pièce du type "Culasse" (grande et déformable)

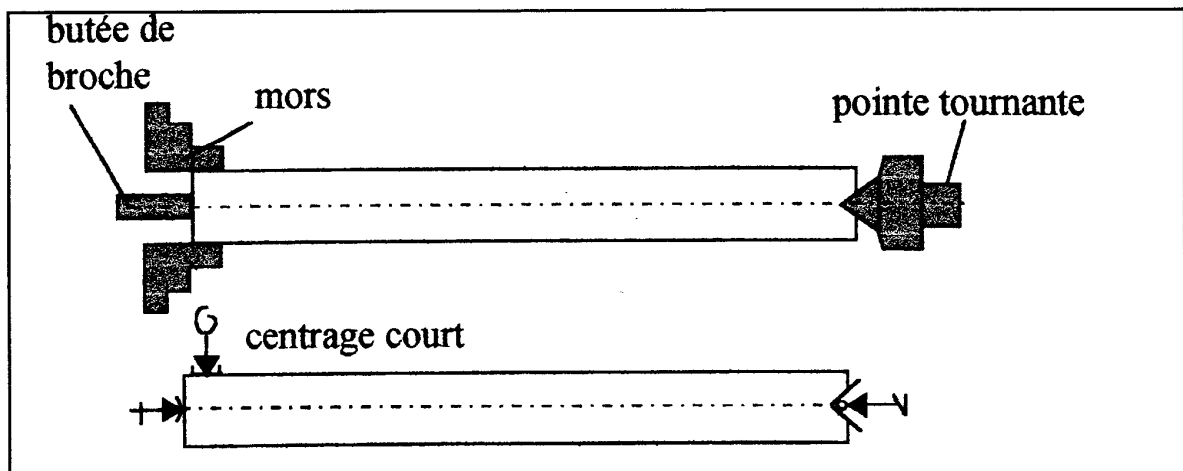


On place plus de 3 points d'appuis pour réaliser l'appui plan afin d'éviter la déformation de la pièce lors de l'usinage. Par le serrage en plusieurs points, on déforme légèrement la pièce pour qu'elle touche sur tous les appuis. Autre solution : utilisation d'appuis réglables.

Hyperstatisme toléré par déformation

Exemple 2: Montage avec pointe tournante (chariotage de pièces longues)

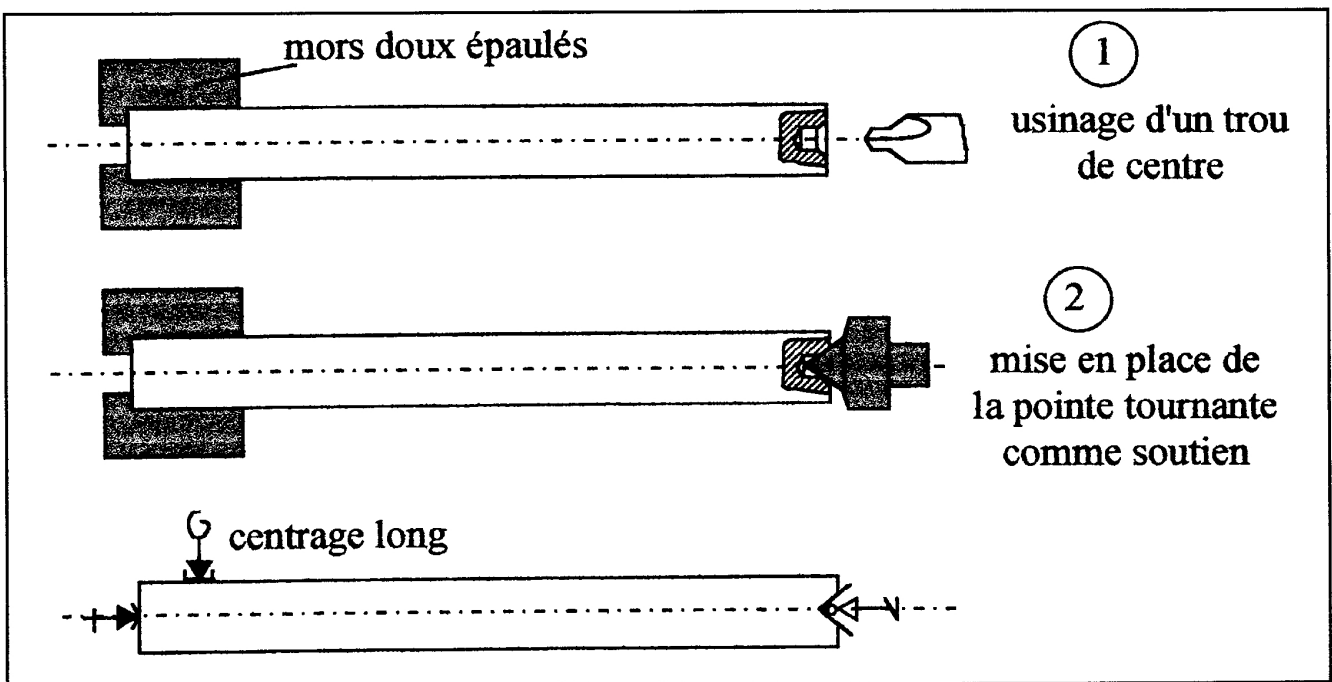
1er cas : Montage mixte (le trou de centre est fait au préalable)



Le montage est isostatique (en faisant abstraction du degré de liberté en rotation).

2ème cas : Montage en centrage long avec soutien

Le montage est hyperstatique mais l'axe du trou de centre est coaxial à l'axe du centrage long.



Hyperstatisme toléré par procédé d'usinage

Attention, en cas de démontage, il y aura un défaut de reprise et le trou de centre ne sera plus dans l'axe, il y aura détérioration de la pointe tournante.

La solution est alors de se reprendre comme dans le cas 1 mais l'axe ne sera plus le même.

6) - REALISATION DE LA LIAISON PIECE-MACHINE :

Actuellement en production, il existe trois types de porte-pièces :

6-1) Les portes-pièces standards :

Etau, mandrin, diviseur, mandrin à pinces,

- Avantages :

- pratiques à mettre en oeuvre.
- répondent bien à l'usinage de pièces aux formes géométriques simples (cylindres, parallélépipède rectangle, ...).

- Inconvénients :

- ne permettent pas toutes les prises de pièces.
- sont difficilement modifiables.

6-2) Les portes-pièces dédiés :

Ils sont spécifiques à chaque phase, ils sont conçus et fabriqués (usinés, assemblés, mécano-soudés) puis détruits à la fin de la durée de vie de fabrication de la pièce. Cette solution est valable pour des séries renouvelables ou des grandes séries.

- Avantages :

- répondent aux impératifs des grandes séries.
- peuvent s'adapter aux problèmes particuliers d'une pièce (vibrations, efforts de coupe, déformations, ...).
- ne nécessitent pas un gros investissement au départ.

- Inconvénients :

- temps d'étude, de réalisation et de mise au point longs et donc délai important avant exploitation du montage.
- difficultés de modifications si changement de morphologie de la pièce.
- coûts de stockage et de gestion important.
- nécessite un personnel hautement qualifié pour la réalisation ou sous-traitance.

6-3) Les portes-pièces modulaires :

En acier (ou en fonte) traité et rectifié, ils permettent de réaliser des montages comme un mécano et sont utilisés pour des petites séries renouvelables ou non et pour de l'unitaire.

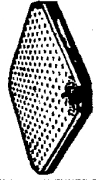

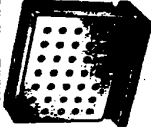
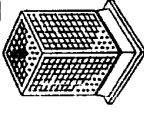
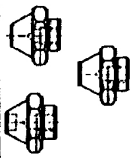












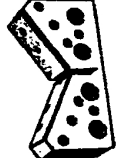
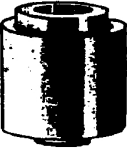






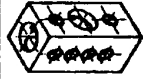







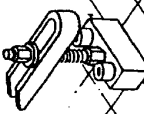
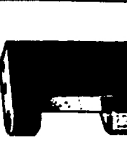
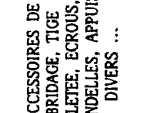
- Avantages :

- meilleure flexibilité (adaptabilité aux modifications de la production).
- temps de réalisation court (rapport de 1/10 entre dédié et modulaire).
- possibilité de gestion et de conception assisté par ordinateur (bibliothèque d'éléments standards).
- facilité de mise en oeuvre (analogue à du LEGO).
- intéressant pour les travaux de sous-traitance.
- coûts de stockage et de gestion réduits.

- Inconvénients :

- au départ, investissement important en éléments modulaires.
- difficulté de reproduire avec fidélité des montages identiques (reprise de série, décalage d'origine sur machine à commande numérique);
- précision du montage fonction de l'empilage des divers éléments (dispersions).

Exemple d'éléments modulaires :

éléments de base		appuis ponctuels simples			appuis linéaires doubles	
 Réf. 2006	 Réf. 2026	 Réf. 2016	 Réf. 2021	 Réf. 208	 Réf. 211	 Réf. 2116
 Réf. 2111	 Réf. 781	 Réf. 2136		 Réf. 2106	 Page 18	 Réf. 2206
 Réf. 2236						
appuis combinés		éléments de bridage			anti-vibratil	
 Réf. 2156	 Réf. 2136	 Réf. 2126	 Réf. 2206	 Réf. 411	 Réf. 401	 Réf. 409
 Réf. 405	 Réf. 416	 Réf. 236	 Réf. 238			
supports d'appuis		supports de bridage			accessoires de bridage	
 Réf. 2128	 Réf. 2166	 Réf. 2146	 Réf. 2161	 Réf. 2041	 Réf. 2216	 Réf. 2111
 Réf. 2306	 Réf. 2331	 Réf. 2316	 Réf. 215			
						référence norelem

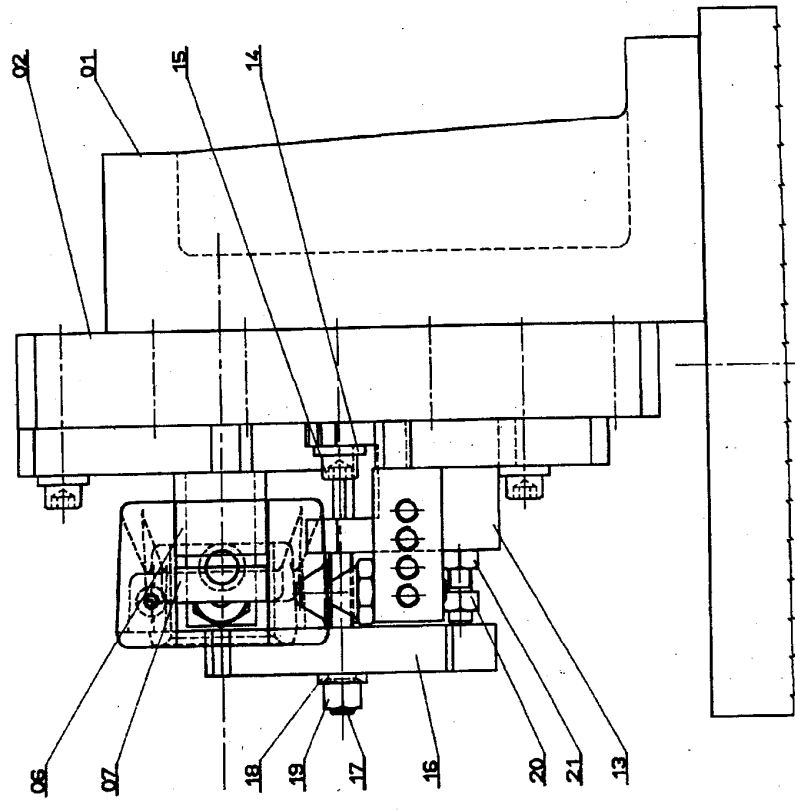
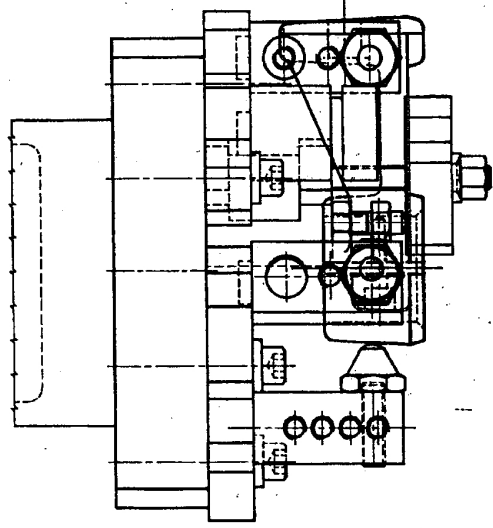
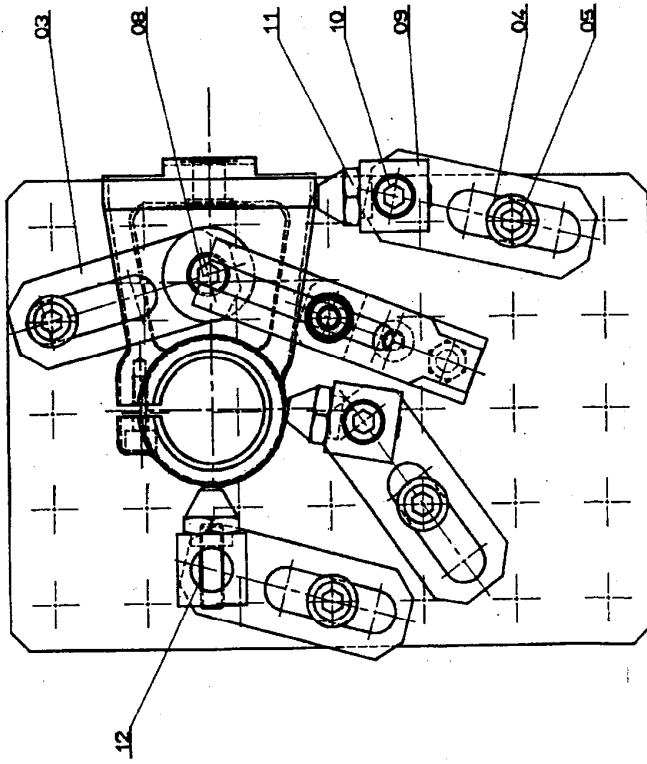
Classification fonctionnelle des éléments

LES PORTE-PIÈCES MODULAIRES

Exemple de montage : poupée de tour à bois

		CONTRAT DE PHASE n° 20					
Ensemble: <u>TOUR A BOIS</u>		Nombre: _____		Machine: _____			
Sous ensemble: _____		Matériau: <u>A-U8S</u>		_____			
Pièce: <u>POUPEE FIXE</u>		Brut: <u>Y20</u>		_____			
n°	Opérations et réglages	Outils/Elements modulaires		V	N	F	A
		Outils					
1	Centrer 07	Foret à centrer					
2	Percer 07	Foret Ø 14					
3	Lamer 08,09	Outil à lamer éclipseable					
4	Fraiser 01,02,03	Fraise 2 tailles Ø 30					
5	Rotation du plateau de 90°						
6	Fraiser 05	Fraise 2 tailles Ø 20					
7	Aléser ébauche 04	barre d'alésage					
8	Aléser finition 04	Alésoir Ø 45					
9	Rotation du plateau de 90°						
10	Centrer 10	Foret à centrer série longue					
11	Percer 10	Foret Ø 5					
12	Lamer 12,13	Fraise à lamer					
13	Tarauder 11	Taraud M6					
14	Fraiser 14,15	Fraise scie Ø 160 épais. 5					

GMP2D



NOMENCLATURE <BMP2D> Version : B802.1
 Fichier dessin : MONTAGE
 Dénomination du plan : : 3 poutres
 Format : : A1H (840 x 594)
 Echelle : : 1

NIV	ELM	T	NBR	DESIGNATION	REFERENCE
1	2	1	1	Equerre coulissante nervure	NLM 2256 010 016
2	3	4	1	Plaque de liaison	NLM 2028 010 010
3	3	4	1	Support universel	NLM 2146 010 003
4	4	4	1	Douille de centrage à collerette	NLM 2720 010 026 29
5	5	4	1	Vis Chc M10-40	NLM 716 100 046 29
6	6	1	1	Appui cylindrique fixe	NLM 2116 010 010
7	7	1	1	Entretoise	NLM 2116 010 010
8	8	1	1	Vis Chc M10-40	NLM 716 100 046 29
9	9	1	1	Vis Chc M10-25	NLM 2128 010 06
10	10	3	1	Vis Chc M10-25	NLM 208 010 015
11	11	1	1	Tête d'appui type 2	NLM 2310 010 005
12	12	3	1	Boujon M10-35	NLM 210 010 014
13	13	1	1	Entretoise de bridage	NLM 2720 010 035 29
14	14	1	1	Douille de centrage à collerette	NLM 413 100
15	15	1	1	Vis Chc M10-35	NLM 701 100 080
16	16	1	1	Bride ouverte à nez	NLM 742 100
17	17	1	1	Boujon M10-35	NLM 210 010 014
18	18	1	1	Appui à portées réglable M10	NLM 726 100
19	19	1	1	Ecrin à portées réglable	NLM 215 100
20	20	1	1	Appui de bride réglable	
21	21	1	1	Ecrin H, M10, 8	

POUR LE FIXE	101	1	A-UBS	Y20
Designation	No de pièce à fournir			
	No de pièce à livrer			
	Moins			
	DOCUMENTA / 6			

ATTENTION Dessin réalisé par Service L.C. 2

7) - REALISATION DES PORTES-PIECES :

7-1) Eléments de mise en position :

Qualités exigées :

- assurer la mise en position isostatique de la pièce.
- résister aux efforts de coupe, de serrage et aux chocs.
- résister à l'usure (usinage de toute une série de pièces).
- permettre le montage et le démontage rapide des pièces.

Eléments courants :

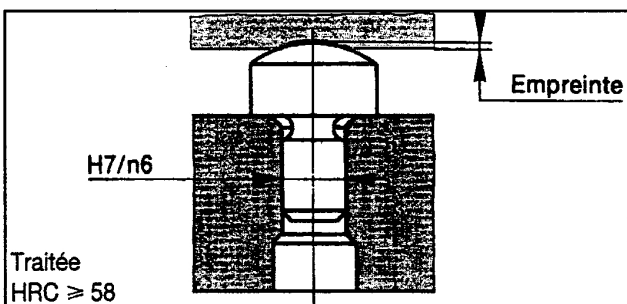
- Matérialisation des appuis ponctuels, linéaires rectilignes, plans :

- bornes planes (sur surfaces usinées) $\varnothing 12$ en C12, cémentées, trempées et rectifiées après montage.
- bornes bombées, striées (sur surfaces brutes), utilisation de bornes réglables.

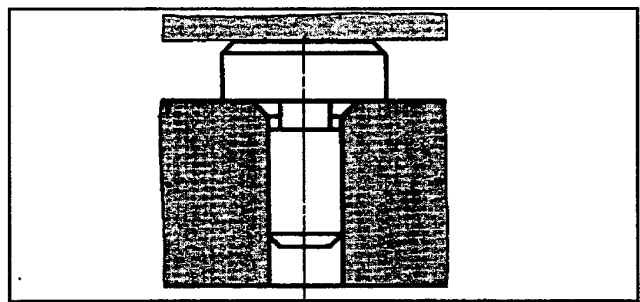
Pour un appui linéaire rectiligne ou plan, les 2 ou 3 bornes devront être rectifiées simultanément après montage (possibilité de mettre une étroite bande mais attention au défaut de forme).

Parfois l'appui ponctuel sera remplacé par un appui palonné (dans le cas de grande surface plane).

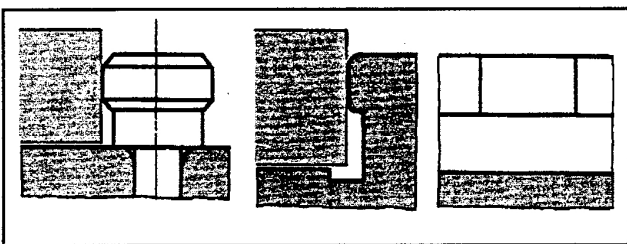
Touche bombée



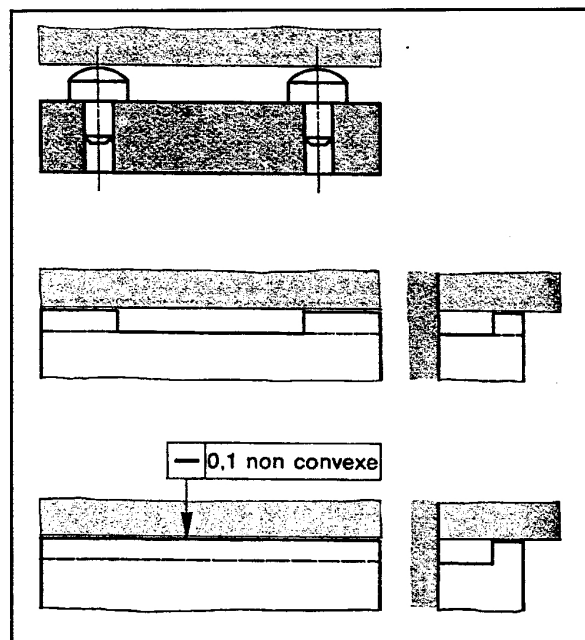
Touche plane



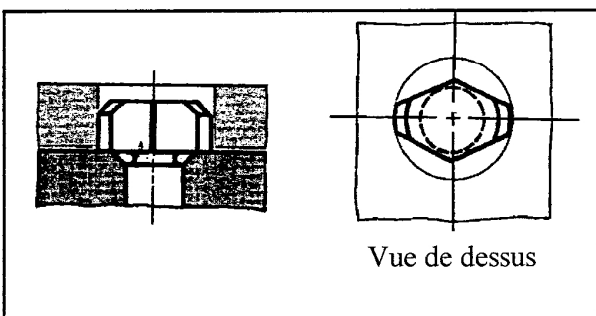
Butées



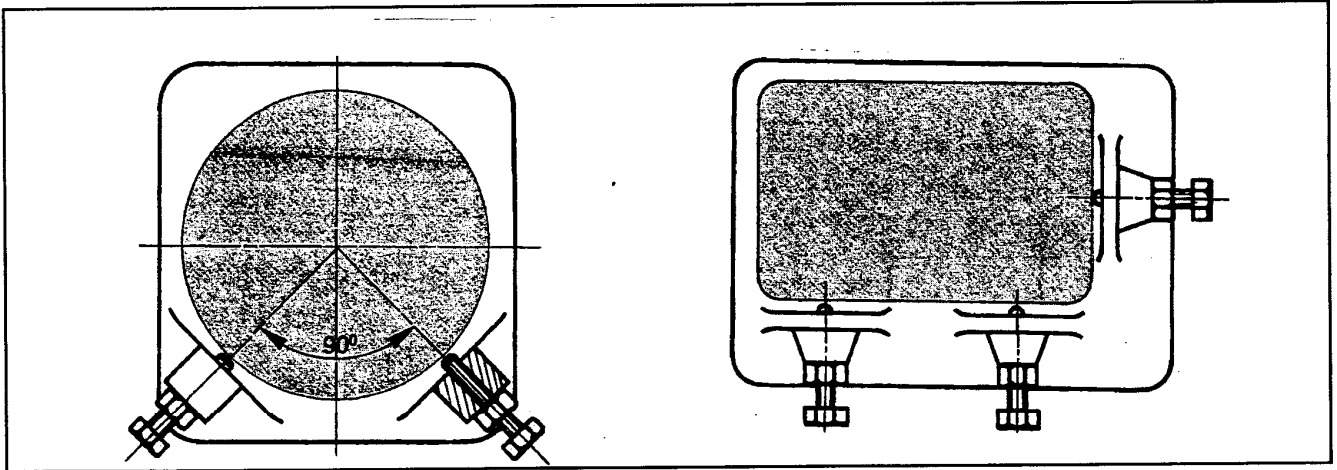
Appuis linéaires fixes



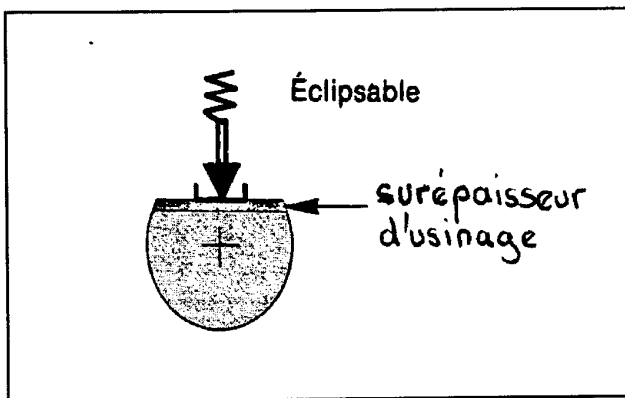
Locating



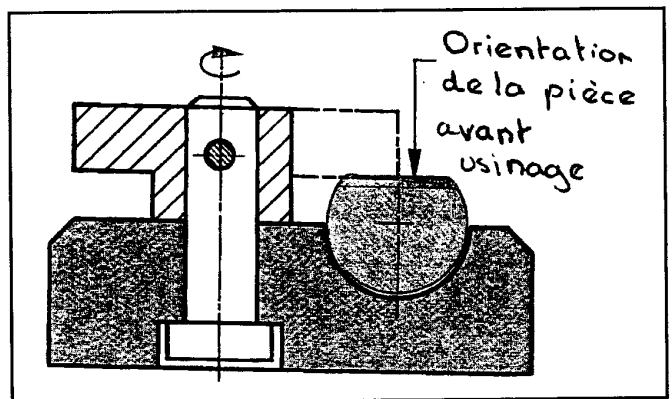
Appuis linéaires réglables



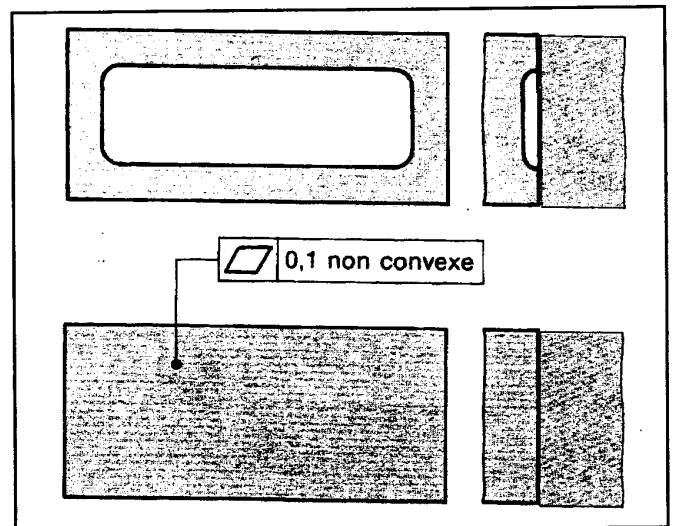
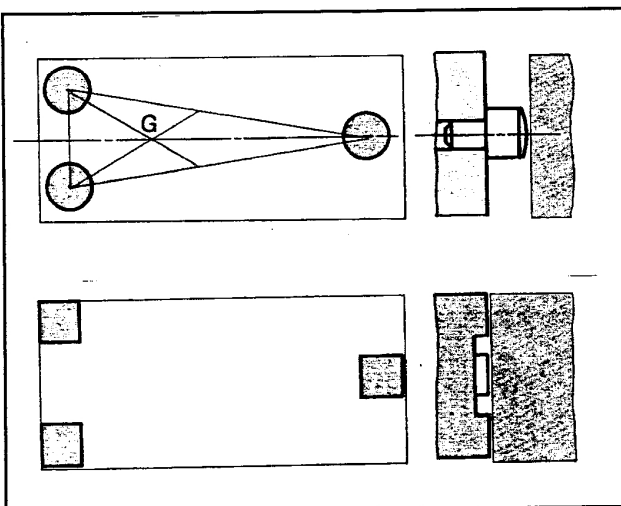
Appuis linéaires éclipçables



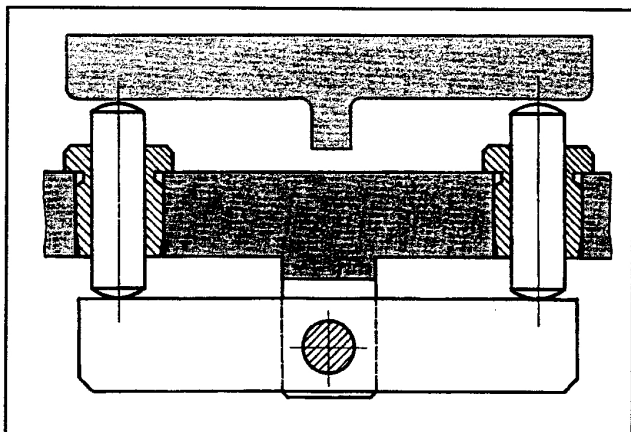
Exemple de solution technologique



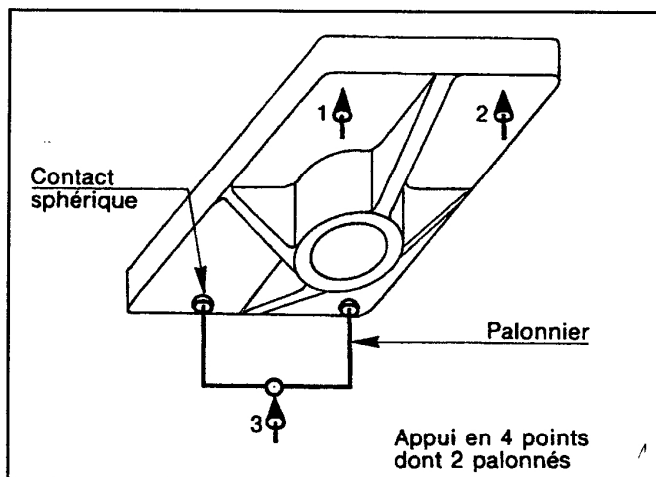
Appuis plans



Principe d'un appui palonné



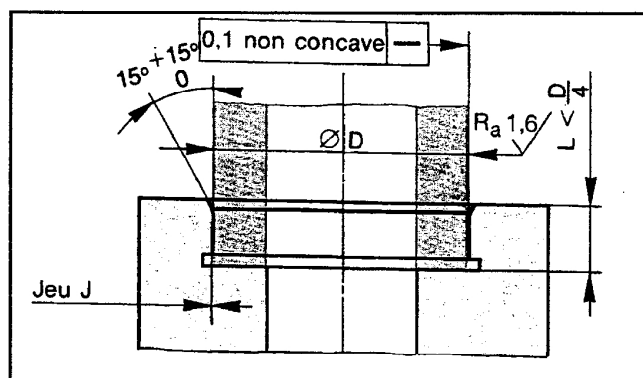
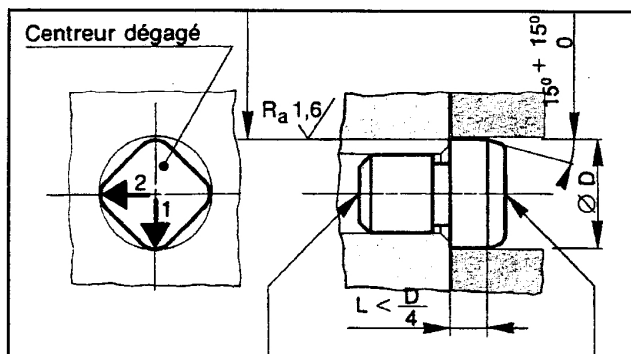
Exemple de solution technologique



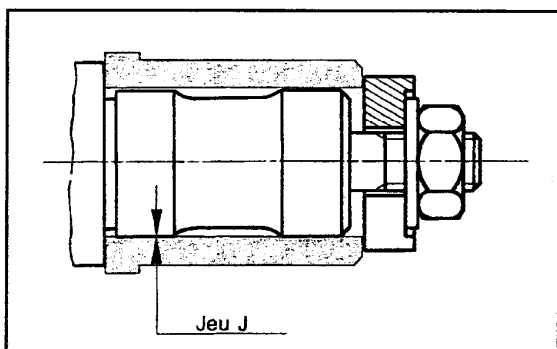
- Matérialisation des liaisons linéaires circulaires et pivot glissant :

- centreurs fixes pour arbres ou alésages.
- serrages concentriques.
- pinces, mandrins expansibles.
- vés pour les arbres.

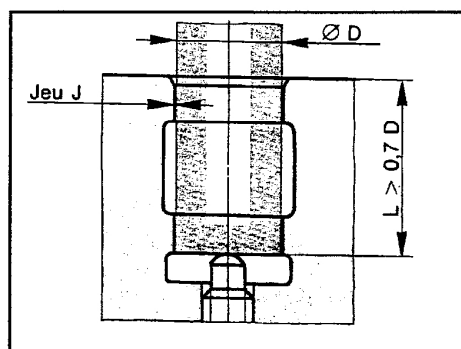
Centreurs courts



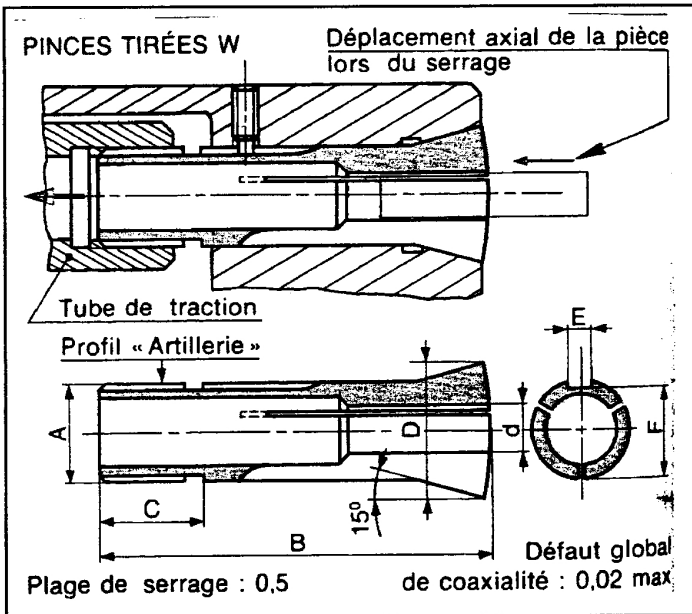
Centreur long cylindrique



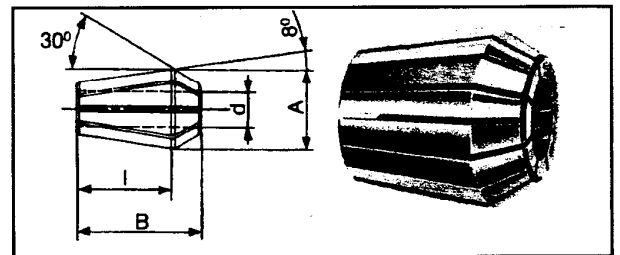
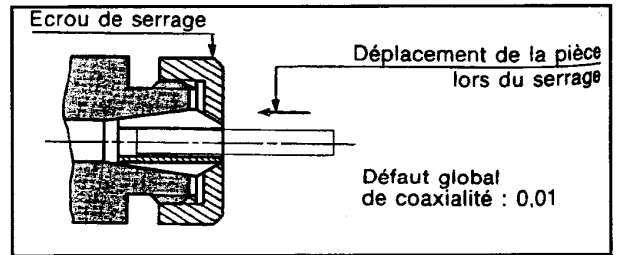
Centreur long



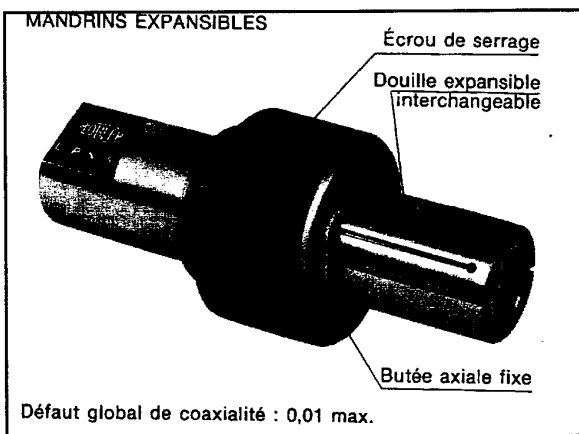
Pinces tirées W



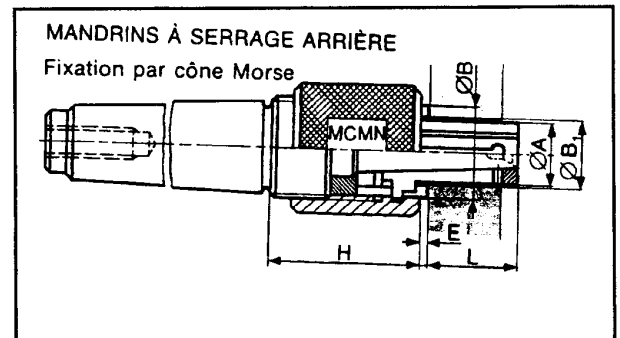
Pinces biconiques



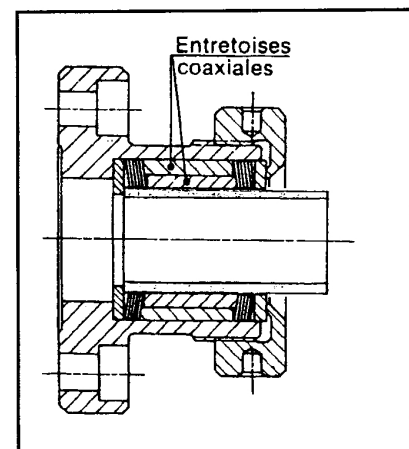
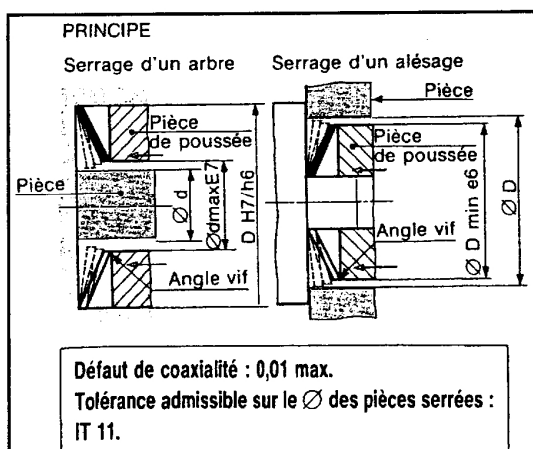
Mandrins expansibles



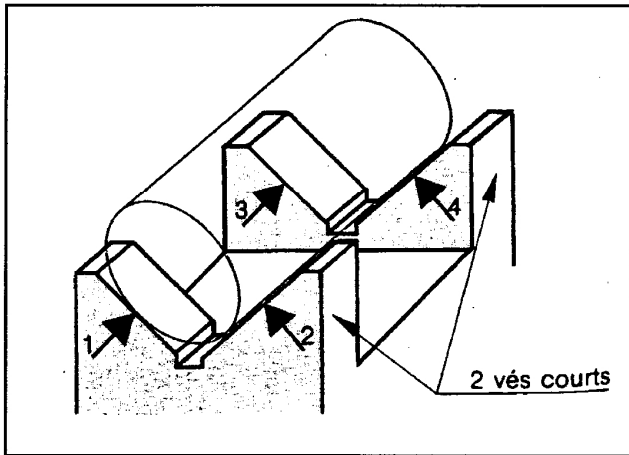
Mandrins à serrage arrière



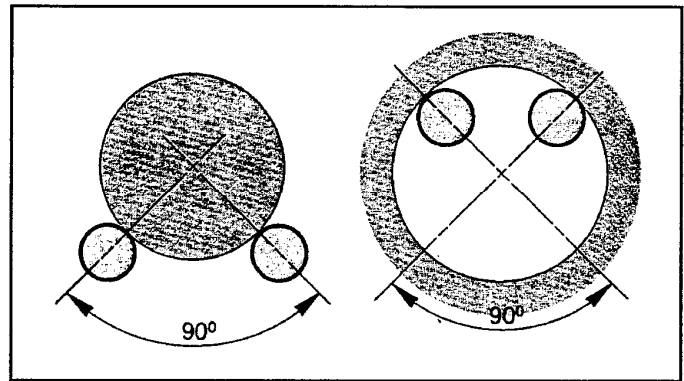
Système Ringspann



Vés de centrage

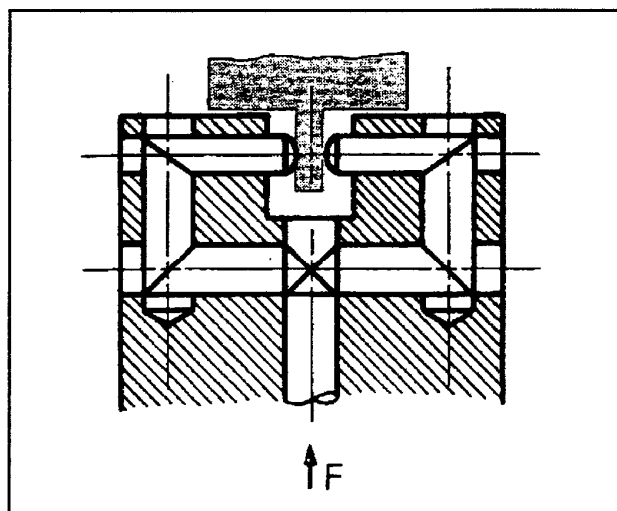
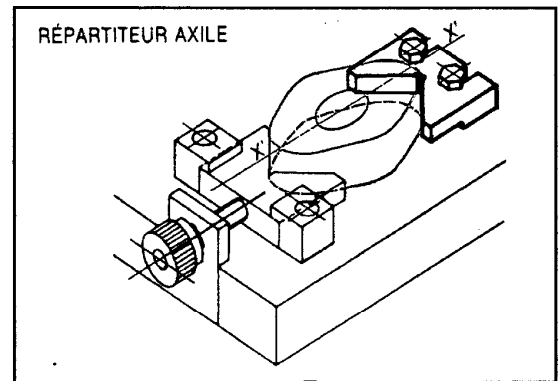
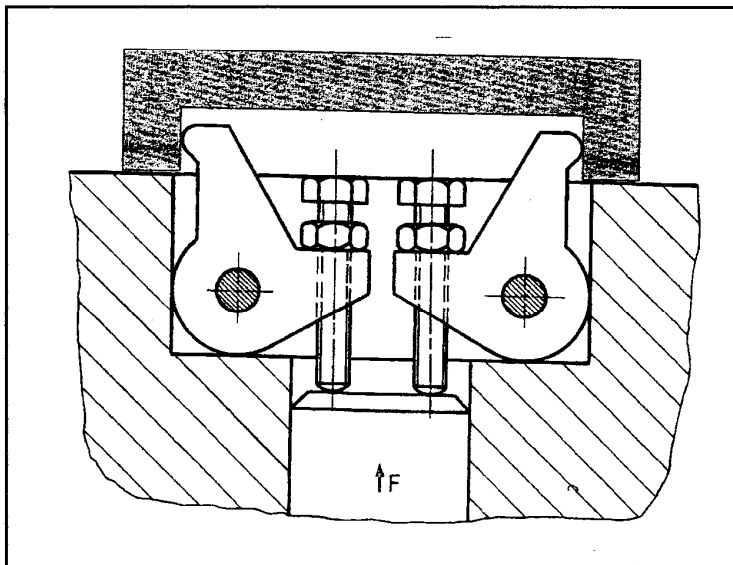


Matérialisation d'un vé par 2 broches



Afin de situer un élément d'une pièce en partageant de façon sensiblement égale la matière autour de cet élément, il est souhaitable d'utiliser des répartiteurs.

Répartiteur axiale



7 - 2) Eléments de serrage :

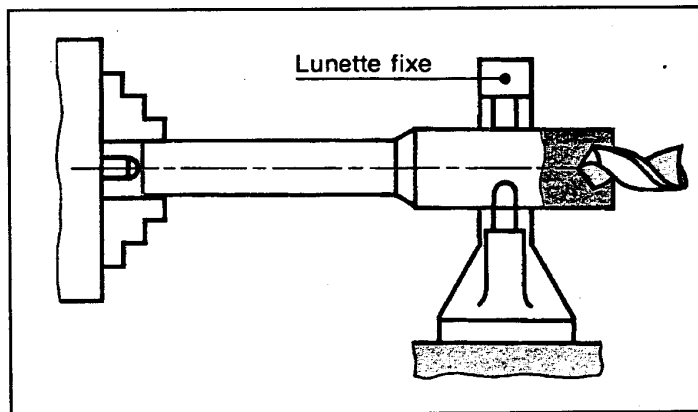
Qualités exigées :

- fournir un effort suffisant pour maintenir, sans la déformer, la pièce contre ses appuis.
- avoir une certaine rapidité d'action.
- avoir un effacement suffisant pour ne pas gêner le montage des pièces ainsi que le nettoyage du montage.

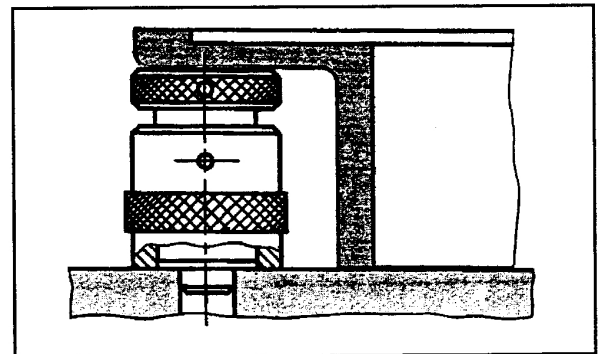
Maintien des pièces sans déformation :

- le serrage doit agir à l'opposé de la surface de référence primaire et au droit d'un appui réel pour éviter les déformations.
- l'effort de serrage doit être suffisant, mais sans excès, il est recommandé de calculer cet effort en fonction des efforts de coupe sur la pièce (utilisation d'une clé dynamométrique).
- Le système de serrage doit être irréversible.
- forme de l'élément d'immobilisation en contact avec la pièce :
 - surfaces brutes : appui réduit bombé ou strié pour augmenter l'adhérence.
 - surfaces usinées finies : appuis articulé ou rotule, de protée suffisante pour ne pas abîmer la surface. Pour les surfaces fragiles intercaler une plaquette en métal tendre.
- si le maintien est insuffisant, il faut utiliser des appuis secondaires.

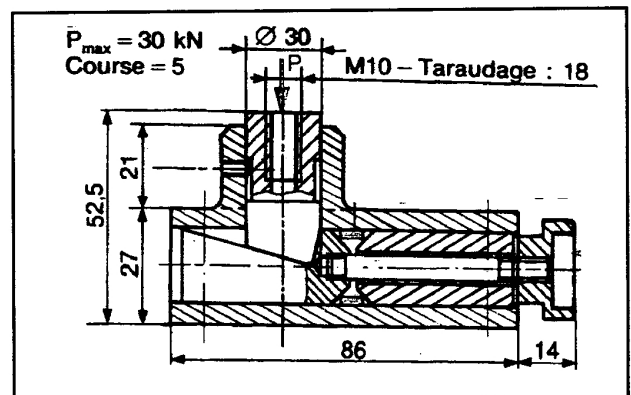
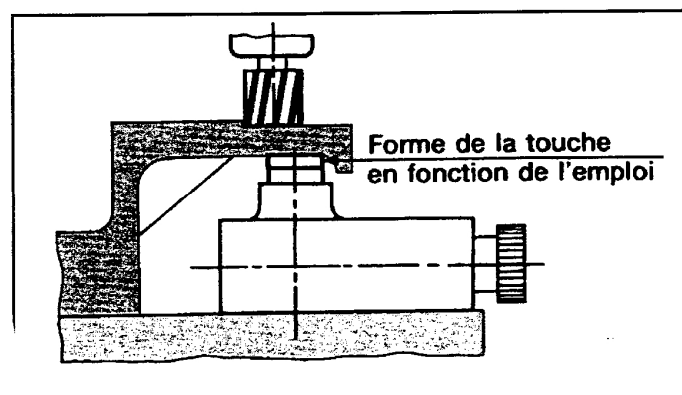
Lunette fixe



Vérin d'appui



Vérin support horizontal



- Systèmes de serrage :

- Filetages et rampes hélicidales :

- Avantages :

- force développée importante (dépend du diamètre nominal, du pas, du moment appliqué, du rendement du système/coefficient de frottement).
- course utile importante.
- bonne résistance aux vibrations.
- irréversibilité fonction de l'inclinaison de l'hélice.
- exécution relativement économique.

- Inconvénients :

- action lente (fonction du pas).
- effort de serrage variable suivant l'opérateur (clé dynamométrique).

$$F \cdot L = N \cdot r \cdot \text{tg}(\alpha + \phi)$$

F : effort tangentiel

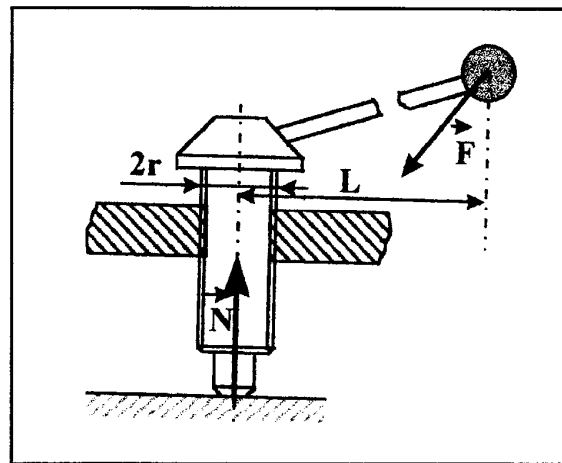
L : longueur du bras de levier

r : rayon de la vis

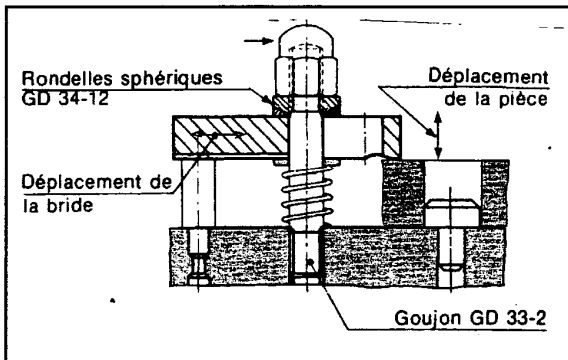
N : effort normal

α : angle d'inclinaison de l'hélice

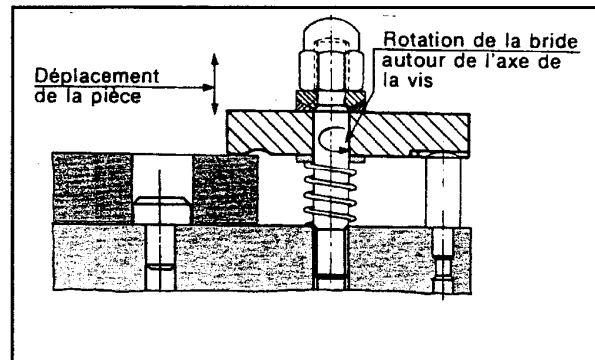
ϕ : angle de frottement $\text{tg } \phi = 0,1$



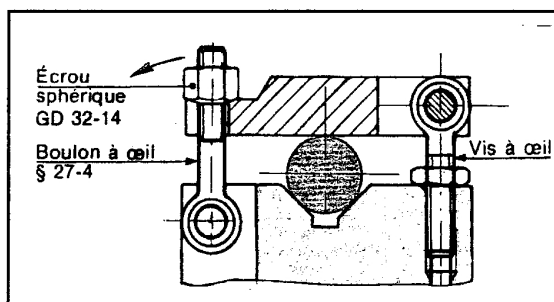
Bride coulissante



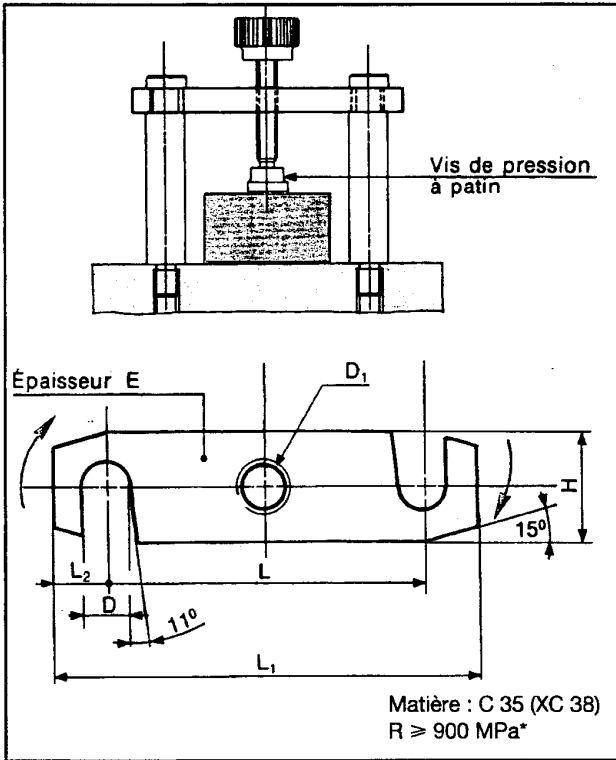
Bride pivotante



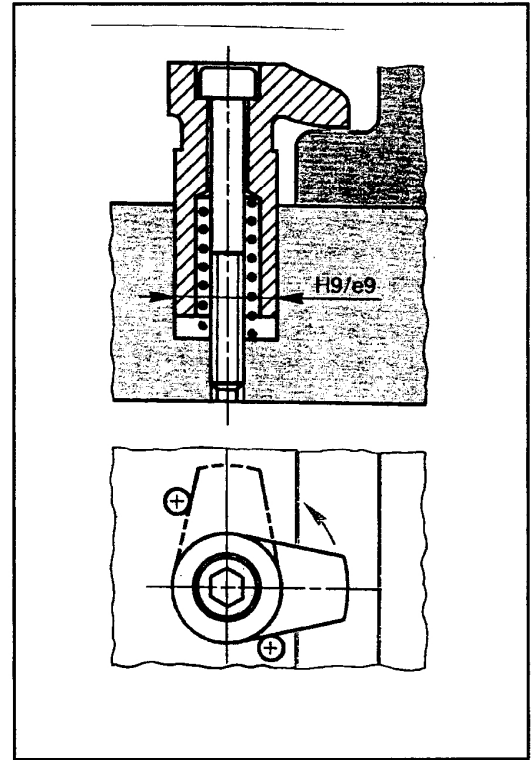
Bride articulée



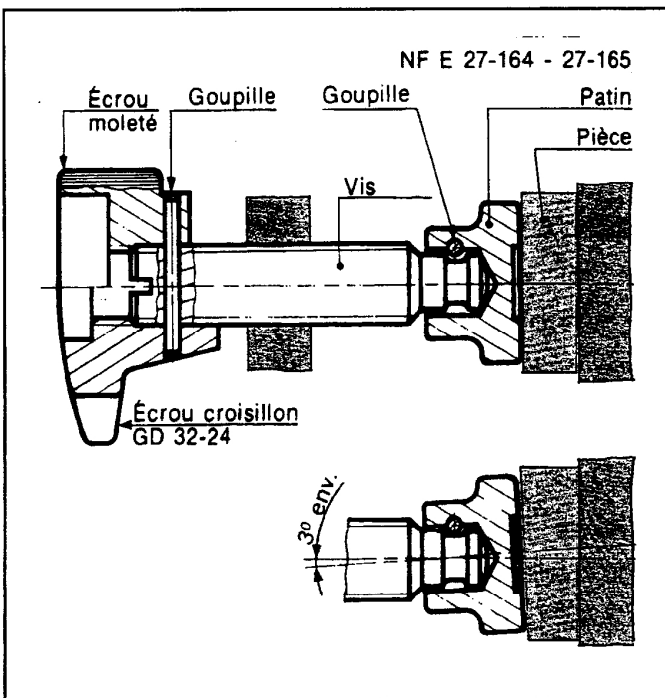
Bride pivotante démontable



Crochet

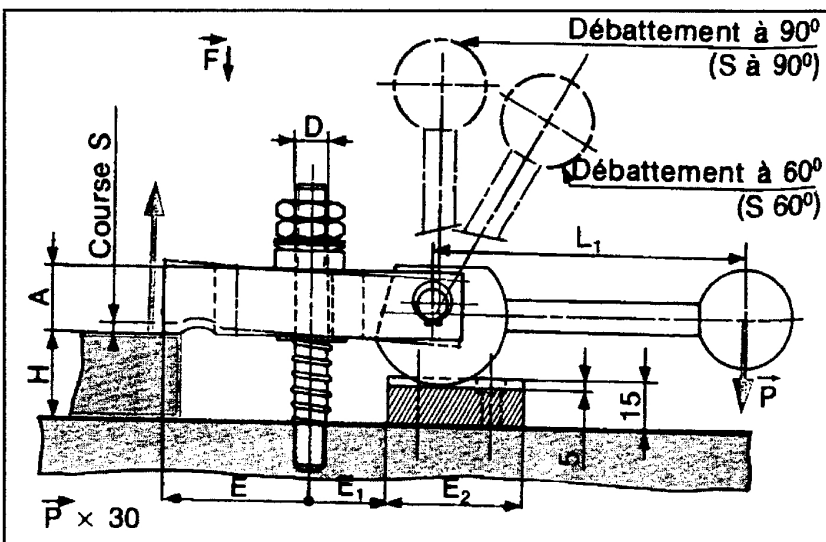
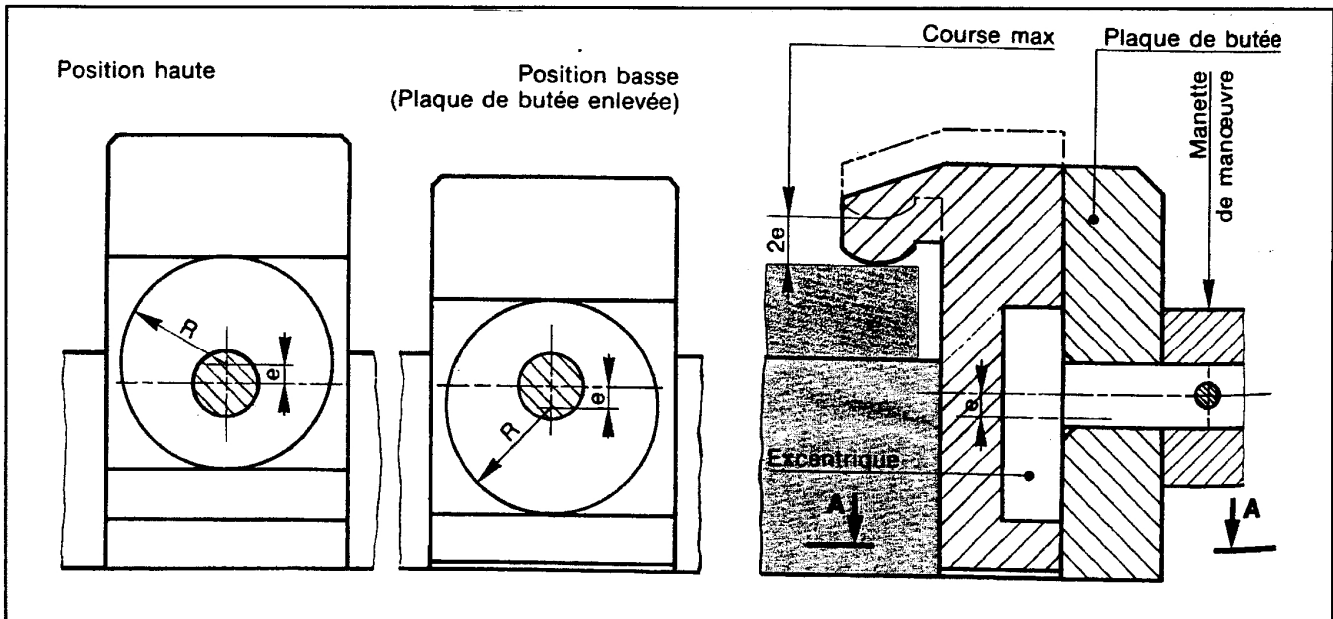


Vis de pression à patin



- Excentriques et cames

Excentrique arbre



- **Avantages :**

- force développée importante.
- action rapide.
- économique sous réserve d'une standardisation.

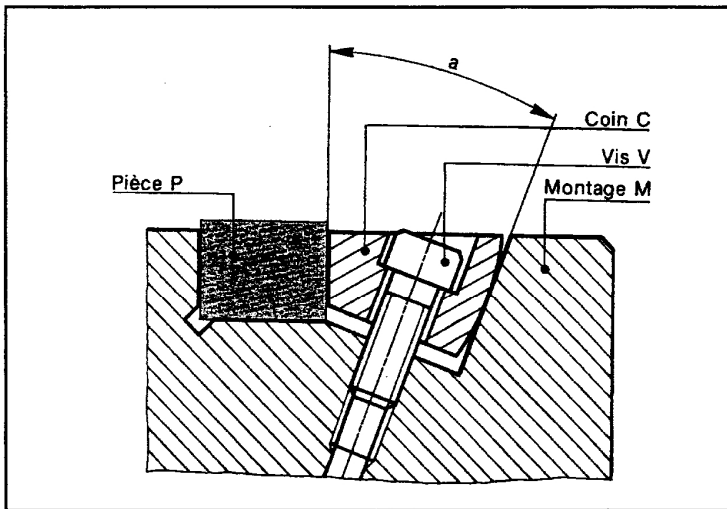
- **Inconvénients :**

- mauvaise résistance aux vibrations.
- desserrage sous l'action de la force centrifuge (interdit en tournage).
- course utile réduite (tolérance pièce < course de serrage).
- effort de serrage variable suivant l'opérateur.

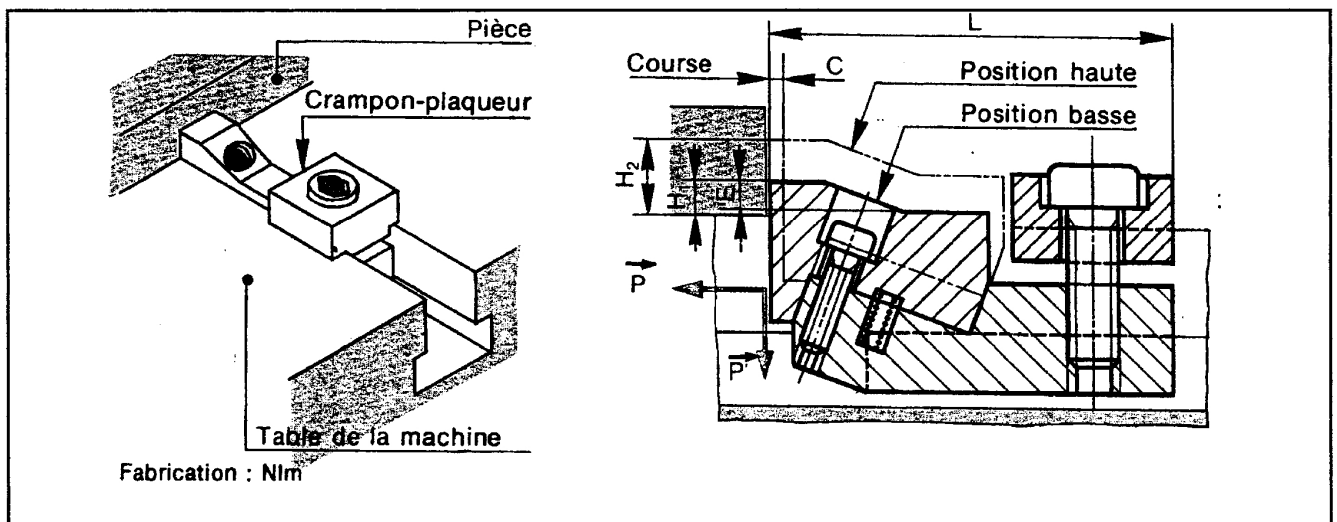
- Coins de bridage et crampons plaqueurs :

Très utilisés lorsque aucun élément de serrage ne doit dépasser de la surface à usiner.

Coin de bridage

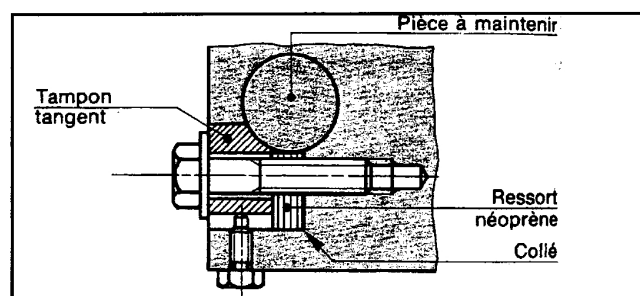


Crampon plaqueur



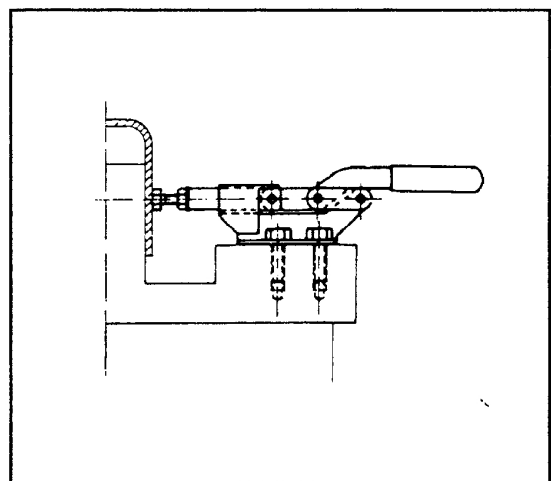
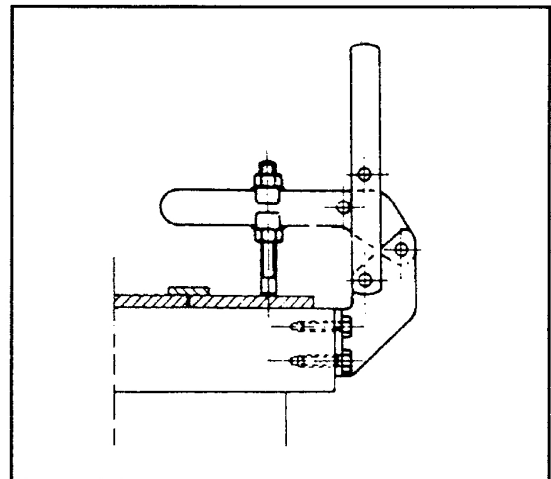
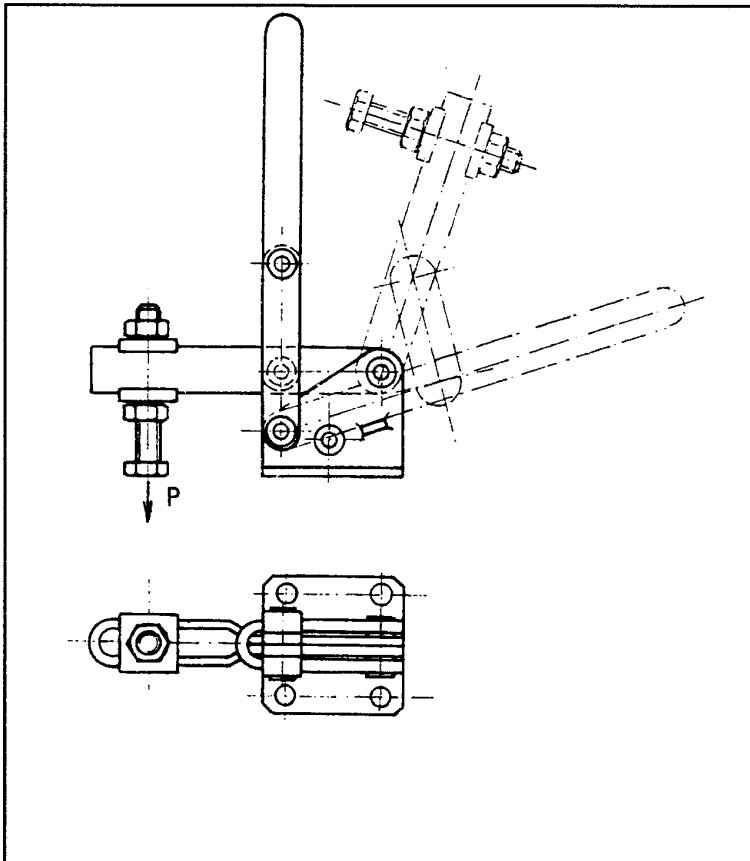
Serrage par tampons tangents :

Système utilisé pour le serrage des pièces cylindriques.



- Systèmes de serrage à ressort (sauterelles) :

- serrage et deserrage rapide.
- large effacement vis à vis des éléments annexes.
- irréversibilité totale du mécanisme sous l'action des vibrations et des chocs.
- multiplication importante de l'effort normal.
- facilement réutilisable après emploi.
- très utilisé pour les montages de soudage.



Systèmes pneumatiques (6 à 8 bars) et hydrauliques (25 à 100 bars) :

- effort de serrage constant quelque soit l'opérateur.
- les systèmes pneumatiques sont plus utilisés car il facilité de distribution de l'air comprimé, l'action est plus rapide qu'avec des fluides hydrauliques.

Systèmes magnétiques :

- élimination de tout dispositif mécanique de serrage.
- la pièce doit être magnétique ou le support dans lequel elle est montée.
- l'effort dépend de la matière de la pièce et de sa rugosité, l'aire de la surface de contact entre la pièce et le plateau.

7 - 3) Le corps du montage :

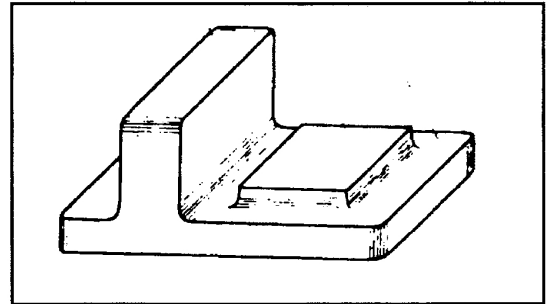
Qualités exigées :

- répondre aux spécifications géométriques et dimensionnelles.
- ne pas se déformer (dans le temps, sous les efforts de coupe, de serrage).
- absorber les vibrations (fonte, massif).
- ne pas gêner le travail des outils.
- permettre le montage et démontage aisé des pièces.
- permettre le nettoyage facile des appuis, l'évacuation des copeaux, du lubrifiant.
- ne doit pas être trop lourd si déplacement ou retournement.

Comparaison moulé / soudé / assemblé :

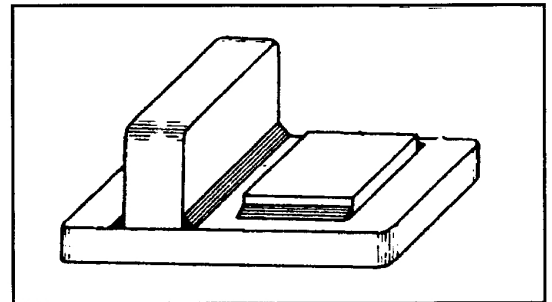
- support moulé :

- pas de limitation de forme.
- rigide.
- absorbe les vibrations.
- frais importants.
- long à réaliser.
- pour chaînes transferts (plusieurs montages) ou pour montage de haute précision (usinage précis, appareils de contrôle).



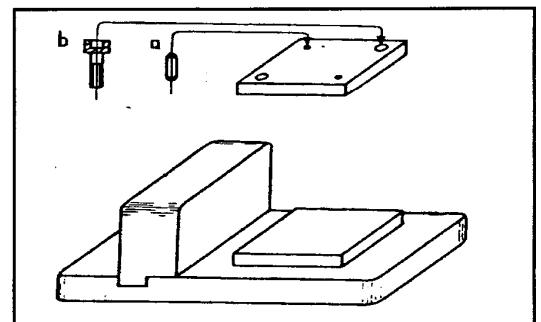
- support soudé (acier doux) :

- facile à réaliser.
- économique.
- rapidité.
- déformations dues au soudage (échauffement localisé).
- les surfaces fonctionnelles doivent être usinées après soudage.
- mauvaise absorption des vibrations.



- support assemblé :

- coûteux.
- long à réaliser.
- possibilité de mettre divers matériaux.
- très précis.
- prévoir des encastrements pour repérage des éléments.
- l'adjonction de pièces par ce procédé sur des batis moulés ou soudés est très fréquente.



7 - 4) Précision du montage :

Il faut prévoir les cotes fonctionnelles du montage en fonction des cotes à obtenir sur la pièce.

Cote nominale du montage = cote moyenne de la cote fabriquée.

Tolérance montage = IT cote fabriquée / 10

Il faut éviter l'usure et prévoir des pièces d'usure tels que guidage et appuis en métal dur (cémenté, trempé, rectifié).

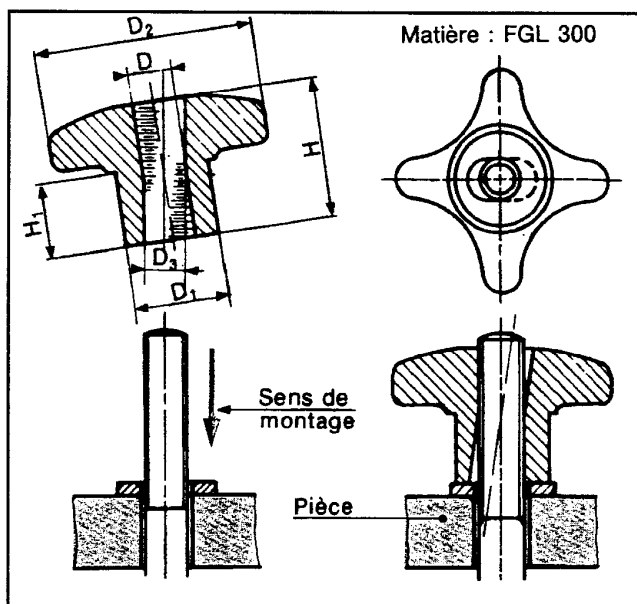
Il faut prévoir des possibilités de réglage.

7 - 5) Simplification et sécurité du travail :

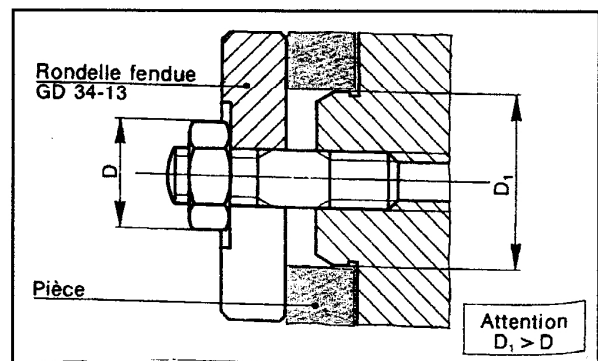
rapidité d'ablocage des pièces :

- utilisation d'accessoires dits "rapides" par effacement ou basculement.
- système de serrage simplifié (serrage unique, multiplicateur d'effort par vis ou came, vérins, ..).

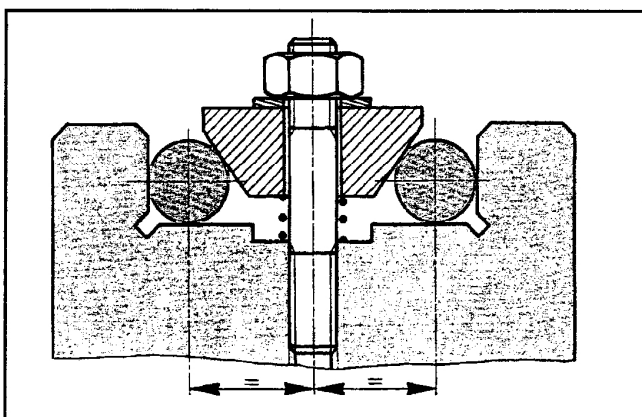
Ecrou à croisillon à serrage rapide



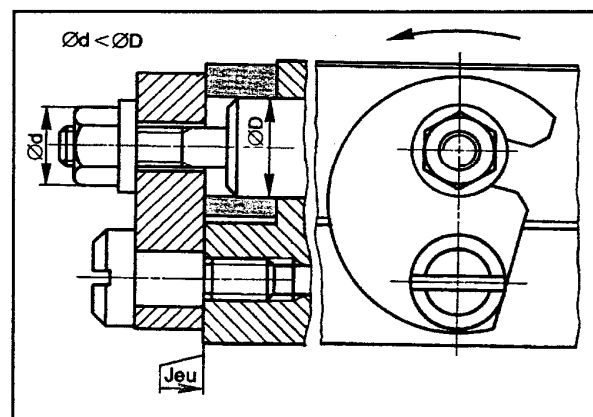
Rondelle fendue amovible



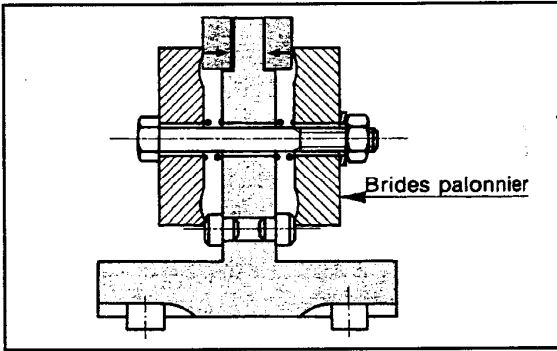
Serrage double



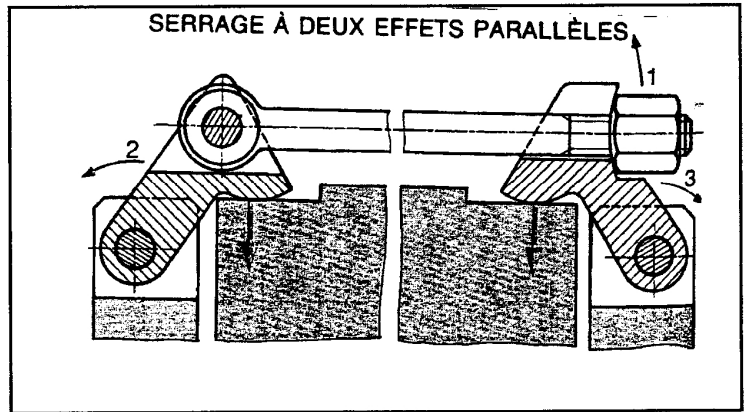
Rondelle fendue pivotante



Serrage à deux effets convergents



Serrage à deux effets parallèles



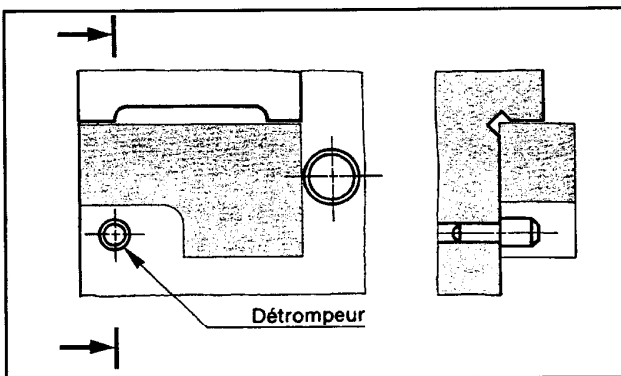
Evacuation des copeaux :

- aspiration (bois, plastiques).
- soufflage (produits lourds, écrans protecteurs).
- arrosage (rampes d'écoulement).

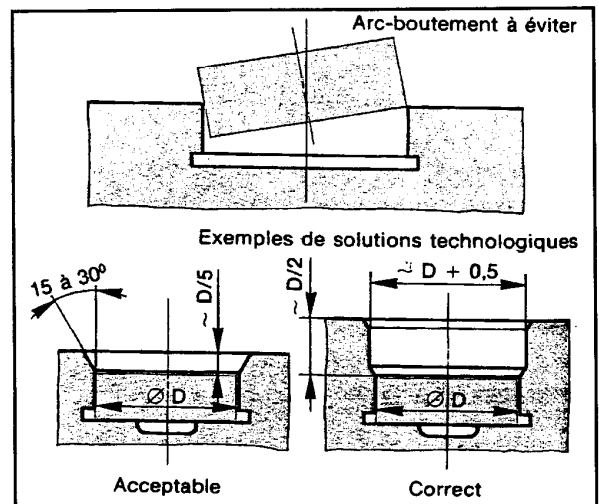
Systèmes facilitant la pose des pièces :

- détrompeurs.
- positionneurs.

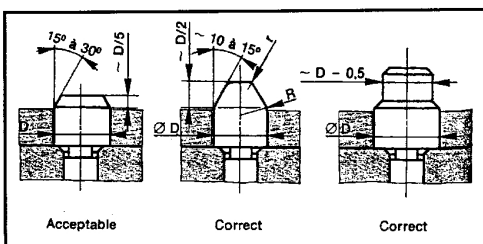
Détrompeur



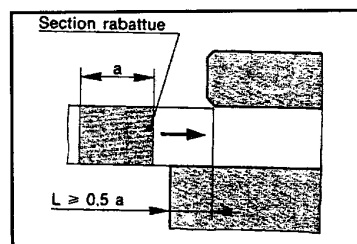
Engagement de précentrage



Pièces centrées par un alésage

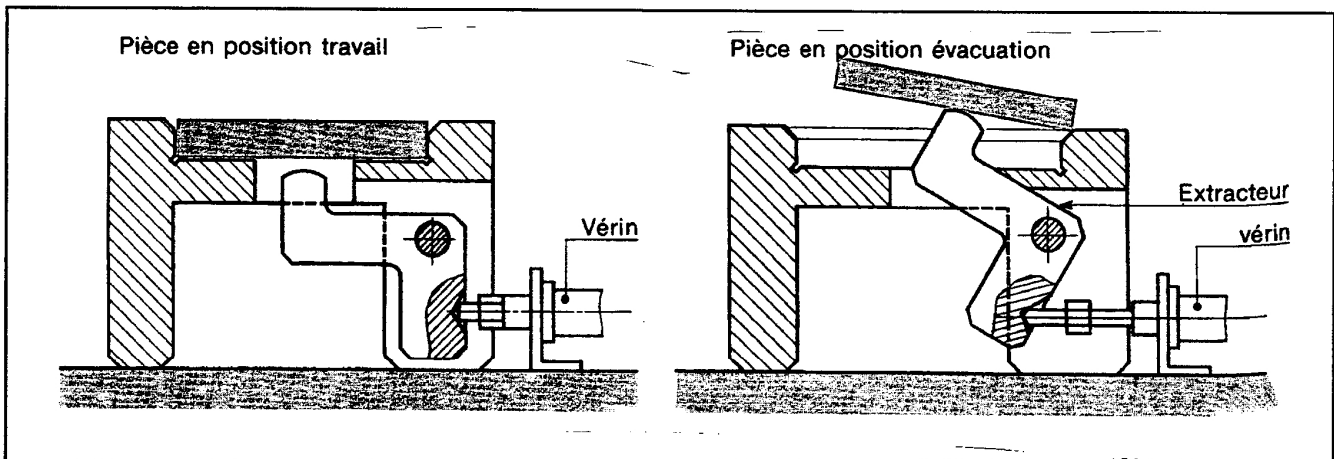
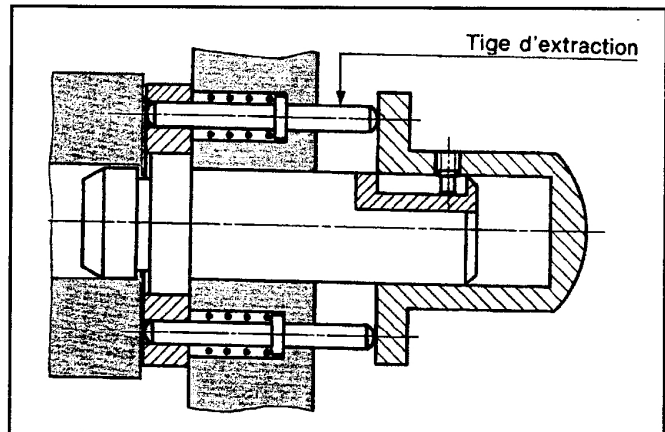
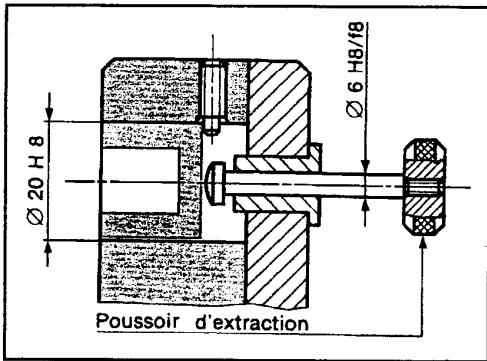


Pièces à guidage prismatique



- Systèmes permettant le démontage des pièces :

- extracteurs.
- dégagement dans le porte-pièce.

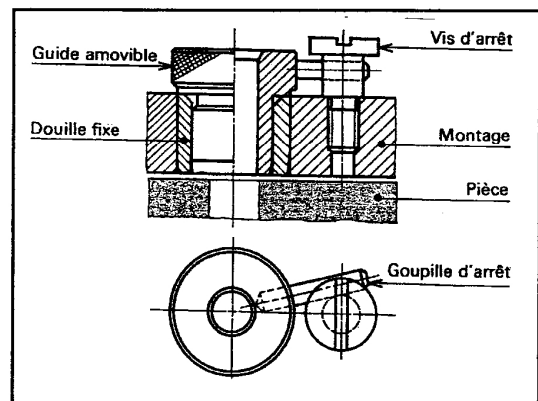
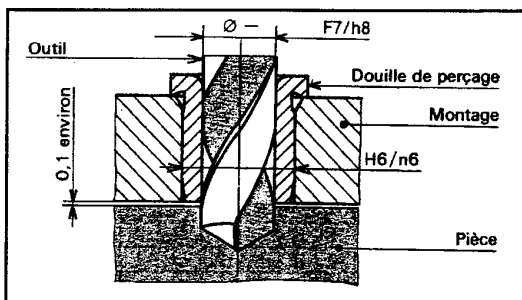


- Installation du montage sur la machine :

- orientation du montage sur la table par piges ou lardons.

Réglage des outils :

- utilisation de cales de réglages.
- utilisation de canons de perçage pour guider les forets.



**MACHINES-OUTILS A
COMMANDE
NUMERIQUE**

- STRUCTURE**
- MODÉLISATION**
- RÉGLAGE**

Introduction

La machine-outil et son évolution actuelle, la machine-outil à commande numérique représentent encore le moyen de production le plus important des pièces mécaniques. De par l'avancée des techniques, la machine-outil a subi des modifications et le couple outil - machine-outil s'est adapté aux exigences de productivité moderne.

Dans la première partie, ce document a pour but de faire le point sur l'étude des machines-outils modernes, de manière à en recenser les fonctionnalités, ainsi que celle de leurs composants principaux. La seconde partie de ce document vise à aider à la mise en œuvre rationnelle de ces machines.

A partir de différentes modélisations, nous étudierons les problèmes d'identification et de réglage de ces machines.

1. Définitions et structure physique des machines-outils à commande numérique

Ce chapitre a pour but de définir et d'étudier les machines-outils.

L'étude passe par l'analyse des solutions technologiques employées dans la conception des éléments clés des machines. Nous analysons les cinématiques possibles des machines de façon à proposer des moyens de sélection de machines en fonction des caractéristiques des pièces à réaliser.

1.1. Définitions

Machine-outil à commande numérique (MOCN): machine-outil programmable équipée d'une commande numérique par ordinateur (CNC).

Centre d'usinage (CU): machine-outil à commande numérique équipée d'un changeur d'outil. On distingue les centres de tournage et les centres de fraisage (voire les centres de perçage). Souvent, par abus de langage, on appelle centre d'usinage, les centres de fraisage.

Cellule flexible d'usinage: centre d'usinage équipé d'un système automatique de chargement et déchargement de pièces.

Demi-axe numérique: axe de déplacement pour lequel un ensemble fini de positions peut être atteint - OU - axe de déplacement asservi en position **ou** en vitesse.

Axe numérique: axe de déplacement pour lequel une infinité de positions peut être atteinte à la résolution de positionnement près - OU - axe de déplacement asservi en position **et** en vitesse.

Une machine outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce. De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces en respectant les spécifications fonctionnelles.

Une machine outil à commande numérique assure la réalisation automatisée des pièces, les mouvements nécessaires sont décrits dans un programme.

On représente la structure d'une machine, en cours d'usinage, par un système bouclé, chaque élément contribue à la réalisation du contrat fonctionnel. Le réglage de la machine consiste à mettre en position relative ces différents éléments.

1.2. Etude organique d'une machine-outil à commande numérique

1.2.1. Structure physique d'une MOCN

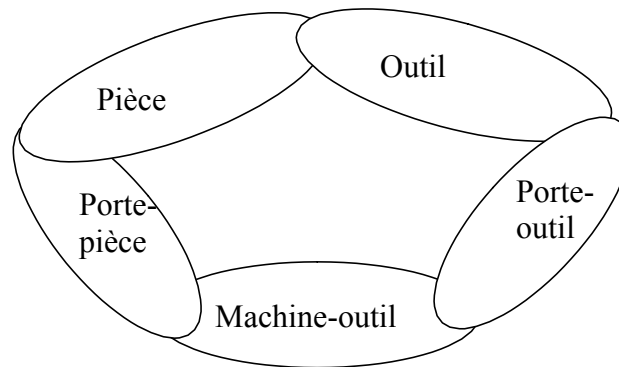


Figure n°1: Modèle de la structure d'une machine-outil

Si on ne s'intéresse qu'aux méthodes d'enlèvement de matière par mouvement de rotation (cas classiques du tournage, perçage, fraisage), la machine doit avoir la structure suivante:

- des systèmes, autant que nécessaire, assurant la mise en position de l'outil par rapport à la pièce et les mouvements d'avance. Ce sont les axes de la machine;
- un système qui réalise le mouvement de coupe par mise en rotation des outils ou de la pièce: la broche ;
- un système de contrôle - commande, qui permet le suivi automatique du programme de commande de la machine;
- un élément mécanique qui assure le lien entre ces systèmes: le bâti.

A cela, il faut ajouter des éléments d'interfaces spécifiques à la production permettant la mise en position les outils et des pièces sur la machine.

1.2.2. Le bâti

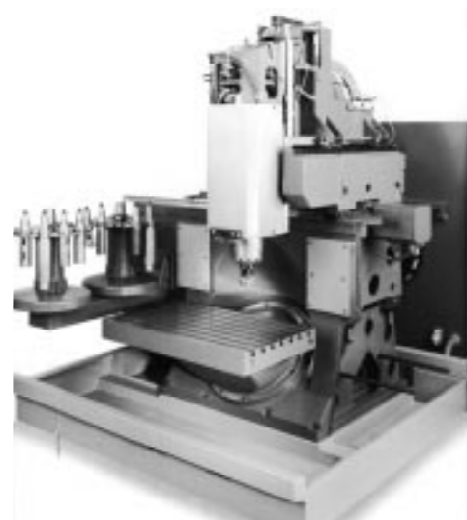
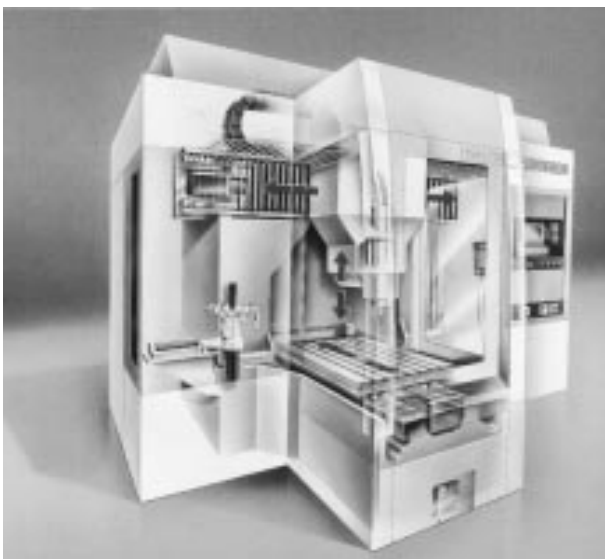


Figure n°2: Vue générale des machines à fraiser

Le bâti assure le guidage des axes de mouvements et l'agencement des autres organes de la machine. Pour assurer une géométrie correcte et encaisser les actions mécaniques dues aux accélérations élevées des mobiles, le bâti doit être rigide et limiter les déformations dues à la chaleur. Les nouvelles machines intègrent de nouveaux matériaux de construction (béton) et la répartition des masses est optimisée.

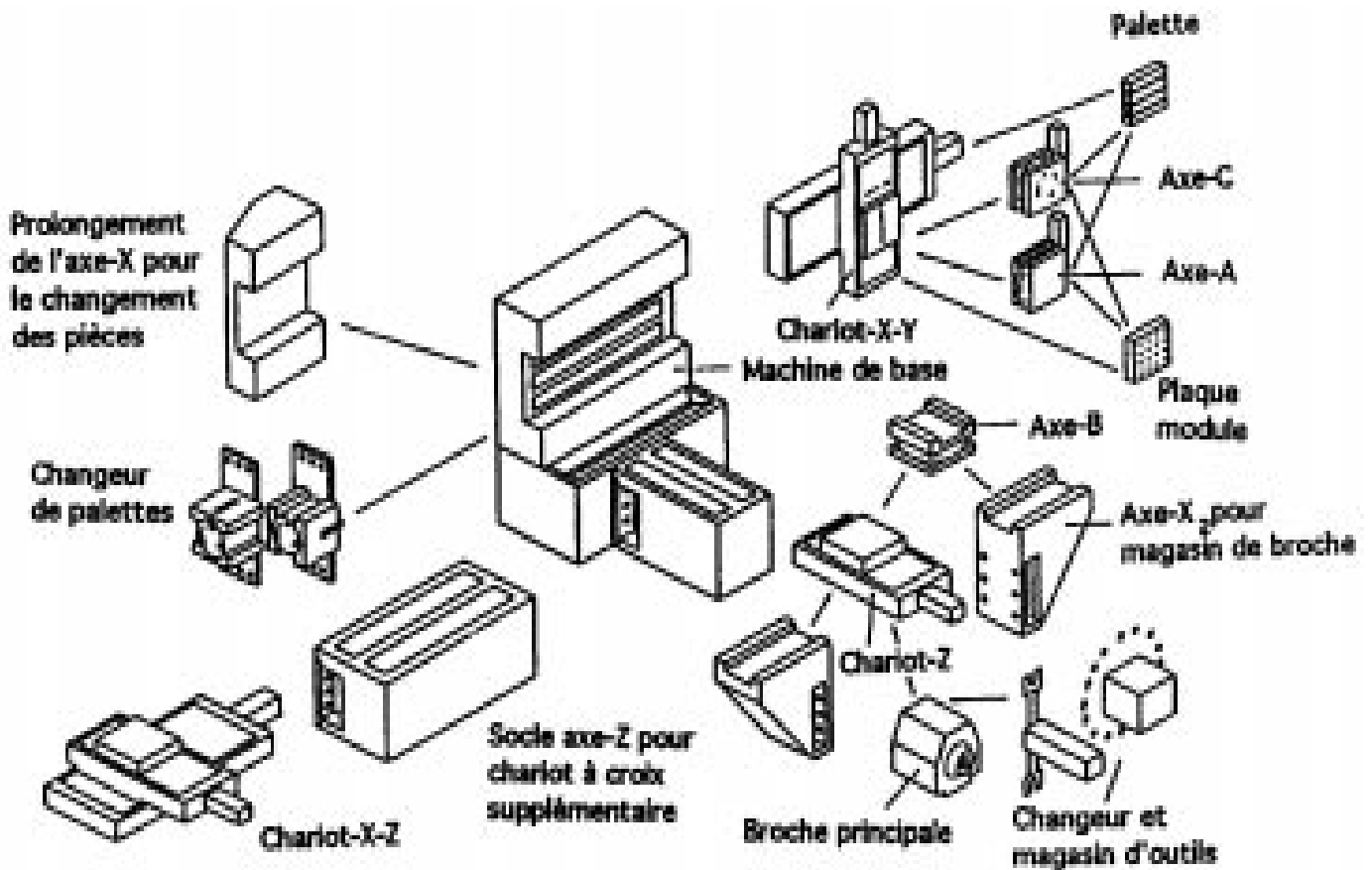


Figure n°3: Système de construction modulaire pour une fraiseuse à grande vitesse

La liaison au sol du bâti est également importante. Pour augmenter la rigidité des machines, on a recours à des liaisons hyperstatiques au sol, ce qui pose des problèmes de déformation du bâti. Par contre, les machines actuelles, plus rigides, permettent la réalisation de liaisons isostatiques sur trois points, qui limitent les déformations du bâti. Cette rigidité importante pose des problèmes de dissipation énergétique lors des chocs.

En plus de ces fonctions essentielles, le bâti remplit aussi des fonctions auxiliaires importantes, comme la gestion des copeaux et la protection des opérateurs.

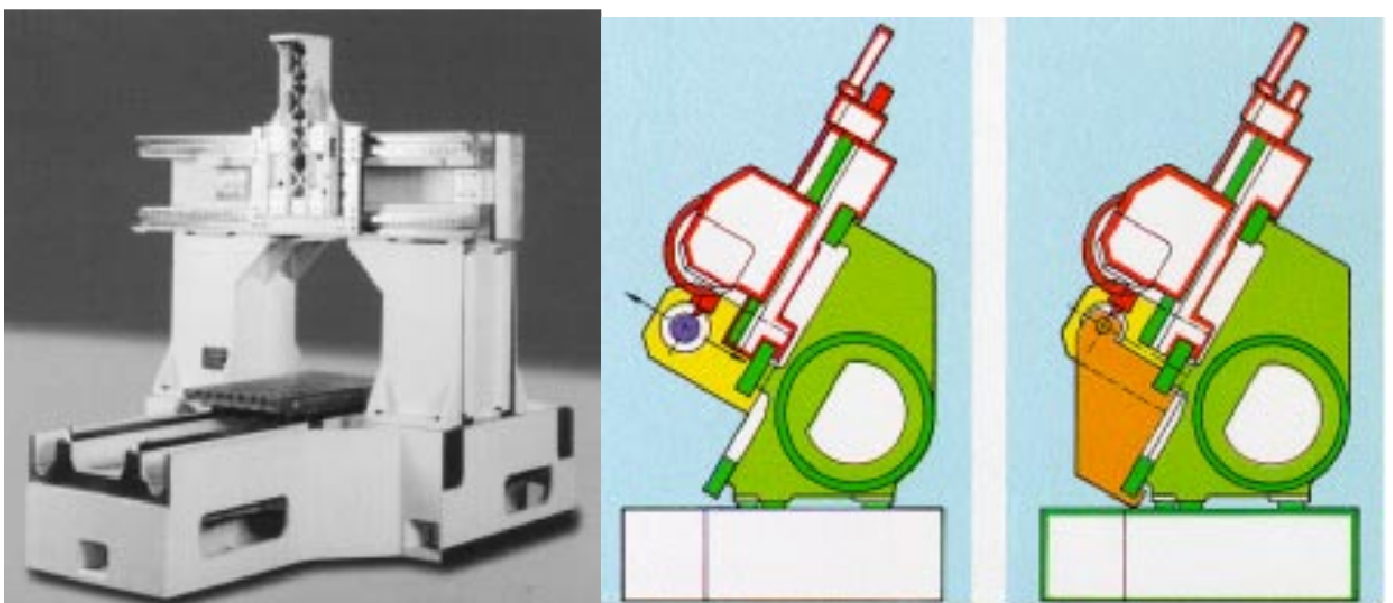


Figure n°4: Structure de machines, fraiseuse verticale (document Mikron) et tour

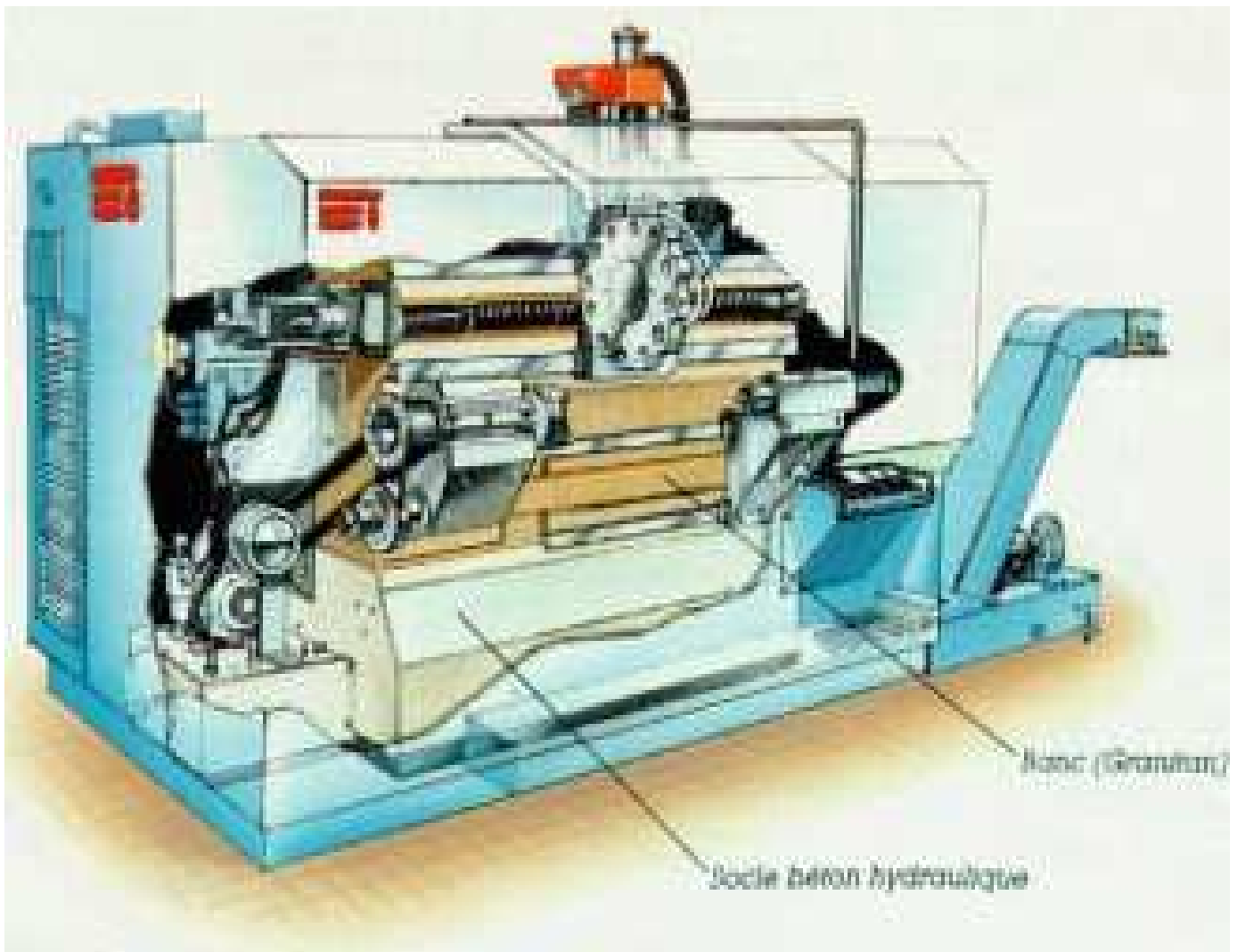


Figure n°5: Structure de machines, bâti de tour (document Ernault)

1.2.3. Les axes de déplacement

Les axes de déplacement mettent en mouvement les parties mobiles des machines avec de fortes accélérations. Les axes sont constitués d'un guidage, d'un système d'entraînement, d'une motorisation et d'un système de mesure.

Le guidage positionne précisément des solides. Il est assuré par des glissières, qui sont de plus en plus réalisées au moyen de rouleaux pré-contraints, afin de limiter les frottements et de supporter des charges plus élevées.

Pour la motorisation, dans les cas de grande productivité (tournage), on cherche à minimiser les temps hors matière et on demande des vitesses de retour rapide importantes. Le mobile doit atteindre rapidement ces vitesses, d'où des accélérations importantes. En tournage, les efforts de pénétration développés par les opérations de perçage exigent des couples moteurs importants pour faire avancer le foret. En fraisage, l'augmentation de la fréquence de rotation entraîne une augmentation des vitesses d'avance. Les machines utilisées actuellement dans l'industrie automobile peuvent assurer des vitesses d'avance de travail de $40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ et des accélérations de $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

La transmission du mouvement se fait encore beaucoup au moyen de vis à billes précontraintes. On assiste à l'arrivée de moteurs dits linéaires qui éliminent les jeux et les frottements de l'entraînement.

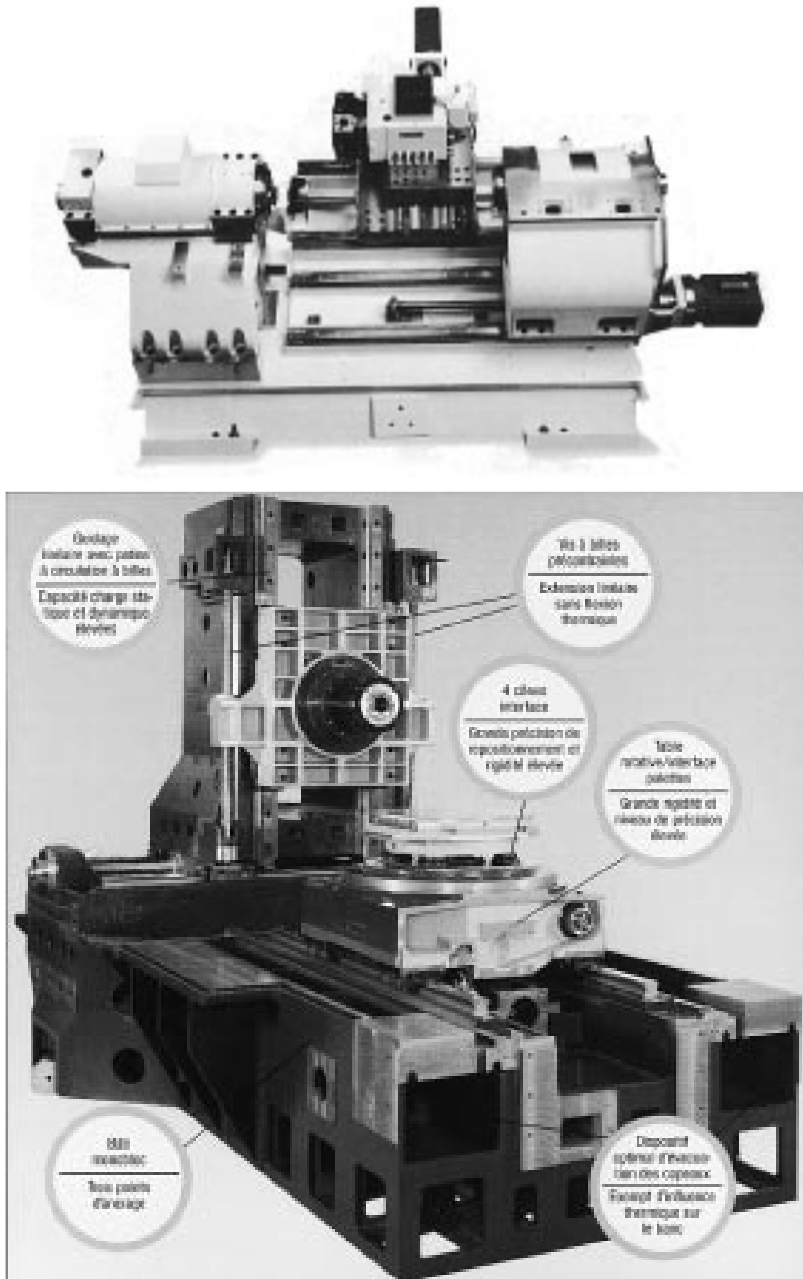


Figure n°6: Vue des liaisons entre le bâti et les mobiles



Figure n°7: Unité de chariot en fonte de titane et d'aluminium

Le système de mesure transmet la position du solide à la commande numérique. Deux technologies sont utilisées:

- les systèmes de mesure qui comptent les nombres de tours de vis et la position angulaire dans le tour. Ils ont pour capteurs des codeurs incrémentaux semi-absolus;

- des systèmes qui mesurent la position effective du mobile. Ils ont pour capteurs des règles incrémentales, plus chère cette technologie a tendance à se développer sur des machines de production qui doivent avoir des asservissements précis (fraisage).

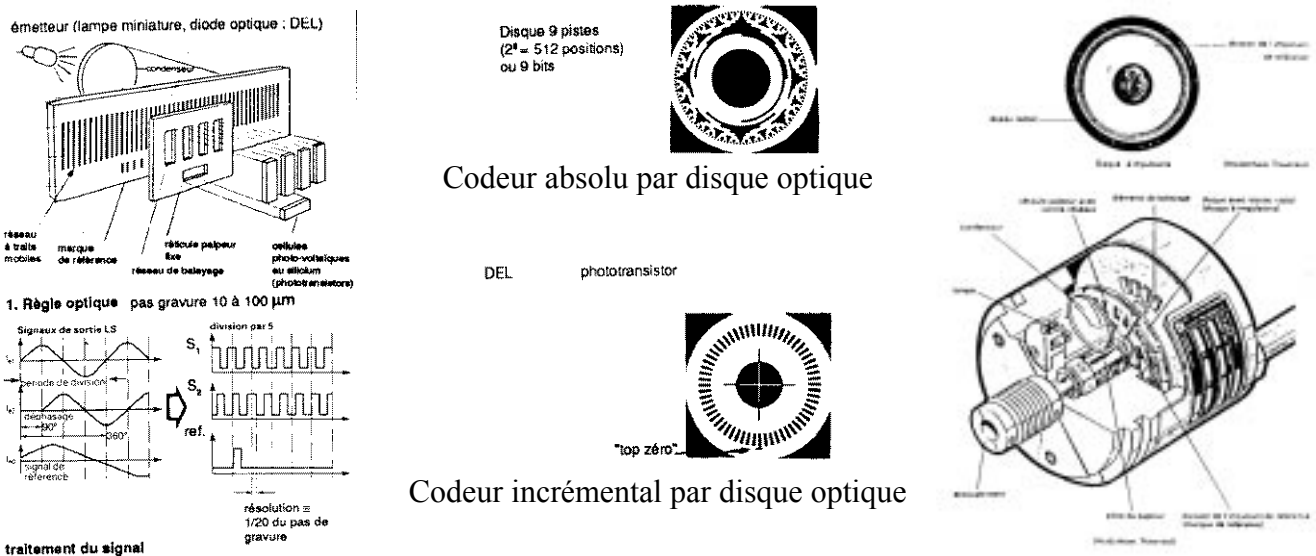


Figure n°8: Technologie des moyens de mesure de position

La commande d'axe permet d'asservir en position et en vitesse le déplacement des mobiles.

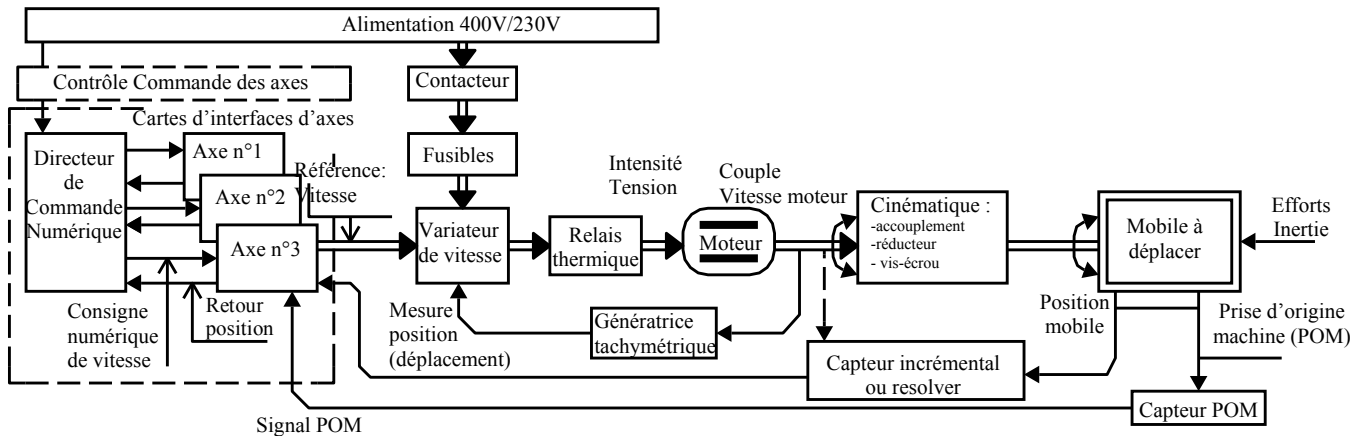


Figure n°9: Fonction contrôle - commande d'une commande d'axe

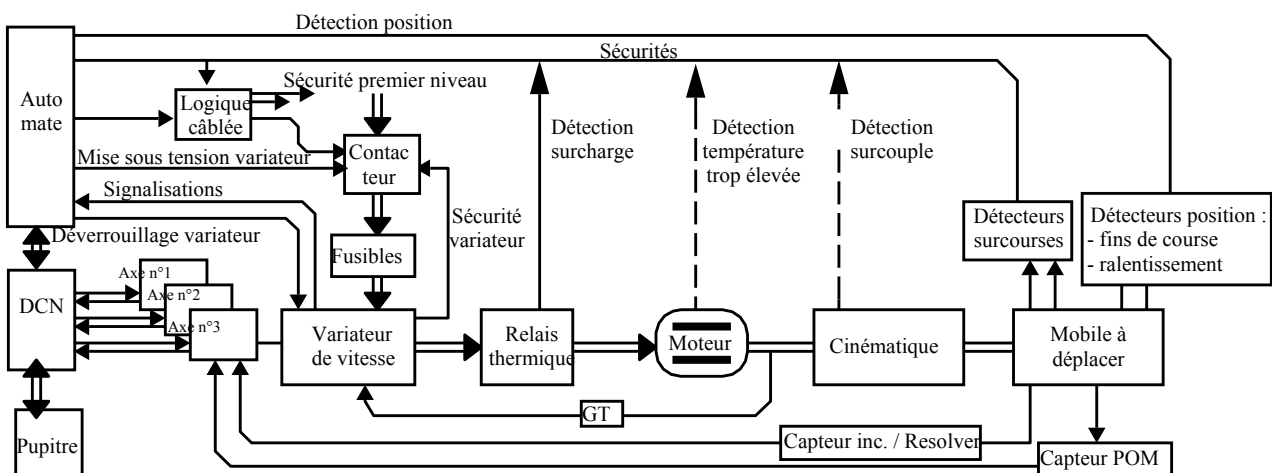


Figure n°10: Fonction conduite - surveillance d'une commande d'axe

1.2.4. La broche

La broche crée le mouvement de coupe nécessaire à l'usinage. Elle assure donc la mise en rotation de la pièce ou de l'outil. Ces deux cas posent des contraintes fonctionnelles différentes.

Cinématiquement, la broche est en liaison pivot avec le bâti ou un chariot. Dynamiquement, elle doit être très rigide et stable thermiquement de façon à garantir la position relative de l'outil par rapport à la pièce durant l'usinage.

L'augmentation des vitesses de coupe impose une augmentation des fréquences de rotation et des couples admissibles au niveau des broches. En fraisage, on cherche actuellement à ce que le couple fréquence de rotation - puissance atteigne ($50\,000\text{ tr.min}^{-1}$ - 50 kW). Industriellement, on utilise des broches atteignant ($25\,000\text{ tr.min}^{-1}$ - 30 kW). A ces fréquences de rotation, les effets dynamiques sont importants et l'équilibrage des parties tournantes est vital.

Les hautes fréquences de rotation imposent des modifications technologiques. La liaison pivot est le plus souvent assurée par des roulements à billes (85 % du marché 1996). Les roulements métalliques ont tendance à laisser la place aux roulements dits hybrides, dont les billes sont en céramique. D'autres technologies sont mises en œuvre comme les paliers à air (8 %), les paliers hydrostatiques et hydrodynamiques (5 %) et les paliers magnétiques (2 %).

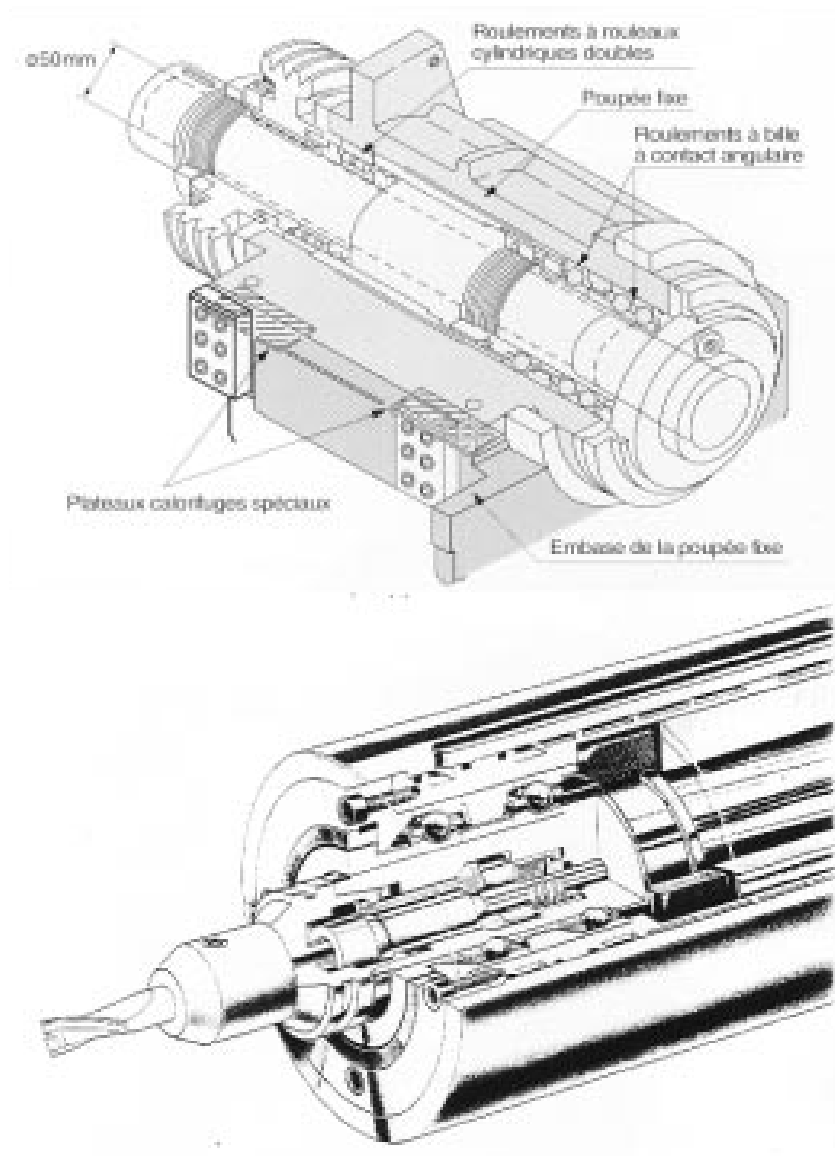


Figure n°11: Broches de tour (document Mazak) et de fraiseuse à grande vitesse (document Précise)

Du point de vue de la motorisation, on cherche à obtenir des broches capables de fournir un couple important à bas régime (ébauche) et pouvant atteindre des grandes vitesses de rotation. Les électro-broches ont aussi fait leur apparition car elles suppriment les problèmes de la liaison entre le moteur et la broche.

Les broches ayant des faibles fréquences de rotation (cas des tours), emploient des moteurs à courant continu. Les broches à grandes fréquences de rotation emploient des moteurs asynchrones à haute fréquence, voire des moteurs asynchrones à haute fréquence et contrôle vectoriel (par mesure de la vitesse). Il s'agit alors d'un véritable asservissement numérique de la rotation de la broche.

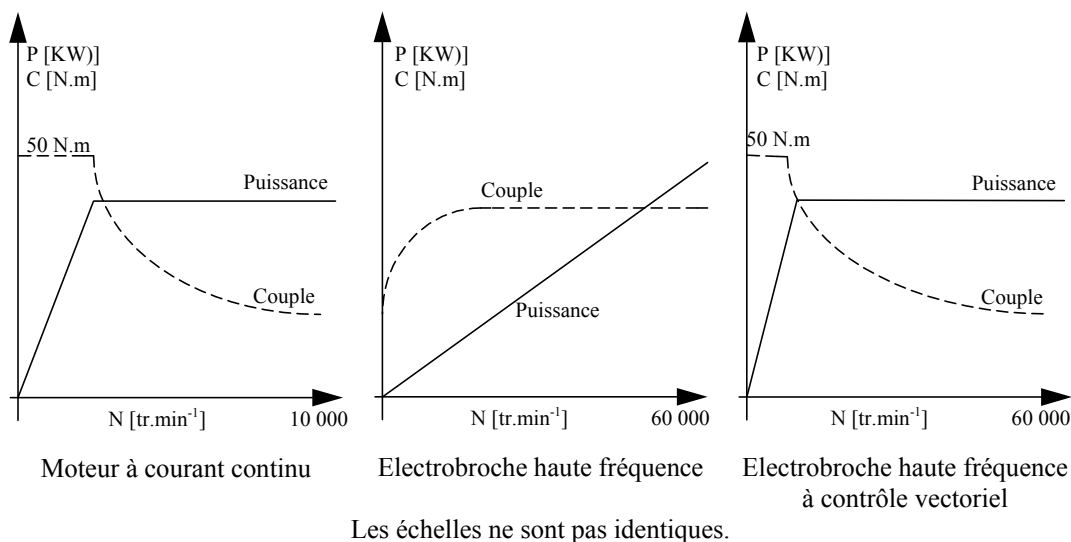


Figure n°12: Forme des caractéristiques des moteurs de broche

1.2.5. Le directeur de commande numérique, architecture fonctionnelle

La commande numérique assure l'asservissement en position et en vitesse des déplacements des mobiles. C'est purement de la commande d'axe avec un traitement numérique pour élaborer les consignes de commande en temps réel en fonction des paramètres de la trajectoire et de l'état de la chaîne d'action. On peut citer les fonctions suivantes:

- interprétation du programme d'application,
- détermination des phases de travail (blocs exécutables),
- calcul des consignes successives sur la trajectoire,
- élaboration de l'écart de poursuite et des corrections nécessaires,
- gestion des données et des mesures,
- surveillance des erreurs.

De plus, elle gère l'ensemble des fonctions séquentielles associées à la machine, soit directement, soit à travers un automate programmable. Citons les actions suivantes:

- commande des actionneurs auxiliaires,
- modes de marche et d'arrêt,
- commande de distribution d'énergie,
- traitement des informations de sécurité.

Enfin elle assure une fonction dialogue avec l'opérateur.

Outre sa fonction de base, on demande à la commande numérique de répondre à des exigences technico-économiques supplémentaires:

- faible coût de fonctionnement,
- confort de mise en œuvre et de programmation,
- exploitation conviviale,

- sûreté de fonctionnement matérielle et logicielle,
- intégration dans un environnement productique.

Le schéma suivant représente l'architecture fonctionnelle d'une commande numérique.

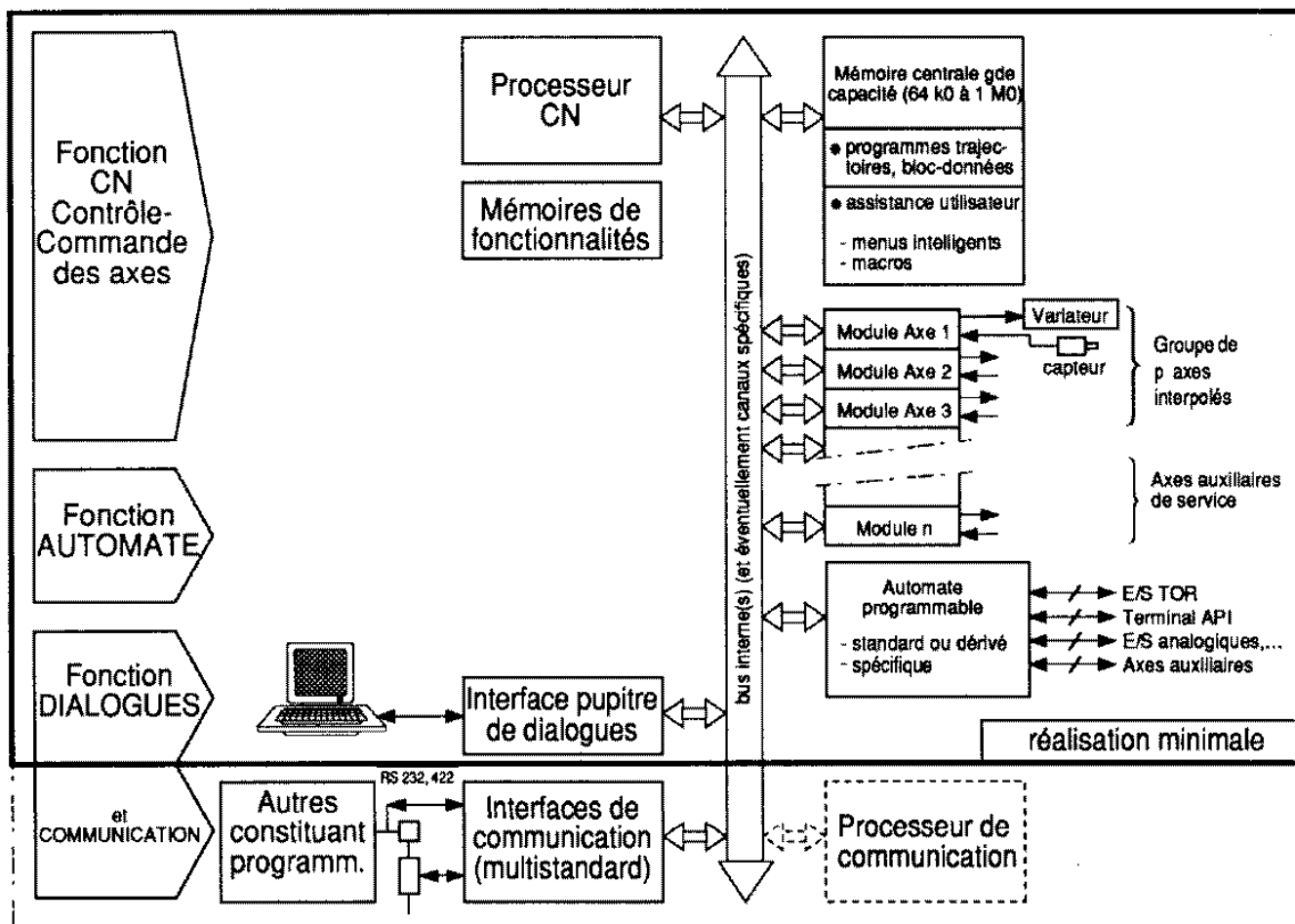


Figure n°13: Architecture fonctionnelle d'une commande numérique

Le fonctionnement temporel de la CN peut être décomposé en deux phases:

- phase de préparation des données:
 - interprétation du programme,
 - vérification de la cohérence,
 - décomposition éventuelle de la trajectoire,
 - calcul éventuel des corrections et décalages,
 - détermination des paramètres de réglage et de surveillance de l'axe,
 - structuration des données,
 - formation de la file d'attente des blocs.
- phase d'exécution en temps réel:
 - calcul des consignes respectant à la fois la trajectoire et l'évolution temporelle (interpolation),
 - calcul éventuel des consignes articulaires par transformation de coordonnées,
 - traitement au niveau des axes, dialogue au niveau trajectoire, lecture de la mesure,
 - calcul de la commande et affichage.

L'ensemble des traitements temps réel est effectué en une période d'échantillonnage actuellement de l'ordre de quelques millisecondes. La valeur de cette période conditionne la qualité de la discrétisation des trajectoires. Par exemple, pour une vitesse d'avance de $1500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, la distance parcourue en une milliseconde est de $25 \mu\text{m}$.

Les opérations de préparation peuvent être traitées soit en temps réel par un processeur parallèle, soit au préalable avec mémorisation dans un fichier-liste de blocs exécutables.

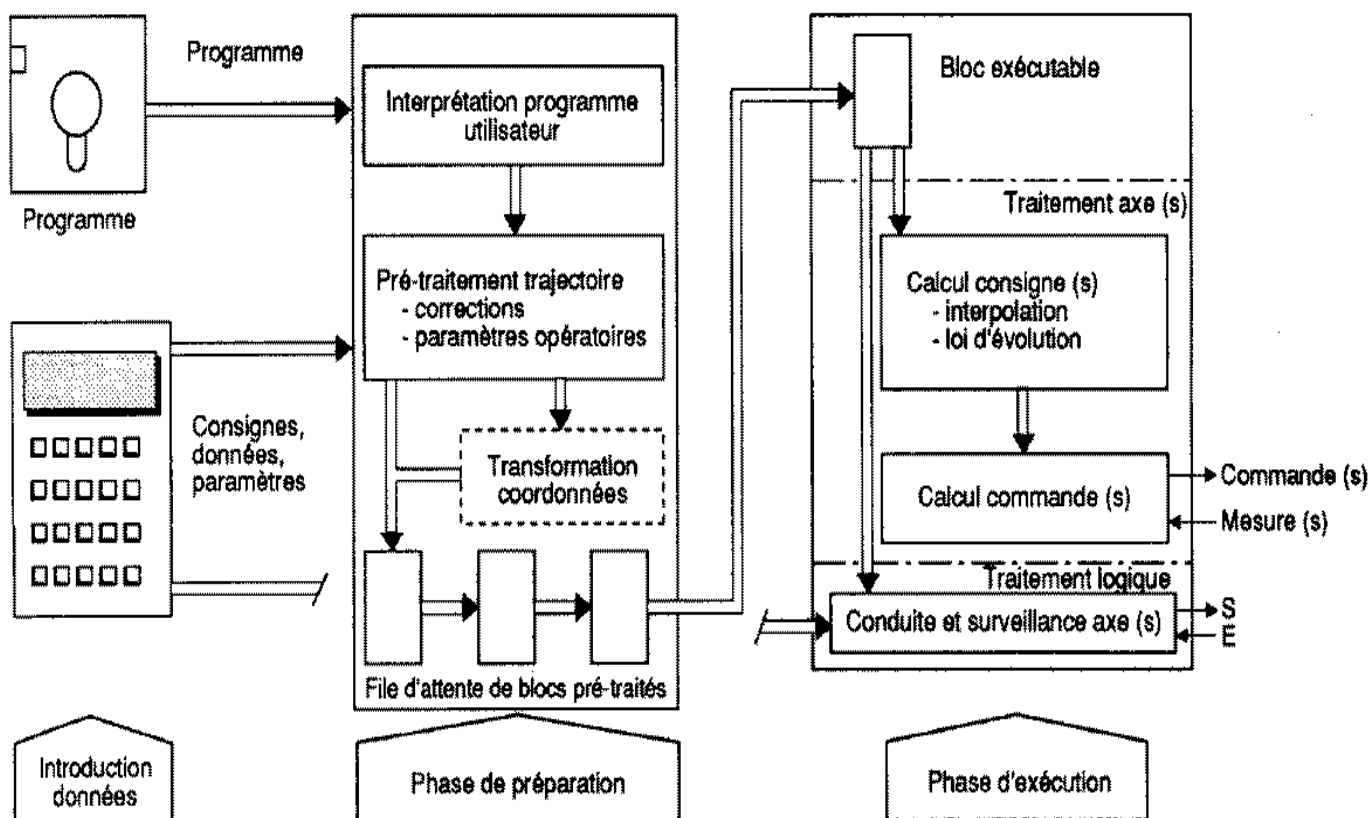


Figure n°14: Organisation temporelle du traitement d'un programme CN

Physiquement, un exemple d'architecture peut être représenté de la manière suivante:

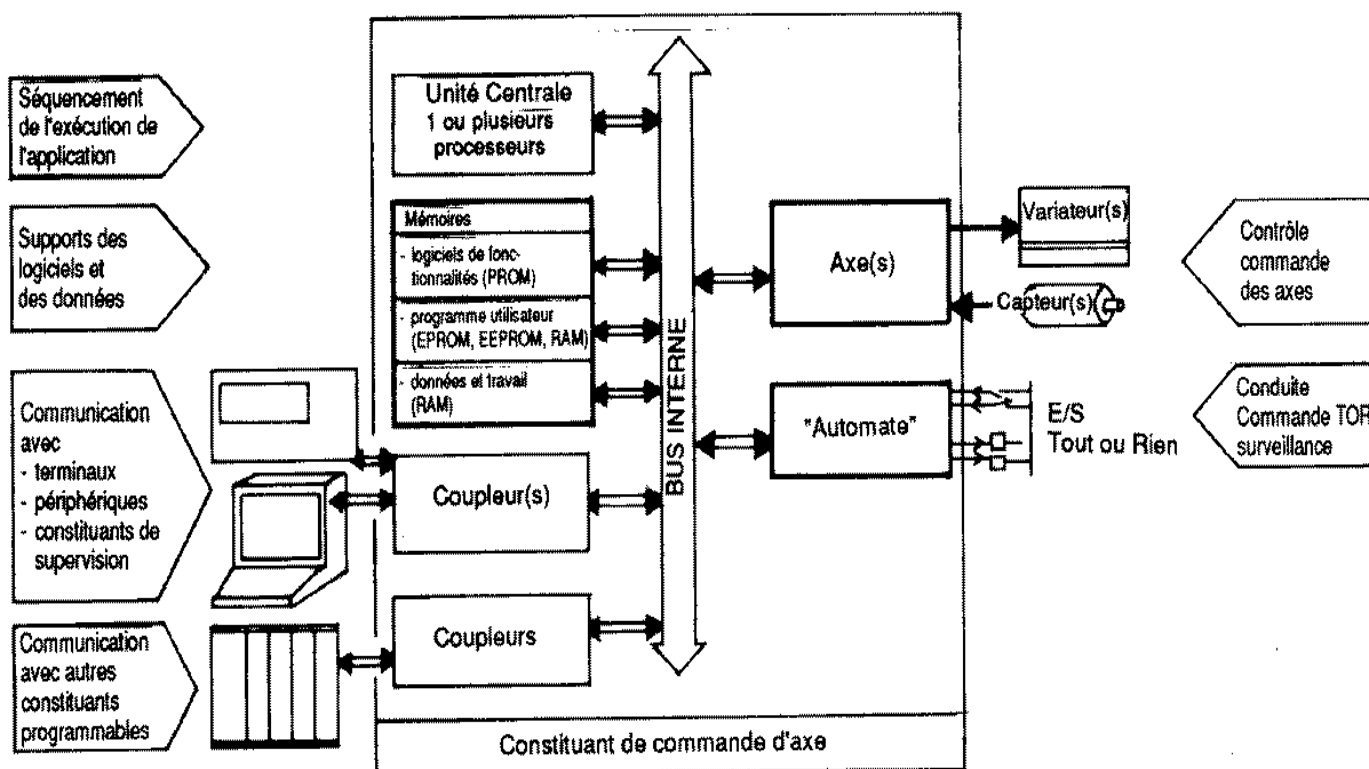


Figure n°15: Architecture physique d'une commande numérique

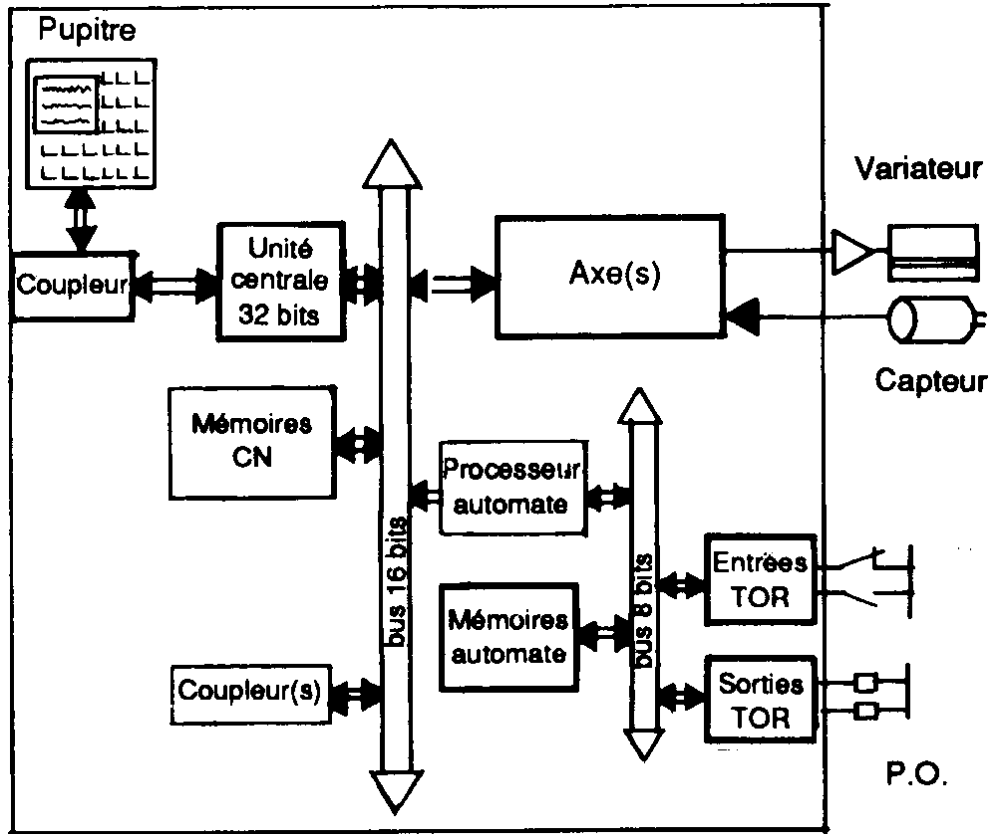


Figure n°16: Commande numérique standard (document Num)

1.2.6. Les porte-outils

Les porte-outils ont pour fonction d'assurer la liaison entre l'outil et la machine. Suivant le mode d'usinage, ils supportent des sollicitations dynamiques différentes.

Dans le cadre du tournage, le porte-outil doit essentiellement supporter un effort de coupe important, les surfaces d'appui doivent être étendues.

Dans le cadre du fraisage, les porte-outils assurent la liaison au moyen d'un cône normalisé. L'augmentation des fréquences de rotation impose des contraintes dynamiques plus importantes. A grande vitesse, le contact entre les parties mâle et femelle de la liaison n'est plus assuré. Pour y remédier on assure un effort de tirage important sur le cône, ce qui a tendance à modifier la position de l'extrémité de l'outil. Enfin de nouveaux attachements sont normalisés en Allemagne, ce sont des attachements du type cône-face, dénommé HSK. Le cône mâle est creux, ce qui permet une meilleure déformation par l'effet centrifuge. De plus l'appui plan est prépondérant et autorise des efforts de serrage plus importants. Au dessus de 30 000 tr.min⁻¹, il est nécessaire d'équilibrer les parties tournantes et d'ajuster parfaitement les outils dans les porte-outils. On utilise des systèmes d'emmanchement par chauffage du porte-outil.

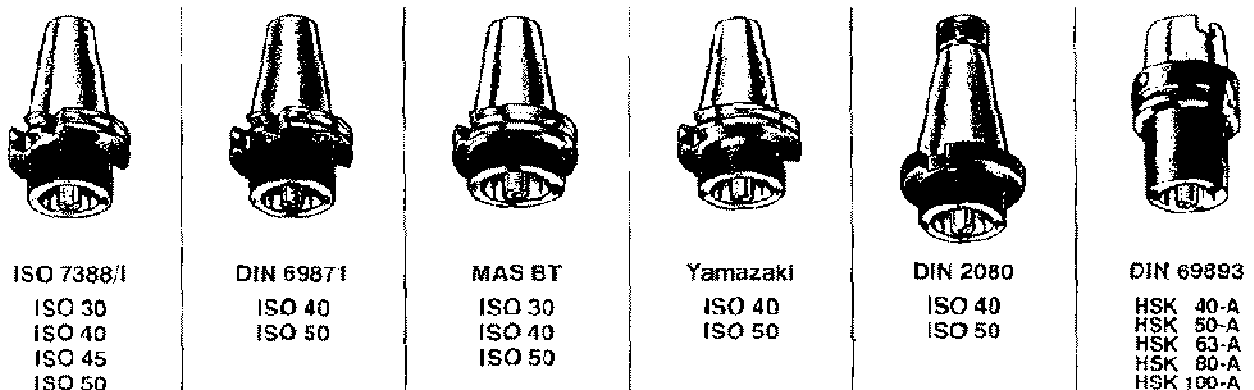


Figure n°17: Différents types d'attachements utilisés en fraisage (document Sandvik)

1.3. Etude morphologique d'une machine-outil à commande numérique

L'étude morphologique d'une machine-outil a pour but de classer les machines suivant les axes de déplacement possibles. Ainsi on peut, par synthèse ou par expérience, définir la cinématique minimale d'une machine permettant d'obtenir une surface donnée.

1.3.1. Définition normalisée des axes numériques d'une MOCN [NF ISO 841]

La norme [NF ISO 841] définit un système de coordonnées et désigne les divers mouvements de manière à ce qu'un programmeur puisse décrire les opérations d'usinage indépendamment de la cinématique de la machine. On considère toujours les mouvements de l'outil par rapport à la pièce tenue pour fixe.

«Le système normal de coordonnées est un système cartésien rectangulaire de sens direct, lié à une pièce placée sur la machine et ayant des arêtes parallèles aux glissières principales de la machine. Il est désigné par les lettres X, Y, Z non munies du signe «prime»».

«Le sens positif du mouvement d'un chariot de la machine est celui qui provoque un accroissement sur la pièce dans la coordonnée correspondante.»

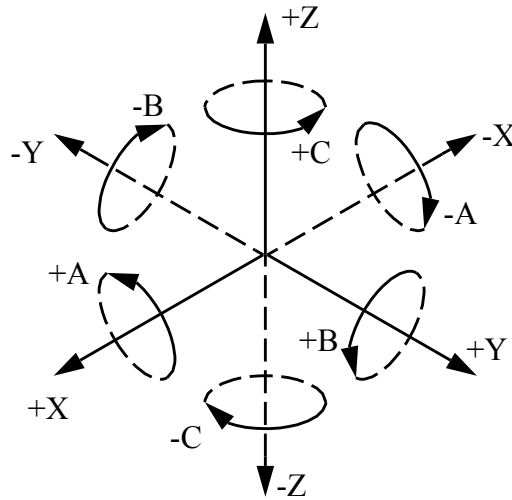


Figure n°18: Système normal de coordonnées

L'axe Z du mouvement est l'axe du système normal parallèle à l'axe de la broche principale. Dans le cas d'une machine ayant des mouvements de rotation (cas du 5 axes), on choisit l'axe parallèle à une des positions que peut occuper la broche.

L'axe X est perpendiculaire à l'axe Z.

- Sur les machines comportant des pièces en rotation l'axe X de mouvement est radial.
- Sur les machines ayant des outils tournants, deux cas sont à étudier.
 - Si l'axe Z est horizontal, le sens X positif est dirigé vers la droite lorsqu'on regarde de la broche principale vers la pièce.
 - Si l'axe Z est vertical, le sens X positif est dirigé vers la droite, lorsqu'on regarde de la broche principale vers le montant de la machine.

L'axe Y du mouvement forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

«A ces translations, on associe des angles A, B, C définissant des mouvements de rotation effectués respectivement autour d'axes parallèles à X, Y et Z. Les valeurs positives sont comptées de façon qu'une vis pas à droite, tournant, dans le sens positif, avance respectivement en direction +X, +Y et +Z.»

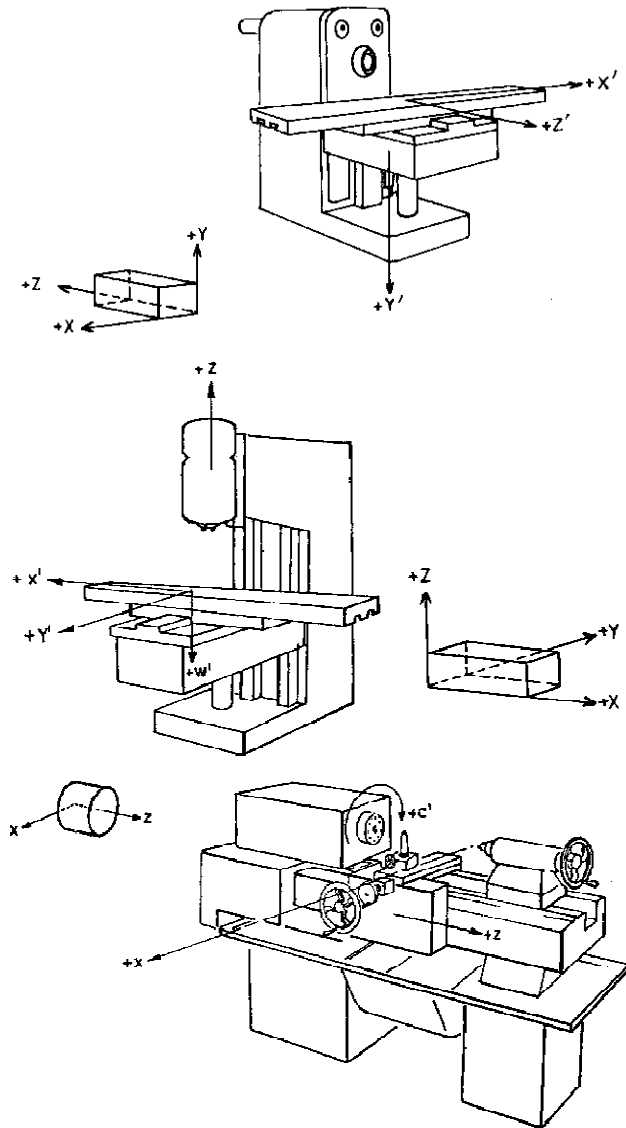


Figure n°19: Définition des axes sur différentes machines

L'emplacement de l'origine ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$) du système normal de coordonnées est arbitraire. Les demi-droites originaires des angles A, B et C sont arbitraires; on les choisit, de préférence, respectivement parallèles aux axes Y, Z et X.

A noter que cette norme définit aussi le sens positif de la broche par rapport au repère défini précédemment: «Le sens positif de rotation de la broche est opposé au sens trigonométrique».

1.3.2. Typologie des machines-outils à commande numérique

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

On classe maintenant les machines-outils par le nombre de mouvements élémentaires qu'elles peuvent mettre en œuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce. Seuls les axes sont décomptés. La mise en œuvre simultanée de plusieurs outils entraîne l'augmentation du nombre d'axes. Cette classification ne permet pas d'associer directement un type de forme usinable à une classe de machine, car elle ne reflète pas la cinématique de l'outil. Par exemple, un tour à cinq axes ne permet pas de faire des pièces différentes par rapport à un tour à trois axes.

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

Tableau n°1: classification des machines-outils

De plus en plus, la broche se comporte comme un axe asservi. C'est le cas en tournage, où l'on peut être obligé de mettre en place une seconde motorisation lorsqu'elle génère un mouvement d'avance (tournage avec outil tournant). En fraisage, la broche est plutôt un demi-axe, car on cherche à asservir sa vitesse de rotation à la vitesse d'avance de l'outil pour assurer, par exemple, des interpolations hélicoïdales (tarudage) ou de façon à garantir l'avance par dent de l'outil.

Les machines 5 axes du type (X, Y, Z, A, C) sont privilégiées dans le cadre de l'usinage de pièces de dimensions importantes, bien qu'elles perdent en rigidité au niveau de la tête de la machine.

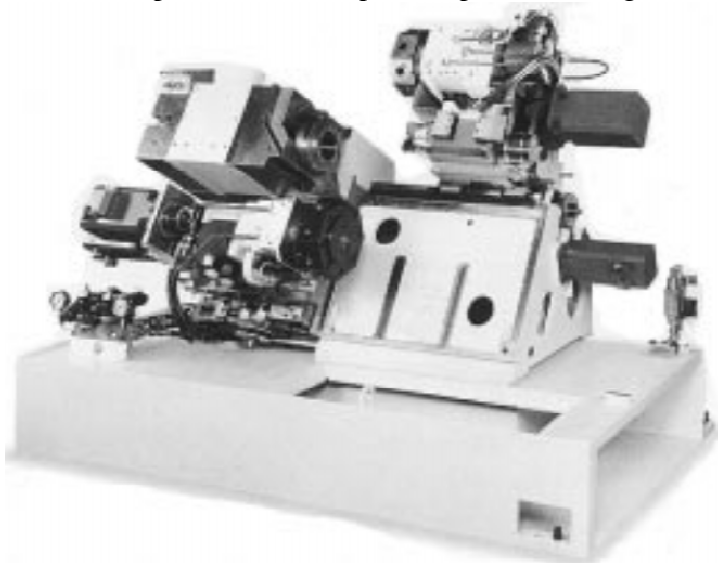


Figure n°20 Cinématique de tours multiaxes (document Gildemeister et Traub)

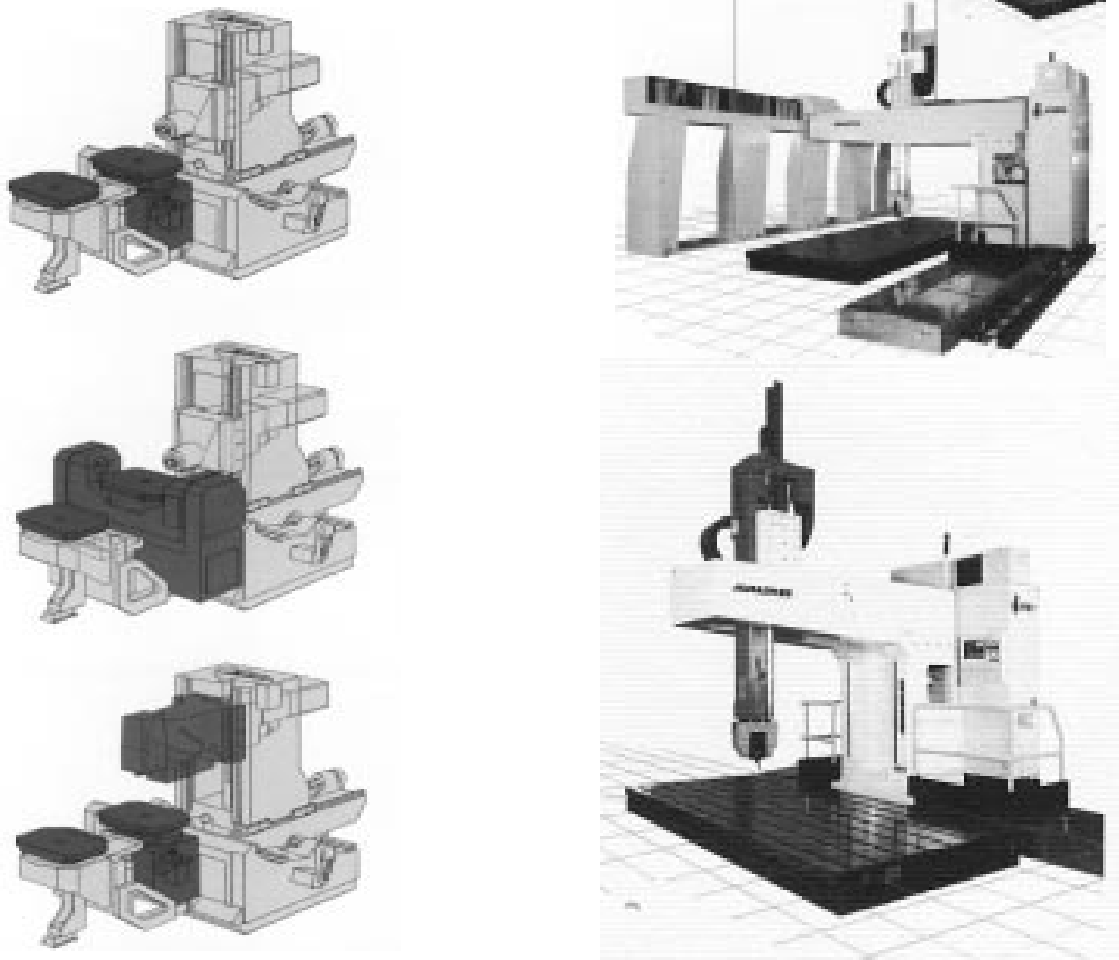


Figure n°21: Structures de machine de 3 à 5 axes

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

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

1.3.2. Choix d'une machine en fonction de l'usinage d'une pièce

Ce paragraphe n'est absolument pas la description d'une méthode exhaustive de choix de machine outils. Il vise simplement à attirer l'attention du lecteur sur les problèmes que l'on peut rencontrer. Lors de l'établissement de l'avant-projet de fabrication, on est amené à choisir le type de machine capable de réaliser la pièce. Il n'existe pas de méthode simple de choix de la machine. Le choix provient d'un processus de synthèse de l'analyse des mouvements possibles des différentes machines utilisables.

Au niveau morphologique, on distingue encore nettement les deux types de pièces réalisables: prismatiques et cylindriques. Pour l'instant, de manière générale, il est toujours plus productif d'usiner les cylindres sur un tour et les formes prismatiques sur une fraiseuse. Les axes supplémentaires servent à finir les pièces sans démontage.

L'étude de la morphologie de la pièce peut consister à associer un polyèdre à la pièce. A chaque entité à usiner, on associe une facette plane perpendiculaire à l'axe de l'outil usinant cette entité. Pour un perçage, c'est le plan perpendiculaire à l'axe du trou, pour un surfacage, c'est le plan surfacé, idem, pour un fond de poche ou un contournage.

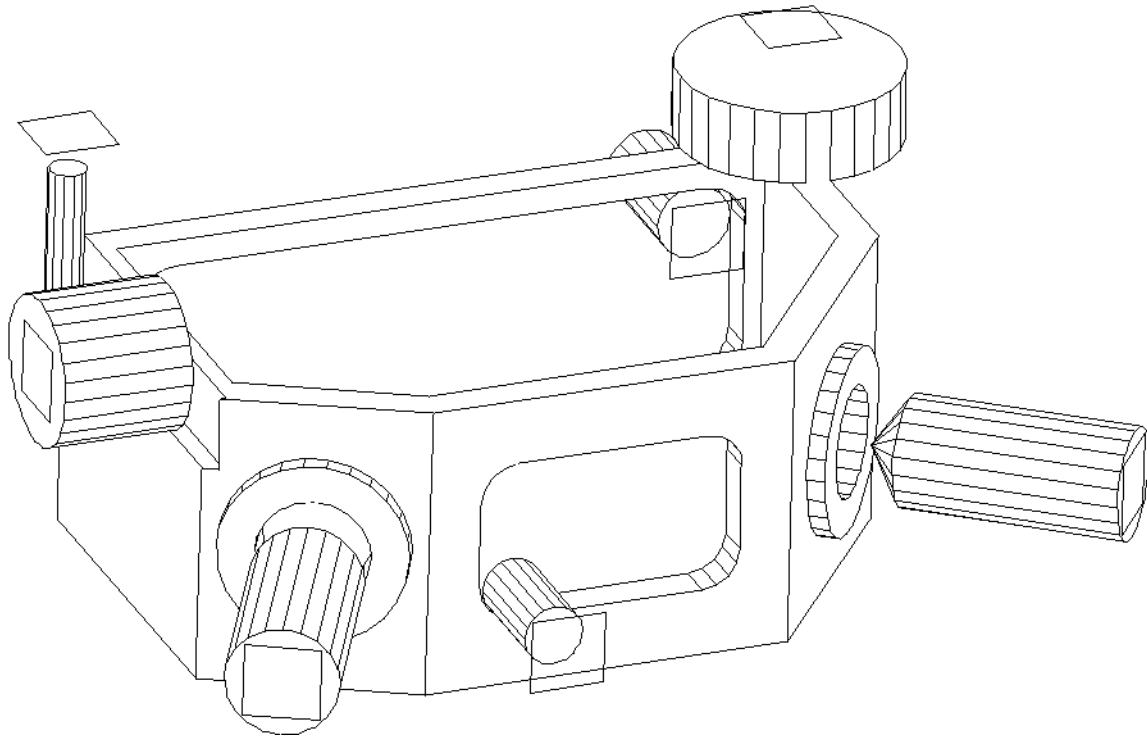


Figure n°22: Exemple d'association de facettes à des entités d'usinage

Si la cinématique d'une machine donnée permet de rendre perpendiculaire cette facette à l'axe de la broche, alors la machine est capable d'usiner l'entité.

En particulier, lorsque les entités retenues ont toutes une facette identique, une machine-outil à trois axes suffit. Si les facettes sont toutes perpendiculaires à un même plan, un centre à quatre axes suffit. Dans le cas contraire, on restreint le nombre d'entités à réaliser sans démontage ou on a recours à une machine à cinq axes.

L'augmentation du nombre d'axes diminue le nombre de prises de pièce et de démontages nécessaires et vice-versa. Pour usiner un polyèdre à n faces quelconque, une machine à trois axes a besoin de n prises de pièces, une machine à quatre axes d'au plus $n/2$ prises car si l'axe de rotation est perpendiculaire à l'arête commune à deux facettes, alors les deux facettes sont usinables sans démontage et une machine à cinq axes de deux prises.

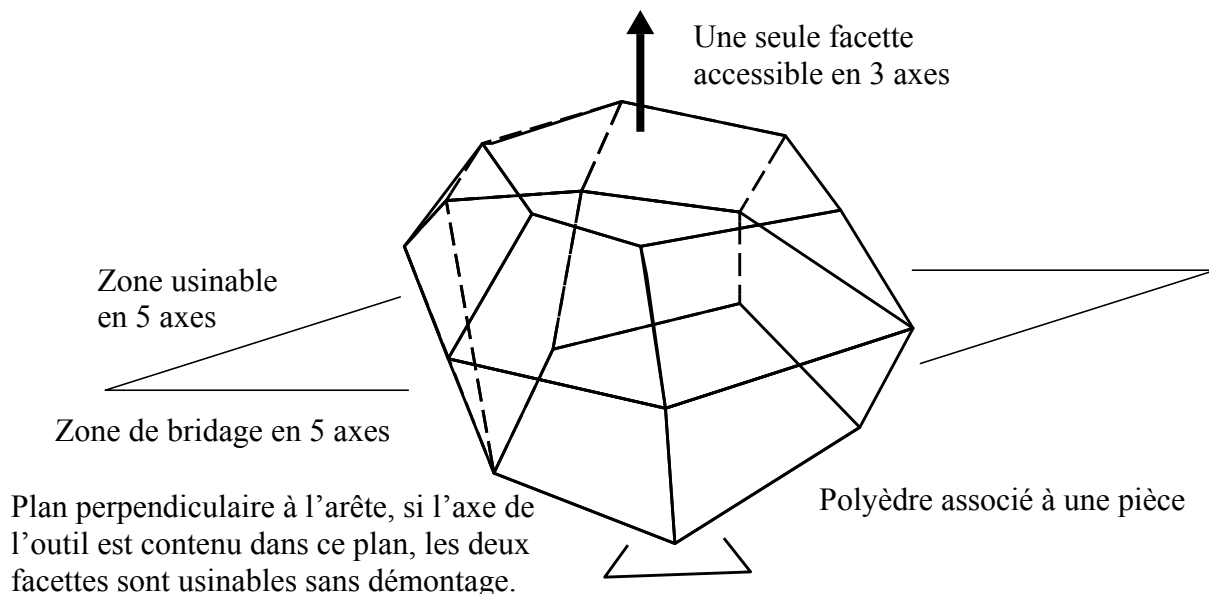


Figure n°23: Prise de pièce en fonction du nombre d'axes

Les contraintes autres que cinématiques restreignent l'étendue de cette méthode. La prise et le bridage de la

pièce empêchent l'usinage sur certaines faces. Les courses des axes influent sur les dimensions de la pièce à usiner. Les courses des axes de rotation peuvent être faibles (200 degrés d'amplitude sur certaines machines en cinq axes) et les longueurs d'outil limitent le volume usinable. Le document suivant propose une démarche de choix de la cinématique d'une machine-outil en fonction du type de pièce à réaliser.

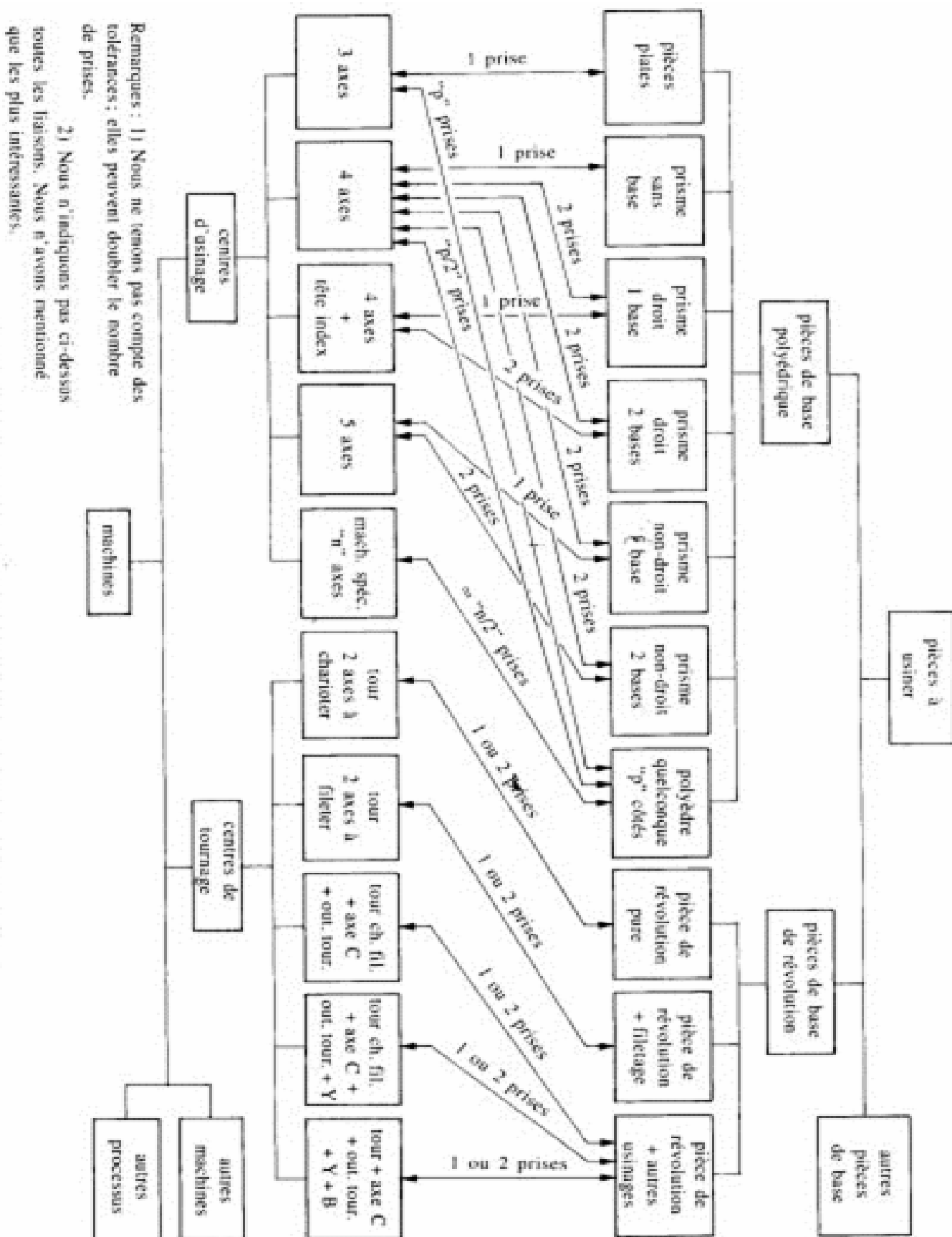


Figure n°24: Relation entre pièce et machine

2. Modélisation géométrique des machines-outils à commande numérique

Cette partie présente les différentes modélisations possibles d'une machine-outil et leurs applications. Nous nous intéressons essentiellement à la modélisation conventionnelle, qui impose les vocabulaires et us de la commande numérique et la modélisation vectorielle qui permet de mener rapidement l'étude des mouvements des machines simples.

2.1. Pourquoi modéliser les MOCN ?

Par définition, le pilotage d'une machine-outil à commande numérique est réalisé par un ordinateur qui établit une stratégie de commande des axes (sortie) en fonction des déplacements mesurés de la machine (entrée). Pour pouvoir agir, le calculateur doit se représenter la machine dans l'espace en fonction des données (déplacements sur les axes). Il s'appuie sur le modèle. La modélisation mécanique de la partie opérative est nécessaire au calcul de l'asservissement. De même la modélisation géométrique de la machine est nécessaire à sa commande par l'opérateur.

2.2. Différents types de modélisation

Il existe plusieurs modélisations suivant le point de vue adopté et les objectifs recherchés.

Au sens de l'utilisation, il existe un ensemble de règles et conventions normalisées, qui simplifient l'emploi des machines-outils à commande numérique et autorisent le passage d'un programme d'une machine à l'autre. C'est une modélisation cinématique, qui codifie la description des déplacements. Elle est nécessaire au programmeur. Par contre, elle n'est pas suffisante lorsqu'on envisage la mise en production d'une pièce, car les notions de précision d'usinage n'apparaissent pas dans le modèle.

Au sens de l'obtention de la pièce, on cherche avant tout à obtenir une géométrie correspondant au contrat de phase. Cette géométrie est exprimée sous forme de cotes nominales et de tolérances dimensionnelles. Il faut donc trouver un modèle qui permette de décrire les positions successives de l'outil dans l'espace machine et de placer correctement l'outil par rapport à la pièce. Ceci impose une modélisation, qui décrit les dimensions caractéristiques de la machine et de son environnement. Le régleur assure l'obtention de pièces bonnes en corrigeant les valeurs de ces caractéristiques. C'est la modélisation vectorielle de la machine-outil.

Au sens de la commande, la commande numérique doit être capable de transformer les ordres de mouvement donnés dans un système de coordonnées particulier, en des commandes de déplacement sur chaque axe. Il faut avoir une modélisation géométrique plus complète inspirée des modèles de la robotique, qui permette de passer d'un système à l'autre. De plus cette modélisation géométrique prend en compte les défauts géométriques de la machine et assure une commande plus précise.

Au sens de la commande d'axe, on peut être amené à réaliser une modélisation dynamique de l'axe, en prenant en compte les rigidités et les inerties des axes de déplacement. Cette modélisation permet de construire le schéma fonctionnel de l'asservissement de l'axe et de le corriger afin de répondre au cahier des charges dynamique de la machine.

2.3. Modélisation conventionnelle d'une MOCN

L'utilisation d'une machine-outil à commande numérique impose de fait l'utilisation d'un modèle associé. La définition normalisée des axes et les usages de programmation y concourent. Dans cette partie, nous rappelons les conventions indispensables à connaître lors de l'élaboration d'un programme de commande numérique.

2.3.1. Repères géométriques associés à une MOCN

On associe un repère à chaque solide ou groupe de solides identifiés comme un sous-ensemble dans l'opération d'usinage. On obtient ainsi :

- le repère de programmation: associé à la pièce, il permet la programmation de ses usinages. Il est composé d'une origine choisie arbitrairement et d'un trièdre direct.
- le repère pièce: associé à la pièce, il permet la mise en position de l'origine programme. Il est construit à partir des éléments constituant la liaison complète entre le porte-pièce et la pièce.
- repère porte-pièce: associé au porte-pièce, il définit la position de l'origine du repère pièce dans le repère machine.
- repère machine: associé à la machine, il est formé d'une origine souvent choisie comme l'origine mesure et d'un trièdre direct parallèle aux axes de translation de la machine.

2.3.2. Caractéristiques des repères associés à une MOCN

Il est important de noter que les axes de rotation sont gérés indépendamment des axes de translations. On commande une rotation ou une translation sur un axe, indépendamment l'une de l'autre. On n'opère pas, une transformation géométrique d'un repère dans un autre. Cela permet de garantir la portabilité des programmes d'usinage. Quelle que soit la configuration et la cinématique de la machine, un ordre de déplacement donné conduit à un unique résultat. Mais on peut être obligé de recalibrer les origines des repères après rotation.

De même, le repère pièce ne tourne pas avec la rotation physique des éléments de la machine. Il n'y a pas de transformation de coordonnées, l'axe Z reste l'axe de déplacement parallèle à la broche.

2.3.3. Programmation des MOCN

La programmation des MOCN repose aussi sur des conventions, à savoir les langages de programmation normalisés. Les normes [NF ISO 6983-1], [NF Z 68-036], [NF Z 68-037], [NF ISO 4342] décrivent les langages de programmation.

Il se trouve que ces normes ne sont pas complètes. Les constructeurs de commande numérique les adaptent aux spécifications de leurs machines. Ainsi, les programmations semi-automatiques du type CFAO, se font dans un autre langage nommé APT ([NF ISO 3592], [NF ISO 4343]).

Le programme est la description structurée de l'opération d'usinage. Il comporte deux types d'informations: des ordres de déplacements et des ordres auxiliaires.

Pour donner un ordre de déplacement, il faut spécifier un mode d'interpolation, un but et une vitesse de déplacement. Les types d'interpolation utilisés sont:

- interpolation linéaire, trajectoire décrite par un segment,
- interpolation circulaire, trajectoire décrite par un arc de cercle, souvent dégradée en interpolation linéaire au niveau de l'asservissement,
- interpolation hélicoïdale, trajectoire décrite par une hélice.

On assiste au développement actuel de l'interpolation polynomiale, où la trajectoire est décrite par une courbe polynomiale, ce qui permet d'assurer une meilleure dynamique de la trajectoire. Les ordres auxiliaires sont des ordres séquentiels qui permettent soit de rendre réalisable, soit d'améliorer la réalisation de l'usinage.

2.4. Modélisation géométrique des MOCN: Cellule Élémentaire d'Usinage

Ce concept se veut un modèle général de description de la cinématique et de la géométrie d'une machine-outil. Directement dérivé de la robotique, il lui emprunte les dénominations et les méthodes de résolution.

2.4.1. Principe de la cellule élémentaire d'usinage: CEU

On considère que la situation relative de l'outil par rapport à la pièce est assurée par un «assemblage» de corps solides. La liaison entre ceux-ci peut être complète, mais démontable, ou autoriser un mouvement de rotation ou de translation, que ce soit un mouvement de réglage ou d'avance.

On distingue deux espaces de description: l'espace des tâches et l'espace articulaire. La géométrie des surfaces à usiner et les dimensions du porte-pièce sont décrites dans l'espace des tâches. C'est un espace à trois dimensions. Les mouvements relatifs des organes de la machine et leurs dimensions intrinsèques sont représentés dans l'espace articulaire. C'est un espace à autant de dimensions que d'axes de mouvement.

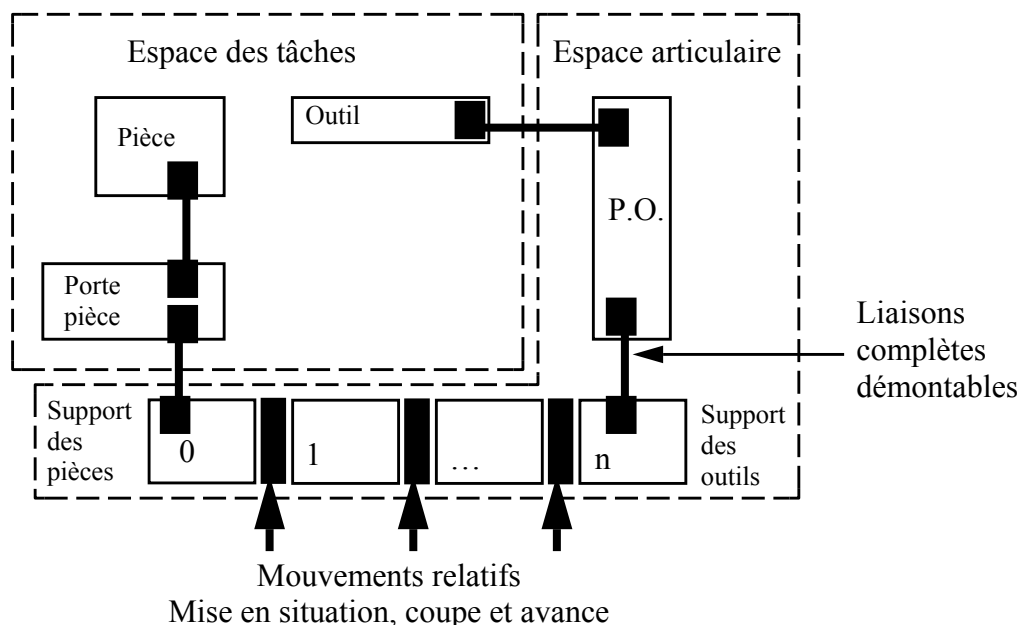


Figure n°25: Cellule Élémentaire d'Usinage

2.4.2. Nomenclature de la CEU

Sous le terme de Cellule Élémentaire d'Usinage est nommé un ensemble composé des éléments suivants:

- la structure mécanique articulée, pourvue de ses motorisations,
- le DCN,
- un porte-pièce, susceptible de recevoir la pièce à usiner,
- un outil, partie active et support.

La pièce à usiner ne fait pas partie de la cellule élémentaire d'usinage. On définit dans l'espace des tâches, les repères suivants:

- <PP>: repère porte-pièce, construit sur les éléments géométriques du dispositif matérialisant la liaison complète démontable avec la machine,
- <Pos>: repère de posage, construit sur les éléments géométriques servant à la mise en position de la pièce,
- <P>: repère pièce, coïncidant avec <Pos>, il est construit sur les surfaces de posage de la pièce.

On définit dans l'espace articulaire les repères suivants:

- <0> ou <SP>: repère support des pièces, construit sur le dispositif matérialisant la liaison complète démontable entre le solide machine appelé «support des pièces» et le porte-pièce.
- <I> ou <SO>: repère support des outils construit sur le dispositif matérialisant la liaison complète démontable entre le solide machine appelé «support des outils» et le porte-outil.
- <PO>: repère porte-outil, il est construit sur les surfaces de l'attachement de l'outil ou du porte-outil.

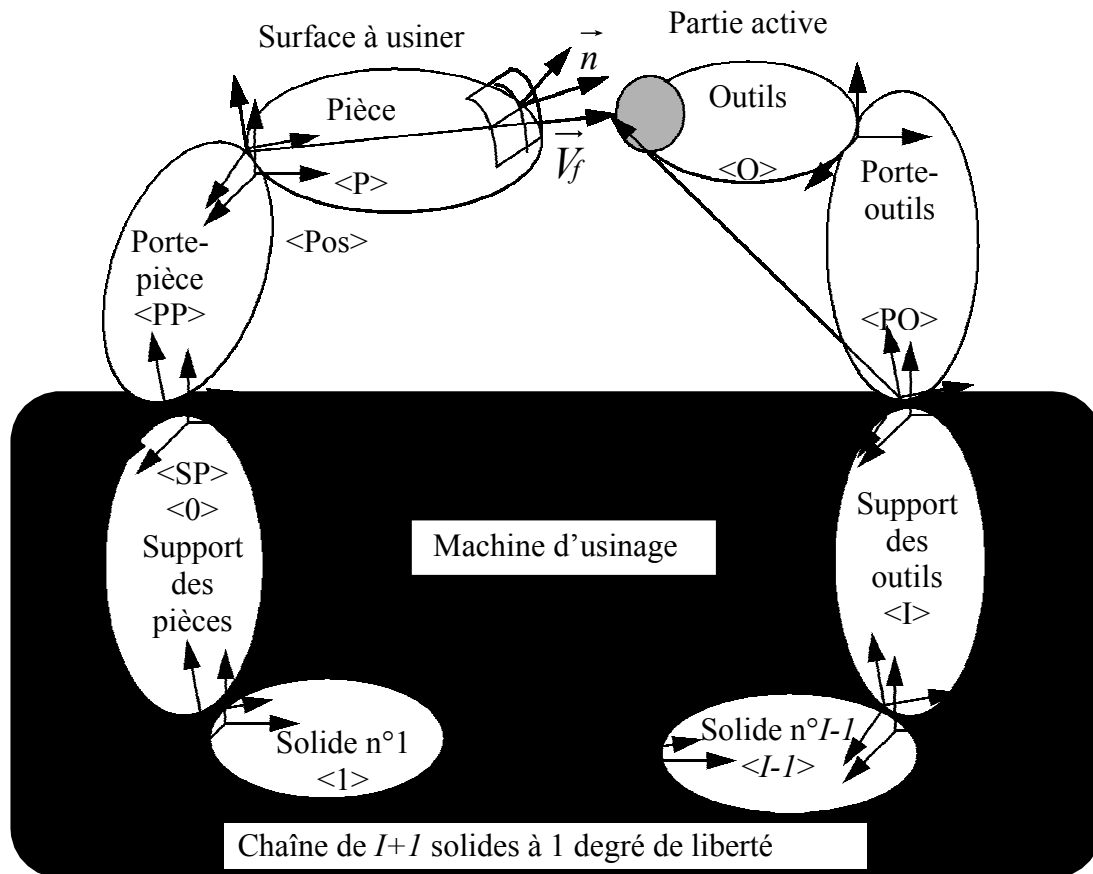


Figure n°26: Désignation des éléments de la CEU

2.4.3. Mise en œuvre du modèle

Une fois les repères géométriques définis, on peut étudier les mouvements d'un point de l'espace des tâches dans l'espace articulaire. L'objet de la modélisation est de déterminer le modèle géométrique qui permet de passer d'une configuration de l'espace articulaire vers une position (de l'outil par rapport à la pièce) de l'espace des tâches.

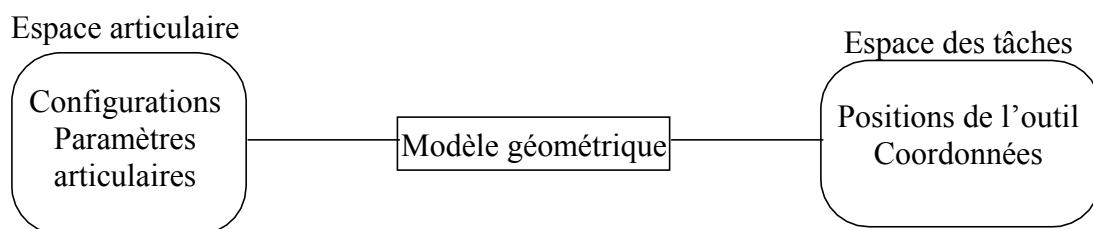


Figure n°27: Relation entre espace articulaire et espace des tâches

Pour cela, on crée des modèles géométriques associés à chaque élément. Pour la chaîne cinématique, on utilise les modèles classiques de la robotique pour décrire les positions respectives des solides. Pour l'outil on définit un modèle caractérisant la partie active de l'outil. Enfin, on modélise les liaisons complètes par des matrices de changement de repère ou des torseurs de petits déplacements. Deux niveaux de finesse sont possibles pour modéliser la machine-outil.

Modélisation globale de la machine

La modélisation complète de la machine a pour but d'étudier précisément la phase d'usinage et les défauts géométriques associés. On ne prend en compte ni le type, ni la qualité, ni la position réelle des axes numériques de la machine. La machine est alors modélisée comme un changement de repère qui permet de passer d'un repère associé à l'outil à un repère associé à la pièce.

On utilise pour cela les coordonnées homogènes et les matrices de changement de repère.

L'expression au moyen de coordonnées homogènes offre la possibilité d'appliquer les mêmes opérateurs aux points et aux vecteurs. Ceux-ci sont différenciés par la valeur de la quatrième ligne, qui est un facteur d'échelle, égale à 1 pour les points et à 0 pour les vecteurs. Les opérateurs permettent d'exprimer une rotation, une translation ou les deux combinées.

$$M = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \overrightarrow{OM} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{bmatrix} \quad T(M) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & tx \\ 0 & 0 & 0 & ty \\ 0 & 0 & 0 & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R(M) = \begin{bmatrix} ax & ay & az & 0 \\ bx & by & bz & 0 \\ cx & cy & cz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En coordonnées homogènes, le changement de repère s'applique de la manière suivante. Soit R_1 et R_2 deux repères. On connaît la position du centre O_2 du repère R_2 dans le repère R_1 et la matrice de changement de base de B_1 associée à R_1 à B_2 associée à R_2 , c'est-à-dire les coordonnées des vecteurs de la base B_2 exprimée dans B_1 .

$$\overrightarrow{O_1O_2} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}_{R_1} \quad (B_2 \rightarrow B_1) = \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_j & \alpha_k \\ \beta_i & \beta_j & \beta_k \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_k \end{bmatrix}_{R_1}$$

On a alors la relation suivante:

$$\overrightarrow{OM_{R_1}} = (R_1 \rightarrow R_2) \overrightarrow{O_2M_{R_2}}$$

L'opérateur est:

$$(R_2 \rightarrow R_1) = \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_j & \alpha_k & t_x \\ \beta_i & \beta_j & \beta_k & t_y \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_k & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{R_1}$$

Modélisation par axe de la machine

Dans ce cas, on cherche à obtenir un modèle qui permette le passage du repère associé à un solide, au repère associé au solide suivant. Ce passage est paramétré par deux distances et deux angles, qui évaluent les distances d_i , a_i et les orientations α_i et θ_i entre les deux solides.

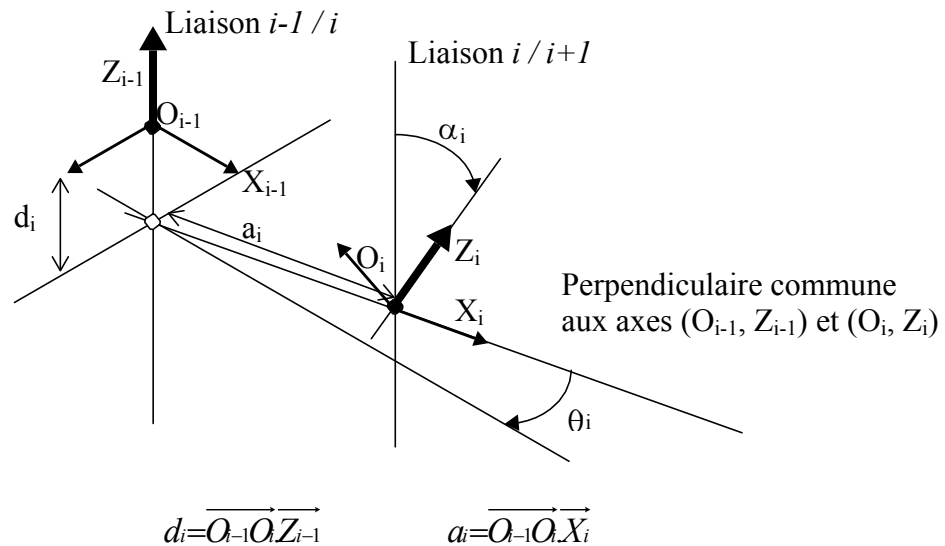


Figure n°28: Passage d'un solide de la chaîne cinématique au suivant

Ces deux niveaux de finesse peuvent être utilisés en modélisation directe ou inverse:

- en modélisation directe, pour un ensemble de consignes données aux axes, on trouve la position de l'extrémité outil dans le repère associé à la pièce;
- en modélisation inverse, pour un jeu de coordonnées de l'extrémité de l'outil exprimées dans le repère associé à la pièce, on trouve les consignes à programmer sur les axes.

Ainsi, ce modèle est capable de produire par fermeture de la boucle un modèle de la surface usinée. On peut, donc, prévoir la qualité de la pièce avant usinage. Ce modèle permet aussi la transformation de coordonnées de l'espace des tâches à l'espace articulaire.

Par contre, ce modèle est difficilement utilisable au pied de la machine, car il nécessite une identification complète des axes avant l'utilisation.

2.5. Modélisation vectorielle des MOCN

La modélisation vectorielle d'une machine-outil passe par la construction de la relation vectorielle entre le vecteur liant l'origine mesure au point piloté et les grandeurs caractéristiques de la machine. Elle permet alors la description des mouvements de l'outil et de la pièce dans un repère associé à la machine.

2.5.1. Points utilisés pour modéliser la géométrie

Ces points sont soit des positions particulières des mobiles de la chaîne cinématique de la machine, soit des points physiques associés à des interfaces entre solides.

R	Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-outil et la machine. Il est défini par les surfaces de mise en position.
O_m	Point coïncidant de R à la date de mise en référence des éléments mobiles. Ce point est appelé «origine mesure».
O_0	Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre la machine et le porte-pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position.
O_p	Point caractéristique de la liaison encastrement supposée parfaite entre le porte-pièce et la pièce. Il est défini par les surfaces de mise en position et appelé «origine pièce».
OP	Origine du repère de programmation
P	Point caractéristique de l'outil: point générateur de l'outil
C	Centre du rayon de bec de plaquette en tournage ou du rayon de bout en fraisage
Q_i	Point(s) programmé(s), visé(s), à atteindre (indice i)

Tableau n°2: Définition des points utilisés

Le point R est un point situé à l'interface entre le porte-outil et la machine. Suivant la machine (centre de fraisage, ou centre de tournage), la forme de la liaison entre le porte-outil et la machine n'est pas la même, le point R peut donc changer d'une machine à l'autre. C'est un point de référence qui permet le calcul des caractéristiques de la machine.

Le point O_0 est un point situé à l'interface entre le porte-pièce et la machine. De plus, en plus, pour des raisons de standardisation, on alèse des centreurs sur les tables des machines-outils. On place, alors, le point O_0 à l'intersection de l'axe de l'alésage et du plan associé à la table.

Le point O_p est l'intersection des éléments géométriques (plans, droites) associés aux liaisons qui concourent à la liaison complète entre la pièce et le porte-pièce.

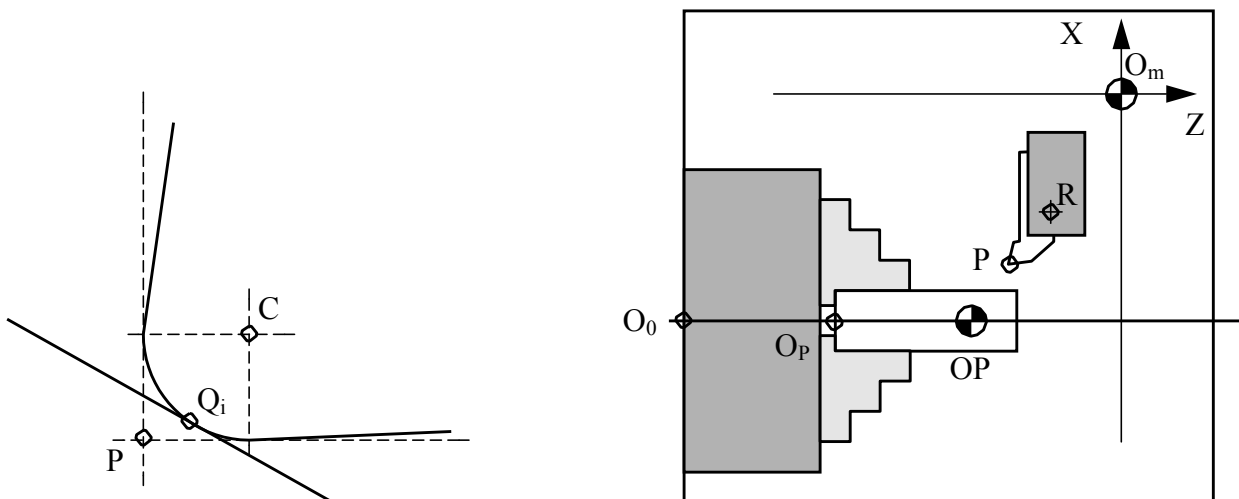


Figure n°29: Représentation des points dans le cas du tournage

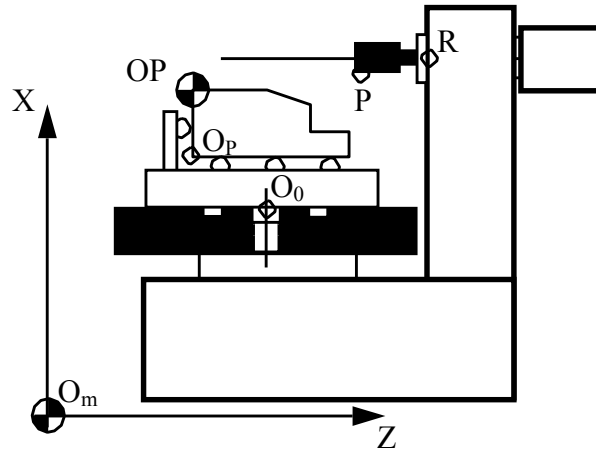


Figure n°30: Représentation des points dans le cas du fraisage

2.5.2. Vecteurs caractéristiques des éléments de la MOCN

A partir de couples de points appartenant aux mêmes solides, on définit des vecteurs.

$\overrightarrow{O_m O_0}$	Caractérise la machine.
$\overrightarrow{O_0 O_p}$	Caractérise le porte-pièce.
$\overrightarrow{O_p OP}$	Caractérise la pièce.
$\overrightarrow{OP Q_i}$	Caractérise la pièce: position de Q_i dans le repère de programmation.
$\overrightarrow{Q_i C}$	Correction de rayon d'outil normale au profil.
\overrightarrow{CP}	Caractérise la configuration de l'outil en tournage et le type de fraisage.
\overrightarrow{PR}	Caractérise l'outil (jauges).
$\overrightarrow{O_m R}$	Caractérise le déplacement des éléments mobiles.

Tableau n°3: Définition des vecteurs caractéristiques des MOCN

2.5.3. Equation vectorielle utilisée en usinage à commande numérique

La relation de Chasles appliquée au vecteur $\overrightarrow{O_m R}$ nous donne:

$$\overrightarrow{O_m R} = \overrightarrow{O_m O_0} + \overrightarrow{O_0 O_p} + \overrightarrow{O_p OP} + \overrightarrow{OP Q_i} + \overrightarrow{Q_i C} + \overrightarrow{CP} + \overrightarrow{PR}$$

2.5.4. Remarques

Selon la définition de l'origine mesure, on constate qu'elle est tributaire du choix du point courant R, qui est fait par le constructeur de la machine-outil. Il en est de même pour la définition des jauges.

Si on change la position de R, on constate alors que le vecteur caractéristique de la machine et les jauges varient. Elles peuvent alors ne plus représenter une dimension physique de la machine ou de l'outil, ce qui peut gêner le régleur.

2.5.5. Apports et limites du modèle

Par sa construction propre, ce modèle est un modèle simple et facile à mettre en œuvre.

Ce modèle permet une meilleure compréhension des paramètres géométriques définissant la MOCN, car il introduit un vocabulaire expressif et indépendant de la marque de la commande numérique. On peut alors prendre en main plus rapidement une nouvelle machine. Cette approche permet la mise en place d'une démarche rigoureuse dans la résolution des problèmes rencontrés au pied des machines. Nous montrons qu'elle s'adapte bien au réglage et au palpage. Cette méthode a été testée auprès d'élèves en formation initiale et de techniciens d'entreprises en formation continue.

Par contre, ce modèle possède deux limites importantes. La première vient du fait que l'on considère comme parfaits les déplacements de la machine. On se place ici dans un cas de production sur une machine donnée que l'on considère comme capable de produire. Ce modèle ne saurait être employé pour permettre la correction dynamique par le calculateur des trajectoires en fonction des imperfections de la machine. Cette opération est interne à la machine. La seconde limite est l'incapacité de gérer des rotations. Plus précisément, à partir du moment où l'usinage impose une rotation continue d'un des axes de déplacement, ce modèle ne convient pas. C'est le cas de l'usinage en 5 axes continus, ou le cas de l'usinage d'une hélice. Par contre, si les rotations sont utilisées pour faire du positionnement, ce qui représente la grande majorité des cas d'utilisation des centres de fraisage à 4 axes, alors ce modèle s'emploie parfaitement, même si son application est plus délicate.

3. Le réglage sur CN

L'objet de ce chapitre est de présenter le réglage sur commande numérique et d'analyser les paramètres à régler, les moyens de les régler, ainsi que l'adaptation du réglage en situation d'usinage. Pour mener à bien le réglage, nous considérons que nous avons le contrat de phase de l'usinage à réaliser ou la fiche de réglage associée. Nous n'étudierons pas la construction de la fiche de réglage à partir du contrat de phase.

3.1. Rappel sur le réglage

3.1.1. Le contrat de phase

À l'issue de l'avant-projet d'étude de fabrication, un ensemble de contrats de phase est rédigé. Sur ces documents est spécifié l'ensemble des informations nécessaires à la mise en production de la phase concernée:

- Numéro de la phase concernée,
- Référence de la machine:
 - Position de l'origine porte-pièce O_0 ,
- Prise de pièce:
 - Référence du montage d'usinage,
 - Position de l'origine du repère pièce O_P ,
- Types d'outils:
 - Référence des outils sélectionnés,
 - Conditions de coupe des outils,
 - Référence des portes-outils,
 - Jauges des outils,
- Position de l'origine du repère de programmation OP ,
- Trajectoires d'outil,
- Cotes de fabrication à obtenir dans la phase.

Ce contrat permet de vérifier si les pièces obtenues sur la machine sont bonnes et peuvent continuer à suivre le cycle de fabrication.

3.1.2. Problème du réglage

Pour régler une machine, on doit se baser sur le contrat de phase. Mais celui-ci et les cotes de fabrication associées, ne donnent pas de méthode de réglage. On peut établir des fiches de réglage qui définissent la méthode de réglage, par exemple du type suivant:

- réglage indépendant des outils,
- possibilité de mettre en production un lot de pièces sans surveillance,
- possibilité de réglage sur la première pièce.

Ainsi, le réglage a pour but de renseigner l'ensemble des valeurs des paramètres du modèle vectoriel de la commande numérique, afin que les pièces produites respectent le contrat de phase.

3.1.3. Définitions

Pièce bonne: si toutes les cotes de fabrication sont vérifiées dans toutes les phases, la pièce est bonne.

Machine réglée: si toutes les pièces produites respectent les cotes de fabrication de la phase en cours, la machine est réglée.

Cote de réglage: cote donnée au régleur comme contrat. Elle est à vérifier sur les postes de travail, sur toutes les pièces pour que les cotes de fabrication soient assurées. Une cote de réglage est définie pour permettre un réglage indépendant des outils. Elles dépendent du mode de réglage retenu et sont issus de la décomposition des cotes de fabrication.

Cote de production: cote de réglage dont l'intervalle de tolérance est réduit pour permettre la production d'un lot de pièces sans vérification.

Fiche de réglage: ce document donne le processus de réglage, les cotes de réglage et si besoin, le mode de mesure des cotes de réglage. Pour que la machine soit déclarée bien réglée et pour autoriser la production, il faut que le contrat de réglage soit respecté.

3.2. Paramètres de réglage

Le réglage de l'opération d'usinage passe par la mesure des caractéristiques dimensionnelles associées aux différents éléments.

3.3. Détermination des caractéristiques du modèle vectoriel de la CN

3.3.1. Vecteur caractéristique outil, porte-outil: jauges

Dans la suite, on nomme «outil», l'ensemble monté outil / porte-outil.

Le vecteur \overline{PR} caractérise l'outil et relie le point générateur de l'outil P et le point de référence R relatif à la liaison encastrement entre l'outil et la machine. On appelle «jauge» les grandeurs scalaires caractéristiques de l'outil représentées sur la figure suivante.

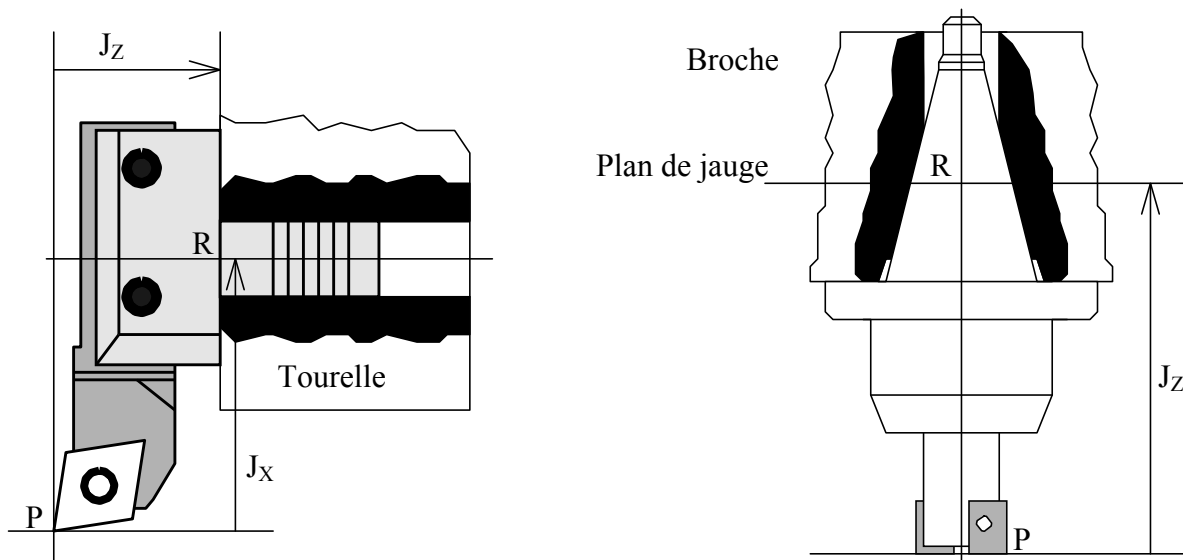


Figure n°31: Gauges d'un outil de tournage et d'une fraise

Pour un outil de tournage, on a $J_x = \overrightarrow{PR}\vec{X}$ et $J_z = \overrightarrow{PR}\vec{Z}$, alors que pour un outil de fraisage, on a $J_z = \overrightarrow{PR}\vec{Z}$ et $R_{outil} = \overrightarrow{PR}\vec{n}$. Le vecteur \vec{n} représente la normale extérieure à la surface, lors d'un usinage par contournage à la fraise deux tailles. Le fait que la normale soit choisie extérieure à la matière permet d'obtenir une valeur positive du rayon.

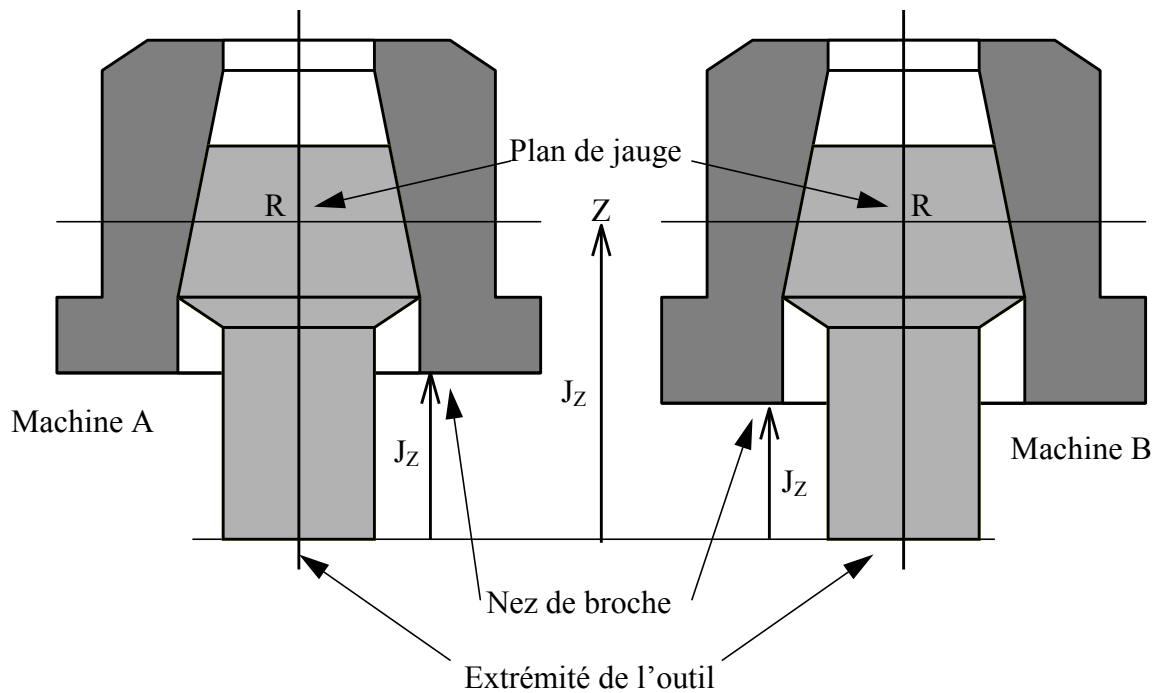
Trois méthodes peuvent être mises en œuvre pour quantifier ce vecteur. La première consiste en une mesure directe sur la machine de ce vecteur. Elle permet une grande précision, mais impose une immobilisation de la machine. Elle est employée lorsque les machines ne permettent pas une bonne répétabilité de montage de l'outil (c'est surtout le cas du tournage, où l'outil est monté directement sur certaines tourelles sans adaptateur, ni élément intermédiaire). La seconde passe par la mesure en dehors de la machine, sur un banc de pré-réglage par exemple. Cette méthode offre un gain en productivité mais introduit un écart sur les jauges dû à la dispersion de remise en position de l'outil dans la machine. On généralise l'utilisation de la seconde méthode dans le cas des pièces de mécanique générale. La troisième comprend une mesure externe sur banc, suivie d'un affinage sur machine soit après usinage de la première pièce, soit en utilisant un palpeur outil dans le cadre d'une production automatisée. Cette méthode permet l'usinage de pièces de meilleure précision.

Si on utilise une méthode de mesure hors machine, il est nécessaire de configurer le moyen de mesure en fonction de la machine. Si la jauge mesurée sur le banc est PR_1 , entre le point P de l'extrémité de l'outil et le point R_1 , point de référence du banc de mesure et si la jauge sur la machine est PR_2 entre le point P et le point R_2 , point de référence de la machine, on suppose alors que $PR_2 = PR_1$, dans une opération de mesure sur un banc. Ce qui est exact si R_1 et R_2 ont la même définition. Ce n'est pas forcément le cas, lorsque l'on gère un atelier à plusieurs machines et bancs de pré-réglage.

Cas du fraisage

Le positionnement du porte-outil dans la broche se fait au moyen d'un cône. Deux points de l'attachement sont caractéristiques (voir figure n°32):

- le point intersection du plan de jauge du cône et de son axe: ce point est censé définir physiquement l'encastrement du cône. Il n'est fonction que de la forme du cône et ne dépend pas de la forme de la broche. Par contre il n'est pas physiquement identifiable, si ce n'est par l'encastrement d'un cône étalon.
- le point d'intersection du nez de broche avec l'axe: c'est un point aisément accessible car sa position est constante par rapport au plan de jauge. Par contre, elle n'est pas identique d'une machine à l'autre, ce qui peut imposer une correction par machine.



Seule la distance entre le plan de jauge et l'extrémité de l'outil reste constante.

Figure n°32: Comparaison entre les jauges mesurées à partir du plan de jauge et les jauges mesurées à partir du nez de broche

Ce problème ne se pose pas dans le cas des nouveaux attachements dit cône - face (HSK, ISO), qui possèdent un appui plan prépondérant pour augmenter les forces de serrage du porte-outil dans la broche. La norme [NF E 60-023] impose le plan de jauge au niveau du nez de broche, mais cette norme n'est pas équivalente à une norme ISO et n'est définie que pour les changements manuels d'outil. En ce qui concerne le point P, on choisit l'intersection entre l'axe et l'extrémité de l'outil. Les informations nécessaires à la commande numérique sont la jauge J_z selon l'axe \vec{Z} , le rayon de l'outil et celui de son arête de coupe.

Cas du tournage

Les types d'attachement sont plus nombreux. Comme les porte-outils ne sont pas coniques, il est plus facile de choisir un point physiquement identifiable. Par exemple, le point de référence R du système d'attachement VDI est l'intersection de la face avant de la tourelle et de l'axe de l'alésage de centrage. Les informations nécessaires à la commande numérique sont la jauge J_x selon l'axe X, la jauge J_z selon l'axe Z, le rayon de bec de l'outil et la position du centre de plaquette C par rapport au point piloté P.

Par contre le choix du point P peut poser des problèmes. La partie coupante de l'outil est définie par la position des trois points C, Q, P. P et C sont des points fixes, dans un repère associé à l'outil, Q est mobile, il génère la forme et varie en fonction de l'orientation du profil.

On peut choisir de viser au pré-réglage le point C, Il faut alors décrire la trajectoire que doit suivre C pour que le profil usiné soit bien celui attendu. Cela nécessite d'appliquer au profil de la pièce finale une opération d'offset d'une valeur égale au rayon de bec de l'outil.

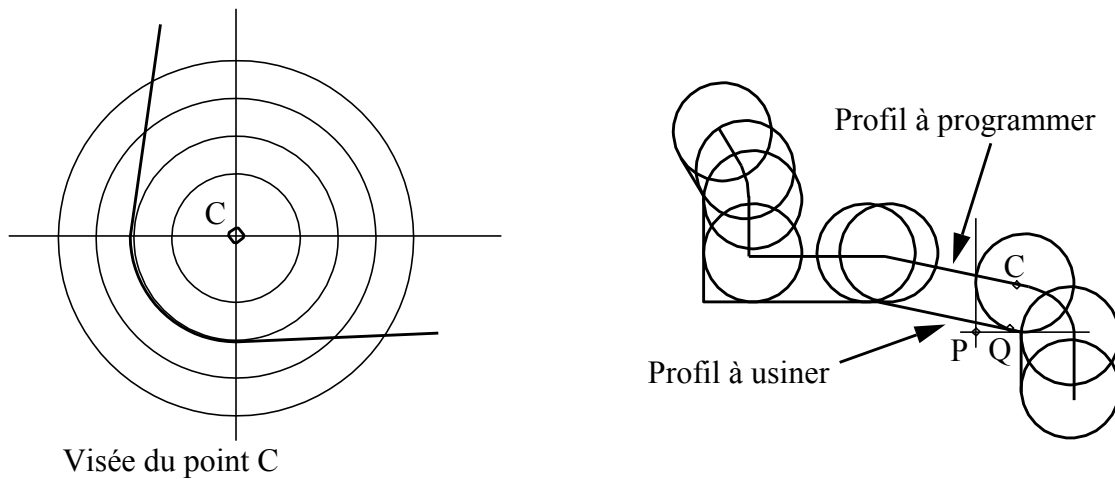


Figure n°33: Définition des jauges au centre de rayon de bec

Si on vise le point P lors du pré-réglage, le profil à programmer est bien celui spécifié sur le dessin de définition. Lors d'une opération de chariotage (respectivement de dressage), le point de contact Q est à l'ordonnée (respectivement à l'abscisse) du point P, la forme usinée est celle décrite. Par contre dans le cas de contournage d'un profil quelconque, ou d'un cône, les points Q et P ne coïncident plus. Le profil généré est faux.

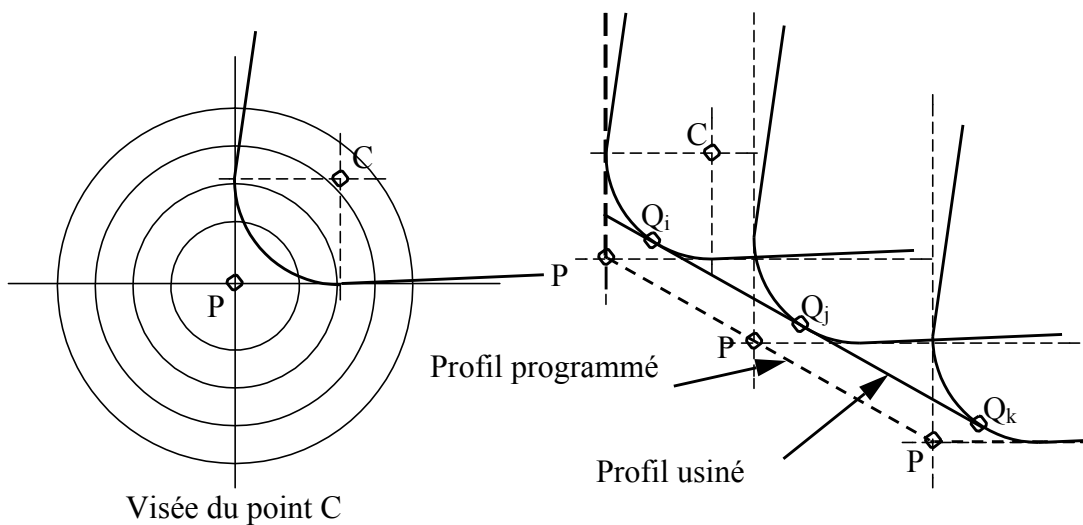
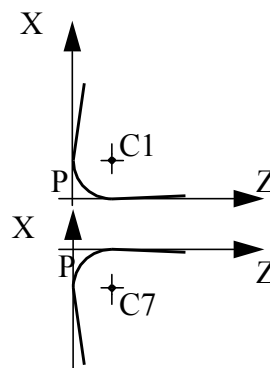
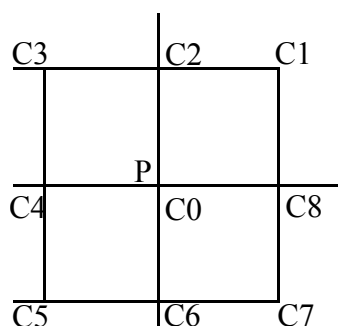


Figure n°34: Définition des jauges à l'extrémité du rayon de bec

Pour y remédier, il faut programmer une correction normale de profil. On doit alors spécifier à la commande numérique la valeur du rayon et la position de centre du bec de la plaquette.

Cas de la
tourelle arrière



Cas de la
tourelle avant

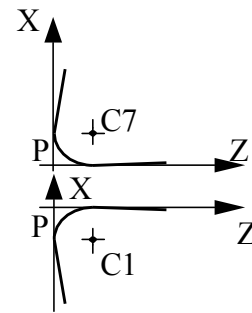
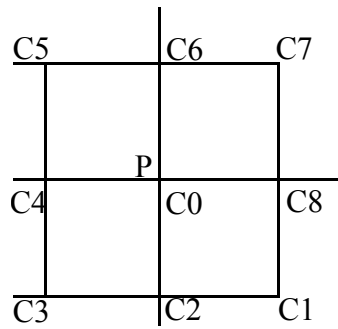


Figure n°35: Codes de correction de la position du centre de l'outil

Les informations nécessaires à la commande numérique sont la jauge J_x selon l'axe X, la jauge J_z selon l'axe \vec{Z} , le rayon de l'outil et la position du centre de plaquette C par rapport au point piloté P.

3.3.2. Vecteur caractéristique du porte-pièce

Il faut quantifier le vecteur $\overrightarrow{O_0 O_P}$.

Cas du tournage

Pour des tours à mandrin démontable, on considère généralement, que le porte-pièce est le mandrin en entier. Par contre, dans les autres cas, le porte-pièce est formé des mors (doux ou durs) et / ou d'une butée d'appui sur \vec{Z} . On choisit l'une ou l'autre des solutions suivant la fréquence des changements du mandrin complet. La caractérisation de la position de O_0 est simple à mener. Par contre celle de O_P pose plus de difficultés. En effet, la structure du mécanisme de serrage et la force centrifuge ont tendance à forcer les mors à se détacher de la face avant du mandrin. La position de O_P n'est donc pas la même à l'arrêt sans pièce montée et en fonctionnement avec une pièce montée. La correction à apporter se fait expérimentalement.

Cas du fraisage

Dans une optique de standardisation, le porte-pièce regroupe deux entités fonctionnelles: une entité fonctionnelle de mise en position du porte-pièce sur la machine et une entité fonctionnelle de mise en position de la pièce sur le porte-pièce. La première entité est généralement la somme d'une liaison appui-plan principal, d'une liaison linéaire annulaire et d'une liaison ponctuelle réalisée par deux lardons. Le point O_0 est alors le centre de la liaison linéaire annulaire projeté sur le plan. Pour la seconde entité, la mesure de la position du point O_P dépend du type de prise de pièce. La mesure de la position relative de O_0 et de O_P peut se faire sur une machine à mesurer tridimensionnelle.

Si la première entité fonctionnelle est absente sur le porte-pièce, il est nécessaire de quantifier directement le vecteur $\overrightarrow{O_m O_P}$ sur la machine. Cela se fait, souvent au moyen de pinnules, ou de comparateurs et jeux de cales étalons. Cette technique entraîne une immobilisation coûteuse de la machine et la nécessité de refaire les mesures à chaque démontage. Dans ce cas, l'utilisation d'un palpeur peut s'avérer tout à fait rentable.

3.3.3. Vecteur caractéristique de la machine

Il faut déterminer le vecteur $\overrightarrow{O_m O_0}$. Le point O_m étant défini comme une position particulière du point R, la détermination du vecteur nécessite la mise en coïncidence de R en O_0 . On obtient directement les coordonnées cherchées. Lorsque ceci n'est pas possible physiquement, un empilement de cales étalons peut suffire à atteindre le point. De même, lorsque R n'est pas physiquement accessible, on est obligé d'utiliser un étalon.

Cas du fraisage

Si pour le réglage d'une machine à fraiser, on considère que la jauge outil est mesurée à partir du plan de jauge de l'outil, il est nécessaire que le point R appartienne à ce plan de jauge. Par conséquent la mesure du vecteur $\overrightarrow{O_m O_0}$, impose l'emploi un outil étalon fixé dans la broche de la machine, car R n'est pas accessible. On a alors la relation suivante illustrée par la figure n°36:

$$\overrightarrow{O_m O_0} = \overrightarrow{O_m R_{\text{étalon}}} + \overrightarrow{(RP)_{\text{étalon}}} + \overrightarrow{P_{\text{étalon}} O_0}$$

Cette caractéristique devant être mesurée précisément, il faut analyser les sources d'erreur de la mesure:

- $\overrightarrow{O_m R_{\text{étalon}}}$: valeur lue sur la machine, précision théorique de 0,001 mm,
- $\overrightarrow{(RP)_{\text{étalon}}}$: «jauge de l'outil étalon» ($J_{\text{étalon}}$)
- $\overrightarrow{P_{\text{étalon}} O_0}$: égale à $J_{\text{référence}}$, considérée comme référence, précision de 0,01 mm.

On constate que la mesure précise du vecteur $\overrightarrow{O_m O_0}$ passe par une connaissance précise de $J_{\text{étalon}}$. Par contre cette valeur n'influe pas sur la précision de l'usinage. Pour usiner précisément, il n'est pas nécessaire de connaître la valeur de cette jauge avec précision, dès l'instant que ce même étalon est utilisé pour configurer le banc de mesure d'outil.

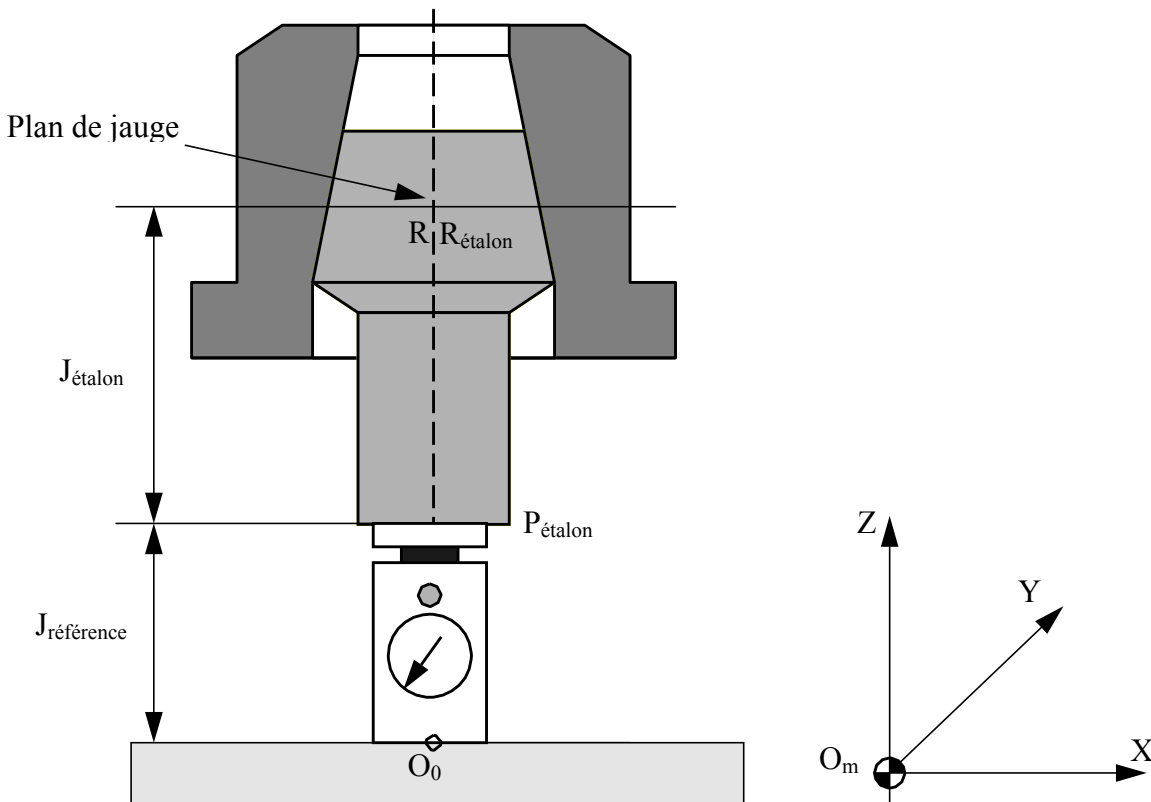


Figure n°36: Calcul de $\overrightarrow{O_m O_0}$ par la méthode d'un étalon de référence

3.3.4. Relation entre la caractéristique machine et la caractéristique outil dans le cadre du fraisage

Nous allons montrer qu'une mesure approchée de la caractéristique de la machine, du fait d'une connaissance approchée de la longueur de l'outil étalon, n'influe pas sur la précision de l'usinage à condition que l'outil étalon serve aussi à étalonner le banc de mesure des jauges.

Soit un atelier réduit à une machine à fraiser et à un banc de pré-réglage. On a mesuré les caractéristiques des deux machines avec le même outil étalon. On décide de mesurer un outil quelconque sur le banc, d'afficher les mesures dans les registres outils de la machine et d'usiner. La question est de savoir si une erreur sur la longueur de l'outil étalon influe sur la position de l'outil.

Hypothèses:

- on néglige les dispersions de mise en position des outils dans les broches du banc de pré-réglage et de la machine.
- on ne s'intéresse qu'à la projection des vecteurs sur \vec{Z} .

Etude de la mesure sur le banc de pré-réglage

Comme les dispersions de mise de position sont négligées, le plan de jauge du montage du cône de l'outil étalon dans la broche du banc et le plan de jauge du cône de l'outil dans la même broche sont confondus. Le banc ayant une mesure initiale donnée par l'étalonnage initial, on calcule la longueur de l'outil par addition du déplacement réalisé à la longueur d'étalonnage.

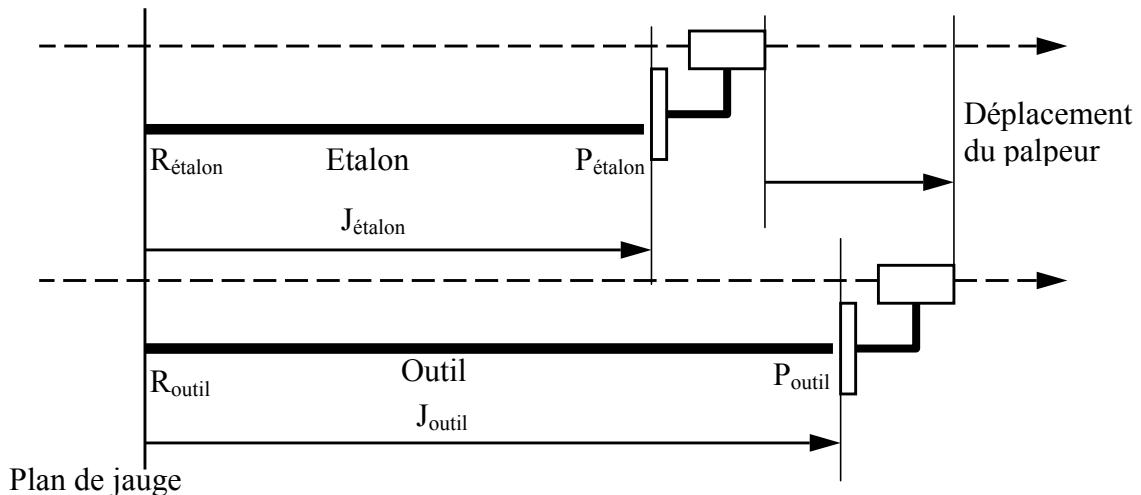


Figure n°37: Mesure de la jauge d'un outil sur un banc de pré-réglage

$$\overrightarrow{(PR)}_{outil} = \overrightarrow{(PR)}_{étalon} + \overrightarrow{P_{outil}P_{étalon}}$$

Etude de l'usinage, écrivons l'équation vectorielle simplifiée régissant l'usinage:

$$\overrightarrow{O_m R} = \overrightarrow{O_m O_0} + \overrightarrow{O_0 OP} + \overrightarrow{OPQ_i} + \overrightarrow{Q_i P} + \overrightarrow{(PR)}_{outil}$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{O_m R} &= \overrightarrow{O_m R_{étalon}} + \overrightarrow{(RP)}_{étalon} + \overrightarrow{P_{étalon} O_0} + \overrightarrow{O_0 OP} + \overrightarrow{OPQ_i} + \overrightarrow{Q_i P} + \overrightarrow{(PR)}_{étalon} + \overrightarrow{P_{étalon} P_{outil}} \\ \overrightarrow{O_m R} &= \overrightarrow{O_m R_{étalon}} + \overrightarrow{O_0 OP} + \overrightarrow{OPQ_i} + \overrightarrow{Q_i P} + \overrightarrow{P_{étalon} P_{outil}} \end{aligned}$$

La projection de cette équation sur \vec{Z} montre que la position en Z de R n'est plus fonction de la valeur de la jauge de l'outil étalon. Par contre, elle devient fonction de la variation de déplacement du banc de pré-réglage $\overrightarrow{P_{étalon}P_{outil}}$. On peut penser que ce déplacement est d'une précision identique voire supérieure à la précision de déplacement de la machine.

Ainsi, on constate que le calcul des longueurs caractéristiques d'une machine à fraiser selon l'axe de la broche avec un outil étalon dont on ne connaît pas la longueur n'introduit pas d'erreur. Par contre la valeur de la caractéristique déduite peut être fortement différente de la valeur réelle, ce qui peut gêner l'opérateur.

3.4. Outils de réglage

3.4.1. Banc de pré-réglage

Le banc de pré-réglage est une technique rapide et assez précise de mesure de jauge-outil. Cet outil s'intègre bien dans les nouvelles structures des ateliers qui privilégient la rationalisation et la standardisation.

Le réglage hors machine permet avant tout d'éliminer les temps improductifs sur les machines. Il offre aussi la possibilité de mieux gérer le parc outils, un outil a une seule jauge pour tout l'atelier, quelle que soit la machine qui l'utilise.

Fonctionnellement, un banc doit permettre de:

- mettre en position l'outil dans un repère de référence,
- disposer d'un moyen de pointage des points caractéristiques de l'outil,
- disposer d'un moyen de mesure de la position du moyen de pointage dans le repère de référence,
- disposer de fonctionnalités de communication avec l'environnement informatique (GPAO, commande numérique).

Le pointage se fait souvent soit par optique (projecteur de profil ou laser), ou par palpeur. Le grossissement du projecteur varie de 10 à 30 fois.

On mesure les déplacements avec des règles incrémentales de résolution variant entre 1 μm et 10 μm .

Même si la mesure est précise, la valeur de la jauge ne l'est pas. Entre la date de la mesure et la date de l'usinage, l'outil est démonté, ce qui introduit des dispersions de remise en position de l'outil sur le banc et de l'outil sur la machine. De plus l'outil n'est pas en configuration d'usinage lors de la mesure, on ne peut donc pas évaluer les déformations possibles.

Par les gains économiques qu'elle procure et sa relative précision, la technique de mesure par banc reste pour l'instant la plus efficace.

3.4.2. Réglage sur machine, usinage

Le réglage des outils par usinage d'une pièce, ou par accostage d'un étalon monté sur la machine est nécessaire lorsqu'on ne peut pas assurer une remise en position avec un minimum de précision du porte-outil à chaque montage.

Le premier mode de réglage est le mode qui produit le moins d'erreur puisque le réglage se fait dans la configuration d'usinage:

- l'outil n'est pas démonté, il n'y a pas de dispersion de remise en position;
- si on usine dans les configurations de l'usinage, c'est à dire avec les mêmes conditions de coupe, on prend en compte le comportement dynamique de l'outil.

Par contre, la mesure des cotes est plus délicate. Dans le cas de cotes de réglage, il faut mettre en œuvre un moyen de mesure sans démontage de la pièce. Pour les cotes de fabrication, le démontage est nécessaire, il faut alors prendre en compte les dispersions de remise en position de la nouvelle pièce sur le porte-pièce.

L'usinage d'une pièce de test paraît apporter des informations plus précises que l'accostage d'un étalon.

En généralisant, on pourrait constater que tout réglage précis d'une opération d'usinage se termine par un réglage en usinant. Par contre le réglage complet d'une machine par cette méthode n'est pas productif et immobilise les machines.

3.4.3. Auto-réglage des machines-outils

L'autoréglage d'une machine-outil permet la mise en œuvre du réglage directement sur le poste d'usinage,

de manière automatique. Le réglage sur le poste doit donner des résultats plus précis et l'automatisation minimise les temps improductifs. Il permet un suivi dynamique et une adaptation du réglage en fonction de l'usure des outils. Pour mener à bien un auto-réglage, il est nécessaire de mettre en œuvre deux systèmes de mesure:

- un système de mesure outil,
- un système de mesure pièce.

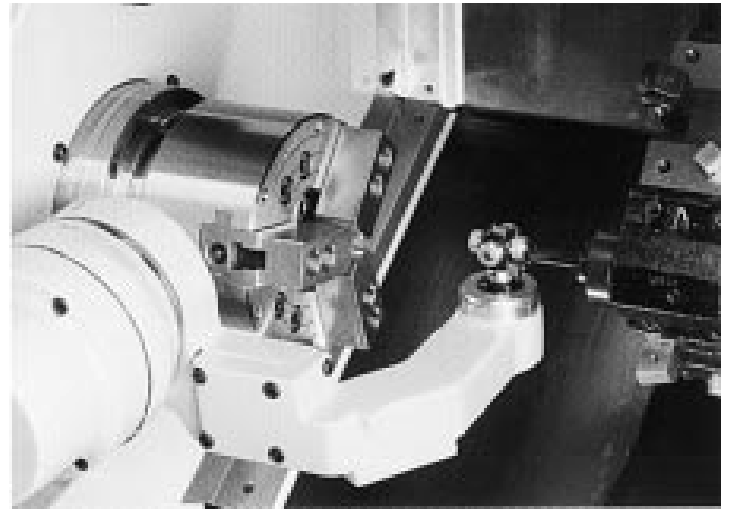


Figure n°38: Mesures des jauges sur machines

Etude du système de mesure outil

Le système de mesure outil permet l'évaluation de la jauge de l'outil sur site. On limite ainsi l'influence des dispersions de mise en position du porte-outil dans l'élément machine correspondant.

La mesure peut être mécanique ou optique. Un capteur équipe la machine et l'acquisition des positions est faite par mesure sur interruption du système de mesure équipant la machine. Il faut alors mettre en position le capteur dans le repère de mesure de la machine. Cela revient à étalonner le capteur ou le palpeur. L'opération se traite par palpement d'une référence connue. La mesure des jauges est alors traitée par différence entre les points acquis et la référence, ce qui est assez précis.

Etude du système de mesure de pièce

Le système de mesure de pièce permet d'acquérir la dimension d'une pièce sans la démonter. Il est basé sur le montage d'un capteur à déclenchement dans un porte-outil. Les mouvements de la machine permettent la mise en contact du capteur sur la pièce, ce qui déclenche une interruption. On mesure la position courante à l'interruption. Cela nécessite la mesure des jauges du palpeur.

L'autoréglage des machines est une technique efficace et productive, qui élimine les erreurs dues aux dispersions de mise en position. Par contre, elle nécessite un positionnement très précis des moyens de mesure dans les repères associés à la machine.

3.5. Ajustement des vecteurs caractéristiques: réglage

Quelles que soient les conditions d'usinage (petite ou grande série, suivi par pièce, par lot) toute production nécessite des périodes de mise au point et de re-réglage réguliers du fait de changements d'outil, etc. Si on généralise l'opération de réglage, indépendamment de la stratégie de suivi de production employée, on constate qu'elle nécessite les actions suivantes:

- usiner une pièce,
- définir les cotes particulières à mesurer,
- évaluer le dé-réglage et choisir les dimensions caractéristiques à modifier,
- déterminer la correction à apporter,
- usiner la pièce suivante.

3.5.1. Lien entre cotes fabriquées et caractéristiques de réglage

Pour évaluer le dé-réglage, on compare les dimensions mesurées aux contrats écrits sur la fiche de réglage ou sur le contrat de phase.

Réglage à partir de cotes de réglage

Pour une cote de réglage fautive, il n'y a qu'une caractéristique outil à modifier.

Réglage à partir des cotes fabriquées

Une cote fabriquée relie deux surfaces usinées dans la même phase, ou une surface usinée et une surface d'appui.

Pour déterminer les modifications de réglage à apporter sur les caractéristiques de la machine ou des outils, on est obligé de mettre en place les positions des surfaces usinées, dans l'espace de la machine et d'y appliquer une modélisation vectorielle.

On suppose que l'on néglige les défauts géométriques des surfaces usinées.

On indique en indice des points caractéristiques de la modélisation, le numéro de la surface à laquelle, ils sont associés. On indique par «'» que les points appartiennent aux surfaces réelles et non au modèle vectoriel.

L'indice «réel» est associé aux dimensions réelles des vecteurs caractéristiques et l'indice «déclaré» est associé aux dimensions déclarées au directeur de commande numérique des vecteurs caractéristiques.

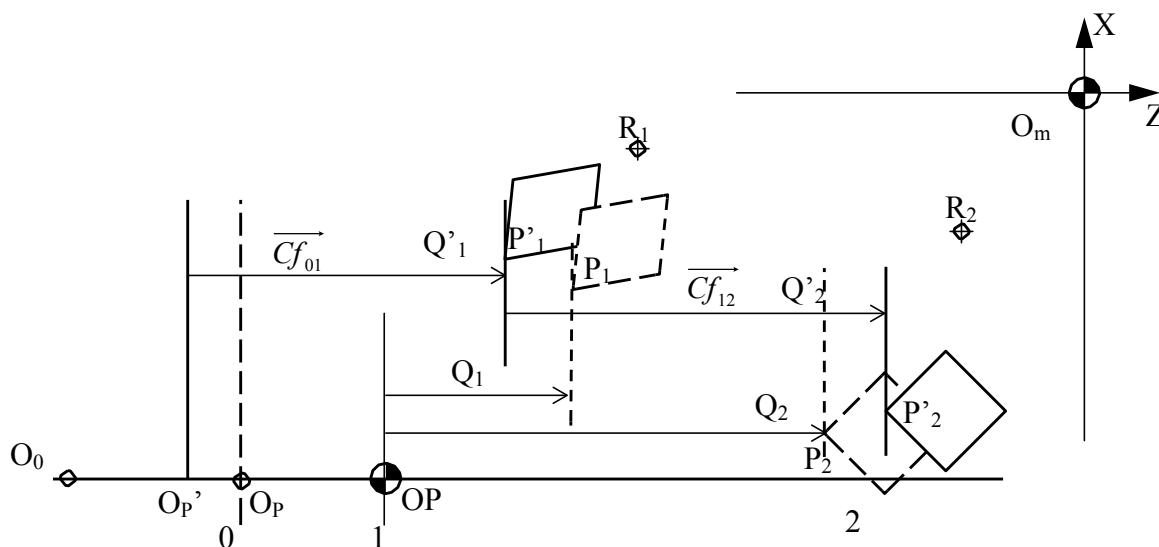


Figure n°39: Représentation des cotes fabriquées dans le modèle géométrique de la MOCN

Exprimons la relation qui existe entre une cote de fabrication liant deux surfaces usinées et les vecteurs caractéristiques:

$$\overrightarrow{Cf_{12}} = \overrightarrow{Q_1 Q_2} = \overrightarrow{Q_1 P_1} + \overrightarrow{P_1 P_1} + \overrightarrow{R Q_1} + \overrightarrow{Q_1 Q_2} + \overrightarrow{Q_2 P_2} + \overrightarrow{P_2 P_2} + \overrightarrow{P_2 Q_2}$$

$\overrightarrow{Q_1 P_1}$ modélise la relation entre le point de contact réel et la pointe de l'outil réelle.

$$\overrightarrow{Q_1 P_1} = \overrightarrow{(Q_1 R)_{réel}} = \overrightarrow{Q_1 C_1} + \overrightarrow{C_1 P_1} = \overrightarrow{(Q_1 C_1)_{réel}} + \overrightarrow{(C_1 P_1)_{réel}}$$

$\overrightarrow{P_1 R}$ représente le passage entre le réel et le modèle décrit dans la commande numérique.

$$\overrightarrow{P_1 R} = \overrightarrow{P_1 R} + \overrightarrow{R R} = \overrightarrow{(P_1 R)_{réel}} - \overrightarrow{(P_1 R)_{déclaré}}$$

$\overrightarrow{P_1 R} = \overrightarrow{(P_1 R)_{réel}}$ est la jauge réelle de l'outil,

$\overrightarrow{R R} = \overrightarrow{(P_1 R)_{déclaré}}$ est la jauge déclarée à la commande numérique de l'outil

$\overrightarrow{P_1 Q_1}$ définit la relation entre le point de contact à atteindre et la pointe de l'outil.

$\overrightarrow{Q_1 Q_2}$ est la consigne de déplacement demandée par le programme à la commande numérique.

$\overrightarrow{Q_1 Q_2} = \overrightarrow{Q_1 O_{PR}} + \overrightarrow{O_{PR} Q_2}$ sont des ordres de programmation absolue.

On obtient ainsi la formule suivante:

$$\overrightarrow{Cf_{12}} - \overrightarrow{Q_1 Q_2} = \overrightarrow{(Q_1 P_1)_{réel}} - \overrightarrow{(Q_1 P_1)_{déclaré}} + \overrightarrow{(P_1 R)_{réel}} - \overrightarrow{(P_1 R)_{déclaré}} + \overrightarrow{(Q_2 P_2)_{déclaré}} - \overrightarrow{(Q_2 P_2)_{réel}} + \overrightarrow{(P_2 R)_{déclaré}} - \overrightarrow{(P_2 R)_{réel}}$$

Si la cote fabriquée n'est pas bonne alors il y a une erreur:

- sur l'ordre programmé $\overrightarrow{Q_1 Q_2}$
- sur la définition de la pointe de l'outil n°1 $\overrightarrow{(Q_1 R)_{réel}} + \overrightarrow{(Q_1 R)_{déclaré}}$
- sur la jauge de l'outil n°1 $\overrightarrow{(P_1 R)_{réel}} - \overrightarrow{(P_1 R)_{déclaré}}$
- sur la définition de la pointe de l'outil n°2 $\overrightarrow{(Q_2 P_2)_{réel}} + \overrightarrow{(Q_2 P_2)_{déclaré}}$
- sur la jauge de l'outil n°2 $\overrightarrow{(P_2 R)_{réel}} - \overrightarrow{(P_2 R)_{déclaré}}$

Si on suppose que les définitions des pointes d'outil sont bonnes, (ou dans des cas particuliers d'usinage: chariotage, dressage, surfaçage) et que l'ordre programmé est bon, on constate que seules les jauges jouent, en s'opposant, sur la valeur de la cote fabriquée.

Pour régler la cote de fabrication, on a alors deux possibilités, modifier la jauge n°1 ou corriger la jauge n°2.

Exprimons la relation entre une cote de fabrication liant une surface d'appui et une surface usinée, et les vecteurs caractéristiques de la machine et des outils:

$$\overrightarrow{Cf_{01}} = \overrightarrow{O_p' Q_1} = \overrightarrow{O_p' O_p} + \overrightarrow{O_p O_p} + \overrightarrow{O_p Q_1} + \overrightarrow{Q_1 P_1} + \overrightarrow{P_1 P_1} + \overrightarrow{P_1 Q_1}$$

$\overrightarrow{O_p' O_p}$ modélise la relation entre la position de l'origine pièce réelle et la position de l'origine pièce déclarée exacte.

$\overrightarrow{O_p' O_p} = \overrightarrow{(O_0 O_p)_{déclaré}} - \overrightarrow{(O_0 O_p)_{réel}}$, si l'on considère que O_0 a une position

$\overrightarrow{O_p O_p}$ caractérise la position de l'origine de l'origine programme par rapport à l'origine pièce déclarée.

$\overrightarrow{O_p Q_1}$ caractérise la position de Q_1 dans le repère de programmation.

Comme précédemment, on obtient la relation suivante:

$$\overrightarrow{Cf_{01}} - \overrightarrow{O_p O_p} + \overrightarrow{O_p Q_1} = \overrightarrow{(O_0 O_p)_{déclaré}} - \overrightarrow{(O_0 O_p)_{réel}} + \overrightarrow{(Q_1 P_1)_{déclaré}} - \overrightarrow{(Q_1 P_1)_{réel}} + \overrightarrow{(P_1 R)_{déclaré}} - \overrightarrow{(P_1 R)_{réel}}$$

Si l'on suppose la position de l'origine programme et l'ordre de commande exacts, la précision de la cote de fabrication est fonction de:

- l'erreur de la caractéristique porte-pièce $\overrightarrow{(O_0Op)_{déclaré}} - \overrightarrow{(O_0Op)_{réel}}$
- l'erreur sur la définition de la pointe de l'outil n°1 $\overrightarrow{(QR)_{déclaré}} - \overrightarrow{(QR)_{réel}}$
- l'erreur sur la jauge de l'outil n°1 $\overrightarrow{(RR)_{déclaré}} - \overrightarrow{(RR)_{réel}}$

On constate, ainsi que l'on peut limiter le nombre de degré de libertés par cote fabriquée à régler à deux:

- deux jauges dans le cas des cotes liant deux surfaces usinées,
- une jauge et la caractéristique porte-pièce dans le cas des cotes liant une surface usinée et la surface d'appui de la phase.

3.5.2. Evaluation du dé-réglage et choix des dimensions caractéristiques à modifier

Lors de la modification de réglage, il faut mettre en place une méthode qui permette:

- de sélectionner et mesurer le nombre de cotes justes nécessaires au réglage,
- d'en déduire les jauges à corriger.

La méthode à employer dépend du type et du nombre de cotes à contrôler et du nombre de caractéristiques que l'on peut modifier.

Réglage à partir de cotes de réglage

Si on dispose d'une fiche de réglage portant des cotes de réglage, alors toute cote de réglage est à contrôler. Si le réglage est traité de la manière indépendante, il n'y a pas d'ambiguïté sur la stratégie de correction à mener. On corrige la caractéristique directement liée à la cote de réglage défaillante.

Réglage à partir des cotes fabriquées

Dans le cadre de l'usinage sur machine-outil à commande numérique, on peut limiter le nombre de cotes à contrôler, suivant le nombre d'outils qu'elles mettent en jeu.

Il existe des cotes fabriquées qui ne sont fonction que d'un seul outil, c'est le cas des diamètres de perçage et d'alésage à l'alésoir. C'est aussi le cas de chariotages, ou d'épaulements usinés par le même outil en continu.

Dans le premier cas, cas des usinages de forme, la cote est liée à la dimension de l'outil. Si la cote est fautive, alors la dimension de l'outil est fautive. En contrepartie, si l'on considère que l'outil est aux bonnes dimensions, alors la cote n'a pas lieu d'être fautive, il n'est pas nécessaire de la contrôler.

Dans le second cas, en l'absence de démontage, ou de rotation des changeurs d'outil, l'erreur sur la cote obtenue par rapport à la cote nominale ne peut être fonction que de la flexion de l'outil, de la précision de la machine et de la valeur du déplacement programmé. Si l'on considère la machine capable et le programme exact, il n'y a pas lieu de contrôler ces cotes, sauf si l'outil subit une importante variation de comportement pendant l'usinage.

Par contre le contrôle des cotes fabriquées entre une surface d'appui et une surface usinée, ou entre deux surfaces usinées par deux outils différents est obligatoire.

Si plusieurs cotes fabriquées mettent en jeu deux mêmes outils, ou un même outil et la caractéristique du porte-pièce, le dérèglement d'une caractéristique doit influencer de la même manière sur les cotes, à la précision de la machine et à l'ordre de grandeur de flexion de l'outil près. On peut envisager de ne contrôler qu'une cote. Le contrôle d'une cote unique permet d'analyser le couple de caractéristiques à régler, sans incidence du nombre de cotes. Cela suppose que les hypothèses précédentes soient vérifiées. Si on veut prendre en compte la totalité des cotes associées, il faut mener une approche statistique de répartition de la correction (par exemple, trouver la valeur moyenne de correction, qui minimise les erreurs restantes).

Ainsi, après avoir éliminé les cotes qu'il n'est pas nécessaire de contrôler et regroupé les cotes mettant en jeu les mêmes caractéristiques de la machine ou des outils, on obtient un ensemble de n cotes, dont m sont des cotes liant des surfaces usinées à la surface d'appui, mettant en jeu p caractéristiques (1 caractéristique du porte-pièce et $p-1$ caractéristiques d'outil).

Il se pose plusieurs cas:

- $n > p$, il n'y a pas assez de liberté de réglage, pour répondre aux exigences de cotes de fabrication. Cela vient du fait que les cotes n'ont pas été précédemment regroupées.
- $n < p$, il y a trop de libertés de réglage, il faut donc choisir celles que l'on veut modifier. On pose donc $p-n$ caractéristiques comme non modifiables, il ne reste plus que n caractéristiques.

Il est important de découpler les cotes entre surfaces usinées et les cotes entre surfaces usinées et surface d'appui. Si on fixe la modification du réglage de la caractéristique du porte-pièce, alors les m relations sont résolues. Il ne reste plus que $n-m$ résolutions à mener. La valeur du réglage de la caractéristique du porte-pièce est très importante.

Sauf cas particulier, si les regroupements ont été correctement réalisés, on a $n=p-1$, on peut choisir alors de ne pas modifier les caractéristiques du porte-pièce et de ne modifier que les jauges.

Ainsi on obtient après réduction un système linéaire ayant autant de caractéristiques à modifier que de cotes fabriquées mesurées. Le système est inversible, il permet le calcul des caractéristiques.

Pour être inversible, le système doit être déduit d'un système de cotation de fabrication non bouclé.

Le réglage à partir de la cotation de fabrication ne permet pas un réglage indépendant des caractéristiques.

3.5.3. Détermination de la correction à apporter

A ce niveau, on connaît les caractéristiques à modifier et la valeur indicative, en fonction des dispersions d'usinage et de la correction. On doit donc modifier chaque caractéristique de façon à ce que la surface usinée sur la pièce suivante prenne la position voulue après correction.

La détermination de la correction à apporter passe par l'évaluation du sens de correction et de sa valeur.

Sens de correction

Si on applique le traitement précédent, le sens de correction est donné par les résultats de l'inversion matricielle. Par contre, dans des cas particuliers, ou plus simples comme l'obtention de diamètre par chariotage, on peut être amené à poser les corrections de manière intuitive par soustraction. Il faut alors chercher une relation entre l'accroissement ou la réduction de la cote fabriquée et l'accroissement ou la réduction de la jauge.

Sur la figure suivante (figure n°40), sont reprises les désignations du paragraphe précédent:

- Q' est le point mesuré, atteint lors de l'usinage par la pointe réelle de l'outil P' .
- Q est le point à atteindre et atteint lors de l'usinage par la pointe déclarée de l'outil P .

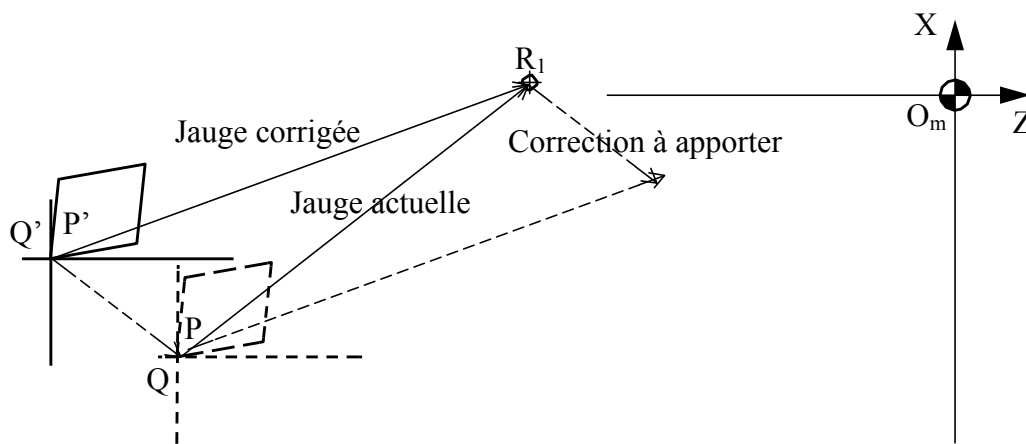


Figure n°40: Etude du sens de la correction à apporter à une jauge outil

Pour que la correction soit bonne, on cherche à ce que Q soit en Q' , ou que P soit en P' à la pièce suivante.

La correction à apporter est la suivante:

$$\overrightarrow{P'P} = \overrightarrow{Q'Q}$$

$$\overrightarrow{(PR)_{corrigé}} = \overrightarrow{P'R} = \overrightarrow{P'P} + \overrightarrow{(PR)_{initial}} = \overrightarrow{Q'Q} + \overrightarrow{(PR)_{initial}}$$

Cette relation est projetée sur \vec{X} et \vec{Z} pour obtenir les jauges corrigées J_X et J_Z .

$$\overrightarrow{J_{X_{corrigé}}} = \overrightarrow{(PR)_{corrigé}} \cdot \vec{X} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{X} + \overrightarrow{J_{X_{initial}}} \quad \overrightarrow{J_{Z_{corrigé}}} = \overrightarrow{(PR)_{corrigé}} \cdot \vec{Z} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{Z} + \overrightarrow{J_{Z_{initial}}}$$

Le principe de réglage des fraises 2 tailles est illustré par la figure suivante.

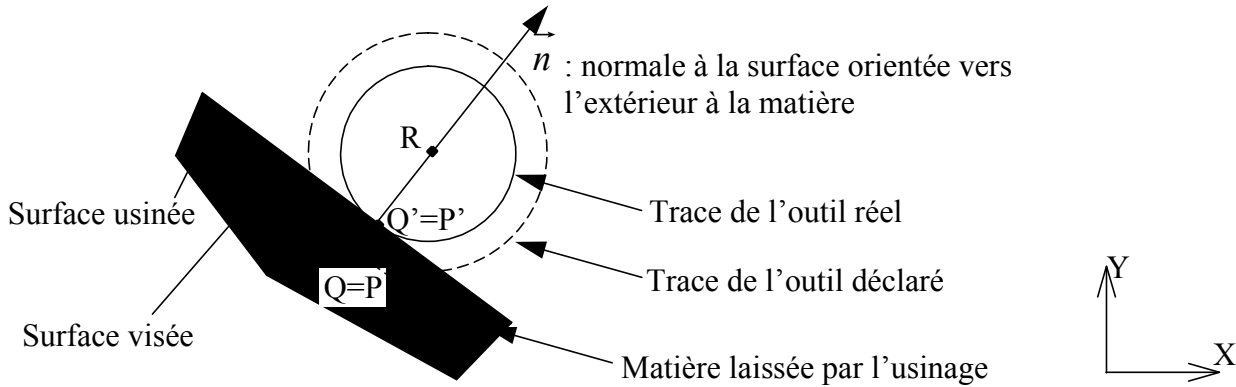


Figure n°41: Principe de réglage des fraises 2 tailles

Pour effectuer la correction, on cherche à ce que Q' soit en Q (ou que P soit en P'). La correction à apporter est $\overrightarrow{P'P} = \overrightarrow{Q'Q}$:

$$\overrightarrow{(PR)_{corrigé}} = \overrightarrow{P'R} = \overrightarrow{P'P} + \overrightarrow{(PR)_{initial}} = \overrightarrow{Q'Q} + \overrightarrow{(PR)_{initial}}$$

que l'on projette sur \vec{Z} et la normale à la surface \vec{n} pour obtenir respectivement la longueur corrigée et le rayon corrigé de l'outil.

$$L_{corrigé} = \overrightarrow{(PR)_{corrigé}} \cdot \vec{Z} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{Z} + L_{initiale} \quad R_{corrigé} = \overrightarrow{(PR)_{corrigé}} \cdot \vec{n} = \overrightarrow{Q'Q} \cdot \vec{n} + R_{initiale}$$

Valeur de la correction

On peut modifier la caractéristique de la valeur exacte de l'erreur mesurée. Cela suppose que l'on ne prenne pas en compte les dispersions d'usinage et de mesure. On considère que la pièce mesurée a une dimension à la moyenne des dimensions possibles en fonction des dispersions d'usinage. C'est une hypothèse très forte.

Pour affiner la valeur de la correction en prenant en compte les dispersions, on peut chercher à usiner un lot de pièces sans réglage et adopter une correction égale à la valeur moyenne de l'erreur obtenue. Mais ceci impose l'usinage d'une série de pièces pouvant être fausses.

On peut alors chercher à modifier le réglage dynamiquement après usinage de chaque pièce, de façon à ce que la correction finale soit égale à celle calculée après usinage d'un lot de pièces sans modification du réglage. Le réglage est alors fonction des corrections précédentes et de l'erreur mesurée sur la dernière pièce usinée. C'est la méthode de l'artilleur:

- usinage de la pièce,
- mesure de la dimension,
- calcul de la valeur de l'erreur entre la consigne à atteindre et la valeur mesurée,
- calcul de la valeur de la correction en fonction du résultat suivant,
- modification de la caractéristique en cause,
- usinage.

Cela permet d'obtenir des pièces bonnes plus rapidement.

**PROGRAMMATION DES
MACHINES-OUTILS A
COMMANDE
NUMERIQUE**

1 Principe de programmation

Un programme est la transcription, dans un langage compréhensible par le directeur de commande numérique d'une machine, des opérations d'usinage à effectuer sur une pièce.

Les différentes manières de programmer sont :

- la programmation manuelle,
- la programmation assistée :
 - soit conversationnelle par le DCN
 - soit avec un logiciel de FAO (fabrication assistée par ordinateur).

Les documents suivants sont nécessaires :

- le dessin de définition,
- le contrat de phase avec l'isostatisme et les paramètres de coupe,
- le dossier de la machine utilisée.

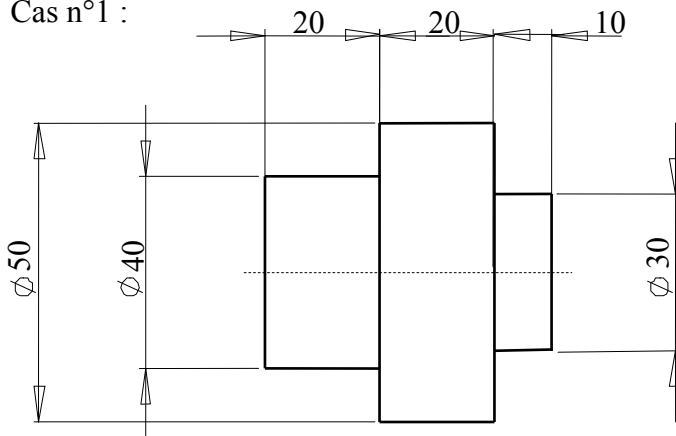
2 Préparation de la programmation

2.1 Choix de l'origine programme OP

On choisit l'OP en fonction de la cotation de la pièce sur le dessin de définition. Pour faciliter la réalisation du relevé de points, prendre l'origine qui demande le moins de calcul (cotes directes).

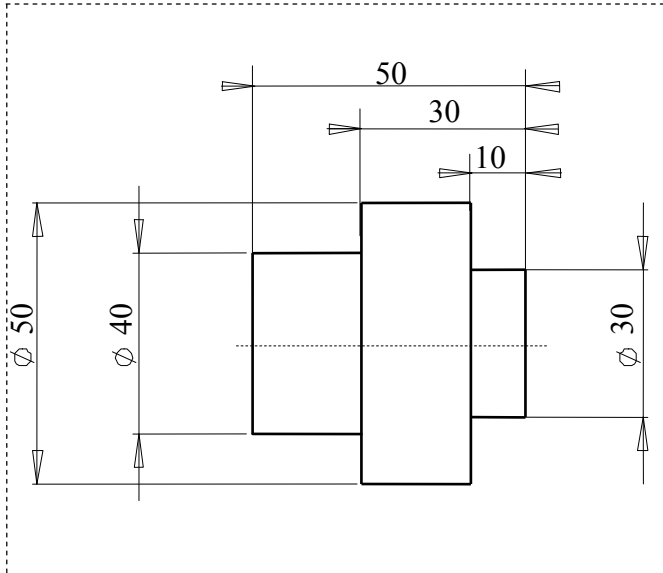
Exemples :

Cas n°1 :

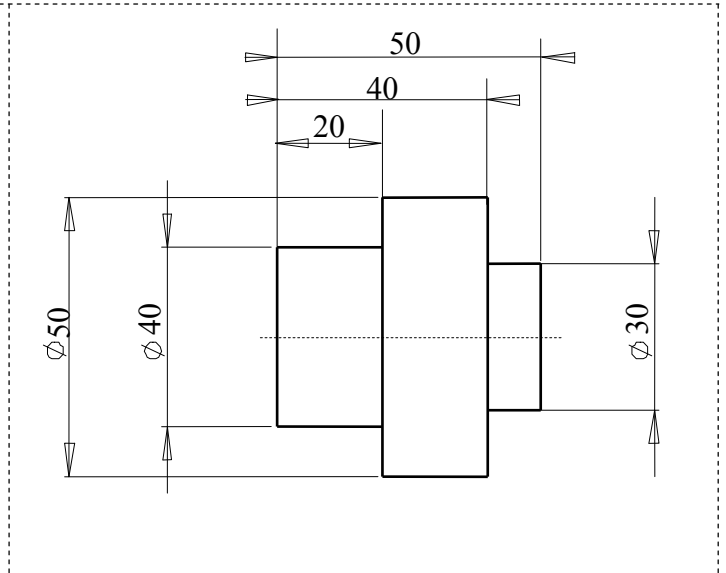


**En tournage, l'origine programme
OP est toujours sur l'axe \vec{Z} .**

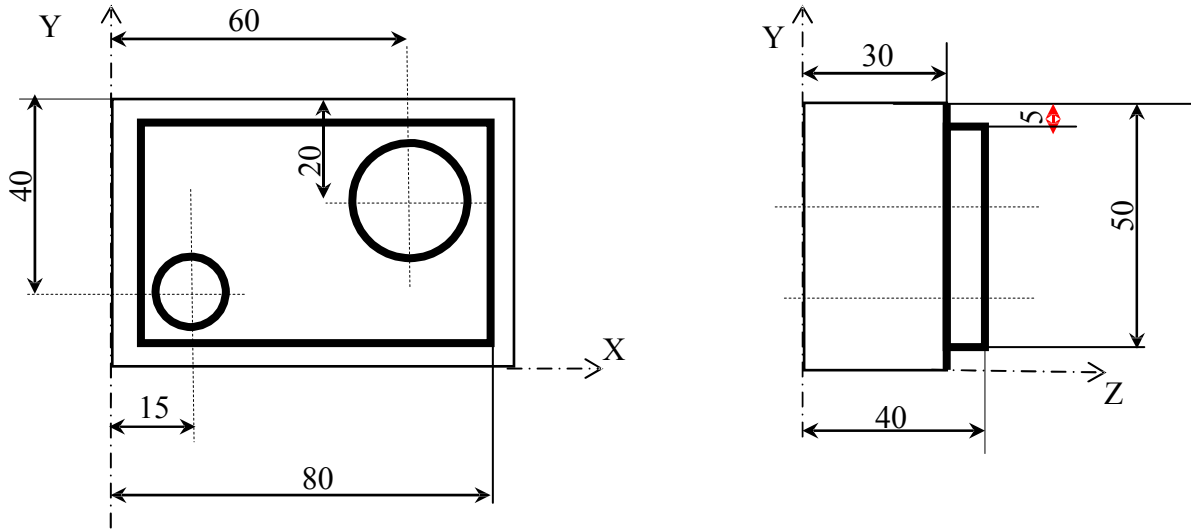
Cas n°2 :



Cas n°3 :



Cas n°4 :



2.2 Calcul des coordonnées des points programmés

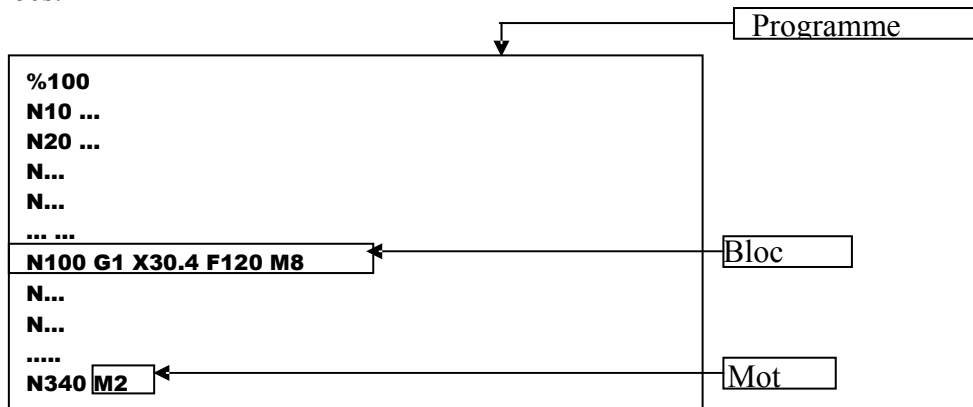
Il est indispensable de chercher les coordonnées des points de changement de direction sur chaque axe pour la programmation d'une pièce. A l'aide du dessin de définition, il faut :

- repérer ces points,
- relever ou calculer leur position par rapport aux axes de l'origine programme OP en cotes moyennes,
- faire le report de leur position dans un tableau.

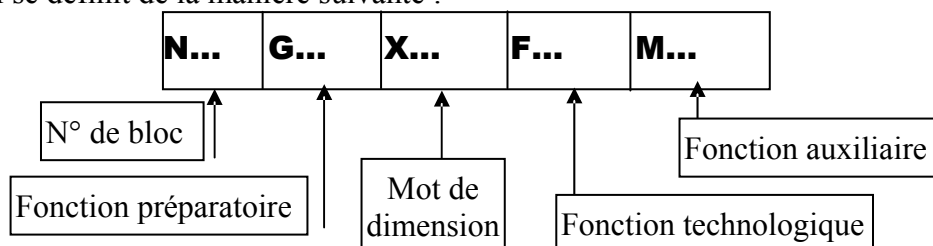
- Les coordonnées des points sont calculées par rapport à l'origine programme OP, à l'aide des cotes moyennes ou nominales (CFAO).
- En tournage, les coordonnées sur \vec{X} sont données au diamètre.

3 Définition d'un programme

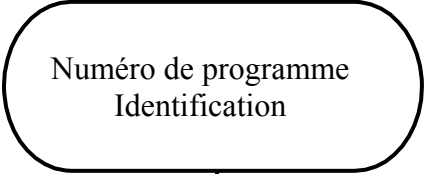
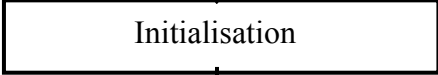
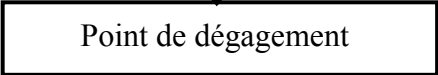

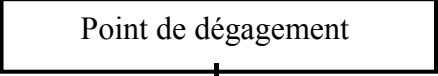
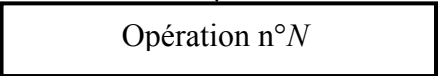
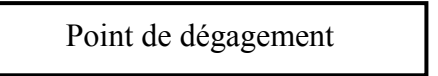

Un programme est une suite d'instructions établies dans un langage codé (ISO) que l'on décompose en une succession de blocs.



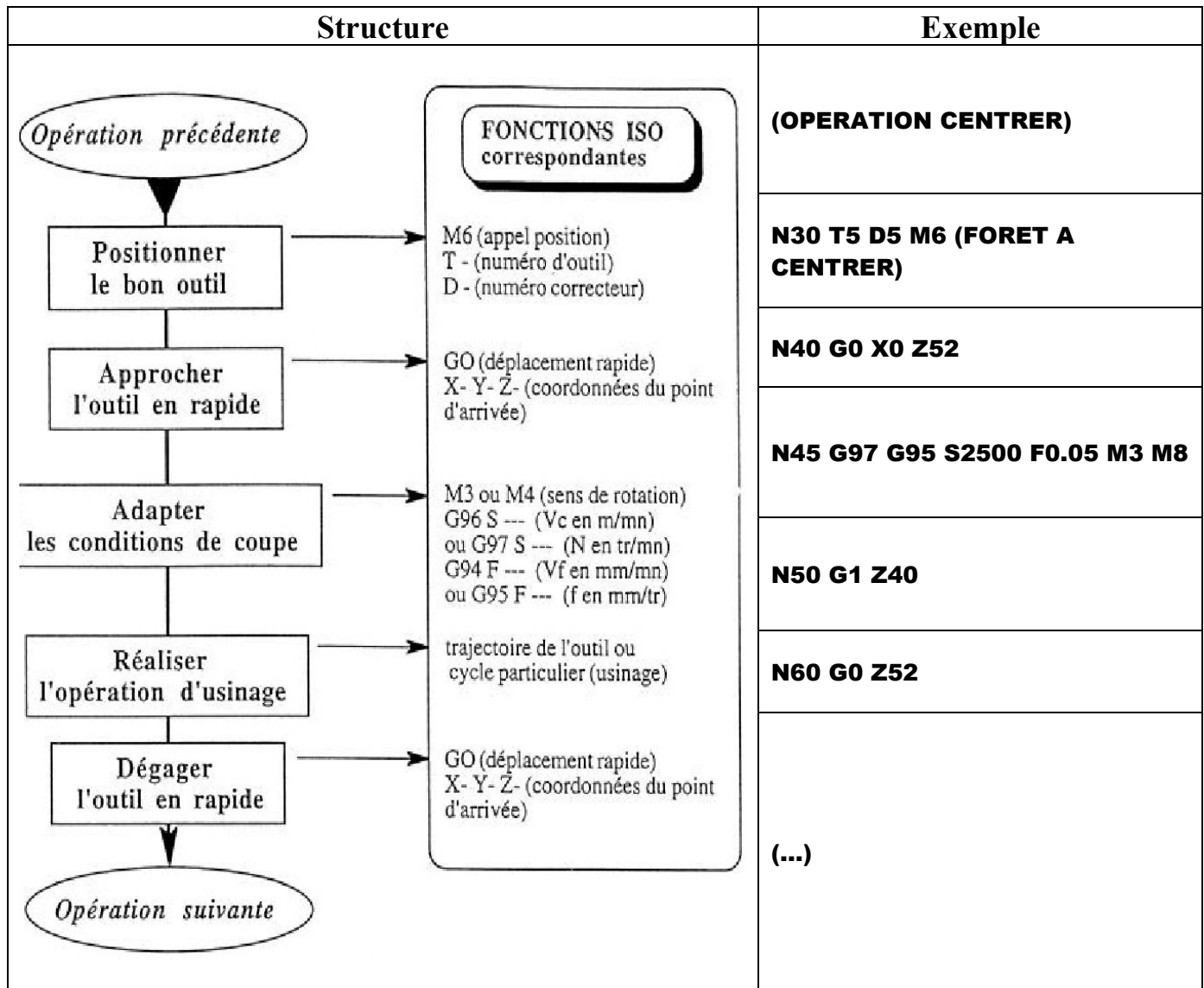
Un bloc est une ligne d'écriture, composée de mots qui contiennent les informations géométriques et technologiques. Il se définit de la manière suivante :



4 Structure d'un programme

Structure	Exemple
	<p>%4723 (TOUR SMI) (POIGNEE) (PH 10 COTE CONE) (11/04/03)</p>
	<p>N28 G40 G80 M5 M9</p>
	<p>N29 G0 G52 X0 Z0</p>
	<p>(OPERATION CENTRER) N30 T5 D5 M6 (FORET A CENTRER) N40 G0 X0 Z52 N45 G95 G97 S2500 F0.05 M3 M8 N50 G1 Z40 N60 G0 Z52</p>
	<p>N70 G0 G52 X0 Z0 M9</p>
	<p>...</p>
	<p>(FINITION PROFIL) N240 T3 D3 M6 (OUTIL DE FINITION) N250 G92 S4000 N260 G0 X4 Z52 F0.05 M8 N270 G1 G42 X5 Z46 N280 G96 S250 N290 G1 X15.961 Z46 N300 X24 Z31 N310 Z26 N320 X26 N330 G3 X34 Z22 I26 K22 N340 G1 Z18 N350 X42 N360 G97 S1000</p>
	<p>N370 G0 G52 G40 X0 Z0 M5 M9</p>
	<p>N710 M2</p>

5 Structure d'une opération



6 Fonctions ISO

Indication	Adresses	Signification
Début d'un programme	%... O...	Début de programme paramètre d'entrée
Ordre	N H	Numéro de bloc Numéro de sous-programme
Fonctions préparatoires	G	Elles prédisposent la machine pour un ordre précis. (Peuvent varier suivant le DCN)
Déplacements suivant les axes	X Y Z A B C	Valeur du déplacement positif ou négatif sur le ou les axes choisis
Avance	F	Vitesse d'avance (Vf) exprimée en mm/min (G94) ou mm/tr (G95)
Fonctions auxiliaires	M	Fonctions particulières désignant un ordre
Outils	T... D... H...	Sélection de l'outil et de son (ou ses) correcteur(s)
Rayon	R	Rayon du cercle en G02 ou G03
Plan de sécurité	ER	Plan de référence en cycle
Vitesse	S	N ou Vc suivant G97 ou G96 placé avant
Répétition ou saut	N	Répétition ou saut à une séquence

7 Fonctions préparatoires G

Code	Désignation	Révocation	Tournage / Fraisage
G00	Interpolation linéaire à la vitesse rapide	G01-G02-G03	T - F
G01	Interpolation linéaire à la vitesse programmée	G00-G02-G03	T - F
G02	Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique G2 X... Y... I... J... ou R...	G00-G01-G03	T - F
G03	Interpolation circulaire sens trigonométrique G3 X... Y... I... J... ou R...	G00-G01-G02	T - F
G33	Cycle de filetage G33 X... Z... K... EA... EB... R... P... Q... F... S...	G00-G01-G02-G03	T
G40	Annulation d'une correction d'outil suivant le rayon	G41-G42	T - F
G41	Positionnement de l'outil à gauche de la trajectoire programmée d'une valeur égale au rayon	G40-G42	T - F
G42	Positionnement de l'outil à droite de la trajectoire programmée d'une valeur égale au rayon	G40-G41	T - F
G52	Programmation absolue des coordonnées par rapport à l'origine mesure	Fin de bloc	T - F
G59	Changement d'origine programme	Fin de bloc	T - F
G64	Cycle d'ébauche paraxial G64 Nn Nm I... K... P... F...	G80	T
G65	Cycle d'ébauche de gorge G65 Nn Nm EA... P... Z... I... K... Q... EF... R... X...	G80	T
G77	Appel inconditionnel d'un sous-programme G77 H... Appel d'une suite de séquences avec retour G77 N... N...	Fin de bloc	T - F
G79	Saut conditionnel ou inconditionnel à une séquence sans retour G79 N...	Fin de bloc	T - F
G80	Annulation d'un cycle d'usinage	Tout cycle	T - F
G81	Cycle de perçage - centrage G81 X... Y... Z... ER...	G80	F
G82	Cycle de perçage - chambrage G82 X... Y... Z... FR... EF...	G80	F
G83	Cycle de perçage avec déburrage G83 X...Y... Z...ER... P... Q...	G80	T - F
G84	Cycle de taraudage G84 X... Y... Z... ER... (F S x pas)	G80	F
G85	Cycle d'alésage G85 X... Y... Z... ER...	G80	F
G86	Cycle d'alésage avec arrêt de broche en fond de trou G86 X... Y... Z... ER...	G80	F
G87	Cycle de perçage avec brise-copeaux G87 Y... Z... ER... P... Q... ER...	G80	F
G88	Cycle d'alésage et dressage de face G88 X... Y... Z... ER...	G80	F
G89	Cycle d'alésage avec arrêt temporisé en fond de trou G89 X... Y... Z... ER... EF...	G80	F
G90	Programmation absolue des coordonnées	Fin de bloc	T - F
G91	Programmation relative des coordonnées	Fin de bloc	T - F

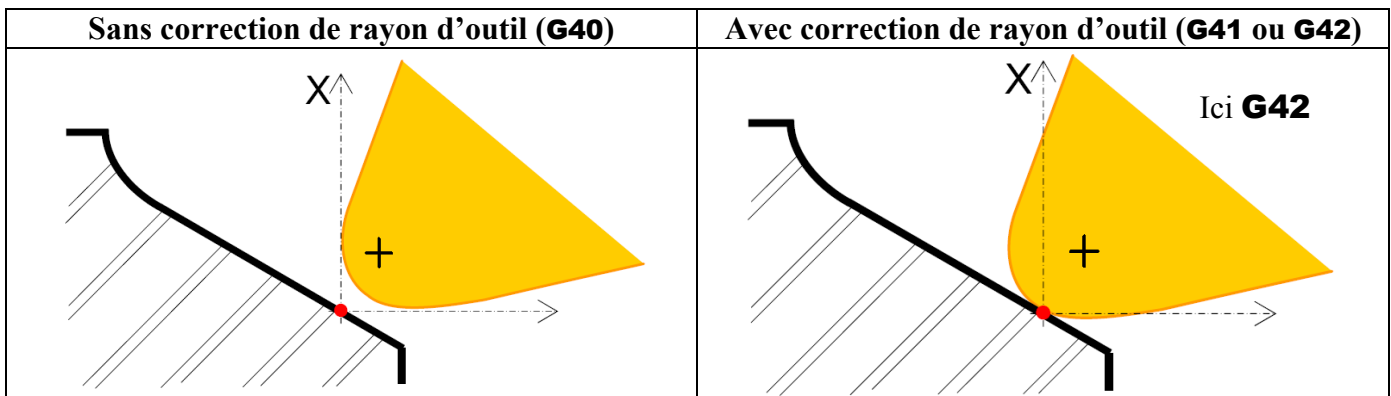
G92	Limitation de la fréquence de rotation (N) en tr/min G92 S...	M02	T - F
G94	Vitesse d'avance (Vf) en mm/min	G95	T - F
G95	Vitesse d'avance (Vf) en mm/tr	G94	T - F
G96	Vitesse de coupe (Vc) constante en m/min G96 X... S...	G97	T
G97	Fréquence de rotation (N) constante en tr/min	G96	T - F

8 Fonctions auxiliaires M

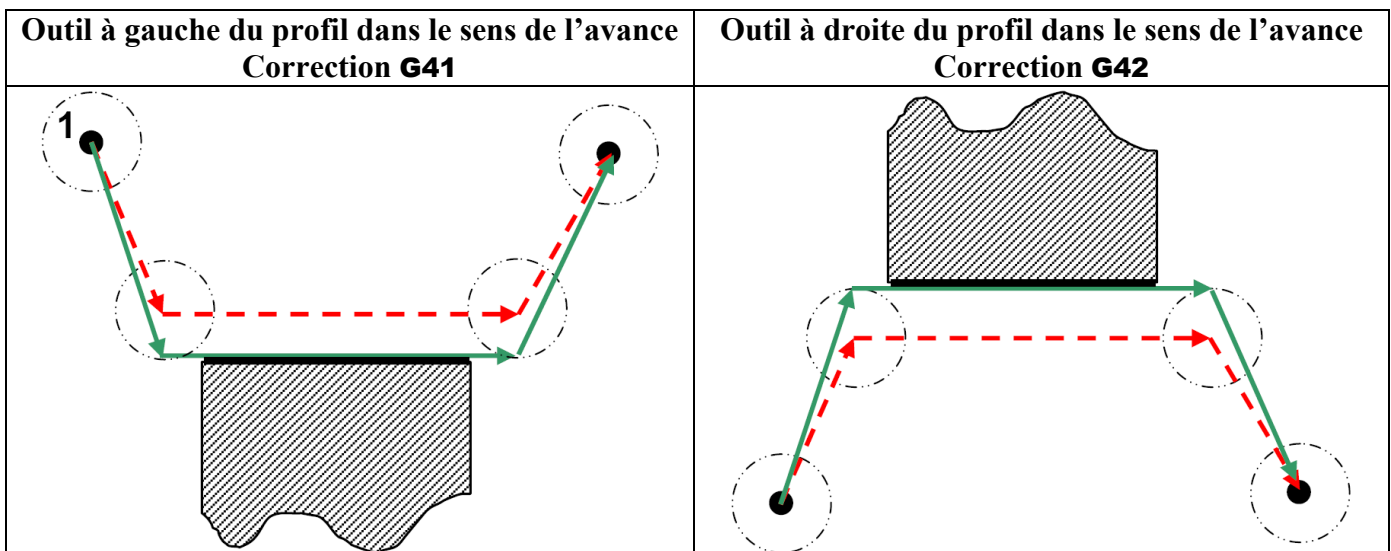
Code	Désignation	Révocation	Code	Désignation	Révocation
M00	Arrêt programmé	Action sur DCY	M07	Arrosage n°2	M0-M9
M02	Fin de programme pièce	%	M08	Arrosage n°1	M0-M9
M03	Rotation de la broche sens horaire	M0-M4-M5	M09	Arrêt des arrosages	M8
M04	Rotation de la broche sens anti-horaire	M0-M3-M5	M41	Gamme de rotation n°1	M42
M05	Arrêt de broche	M3-M4	M42	Gamme de rotation n°2	M41
M06	Changement d'outil	Compte rendu			

9 Correction de rayon d'outil G40, G41 et G42

9.1 Correction de rayon d'outil en tournage



10.2 Correction de rayon d'outil en fraisage

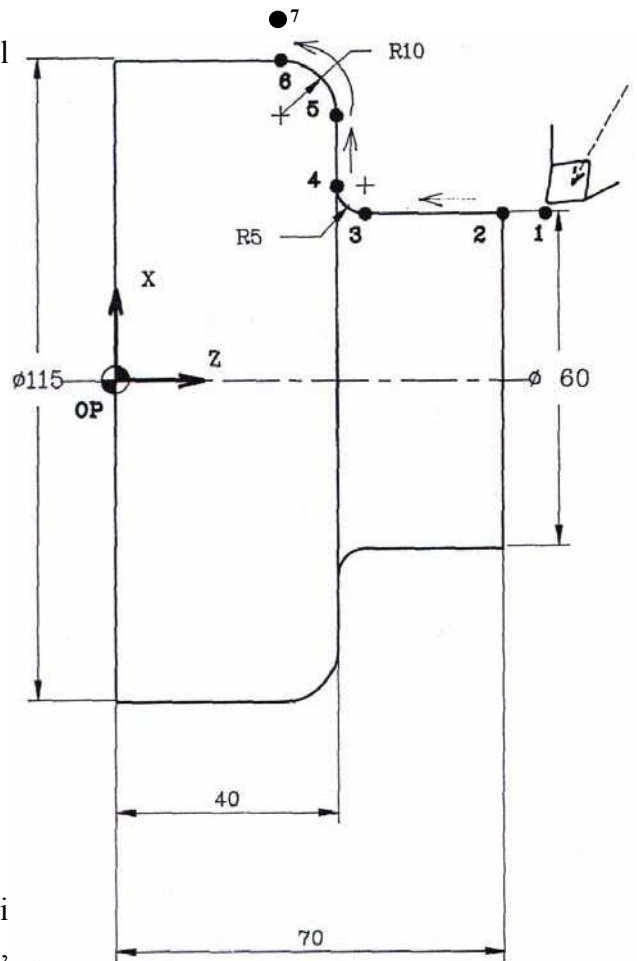


10 Cycles d'usinage en tournage

10.1 Exemple : interpolation circulaire G02 et G03

Compléter le programme ci-dessous pour réaliser le profil ci-contre.

N150 M6 T1 D1	
N160 G92 S5000	
N170 M4 S500 M8	
N180 G0 X60 Z75	
N190 G96 X60 S150	
N200 G1 G42 X60 Z75 G95 F0.1	Point 1
N210 G1 X60 Z70	Point 2
N220 G1 X60 Z45	Point 3
N230 G2 X70 Z40 I70 K45	Point 4 + centre
Ou N230 G2 X70 Z40 R5	Point 4 + rayon
N240 G1 X95 Z40	Point 5
N250 G3 X115 Z30 I95 K30	Point 6 + centre
Ou N250 G3 X115 Z30 R10	Point 6 + rayon
N260 G1 X120	Point 7
N270 G1 G40 X120 Z30	
N280 M5 M9	
N290 G0 G52 X0 Z0	



10.2 Exemple : cycle d'ébauche paraxiale G64

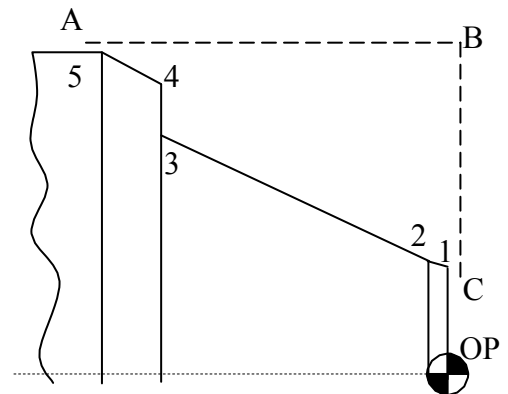
Ce cycle permet, à partir de la définition d'un profil fini (points 1, 2, 3, 4, 5) et d'un profil du brut (points A, B, C), d'effectuer l'ébauche d'une pièce en déplacement paraxial suivant \vec{X} ou \vec{Z} .

Il sera toujours suivi de **G80** : fonction d'annulation de cycle.

Conditions de coupe :

- vitesse de coupe constante $V_c=160\text{m/min}$,
- avance par tour $f=0.3\text{mm/tr}$,
- profondeur de passe 1mm,
- surépaisseurs : en $X=0.5\text{mm}$, en $Z=0.2\text{mm}$.

Remarque : Les points du brut doivent englober les points du profil fini.



N30 G79 N190	
N40 G1 X46 Z0	Point 1
N50 X51 Z-2	Point 2
N60 X80 Z-60	Point 3
N70 X110	Point 4
N80 X120 Z-65	Point 5
N190 G92 S5000	Limitation fréquence de broche
N200 T1 D1 M6	Outil d'ébauche
N210 G0 X123 Z2	Point d'approche 1

Relevé de points en absolu		
Points	X	Z
1	46	0
2	51	-2
3	80	-60
4	110	-60
5	120	-65
A	122	-66
B	122	1
C	44	1
Approche 1	123	2
Approche 2	44	2

N220 M4 S500 M8	Mise en rotation de la broche
N230 G96 X123 S160	Paramètres de coupe
N240 G64 N40 N80 I0.5 K0.2 P1 F0.3	Cycle d'ébauche
N250 X122 Z-66	Point A
N260 X122 Z1	Point B
N270 X44 Z1	Point C
N280 G80	Fin du cycle
N290 G97 S500 G0 X125 Z5	Arrêt vitesse de coupe constante
N300 G0 G52 X0 Z0 M9	Dégagement Arrêt lubrification

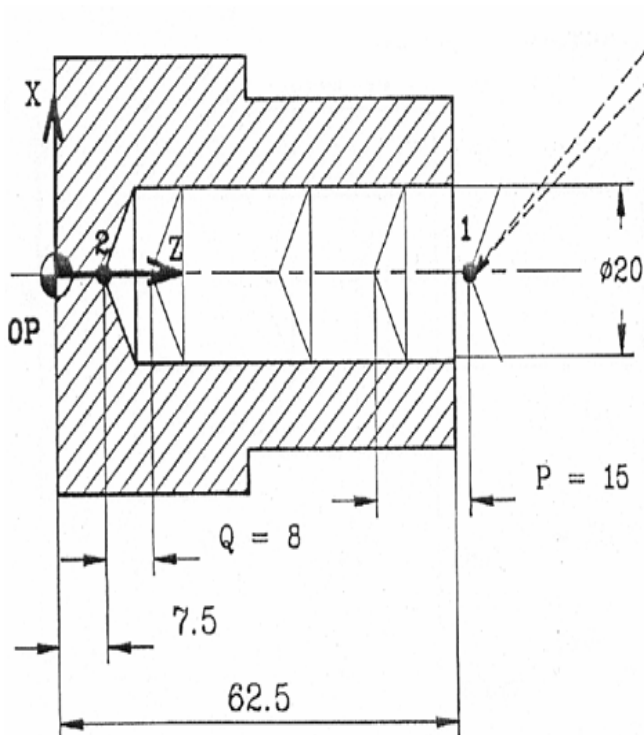
10.3 Exemple : finition du profil

Après un cycle d'ébauche paraxiale, il faut réaliser la finition du profil. Pour cela, il suffit de :

- charger l'outil de finition,
- changer les conditions de coupe V_c constant=180m/min, $f=0.1$ mm/tr,
- rappeler les points du profil fini utilisés dans le cycle d'ébauche paraxiale avec la fonction **G77**.

N300 G0 G52 X0 Z0	Point de changement d'outil
N310 M6 T2 D2	Outil de finition
N320 G0 X48 Z3	
N320 G1 G42 X44 Z2 G95 F0.1	Point d'approche 2
N330 G96 X44 S180	Paramètres de coupe
N340 G77 N40 N80	Reprise de séquence
N350 G1 X125	Point de dégagement
N360 G40 G1 X125 G97 S500	
N370 G0 G52 X0 Z0 M5 M9	

10.4 Exemple : cycle de perçage avec débouillage **G83**



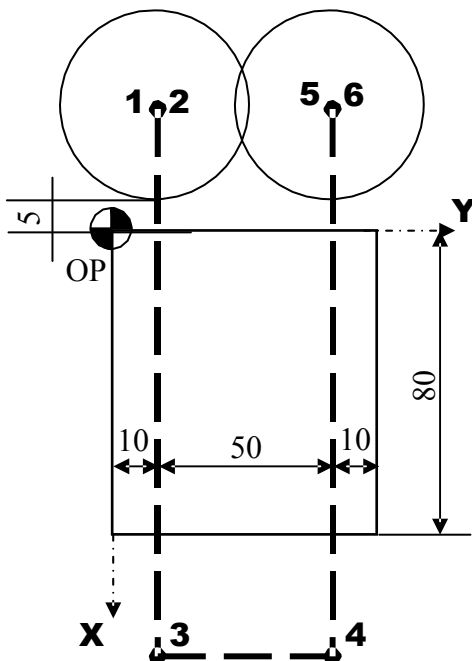
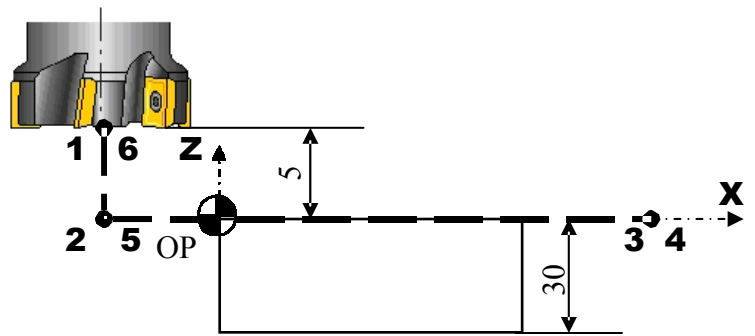
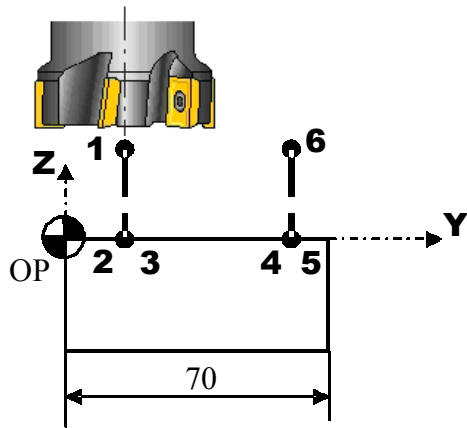
Conditions de coupe :

- $N=180$ tr/min,
- $f=0.2$ mm/tr.

N30 G0 G52 X0 Z0	Point de changement d'outil
N40 M6 T1 D1	Foret $\varnothing 20$ mm
N50 G0 X0 Z63.5	Point d'approche 1
N60 M3 S640 G95 F0.2	Paramètres de coupe
N70 G83 Z7.5 P15 Q8 ER1	Cycle de perçage
N80 G80	Fin du cycle
N90 G1 X0 Z65	
N100 M5 M9	
N110 G0 G52 X0 Z0	

11 Cycles d'usinage en fraisage

11.1 Surfaçage en fraisage



Points	X	Y	Z
1	-30	10	5
2	-30	10	0
3	110	10	0
4	110	60	0
5	-30	60	0
6	-30	60	5

Conditions de coupe :

- $V_c=60\text{m/min}$,
- $f_z=0.05\text{mm/dt}$.

Fraise à surfacer $\varnothing 50\text{mm}$, 5 dents

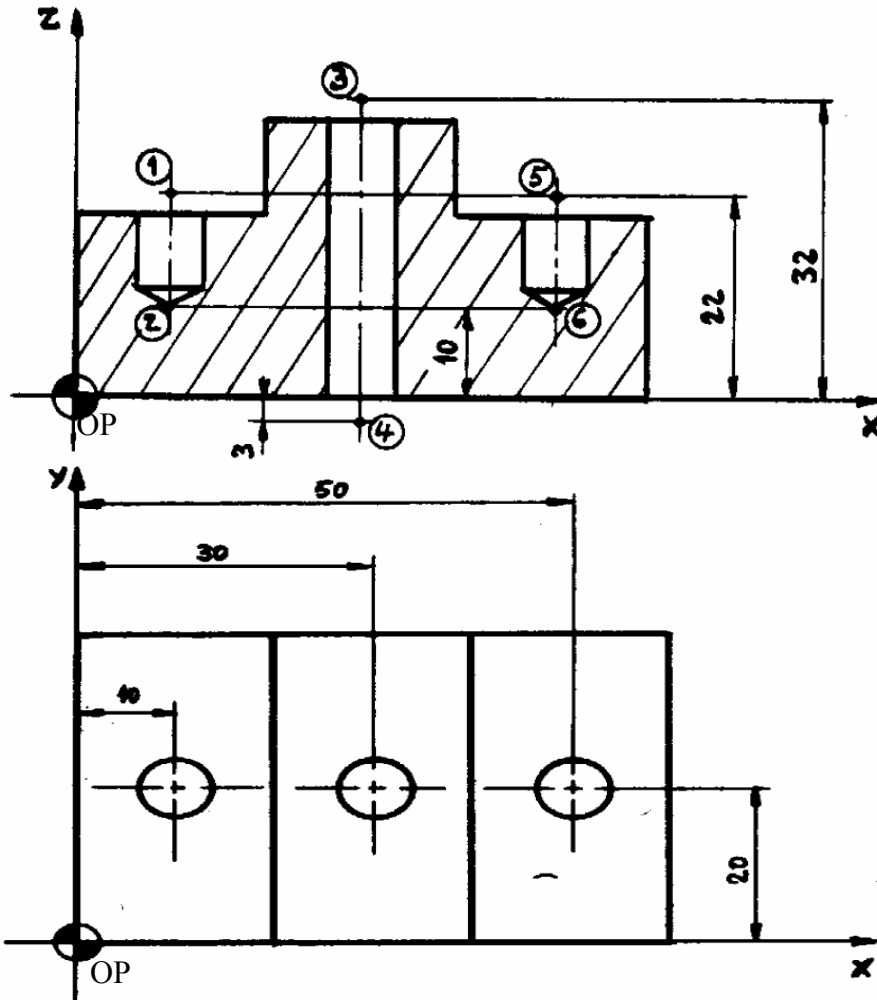
N30 G0 G52 X0 Y0 Z0	Point de changement d'outil
N40 M6 T1 D1	Fraise n°1
N50 G0 X-30 Y10 Z5	Point d'approche 1
N60 M3 S500 G94 F100 M8	Paramètres de coupe
N70 G1 Z0	Point 2
N80 X110	Point 3
N90 Y 60	Point 4
N100 X-30	Point 5
N110 Z5	Point de dégagement 6
N120 G0 G52 X0 Y0 Z0 M5 M9	

11.2 Exemple: cycle de perçage G81

Conditions de coupe:

- $V_c=20\text{m/min}$
- $f=0.1\text{mm/tr}$

Foret hélicoïdal $\varnothing 10\text{mm}$



Points	X	Y	Z
1	10	20	22
2	10	20	10
3	30	20	32
4	30	20	-3
5	50	20	22
6	50	20	10

N30 G0 G52 X0 Y0 Z0	Point de changement d'outil
N40 T3 D3 M6	Foret n°3
N50 G0 X10 Y20 Z22	Point d'approche 1
N60 M3 S500 M8	Paramètres de coupe
N70 G81 Z10 ER35 F100	Cycle de perçage point 2
N80 X50	Perçage point 5 et 6
N90 G80	Fin du cycle de perçage
N90 G0 Z35	Cycle de perçage points 3 et 4
N100 G81 X30 Z-3 ER 35	Fin du cycle de perçage
N110 G80	
N120 G0 G52 X0 Y0 Z0 M9 M5	

**LES OUTILS
DE COUPE**

- GEOMETRIE**
- MATERIAUX**

GÉOMÉTRIE ET MATÉRIAUX DES OUTILS DE COUPE

1) - GÉNÉRALITÉS :

Un outil coupant sera constitué d'un corps qui comportera une ou plusieurs parties actives (coupantes). Une partie active sera constituée d'une arête coupante réalisée par l'intersection de deux surfaces dénommées respectivement :

- face de coupe,
- face en dépouille. (Fig. 1)

Dans le cas d'une arête non rectiligne, les définitions s'appliquent en chaque point de l'arête, à la tangente à celle-ci.

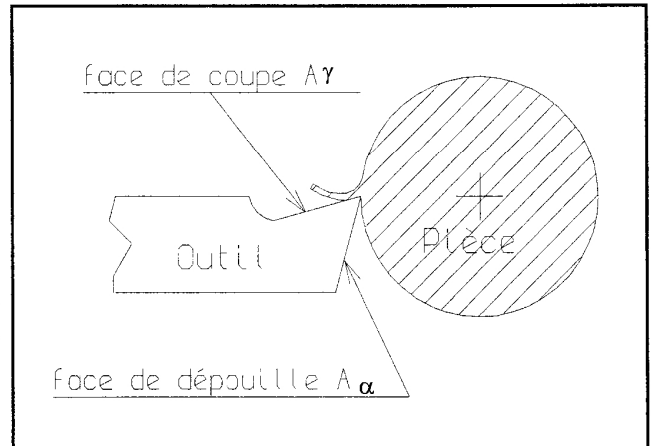


Figure 1

1-1) Arêtes et surfaces :

Nous allons voir ici les différentes surfaces et arêtes composant un outil.

1-1-1) Tournage :

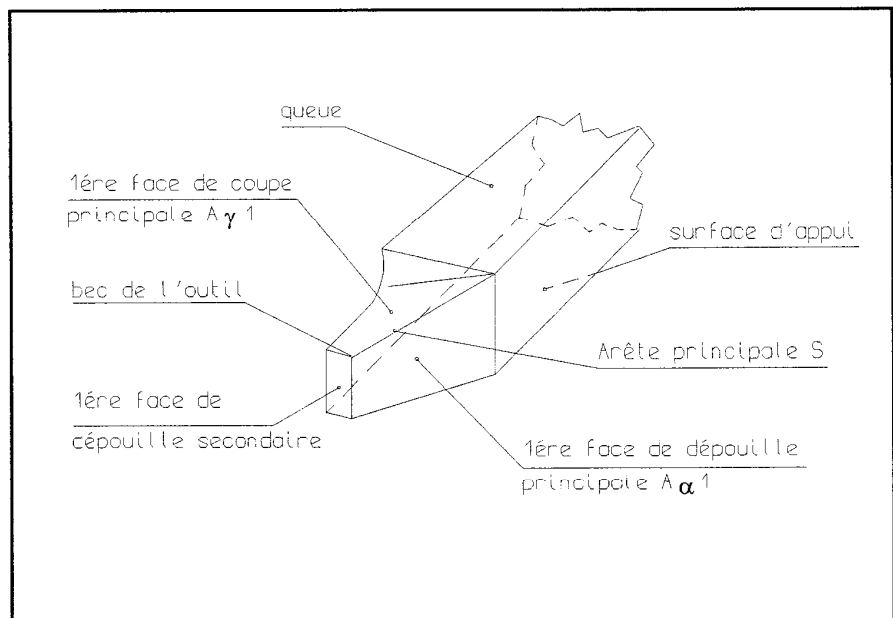


Figure 2

1-1-2) Fraisage :

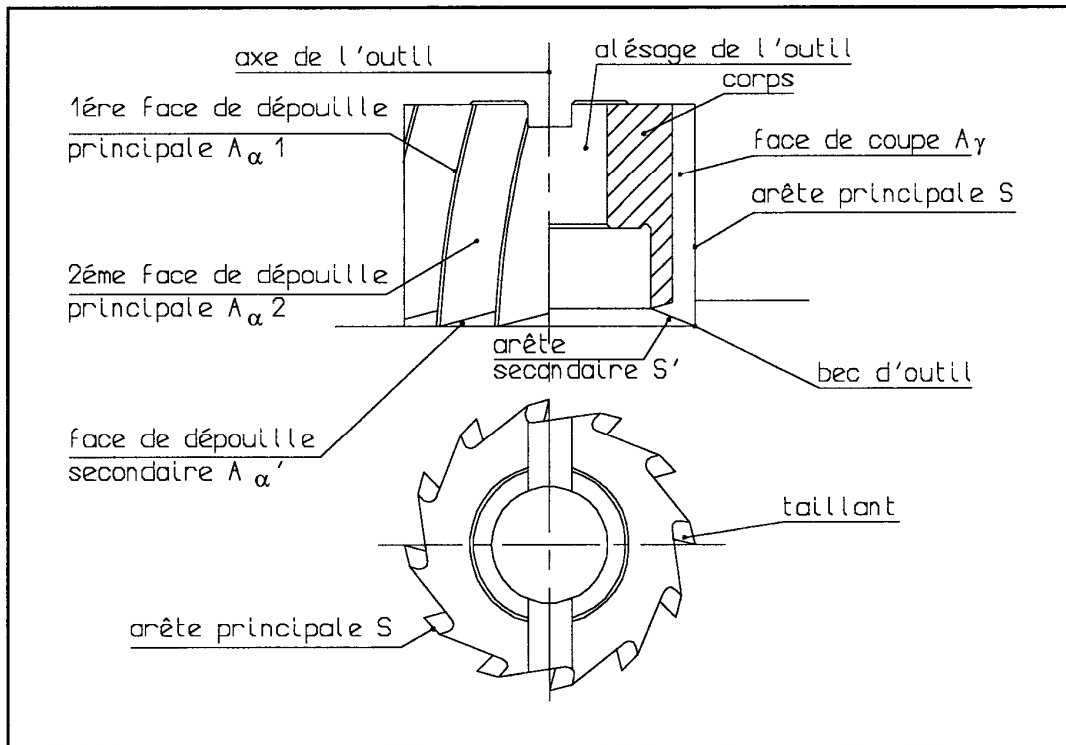


Figure 3

1-1-3) Perçage :

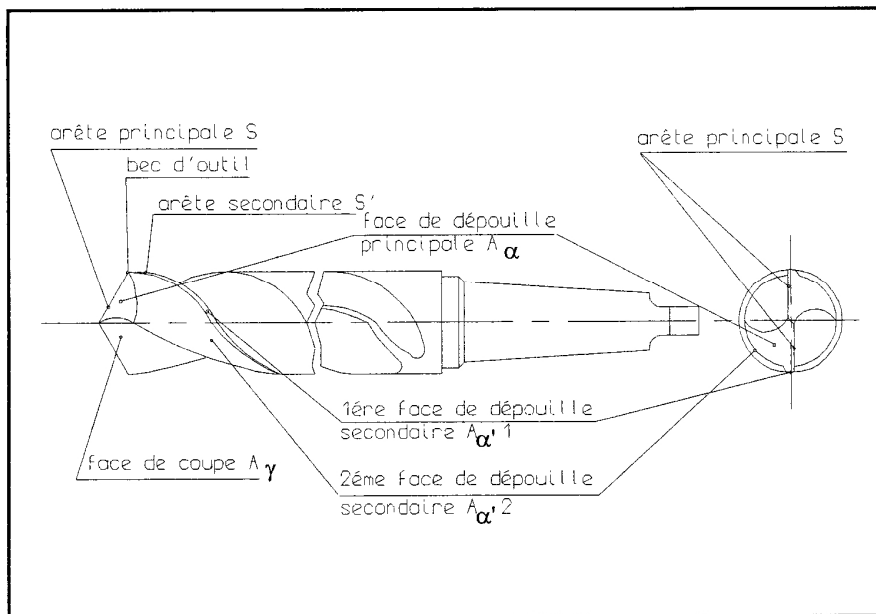


Figure 4

1-2) Définitions :

Les angles sont référencés par rapport à des plans et il existe deux systèmes de référence :

- Système de l'outil en main :

Il détermine la géométrie de l'outil au moment de sa fabrication et de son contrôle, ceci indépendamment de son utilisation.

- Système de l'outil en travail :

Il détermine la géométrie de l'outil dans les conditions d'emploi (en usinage).

1-3) Repérage des angles et des plans :

Chaque plan sera repéré par la lettre P avec un indice permettant l'identification.

Exemple : P_s : plan d'arête de l'outil.

Chaque angle sera repéré par une lettre grecque avec un indice permettant l'identification.

Exemple : γ_n : angle de coupe normal.

Pour distinguer ces angles et ces plans, suivant le système de référence (outil en main ou outil en travail), on affectera à ces lettres repères un e (effectif) lorsqu'il s'agira de désigner un plan ou un angle dans le système de l'outil en travail.

Exemple : P_{se} : plan d'arête en travail.

2) - GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL EN MAIN :

Plans de l'outil en main

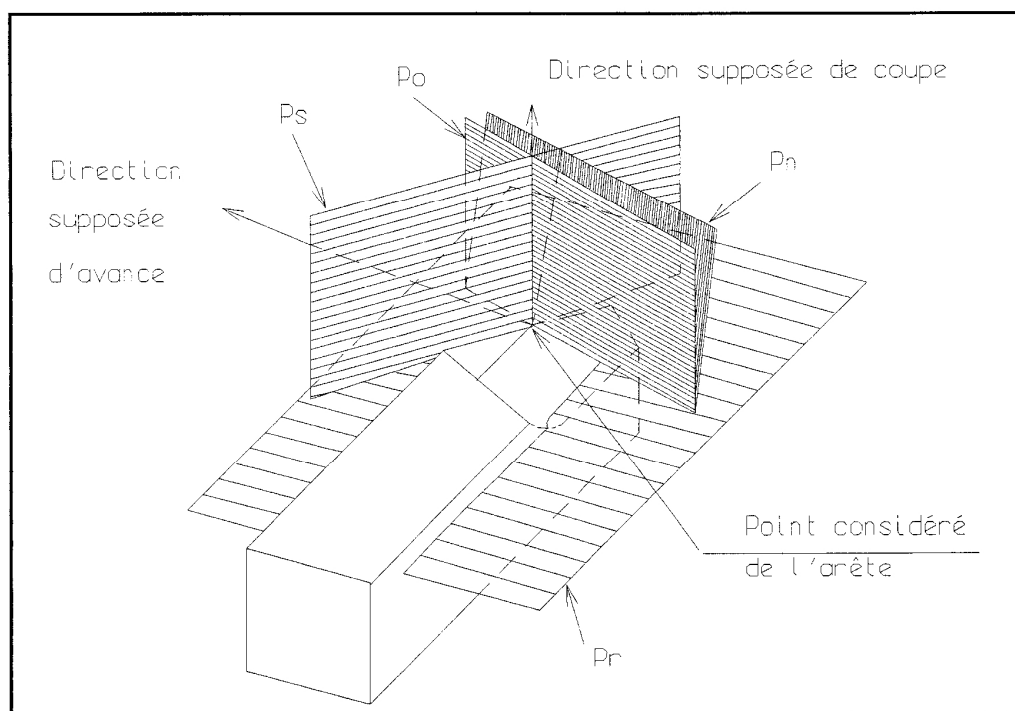


Figure 5

Définitions :

Plan de référence de l'outil P_r :

Plan passant par le point considéré de l'arête de coupe et contenant l'axe de l'outil (fraise ou foret) ou parallèle au plan de base du corps de l'outil (outil de tour).

Plan de l'arête de l'outil P_s :

Plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r .

Plan orthogonal P_o :

Plan contenant la direction supposée de la coupe, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête P_s .

Plan normal P_n :

Plan perpendiculaire à l'arête de coupe, au point considéré, et perpendiculaire au plan d'arête P_s .

3) - GÉOMÉTRIE DE L'OUTIL EN TRAVAIL :

Plans de l'outil en travail

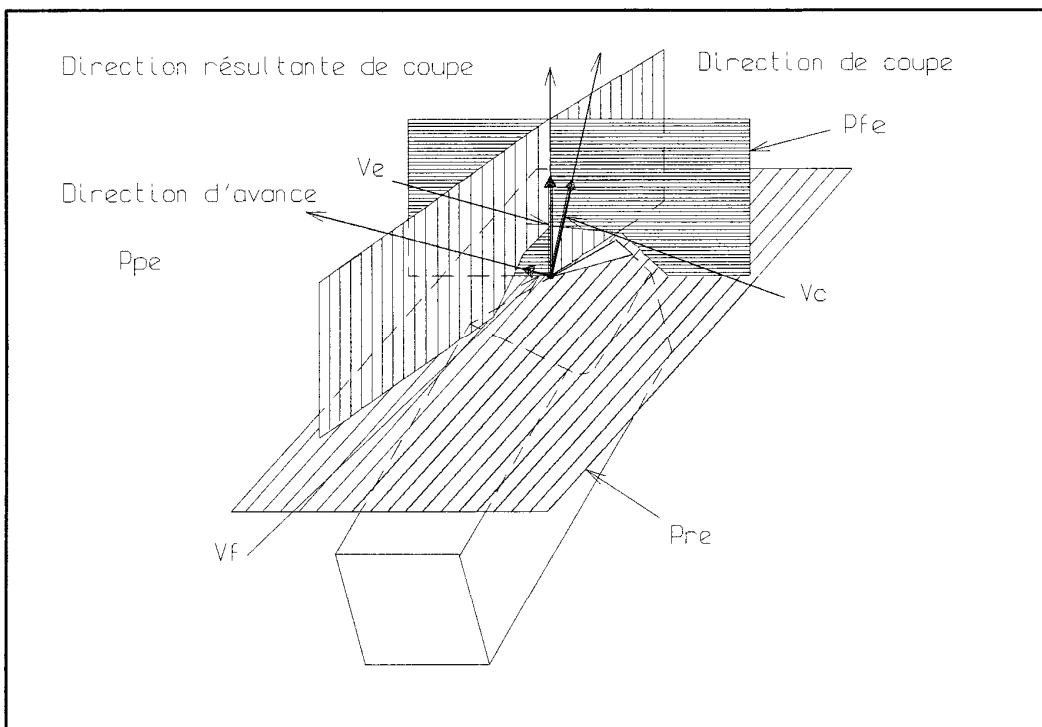


Figure 6

Définitions :

Plan de référence Pre :

Plan perpendiculaire, au point considéré, à la direction résultante de la coupe (résultante de **Mc**, mouvement de coupe, et de **Mf**, mouvement d'avance).

Plan d'arête en travail Pse :

Plan tangent à l'arête de coupe, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence **Pre**. Ce plan contient la direction de la résultante de la coupe.

Plan de travail conventionnel Pfe :

Plan perpendiculaire au plan de référence **Pre**, au point considéré, et parallèle à la direction supposée de l'outil, et qui serait la plus proche de la direction d'avance.

- outil tournant : plan parallèle ou perpendiculaire à l'axe.
- Outil de tour : plan parallèle ou perpendiculaire au corps (ou queue) de l'outil.

Plan arrière Ppe :

Plan perpendiculaire au plan de référence **Pre**, au point considéré, et perpendiculaire au plan de travail **Pfe**.

4) - LES ANGLES D'OUTILS :

Les angles qui vont être définis dans ce chapitre concernent l'arête de coupe principale. On retrouvera les mêmes angles pour l'arête de coupe secondaire mais affectés d'un " ' " (exemple : $\alpha'n$).

4-1) Les angles de l'arête de coupe principale :

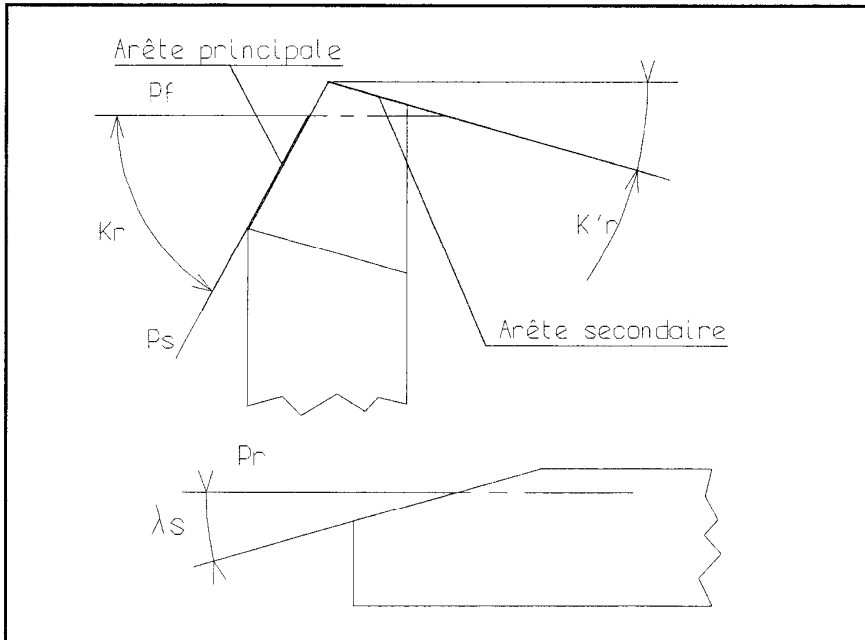


Figure 7

4-1-1) Angle de direction d'arête de l'outil K_r (ou K_{re}) :

C'est un angle aigu mesuré dans le plan de référence Pr (ou Pre) entre le plan d'arête P_s (ou P_{se}) et le plan de travail P_f (ou P_{fe}) (Fig. 7).

4-1-2) Angle d'inclinaison d'arête d'outil λ_s (ou λ_{se}) :

C'est un angle aigu mesuré dans le plan d'arête P_s (ou P_{se}), entre l'arête et le plan de référence Pr (ou Pre).

4-2) Le sens de coupe des outils :

On trouvera trois cas possibles :

- Les outils à gauche (Fig. 8) :

L'arête de coupe est orientée vers la droite lorsqu'un observateur devant la face de coupe regarde vers l'arrière de l'outil et voit l'arête de coupe sur sa droite.

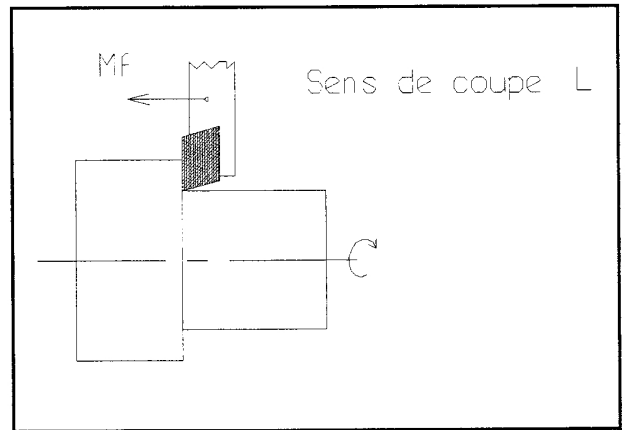


Figure 8

- Les outils à droite (Fig. 9) :

L'arête de coupe est orientée vers la gauche lorsqu'un observateur devant la face de coupe regarde vers l'arrière de l'outil et voit l'arête de coupe sur sa gauche.

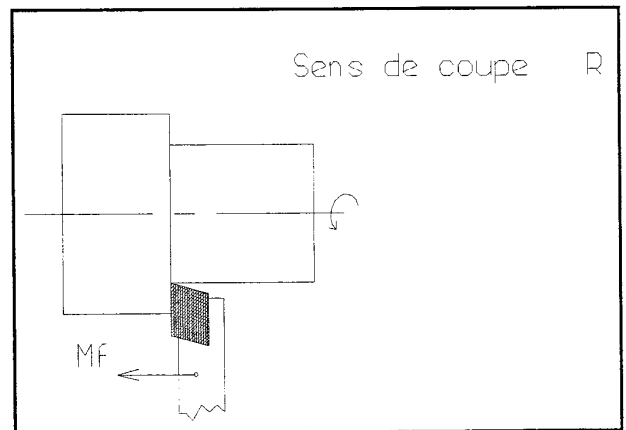


Figure 9

- Les outils neutres (Fig. 10) :

C'est un outil dont l'arête de coupe n'est ni à droite ni à gauche. Il est possible avec ce type d'outil d'usiner dans les deux sens.

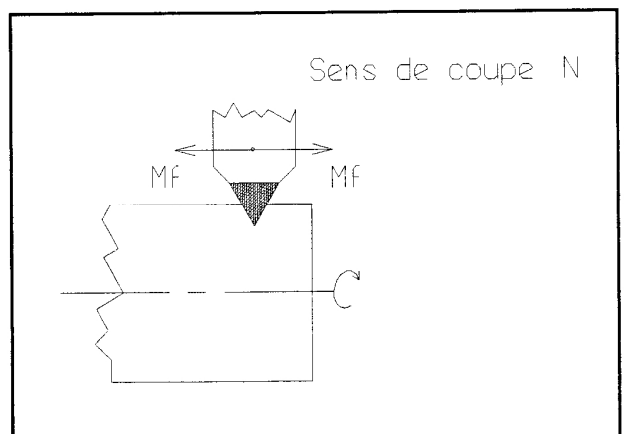


Figure 10

4-3) Les angles de faces :

Dans un plan de section donné, on appelle :

- **la dépouille α** : angle aigu entre la face de dépouille $A\alpha$ et le plan d'arête P_s (ou P_{se}).
- **l'angle de taillant β** : angle aigu entre la face de coupe $A\gamma$ et la face de dépouille $A\alpha$.
- **l'angle de coupe γ** : angle aigu entre la face $A\gamma$ et le plan de référence P_r (ou P_{re}).

DANS TOUS LES CAS :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Les angles de faces sont repérés dans quatre systèmes suivant le ou les plans de sections choisis.

4-3-1) 1er système : angles orthogonaux. (Fig. 11)

Plan de section orthogonal P_o (ou P_{oe}).

- Outil en main :

- **dépouille** : α_o
- **angle de taillant** : β_o
- **angle de coupe** : γ_o

- Outil en travail :

- **dépouille** : α_{oe}
- **angle de taillant** : β_{oe}
- **angle de coupe** : γ_{oe}

4-3-2) Deuxième système : angles normaux (Fig. 11).

Plan de section normal P_n (ou P_{ne}).

- Outil en main :

- **dépouille** : α_n
- **angle de taillant** : β_n
- **angle de coupe** : γ_n

- Outil en travail :

- **dépouille** : α_{ne}
- **angle de taillant** : β_{ne}
- **angle de coupe** : γ_{ne}

4-3-3) Troisième système : angles latéraux et vers l'arrière.

Les plans de sections choisis sont :

- le plan latéral **Pf**.
- le plan vers l'arrière **Pp**.

4-3-4) Quatrième système : angles d'affutage.

Dépouille et angle de coupe pris chacun séparément dans le plan de chaque face, défini lui-même par son angle de position.

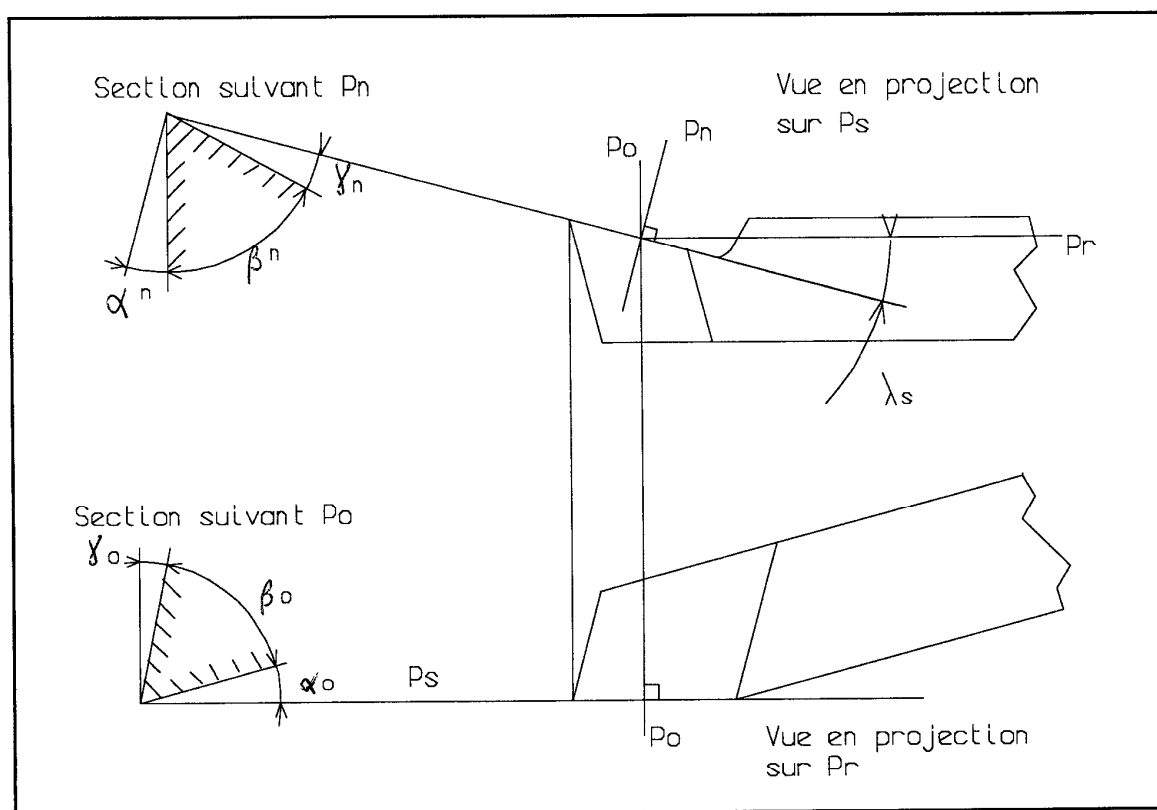


Figure 11

5) - LES MATÉRIAUX D'OUTILS :

5-1) Notions de métallurgie :

Désignation des métaux :

Tableau de la symbolisation AFNOR des métaux purs (**Fig. 12**).

Élément	Symbole AFNOR	Élément	Symbole AFNOR
Aluminium	Al	Molybdène	Mo
Antimoine	R	Nickel	Ni
Azote	Az	Niobium	Nb
Béryllium	Be	Phosphore	P
Bismuth	Bi	Plomb	Pb
Bore	B	Sélénium	Se
Cadmium	Cd	Silicium	Si
Chrome	Cr	Soufre	S
Cobalt	Co	Tantale	Ta
Cuivre	Cu	Titane	Ti
Étain	E	Tungstène	W
Fer	Fe	Vanadium	V
Magnésium	G	Zinc	Z
Manganèse	Mn	Zirconium	Zr

Figure 12

Parmi les matériaux d'outils on trouve :

- Les aciers rapides.
- Les carbures métalliques.
- Les céramiques.
- Les cermets.

5-2) Les aciers rapides :

Les aciers rapides sont apparus après les aciers fondus lorsque la métallurgie s'est pleinement développée. La composition métallurgique des aciers rapides comporte au minimum 0,7 % de carbone ainsi que des éléments additionnels susceptibles de former des carbures durs et résistants.

Dans tous les cas les aciers rapides contiennent au moins 4% de chrome, du vanadium, du tungstène, du molybdène et éventuellement du cobalt.

Ils sont principalement utilisés pour la fabrication d'outils monoblocs (forets, fraises, alésoirs, etc..) ou de mises rapportées (outils de tournage, de rabotage, d'alésage, etc..).

Vous trouverez dans le tableau ci-après la désignation des aciers rapides (**Fig. 13**):

N° de nuance	Symbole	Désignation abrégée	Dureté Hrc
Groupe 41	Aciers à 12 % de tungstène		
4151	X 80 WCrMoV 12-04-02-02	12-2-2	65/62
4161	X 130 WCrV 12-04-04	12-0-4	66/63
4171	X 150 WCoVCr 12-05-04-04	12-0-5-5	67/64
4175	X 165 WCoVCr 12-10-05-04	12-0-5-10	68/64
Groupe 42	Aciers à 18 % de tungstène		
4201	X 80 WCrV 18-04-01	18-0-1	65/62
4203	X 85 WCrV 18-04-02	18-0-2	65/62
4271	X 80 WCoCrV 18-05-04-01	18-0-1-5	66/63
4275	X 80 WCoCrV 18-10-04-02	18-0-2-10	66/63
Groupe 43	Aciers au tungstène-molybdène		
4301	X 85 WMoCrV 06-05-04-02	6-5-2	65/62
4361	X 130 WMoCrV 06-05-05-04	6-5-4	65/63
4371	X 85 WMoCoCrV 06-05-05-04-02	6-5-2-5	65/62
4373	X 150 WMoCoVCr 07-05-05-05-04	7-5-5-5	67/64
4375	X 175 CoWMoVCr 10-07-05-05-04	7-5-5-10	68/64
Groupe 44	Aciers au molybdène		
4441	X 85 MoCrWV 08-04-02-02	2-8-2	65/62
4475	X 110 MoCoCrWV 09-08-04-02-01	2-9-1-8	69/65

Figure 13

5-2-1) Les aciers rapides revêtus :

De plus en plus on trouve des aciers rapides revêtus. Ce revêtement, en couches de quelques microns, est constitué :

- de nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2000 HV;
- de carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3900 HV;
- d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), d'une dureté d'environ 2400 HV.

Ces revêtements améliorent considérablement les possibilités des outils, principalement en ce qui concerne la durée de vie, grâce à une diminution du frottement entre le copeau et l'outil et entre la pièce et l'outil. Dans certains cas l'augmentation de la durée de vie peut atteindre 500 %.

5-3) Les carbures métalliques :

Tableau de classification des carbures en fonction de l'utilisation.

Les carbures métalliques se sont développés grâce à l'apparition de la métallurgie des poudres. Les carbures sont des agglomérés de tungstène, de cobalt et de carbures divers (tantale, titane, bore) obtenus par frittage. Ils conservent leurs caractéristiques jusqu'à 1000°, leur dureté est voisine de celle du diamant avec une densité d'environ 14,6. Assez fragiles, ils supportent plus ou moins bien les variations de température. Les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance) sont élevées et permettent de fortes passes dans l'usinage de divers matériaux.

Les carbures métalliques sont classés en trois groupes (P, M ou K) en fonction des applications. Chaque groupe sera suivi d'un numéro définissant les domaines d'applications.

5-3-1) Les revêtus :

Pour les carbures, les revêtements sont identiques aux aciers rapides et sont de plus en plus utilisés. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de l'outil jusqu'à 100 %, mais la couche à une tenue moins stable.

Tableau de classification des carbures en fonction de l'utilisation.

Groupes principaux enlèvement de copeaux		GROUPES D'APPLICATION			Sens croissant des caractéristiques	
Symbole	Matières	Symbole	Matières à usiner	Utilisation	coupe	carbure
P	Métaux	P 01	Acier, acier moulé	Tournage et alésage de finition : grande vitesse de coupe, petite section de copeau.	Avances ↑ Vitesses ↓	Résistance à l'usure ↑ Ténacité ↓
	ferreux	P 10	Acier, acier moulé	Tournage, copiage, filetage, fraisage, grande vitesse de coupe, section de copeaux petite ou moyenne.		
	à	P 20	Acier, acier moulé Fonte malléable	Tournage, copiage, fraisage, vitesse de coupe et section de copeau moyenne.		
	copeaux	P 30	Acier, acier moulé Fonte malléable	Tournage, fraisage, rabotage, moyenne ou petite section de copeaux.		
	longs	P 40	Acier, acier moulé avec inclusion de sable ou retassures.	Tournage, rabotage, mortaisage, petite vitesse de coupe, grande section de copeaux.		
		P 50	Acier, acier moulé avec inclusion de sable ou retassures.	Opérations exigeant une bonne ténacité des carbures : tournage, rabotage, mortaisage, petite vitesse de coupe, grande section de copeaux.		
M	Métaux ferreux	M 10	Acier, acier moulé, acier au manganèse, fonte grise et allié.	Tournage, moyenne ou grande vitesse de coupe. Section de copeaux petite ou moyenne.	Avances ↑ Vitesses ↓	Résistance à l'usure ↑ Ténacité ↓
	à copeaux longs et	M 20	Acier, acier moulé, acier au manganèse, fonte grise.	Tournage, fraisage. Vitesse de coupe et section de copeaux moyennes.		
	à copeaux courts	M 30	Acier, acier moulé, acier austénitique, fonte grise.	Tournage, fraisage. Vitesse de coupe et section de copeaux moyenne ou grande.		
	métaux non ferreux	M 40	Acier doux et de décolletage. Métaux non ferreux, alliages légers.	Tournage, tronçonnage, particulièrement sur machines automatiques.		
K	Métaux ferreux	K 01	Fonte grise de dureté élevée, moulage en coquille.	Tournage, tournage finition, alésage, fraisage, grattage.	Avances ↑ Vitesses ↓	Résistance à l'usure ↑ Ténacité ↓
	à copeaux courts	K 10	Fonte grise dureté > 220 Br. Fonte malléable, aciers trempés. Alliage de cuivre.	Tournage, perçage, fraisage, alésage, brochage, grattage.		
	métaux non ferreux	K 20	Fonte grise dureté < 220 Br. Cuivre.	Tournage, fraisage, rabotage, brochage exigeant une grande ténacité des carbures métalliques.		
	matières non métalliques	K 30	Fonte grise. Acier doux. Bois comprimé.	Tournage, fraisage, rabotage, mortaisage pour usinage dans des conditions défavorables.		
		K 40	Bois naturel, tendre ou dur.	Tournage, fraisage, rabotage, mortaisage pour usinage dans des conditions défavorables.		

5-4) Les céramiques :

D'apparition récente, les céramiques offrent des perspectives d'avenir très intéressantes. Elles se présentent sous la forme de plaquettes frittées existant en deux grandes familles :

- les céramiques à base d'alumine :

- les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxydes d'aluminium et d'autres oxydes métalliques .
- les céramiques mixtes de couleur grise composées d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.

- Les céramiques à base de nitrure de silicium :

- ce sont des matériaux récents, les plus connus étant les sialons. De couleur noire, elles sont composées de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

Leur dureté est équivalente à celle des carbures et elles conservent leurs caractéristiques jusqu'à 1200°. Les céramiques sont prévues pour supporter des conditions de coupe élevées. Elles résistent très bien à l'usure mais supportent mal les chocs. On les utilise principalement sur des machines puissantes, pour des opérations de finition, pour l'usinage des métaux ferreux.

5-5) Les cermets :

Nous avons affaire ici à des matériaux à base de titane avec un liant soit de nickel, soit de cobalt ou des deux à la fois. Ils présentent une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. On les utilise principalement pour des opérations de finition. Les résultats en tournage de finition pour les aciers sont bons, en particulier pour les aciers inoxydables.

5-6) Domaine d'utilisation :

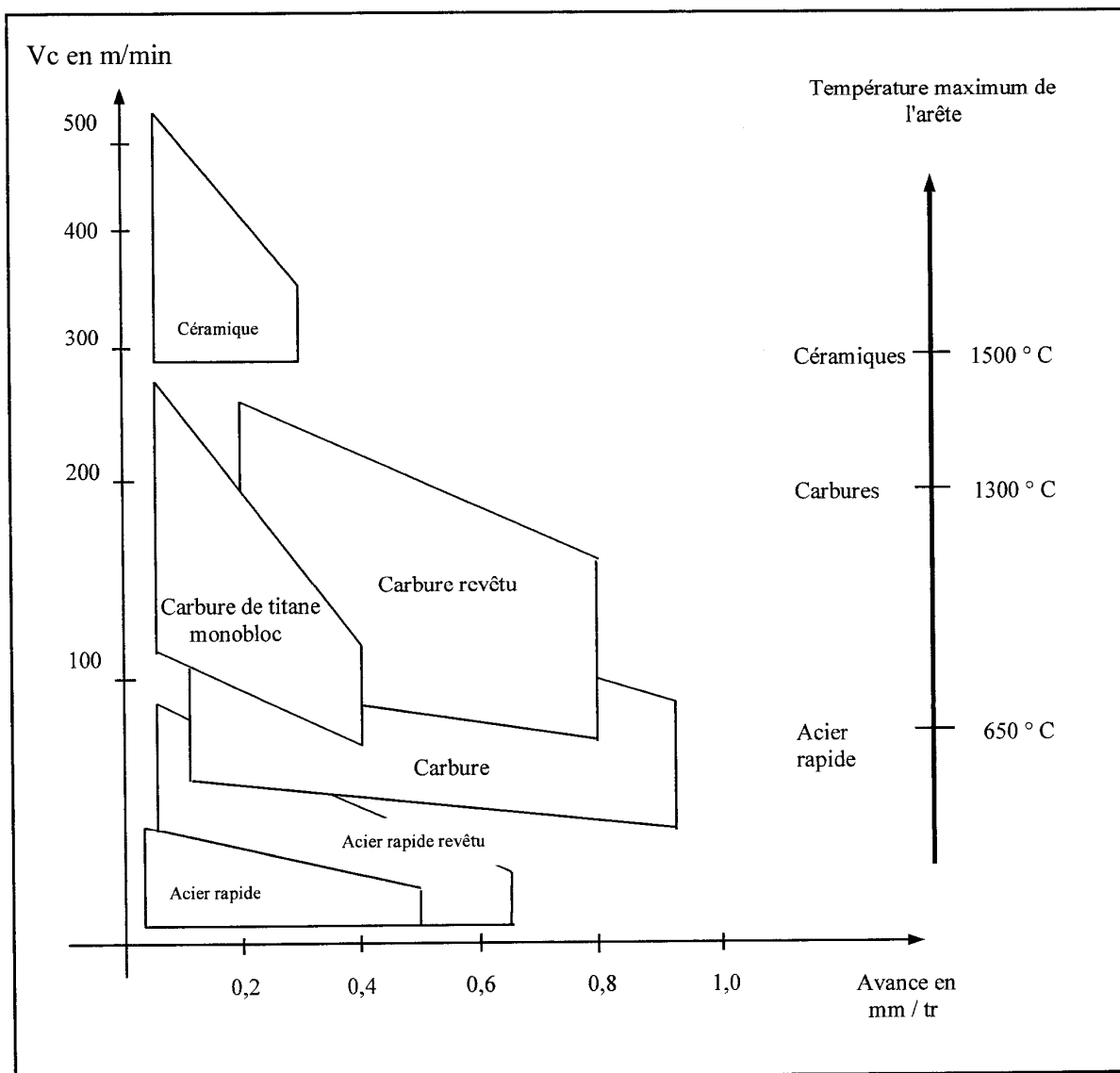


Figure 14

DOMAINE D'UTILISATION DES DIVERS TYPES DE MATÉRIAUX D'OUTILS COUPANTS

Ce diagramme (fig. 14) est donné à titre indicatif afin de situer les différents domaines d'utilisation des matériaux d'outils. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation des outils pour les aciers et les fontes. Il ne peut en aucun cas servir au choix des conditions de coupe.

6 - CONDITIONS DE COUPE ET ANGLES DES OUTILS :

6-1) Tournage :

Dans le tableau ci-après vous trouverez des valeurs indicatives de vitesses de coupe et d'angles d'outils.

Matières à usiner	R daN/mm ² ou HB	ARS sans Co Vc (m/min)	ARS 5% de Co Vc (m/min)	Carbure Vc (m/min)		Angles			
				Ebauche	Finition	ARS		Carbure	
						α	γ	α	γ
Aciers	40<R<60	35 à 50	50 à 65	100 à 200	300	6°	30°	5°	20°
Aciers	60<R<90	20 à 25	25 à 50	80 à 130	150 à 200	6°	25°	5°	15°
Aciers	90<R<110	10 à 20	15 à 25	50 à 80	80 à 100	6°	20°	5°	12°
Fontes	160<HB<250	20 à 30	35 à 50	40 à 60	75 à 100	6°	20°	5°	15°
Fontes	260<HB<350	15 à 20	25 à 40	20 à 50	50 à 70	6°	20°	5°	10°
Fontes	360<HB<500	10 à 15	20 à 30	30 à 50	50 à 70	6°	15°	5°	10°
Aciers		18 à 30	25 à 40	25 à 50	50 à 70	6°	10°	4°	5°
Cuivre		40 à 50	50 à 70	80 à 100	80 à 150	8°	30°	8°	20°
Alliages légers		45 à 80	65 à 100	150 à 400	150 à 500	8°	30°	8°	25°
Bronze		40 à 60	45 à 70	100 à 150	200 à 300	8°	25°	6°	15°
Bronze phosphoreu		30 à 50	40 à 60	80 à 120	120 à 200	8°	20°	5°	10°
Laitons		45 à 75	60 à 100	150 à 300	200 à 500	8°	25°	6°	15°

6-2) Fraisage :

Dans le tableau ci-après vous trouverez des valeurs indicatives de conditions de coupe et d'angles en surfacage.

Matières à fraisier	R (daN/mm ²) ou HB	Vitesses de coupe Vc (m/min)		Tailles				
		Ébauche	Finition	Périphérique			en bout	
				α	γ	α'''	α	α'
Aciers	< 60	20 à 25	25 à 30	8°	20°	15°	6°	20°
Aciers	60<R<90	8 à 12	12 à 18	10°	12°	15°	6°	15°
Fontes	HB<250	10 à 15	12 à 20	8°	15°	15°	6°	15°
Fontes	HB>250	8 à 12	12 à 15	8°	5°	-	6°	25°
Alliages légers		100 à 150	150 à 300	8°	20°	15°	6°	15°

Nota : L'angle α' correspond à la valeur angulaire de la seconde face en dépouille (face de dépouille principale $A\alpha$ et face de dépouille secondaire $A\alpha'$).

6-3) Perçage - Alésage :

6-3-1) Perçage :

Valeurs indicatives de vitesses de coupe pour forets ARS et carbure

Matières à percer	ARS Vc (m/min)	Carbure Vc (m/min)
Aciers R<60	20 à 30	20 à 30
Aciers 60<R<90	15 à 20	8 à 12
Aciers R>90	10 à 15	60 à 100
Fontes HB<250	20 à 30	40 à 80
Fontes HB>250	15 à 20	80 à 100
Bronzes	40 à 50	100 à 200
Laitons	50 à 80	120 à 160

6-3-2) Alésage :

Conditions de coupe (vitesses de coupe) et angles pour alésoirs ARS.

Matières à aléser	ARS Vc (m/min)
Aciers R<60	10 à 15
Aciers 60<R<90	6 à 10
Aciers R>90	4 à 6
Fontes HB<250	10 à 16
Fontes HB>250	6 à 12
Bronzes	6 à 12
Laitons	20 à 30

Type d'alésoir	Alésoir à main	Alésoir machine ébauche	Alésoir machine finition
α	0°	1° à 3°	0°

GLOSSAIRE

Système de l'outil en main : géométrie de l'outil au moment de sa fabrication.

Système de l'outil en travail : géométrie de l'outil pendant l'usinage.

Ps : plan de section contenant l'arête de l'outil.

Pr : plan de référence.

Po : plan orthogonal perpendiculaire à Pr et à Ps.

Pn : plan normal perpendiculaire à Ps et à l'arête de coupe.

Kr : angle de direction de l'arête principale de coupe.

K'r : angle de direction de l'arête secondaire de coupe.

λs : angle d'inclinaison de l'arête principale de coupe.

α : angle de dépouille.

β : angle de taillant.

γ : angle de coupe.

A.R.S. : Aciers Rapides Supérieurs.

**LA COUPE
DES METAUX**

LA COUPE DES METAUX

1) - GENERALITES

Lors d'une opération d'usinage, il est nécessaire de définir **les différents paramètres de coupe** :

- la profondeur de passe a_p en mm (engagement arrière de l'arête)
- l'avance par tour f en mm/tour ou l'avance par tour pour 1 dent f_z en mm/dent
- la vitesse de coupe V_c en m/min

Pour cela, il faut prendre en compte :

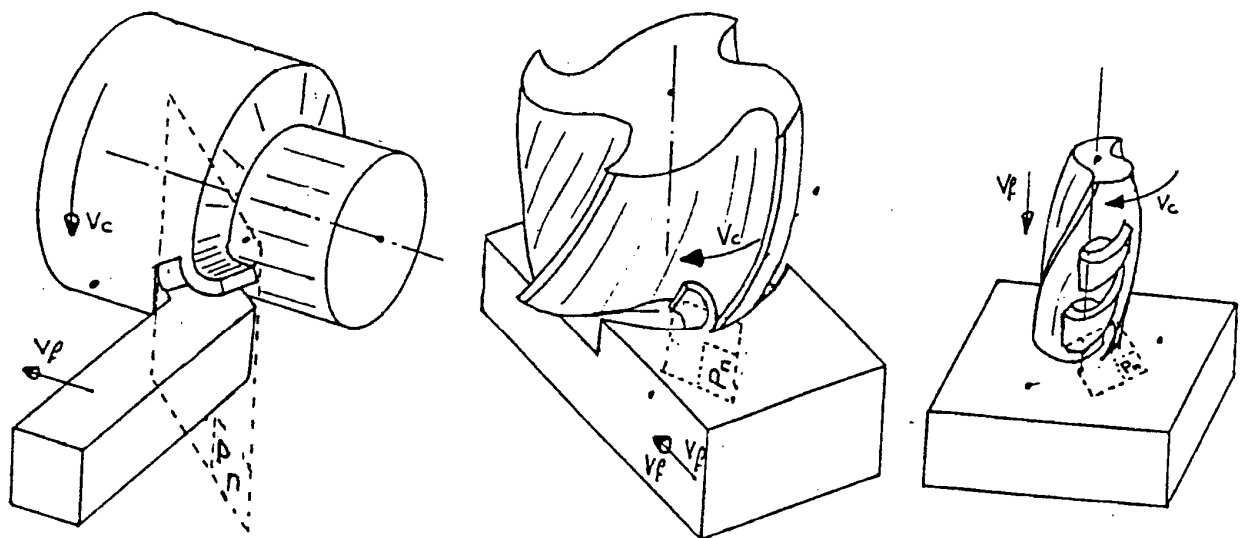
- la matière de la pièce (acier, alliage léger,)
- le matériau de l'outil (ARS, carbure, céramique, ...)
- le type de l'opération :
 - * **en ébauche** : rechercher le débit maximum de copeaux tout en produisant au coût minimum (prise en compte de la durée de vie de l'outil, des efforts de coupe et donc de la puissance de la machine)
 - * **en finition** : rechercher la qualité dimensionnelle, assurer les spécifications de forme et l'état de surface (prise en compte du rayon de bec de l'outil)

2) - NOTION DE DUREE DE VIE D'UN OUTIL

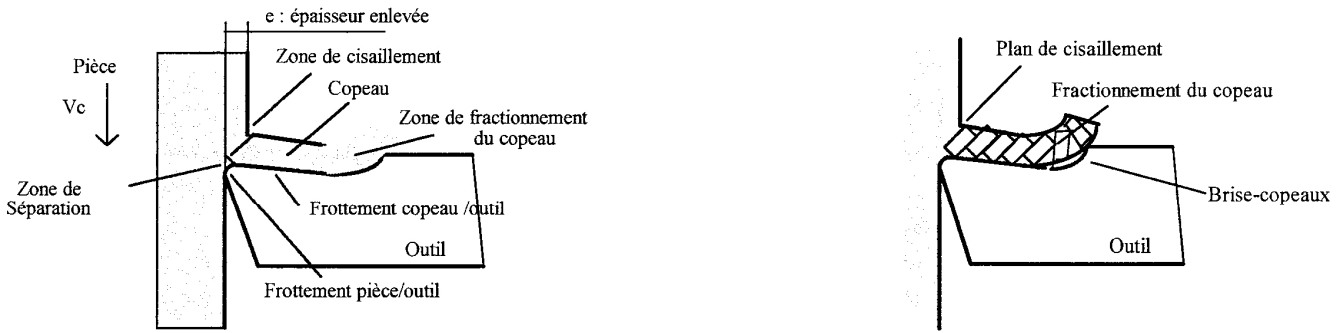
La durée de vie d'un outil est limitée par l'usure de l'outil, c'est un phénomène qu'il faut maîtriser. En effet, les dimensions des pièces évoluent au fur et à mesure des usinages, l'état de surface se détériore et finalement à un certain moment l'usure provoque "la mort" de l'outil (détérioration totale de l'arête de coupe). Afin de comprendre ce phénomène, il faut étudier la formation du copeau.

2-1) Etude de la formation du copeau :

Le copeau se déroule sur la face de coupe de l'outil, dans le plan P_n , perpendiculaire à l'arête de coupe.
(dessin des outils)



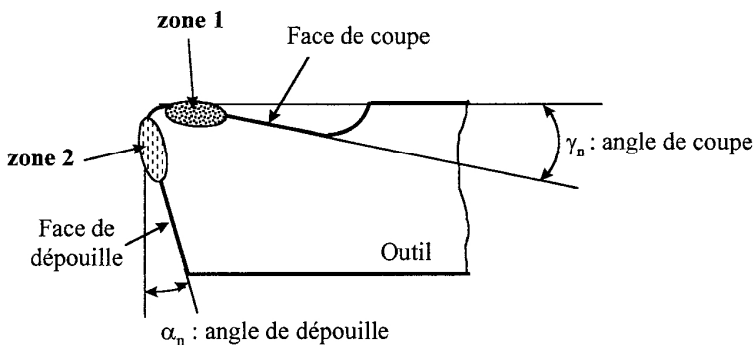
Vue dans le plan Pn, pour une opération de tournage :



Le copeau ne se forme pas suivant une séparation homogène de la matière, mais par une succession de morceaux découpés par cisaillement et agglomérés.

On constate :

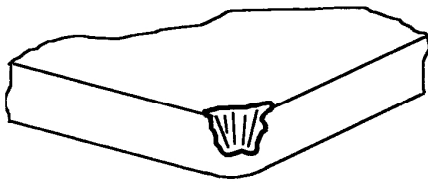
- un frottement intense du copeau sur la face de coupe (zone 1)
- un frottement de la surface usinée sur la face en dépouille de l'outil (zone 2)



2-2) Les critères d'usure :

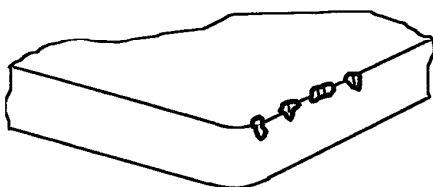
Lorsque l'on observe la partie active d'un outil, on voit apparaître différentes formes d'usure :

- rupture de la pointe



Cette usure apparaît si la plaquette est trop chargée ou de dimensions trop réduites et lors de chocs mécaniques ou thermiques
Remèdes : prendre une nuance plus tenace, réduire l'avance ou la profondeur de passe, prendre une plaquette plus grande ou plus épaisse.

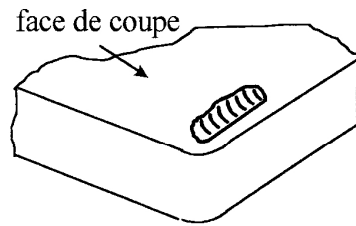
- écaillage de l'arête



Ces fractures provoquent un état de surface médiocre, elles peuvent être dues à une arête rapportée (matière pièce qui se soude sur la plaquette et qui effrite la plaquette lorsqu'elle se détache), ou à un copeau trop fin (voir plus loin la notion de copeau mini).

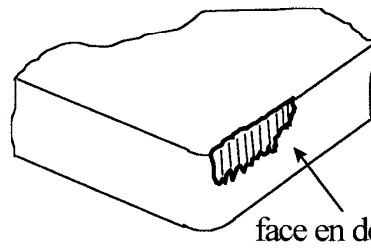
Remèdes : prendre une nuance plus tenace, ou une plaquette ayant une arête de coupe plus robuste, augmenter la vitesse de coupe.

- **usure en cratère** due au frottement du copeau sur la face de coupe (zone 1), le critère retenu est la **profondeur KT**

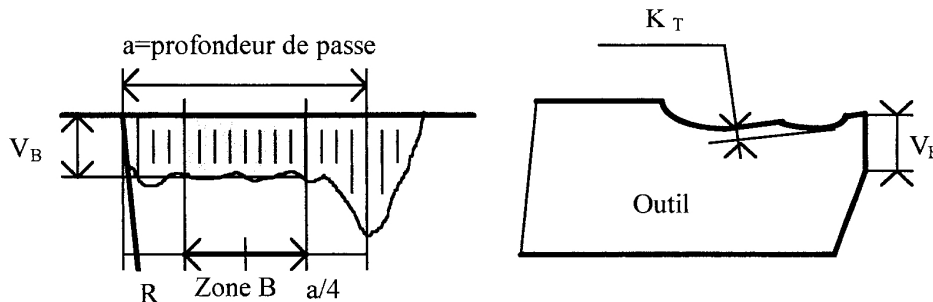


C'est une usure par diffusion due à une température de coupe trop élevée sur la face de coupe.
Remèdes : diminuer vitesse d'avance et vitesse de coupe, choisir une géométrie de coupe positive, prendre une nuance à revêtement d' Al_2O_3

- **usure frontale** due au frottement de la surface usinée sur la face en dépouille de l'outil, le critère retenu est la **hauteur moyenne de la trace de l'usure dans la zone centrale VB**.



Une usure en dépouille rapide entraîne un état de surface médiocre en dehors des tolérances.
Remèdes : réduire la vitesse de coupe, choisir une nuance plus résistante à l'usure



Dans le cas des outils en aciers rapides, le critère d'usure retenu est l'effondrement d'arête, la mesure de l'usure frontale sur ces outils montre une trop grande dispersion en raison :

- hétérogénéité des aciers à outils et de la matière usinée
- échauffement excessif de la pointe de l'outil
- arête rapportée (copeau adhérent)

Par contre, pour les outils carbure à plaquettes amovibles, les critères d'usure KT et VB seront retenus.
On retient en principe :

$VB = 0,3 \text{ mm en finition} \quad 0,6 \text{ à } 0,8 \text{ mm en ébauche}$ $KT = 0,06 + 0,3 \cdot f$

Au delà de ces valeurs, l'outil est considéré comme usé et doit donc être changé.

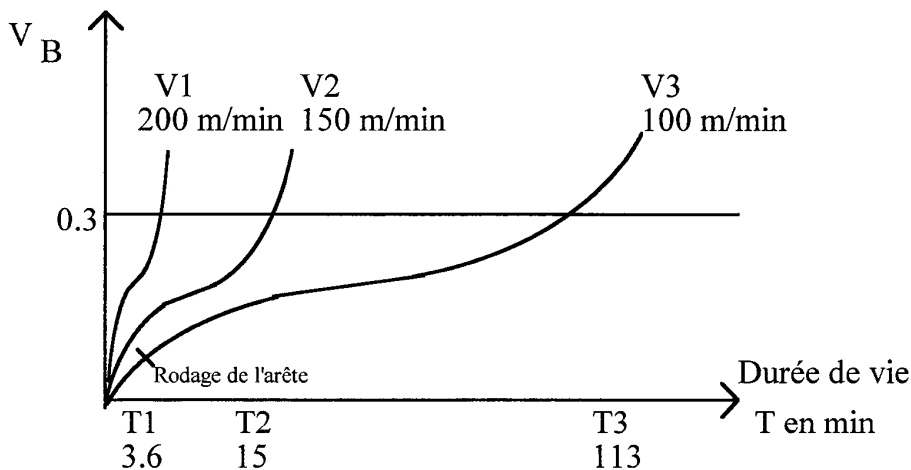
Il est évident que lors d'une opération d'usinage, il est hors de question de contrôler en permanence l'évolution de l'usure de l'outil, l'idée est donc d'essayer de déterminer le temps pendant lequel un outil peut usiner et au delà duquel il sera considéré comme usé (ce temps correspond à la durée de vie de l'outil).

2-3) Loi expérimentale de durée de vie d'un outil en tournage :

2-3-1) L'essai normalisé (NF E 66 505) :

Il consiste à faire un chariotage à vitesse, avance et profondeur de passe constantes. L'usure V_B est mesurée (avec une loupe graduée) toutes les deux minutes environ.

Exemple de courbes expérimentales montrant l'évolution de l'usure V_B en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe.

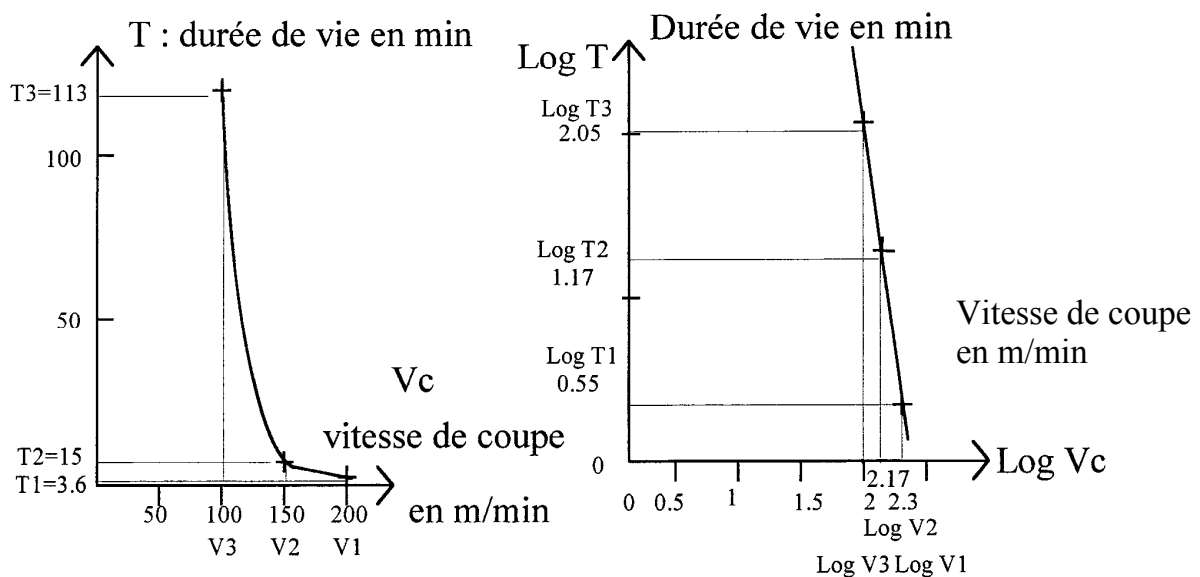


Ces courbes présentent un point d'inflexion, les débuts de courbes correspondent à une période de "rodage" de l'outil (l'arête vive s'émousse rapidement), on peut considérer que la zone correcte d'utilisation se situe après le point d'inflexion.

2-3-2) Modèle de TAYLOR :

Ce modèle a pour objectif de prévoir la durée de vie d'un outil (avec une erreur de 40% !)

A partir de l'ensemble des courbes expérimentales, on peut définir des couples (V_i, T_i) correspondants à une usure $V_B = 0,3$ mm, si l'on reporte ces points sur un graphe (en échelle linéaire), on obtient la courbe de gauche.



Taylor a remarqué qu'en échelles logarithmiques, les points étaient sensiblement alignés d'où l'équation d'une droite :

$$\text{Log } T = n \text{ Log } V_c + C_{st} \quad \text{avec } n : \text{ pente de la droite, } n \text{ est négatif}$$

Cst : constante correspondant à l'ordonnée à l'origine

On pose : $C_{st} = \text{Log } C_v$

$$\text{Log } T = \text{Log } (V_c)^n + \text{Log } C_v = \text{Log } (C_v \cdot V_c^n) \quad \text{d'où}$$

$$T = C_v \cdot V_c^n$$

T : durée de vie de l'outil en minutes

V_c : vitesse de coupe en m/min

n et C_v sont des constantes dépendant de la matière usinée et de l'outil, leur ordre de grandeur est :

pour les carbures

$$n = -4 \text{ à } -6$$

$$10^4 < C_v < 10^{14}$$

Remarque 1 : l'avance f et la profondeur de passe a_p influent sur la durée de vie de l'outil, ces paramètres peuvent être pris en compte en utilisant **le modèle généralisé de GILBERT** :

$$T = C \cdot V_c^n \cdot f^x \cdot a_p^y$$

(C, n, x et y dépendent de la matière usinée et de l'outil)

Remarque 2 : les fabricants d'outils définissent dans leur catalogue les durées de vie de leurs outils de la manière suivante : pour un couple matière pièce / matériau outil, ils définissent le V_{15} qui correspond à la vitesse de coupe permettant d'atteindre sa limite au bout de 15 minutes ($V_B = 0,3$ mm en finition et $V_B = 0,6$ mm en ébauche).

Exemple : $V_{15} = 200$ m/min signifie que pour une vitesse de coupe de 200 m/min, l'outil sera usé au bout de 15 minutes.

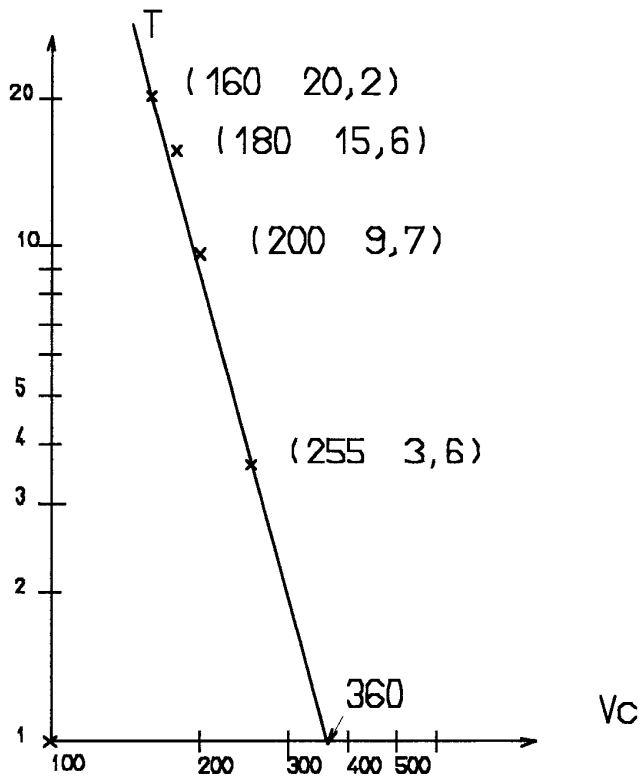
La loi de Taylor permet de modifier la valeur de la vitesse de coupe en fonction de la durée de vie souhaitée ou de calculer l'influence sur la durée de vie d'une arête de coupe lors d'un changement de vitesse de coupe.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1^n}{V_2^n}$$

Nota : la vitesse de coupe se note V_c ou V.

Exercice 1 :

On a mené une campagne d'essais pour définir les lois d'usure (matière pièce: C45, outil carbure GC135), on a obtenu la droite de Taylor suivante :



- 1) Déterminer n et C_v graphiquement.
- 2) Trouver T pour $V_c = 300$ m/min.
- 3) Trouver V_c pour $T = 5$ min.

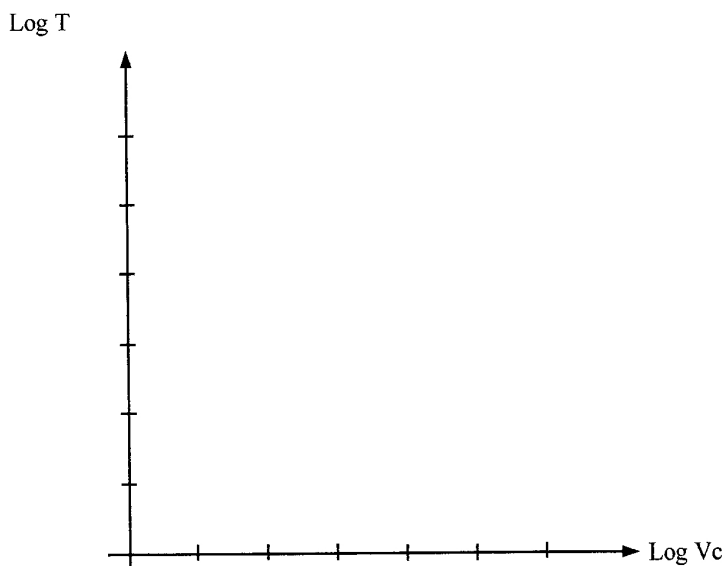
Exercice 2 :

On considère le modèle de Taylor. Pour une pièce en 35 Cr Mo4 et un outil carbure en GC415, on recommande $V_{15} = 220$ m/min, avec $n = -5$

Tracer la droite de Taylor dans le repère $\text{Log}T/\text{Log}V$

Déterminer graphiquement V_{30}

Déterminer par le calcul V_{30} .



2-4) Durée de vie économique :

Afin d'optimiser la production, il est possible de déterminer les conditions de coupe donnant un coût minimal d'usinage.

2-4-1) Détermination du coût de production :

On réalise une série de n pièces, le coût de production pour une opération sur une pièce peut être estimé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Coût production 1 pièce} &= \text{Coût auxiliaire par pièce indépendant de la vitesse de coupe} \\ &+ (\text{Coût horaire machine + opérateur}) \cdot \text{temps de coupe} \\ &+ \text{Coût de l'outil} / \text{nombre de pièces usinées par l'outil} \end{aligned}$$

Notation :

- C_p : coût de production pour une pièce en €
- C_a : coût auxiliaire pour 1 pièce : montage, démontage, réglage, ... en €
- C_m : coût par minute (machine + opérateur) en €/min
- C_o : coût d'une arête de coupe en €
- T_c : temps de coupe pour une pièce (min)
- T : durée de vie de l'outil (min)

$$C_p = C_a + C_m \cdot T_c + C_o \cdot T_c/T$$

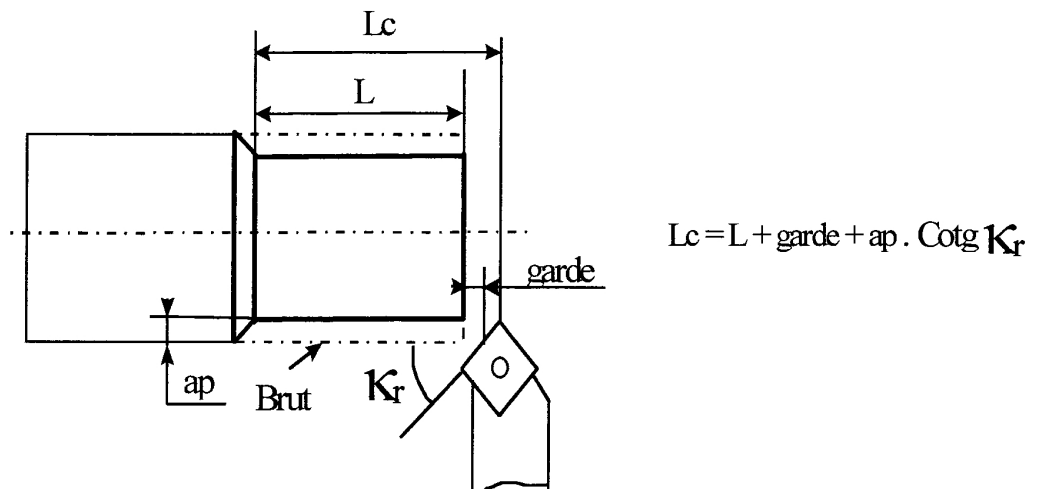
Remarque : C_o prend en compte le prix d'une plaquette, le prix du porte outil, le coût de changement d'outil.

2-4-2) Détermination du temps de coupe T_c :

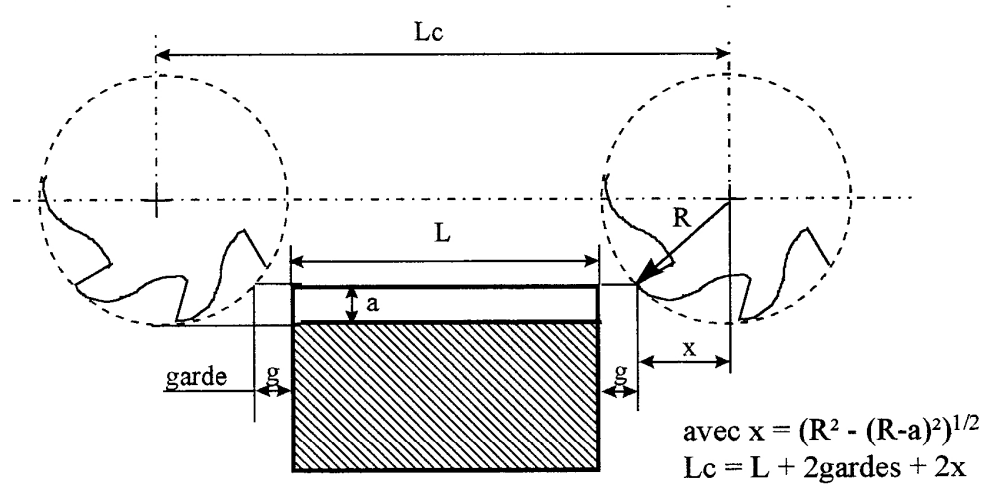
C'est le temps pendant lequel l'outil est en vitesse travail, il dépend de la longueur de coupe L_c .

$$T_c = L_c / V_f \quad (V_f : \text{vitesse d'avance en mm/min})$$

Exemple 1 : opération de chariotage en tournage

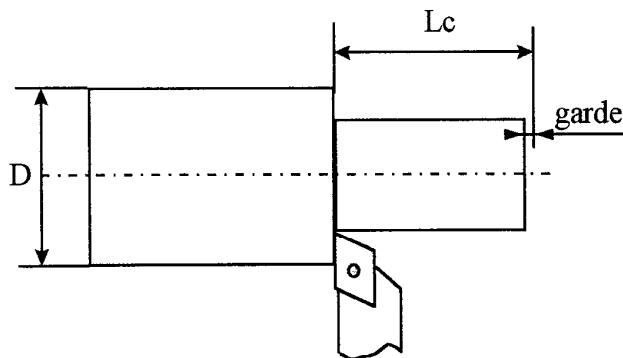


Exemple 2 : opération de fraisage en roulant



2-4-3) Détermination de la vitesse économique de coupe V_e :

Exemple : opération de chariotage ébauche en une passe



$$T_c = L_c / V_f = \text{avec } V_f = f \cdot N = f \cdot (1000 \cdot V_c / \pi \cdot D)$$

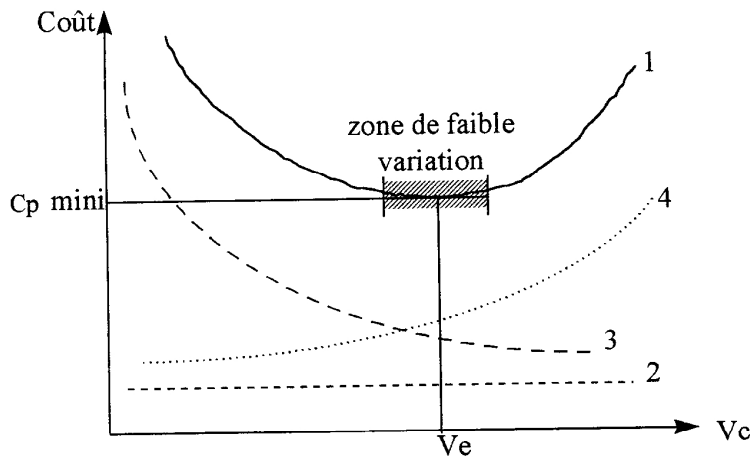
Afin d'optimiser la production, il est possible de déterminer les conditions de coupe donnant un coût minimal d'usinage.

$$C_p = C_a + C_m \cdot \frac{L_c \cdot \pi \cdot D}{f \cdot 1000 \cdot V_c} + C_o \cdot \frac{L_c \cdot \pi \cdot D}{f \cdot 1000 \cdot C_v \cdot V_c^{n+1}} = A + \frac{B}{V_c} + \frac{C}{V_c^{n+1}}$$

$\frac{\backslash/}{1} \quad \frac{\backslash/}{2} \quad \frac{\backslash\text{-----}/}{3} \quad \frac{\backslash\text{-----}/}{4}$

A, B, C sont des constantes

On peut représenter graphiquement l'allure de la courbe $C_p = f(V_c)$.



Il existe une plage de vitesse économique donnant un coût minimal.

Le coût de production C_p sera minimal pour $\frac{\delta C_p}{\delta V_c} = 0$ (rappel $(x^i)' = i x^{i-1}$)

$$\frac{\delta C_p}{\delta V_c} = -\frac{B}{V^2} - (n+1) \frac{C}{V^{n+2}} = 0 \quad \text{d'où} \quad B + (n+1) \frac{C}{V^n} = 0 \quad \text{soit} \quad V^n = - (n+1) \frac{C}{B}$$

$$\text{d'où} \quad V_e^n = - (n+1) \frac{C_o \cdot L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v} = - (n+1) \frac{1000 \cdot f}{C_m \cdot L \cdot \pi \cdot D} = - (n+1) \frac{C_o}{C_v \cdot C_m}$$

$$V_e = \left(- (n+1) \frac{C_o}{C_v \cdot C_m} \right)^{1/n}$$

2-4-4) Durée de vie économique :

Comme $T_e = C_v \cdot V_e^n$ on a :

$$T_e = - (n+1) \frac{C_o}{C_m}$$

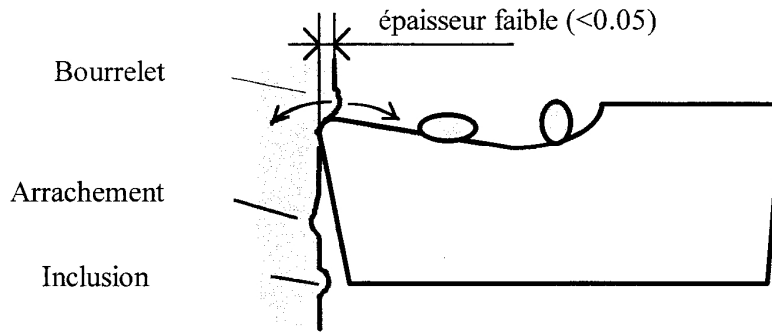
si $C_o \uparrow$ alors $T_e \uparrow$
si $C_m \uparrow$ alors $T_e \downarrow$

3) - CHOIX DE L'AVANCE ET DE LA PROFONDEUR DE COUPE

3-1) Le copeau minimum :

L'arête de coupe n'est pas parfaitement vive. Lorsque l'épaisseur du copeau est trop fine, le copeau n'est pas découpé. Il se forme un bourrelet qui s'évacue soit sur la face de coupe, soit entre la face en dépouille et la pièce (ce qui use considérablement l'outil). Sur la pièce, on constate des arrachements et des inclusions.

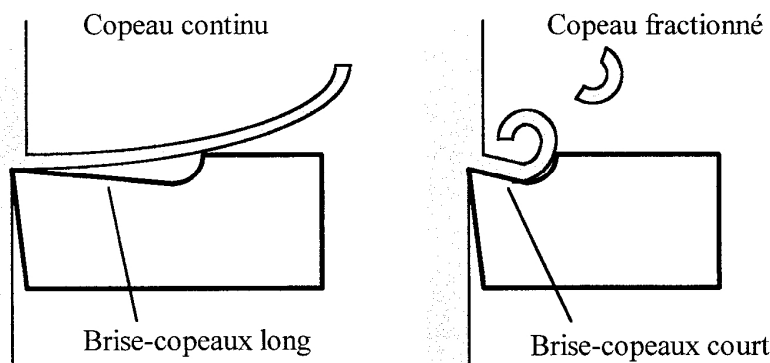
⇒ **Ne jamais utiliser une avance ou une profondeur de passe inférieure à 0,05 mm** (sauf pour les petites fraises en ARS bien affûtées)



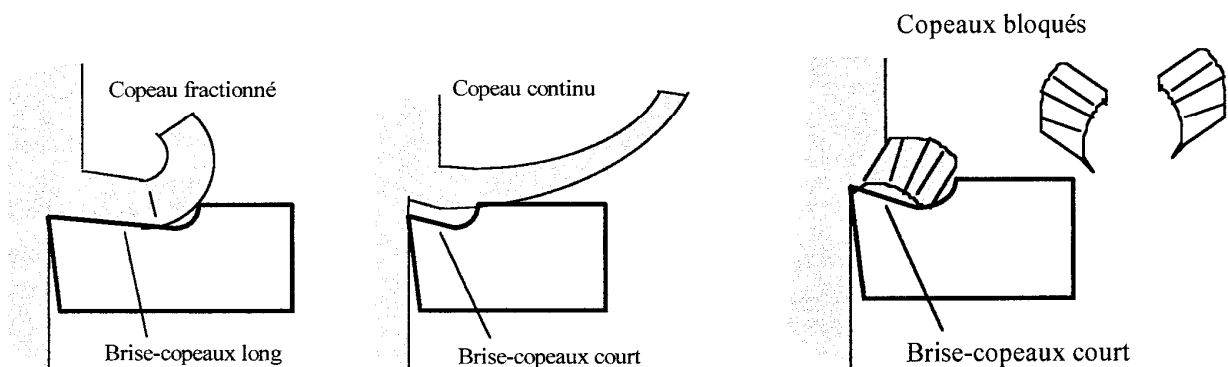
3-2) Etude des diagrammes brise-copeaux en tournage :

En modifiant l'avance et la profondeur de passe, on peut obtenir des copeaux très différents. Les copeaux longs et enchevêtrés sont dangereux pour l'opérateur, ils abîment la surface usinée en finition et ne permettent pas une bonne lubrification. Il est donc souhaitable d'avoir des copeaux fractionnés. Ceci est obtenu sur les outils grâce aux brise-copeaux.

En finition, le copeau est fin, donc souple. Il faut un brise-copeaux court pour courber suffisamment le copeau afin de le fractionner.



En ébauche, au contraire il ne faut pas un brise-copeaux trop court, car on peut soit "passer au-dessus", soit bloquer le copeau, ce qui demande alors une puissance considérable en usinage. Il est donc préférable d'avoir un brise-copeaux long.

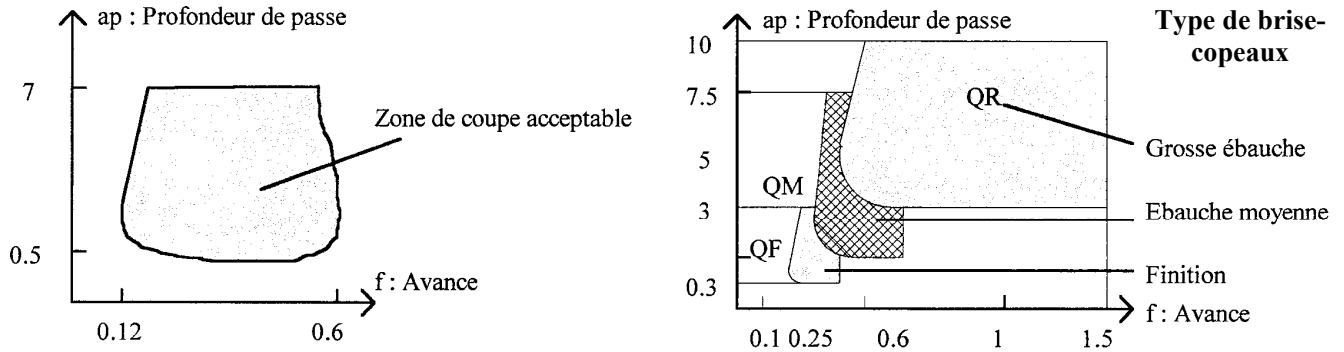


Les constructeurs fournissent donc des diagrammes brise-copeaux indiquant la zone d'utilisation satisfaisante de leurs plaquettes.

Cette zone d'utilisation est approximative, elle dépend de la géométrie de la plaquette, de son rayon de bec, de la matière usinée, de la vitesse de coupe.

Ces diagrammes permettent donc de comparer les plaquettes entre elles et de donner un ordre d'idée de l'avance et de la profondeur de passe à choisir.

Exemples de diagrammes :



Règle rapide utilisable à l'atelier : si on ne dispose pas du diagramme brise-copeaux de la plaquette, pour obtenir un bon copeau fractionné, on conseille d'utiliser la répartition suivante :

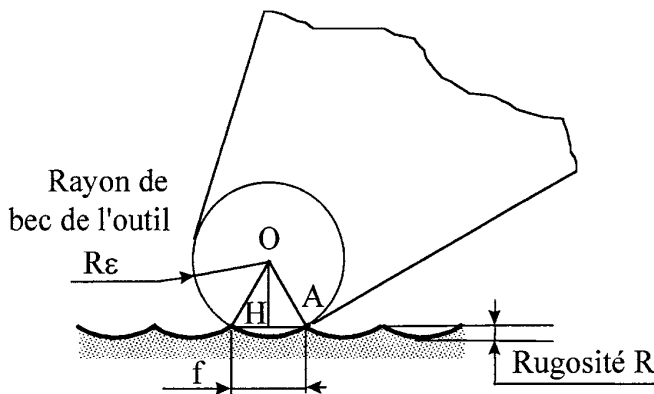
$$f = a_p / 10$$

3-3) Influence du rayon de bec de l'outil :

* **En ébauche**, il faut choisir le rayon de bec R_ϵ le plus grand possible afin d'obtenir une arête de coupe résistante, un grand rayon de bec permet alors de grandes avances (dans le cas de vibrations, il faut réduire le rayon). Il ne faut cependant pas dépasser une avance f maxi :

rayon de bec R_ϵ	0,4	0,8	1,2	1,6	2,4
avance f (mm/tr)	0,25 à 0,35	0,4 à 0,7	0,5 à 1	0,7 à 1,3	1 à 1,8

* **En finition**, le bec des plaquettes étant arrondi, la trace d'usinage est un sillon qui peut être modélisé par un arc de cercle. La rugosité obtenue est R ou R_t .



Exercice : En étudiant le triangle OHA, calculer f en fonction de R et $R\epsilon$. Sachant que R est très petit ($10\mu\text{m}$) devant $R\epsilon$ ($0,4$ à $1,2$ mm), montrer que l'on peut approximer la rugosité par la formule :

$$R = f^2 / (8 \cdot R\epsilon)$$

Dans la pratique, on choisit l'avance en fonction de l'état de surface et du rayon de bec de l'outil dans le tableau ci - dessous (référence Sandvik-Coromant) :

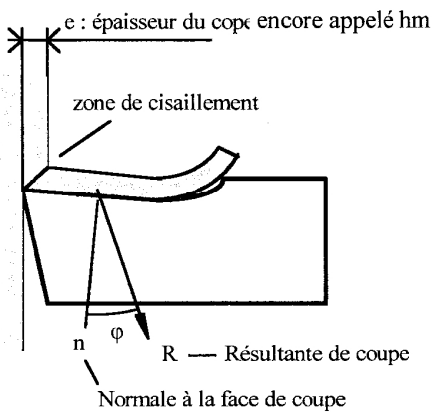
Etat de surface		Rayon de bec de l'outil					
Ra (μm)	R (μm)	0,4	0,8	1,2	1,6	2,4	5
0,6	1,6	0,07	0,1	0,12	0,14	0,17	0,25
1,6	4	0,11	0,15	0,19	0,22	0,26	0,4
3,2	10	0,17	0,24	0,29	0,24	0,42	0,63
6,3	16	0,22	0,3	0,37	0,43	0,53	0,8
8	25	0,27	0,38	0,47	0,54	0,66	1
32	100	-	-	-	1,08	1,32	2

4) - ETUDE DE LA PUISSANCE DE COUPE EN TOURNAGE

L'un des principaux éléments qui va limiter les paramètres de coupe en ébauche va être la puissance de la machine.

4-1) Etude des efforts de coupe en tournage :

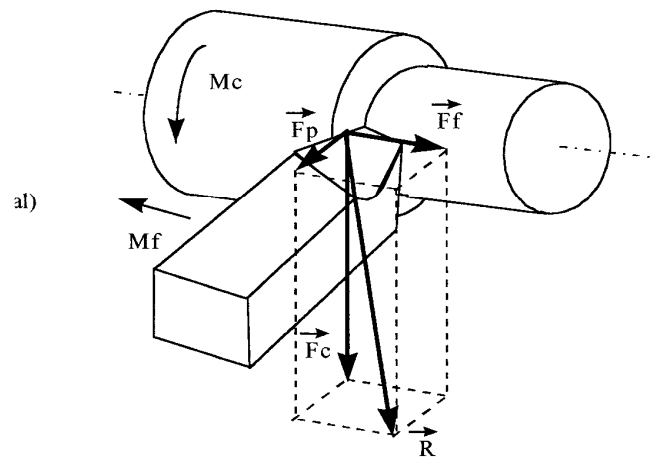
Le copeau glisse sur la face de coupe dans le plan perpendiculaire à l'arête de coupe. Compte tenu du frottement, la réaction de contact copeau/outil se trouve dans le plan P_n et fait un angle ϕ par rapport à la normale à la face de coupe, c'est l'effort de coupe résultant R .



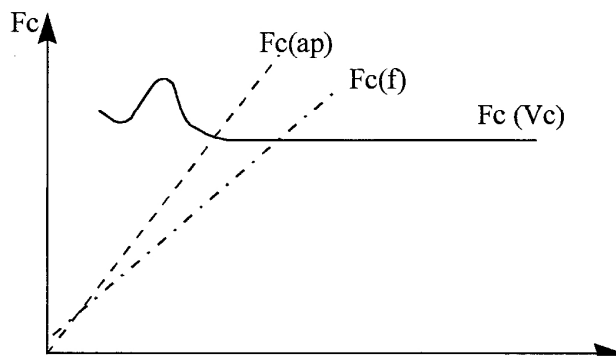
VUE DANS LE PLAN P_n

L'effort de coupe résultant R se décompose en trois efforts :

- F_c : effort de coupe tangentiel, c'est le plus important
- F_p : effort radial de pénétration. $F_p \sim 0,2$ à $0,3 F_c$
- F_f : effort de coupe axial (effort dû à l'avance) $F_f \sim 0,1$ à $0,2 F_c$



Expérimentalement, on constate que la vitesse de coupe n'a pas d'influence sur l'effort de coupe tangentiel F_c , par contre, l'avance et la profondeur de passe interviennent comme sur le graphe ci dessous :

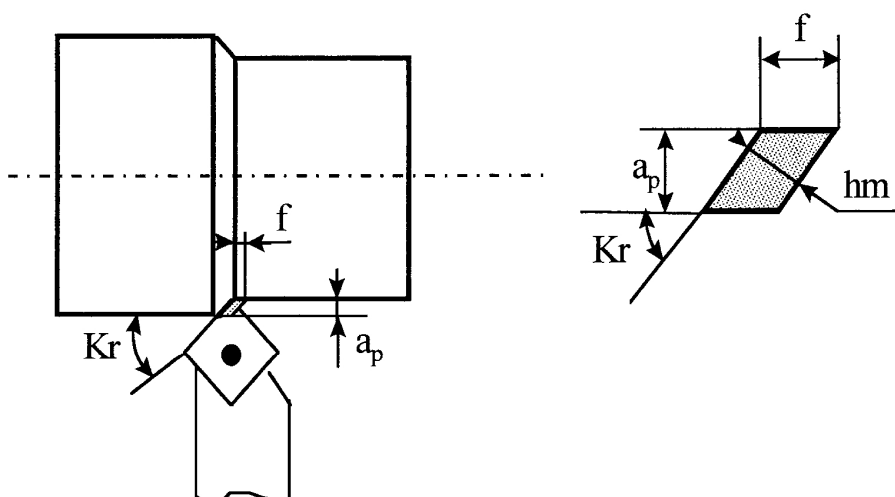


L'effort de coupe tangentiel peut donc être estimé selon la formule :

$$F_c = K_c \cdot f \cdot a_p$$

- F_c : effort de coupe tangentiel en N
- f : avance en mm/tr
- $f \cdot a_p$ = section coupée
- a_p : profondeur de passe radiale en mm
- K_c : pression spécifique de coupe en N/mm^2

La pression spécifique de coupe K_c est fonction de la matière usinée, de sa résistance à la traction R_m (ou de sa dureté Brinell) et de l'épaisseur du copeau hm donc de l'avance f et de l'angle K_r de direction de l'arête de coupe.



$$hm = f \cdot \sin Kr$$

Tableau des valeurs de Kc (données SANDVIK Coromant et HERTEL) :

MATIERES		Kco (N/mm ²) pour hm=0,2 mm et $\gamma = 0^\circ$
Aciers ordinaires	S185 (A33) S275 (E28)	2600
	S 355 (E36)	2900
	E 335 (A60)	3000
	E 360 (A70)	3150
Aciers fins (non alliés)	C35 (XC38) C40 (XC42)	2300
	C45 (XC48) C55 (XC54)	2600
	C60 (XC 60)	2850
Aciers alliés	Acier au manganèse 16 Mn Cr 5	3400
	Acier au nickel-chrome 10 Ni Cr 6	3600
	Acier au chrome-molybdène 35 Cr Mo 4	3800
	Acier inoxydable	3750
Fontes	FGL 150 (Ft 15)	1360
	FGL 200 FGL 250	2100
	Fonte alliée	2300
	Fonte malléables (MB, MN, FGS)	1750
Alliages de Cuivre	Laiton Cu Zn 15	1150
	Bronze Cu Sn 8 P	2450
Alliages d'Aluminium	Alliage d'alu (Si ≤ 13%) A S 13	1000
	Alliage de moulage (Rr ≤ 190 N/mm ²)	850
	Alliage de moulage (190 < Rr < 270)	1000
	Alliage de moulage (270 < Rr < 370)	1220

Pour une épaisseur de copeau hm différente, il faut donc appliquer un facteur de correction k1 :

hm(mm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80	1.00
k1	1.50	1.23	1.10	1.00	0.94	0.89	0.85	0.81	0.79	0.76	0.72	0.69	0.66	0.6

De même, si l'angle de coupe γ est différent de 0° , il faut appliquer la correction k2 suivante :

$$k_2 = (1 - 0,013 \cdot \gamma) \quad \text{lorsque l'angle de coupe est positif } K_c \text{ diminue.}$$

$$\text{d'où } K_c = K_{co} \cdot k_1 \cdot k_2$$

4-2) Détermination de la puissance consommée pour une opération de tournage :

La puissance nécessaire pour obtenir la rotation de la broche et pour le déplacement du trainard est :

$$P_c = F_c \cdot V_c + F_f \cdot V_f$$

Sur un tour conventionnel

Pc : puissance consommée par la coupe en W

Fc : effort de coupe tangentiel en N

Vc : vitesse de coupe tangentielle en m/s

Ff : effort d'avance axial en N

Vf : vitesse d'avance en m/s

Si on estime que $F_f = 0,2 F_c$ et que $V_f = 1/100 V_c$ alors $F_c \cdot V_c \gg F_f \cdot V_f$

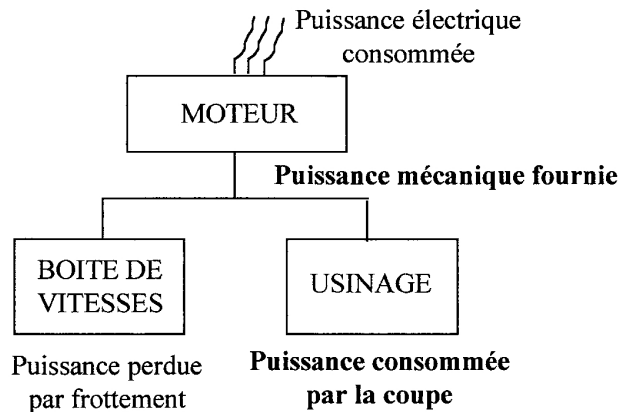
donc $P_c = F_c \cdot V_c$ avec V_c en m/s

Sur un tour à commande numérique

Attention, si la vitesse de coupe est donnée en m/min, on a :

$$P_c = F_c \cdot V_c / 60 \quad \text{avec } V_c \text{ en m/min}$$

Cette puissance est celle nécessaire à l'usinage, la puissance électrique que devra fournir le moteur est donc plus importante compte tenu des pertes électriques (effet joules, ...) et mécaniques (frottement).

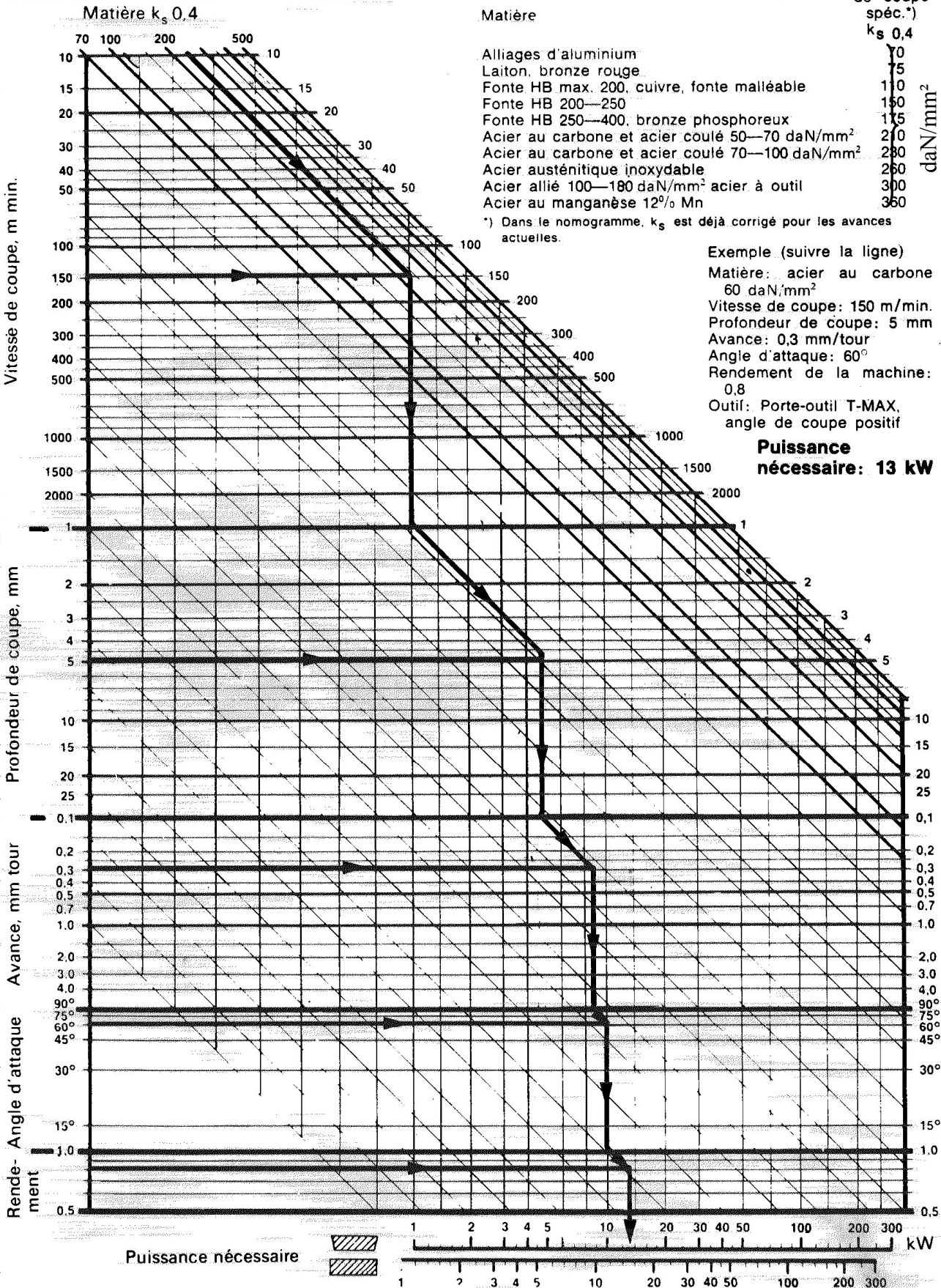


Sur la plaque signalétique du moteur de la machine, on trouve par exemple 15 KW, ceci correspond à la puissance mécanique fournie sur l'arbre du moteur.

On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{\text{Puissance consommée par la coupe}}{\text{Puissance mécanique fournie}} < 1$$

■ Puissance totale absorbée en tournage (D'après Sandvik-Coromant)

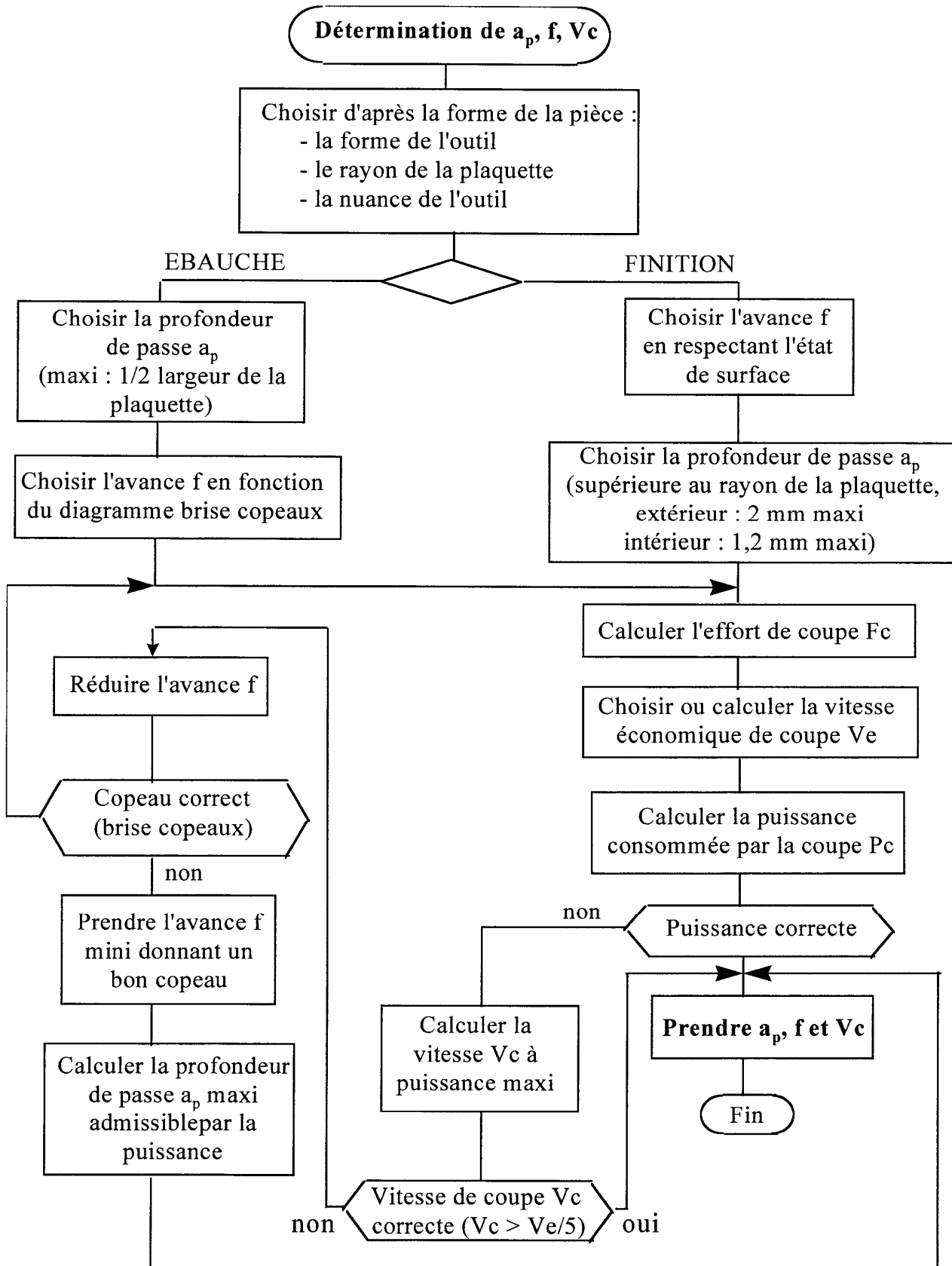


Exercice d'application :

Calculer la puissance mécanique qui doit être fournie par un tour parallèle, lors d'une opération de chariotage sur une pièce brute diamètre 100 mm en C 35. Comparer avec la valeur lue sur l'abaque.

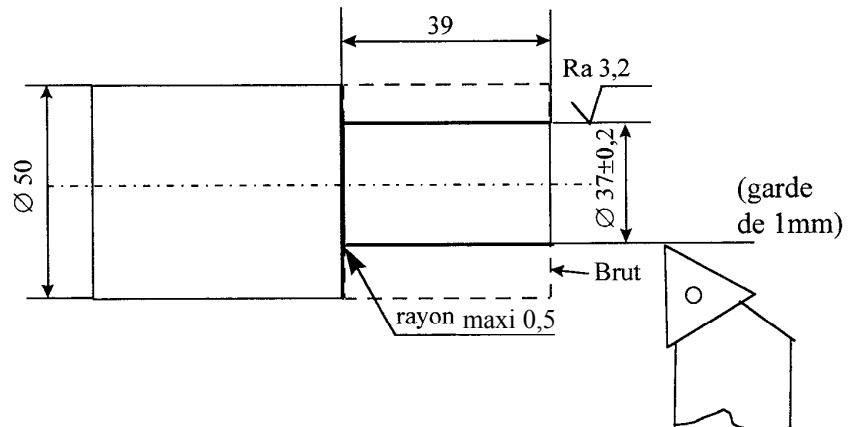
Données : outil carbure SSBN ($K_r = 75^\circ, \gamma = -6^\circ$)
 $a_p = 5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm/tr}, V_c = 150 \text{ m/min}, \eta = 0,8$

4-3) Organigramme de choix de conditions de coupe en tournage :



Exercice d'application :

On désire faire l'étude de l'opération de tournage sur la pièce suivante :



Matière pièce : acier faiblement allié 35 Cr Mo 4

Matériau outil : carbure métallique

Machine utilisée : tour parallèle, puissance au moteur 10 kW, rendement 0,9

Coût horaire C_m : 22,87 €/h

Opération d'ébauche :

porte outil STG NR... ($K_r = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$)

plaquette TNMG 11 03 12 nuance GC135

coût par arête de coupe 1,07 €

couple outil / matière : $C_v = 5,97 \cdot 10^{10}$ $n = -5$

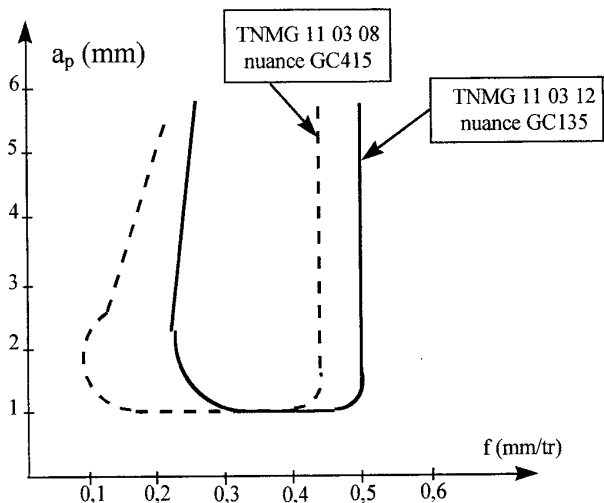
Opération de finition :

porte outil STG NR... ($K_r = 90^\circ, \gamma = 0^\circ$)

plaquette TNMG 11 03 08 nuance GC415

coût par arête de coupe 1,22 €

$V_{15} = 200$ m/min $n = -5$



Méthode simple de choix de conditions de coupe (V_c , a_p , f)

- Choisir les conditions de coupe pour l'ébauche en utilisant les règles simples de l'atelier. Le catalogue du constructeur des outils préconise une vitesse de coupe $V_c=80$ m/min.

- Choisir une plaquette pour la finition (valeur du rayon de bec) et les conditions de coupe pour la finition en utilisant les règles simples de l'atelier. Le catalogue du constructeur des outils préconise une vitesse de coupe $V_c=100$ m/min.

Questions :

1- Déterminer les conditions de coupe économiques pour l'opération d'ébauche (suivre l'organigramme de calcul donné en cours page 19).

2- Déterminer les conditions de coupe économiques pour l'opération de finition (suivre l'organigramme de calcul donné en cours page 19).

3- Donner pour l'ébauche et la finition, le nombre de pièces usinées par arête de coupe :

Ebauche

Finition

4-4) Facteurs limitant les conditions de coupe :

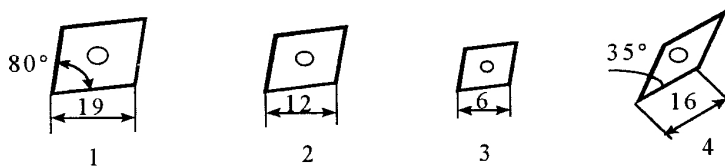
D'autres phénomènes peuvent intervenir et être des éléments limitant les conditions de coupe :

- le couple maximum transmissible par le mandrin (effort de serrage du mandrin)
- le porte à faux des pièces
- les efforts que peuvent supporter les porte-plaquettes et les plaquettes (résistance de l'outil à l'effort de coupe)

Exemples : * Estimation de l'effort maximum admissible sur un porte plaquette :

. Extérieur, carré 25	:	12 000 N
. Extérieur, carré 20	:	8 000 N
. Extérieur, carré 16	:	5 000 N
. Intérieur, rond 25	:	5 000 N
. Intérieur, rond 16	:	2 000 N
. Intérieur, rond 12	:	800 N

* Estimation de l'effort maximum admissible par une plaquette :

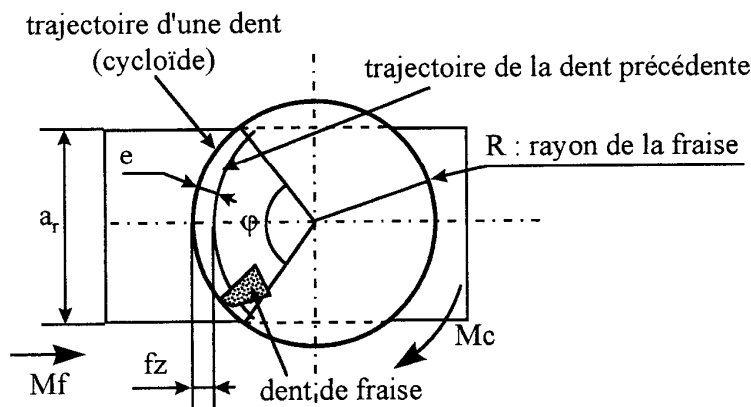


N°	Type plaquette	matière P35 (ébauche)	matière P15 (finition)
1	CNMG 19 06...	12 000 N	6 000 N
2	CNMG 12 04...	6 000 N	3 000 N
3	CCMT 06 02...	1 000 N	500 N
4	VBMM 16 04...	2 000 N	1 000 N

5) - ETUDE DES EFFORTS ET DE LA PUISSANCE DE COUPE EN FRAISAGE

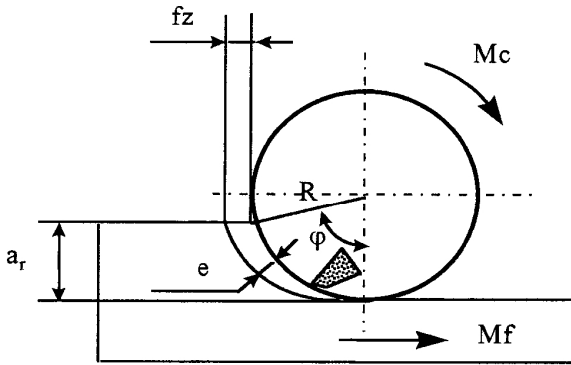
En fraisage, le calcul des efforts de coupe et de la puissance de coupe est basé sur le même principe qu'en tournage. Cependant, en fraisage, on constate que la section du copeau n'est pas constante pendant la coupe, par conséquent, l'effort de coupe sur une dent en prise est variable.

* *Exemple pour un surfacage centré*



a_r : engagement radial
 f_z : avance par dent
 φ : angle d'engagement d'une dent
 e : épaisseur variable du copeau

* Exemple pour un fraisage de profil



a_r : engagement radial
 fz : avance par dent
 φ : angle d'engagement d'une dent
 e : épaisseur variable du copeau

5-1) Détermination de l'épaisseur moyenne du copeau :

L'aire de copeau enlevé par une dent est : $A = a_r \cdot fz$

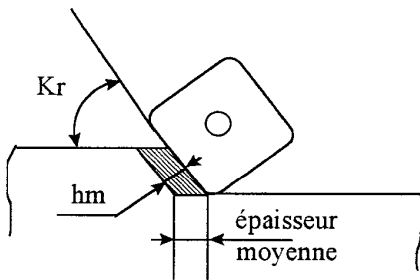
La longueur parcourue par la dent est : $L = R \cdot \varphi$ (φ en radians)

L'épaisseur moyenne du copeau est donc : $hm = A / L = a_r \cdot fz / R \cdot \varphi$

En surfacage centré $\varphi = 2 \cdot \arcsin(a_r / 2R)$

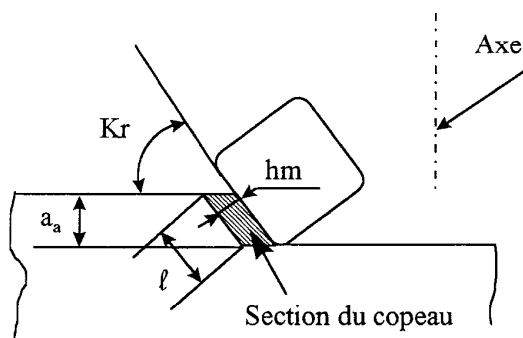
En fraisage de profil $\varphi = \arccos((R - a_r) / R)$

* Etude de l'influence de l'angle K_r d'orientation de l'arête



$$hm = (a_r \cdot fz \cdot \sin Kr) / (R \cdot \varphi)$$

5-2) Détermination de l'effort de coupe résultant F_c pour une dent :



a_a : engagement axial
 hm : épaisseur copeau moyen
 l : longueur du copeau
 K_r : angle de direction d'arête

La section du copeau est : $S = hm \cdot l = (a_r \cdot fz \cdot \sin Kr / R \cdot \varphi) \cdot (a_a / \sin Kr)$

$$S = (a_r \cdot a_a \cdot fz) / (R \cdot \varphi)$$

L'effort de coupe F_c pour une dent est donc : $F_c = K_c \cdot S$

La pression spécifique de coupe K_c sera déterminée à partir du tableau donné en tournage, et en appliquant les facteurs correctifs dus à l'épaisseur h_m du copeau et à l'angle de coupe.

Or, il y a plusieurs dents en prise :

soit : n_d = nombre de dents en prise dans la matière

n_d = nombre de dents en prise dans la matière ($n_d = \text{partie entière} (Z \cdot \varphi / 2\pi) + 1$)

Z = nombre de dents de la fraise

φ = l'angle parcouru par une dent dans la matière

L'effort total de coupe est donc : $F_c = K_c \cdot S \cdot n_d$

$$F_c = K_c \cdot ((a_r \cdot a_a \cdot f_z) / (R \cdot \varphi)) \cdot (\text{INT} (Z \cdot \varphi / 2\pi) + 1)$$

5-3) Détermination de la puissance consommée par la coupe P_c :

Comme pour le tournage, seule la puissance consommée par l'effort de coupe est retenue.

$$P_c = F_c \cdot V_c / 60$$

5-4) Détermination de la puissance de coupe en fraisage par la méthode globale :

On s'aperçoit que de nombreux paramètres entrent en ligne de compte pour déterminer la puissance en fraisage par un modèle analytique.

Certains constructeurs utilisent la notion de débit de copeaux :

On appelle taux d'enlèvement V_p de matière : le débit de matière (en cm^3 / min) l'on peut enlever avec une puissance de 1kW.

Le taux est généralement donné pour un angle de direction d'arête K_r de 90° et une avance par f_z de 0,2 mm.

La puissance dissipée par la coupe est alors :

$$P_c = \frac{a_a \cdot a_r \cdot V_f}{1000 \cdot V_p}$$

P_c = puissance consommée par la coupe en kW

V_p = taux d'enlèvement matière en $\text{cm}^3 / \text{min} / \text{kW}$

a_a = engagement axial (profondeur de passe) en mm

a_r = engagement radial en mm

V_f = avance linéaire en mm/min

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot 1000 \cdot V_c / (\pi \cdot D)$$

Tableau donnant V_p en fonction de la matière pour $h_m = 0,2 \text{ mm}$ et $\gamma = 0^\circ$

Matières		Dureté Brinell HB	$V_p \text{ cm}^3/\text{min/kW}$
Acier au carbone non allié	C < 0,25 %	125	25
	C < 0,8 %	150	23
	C < 1,4 %	250	21
Acier faiblement allié	recuit	125-200	21
	trempe	200-450	17
Acier fortement allié	recuit	150-250	19
	trempe	250-500	17
Acier inoxydable	Ferritique Martensit.	175-225	19
	Austénitique	150-200	17
Aciers coulés	non alliés	225	27
	faiblement alliés	150-250	24
	fortement alliés	150-300	21
Acier très dur		> 150 HRC	10
Fonte malléable	à copeaux courts	110-145	31
	à copeaux longs	200-250	34
Fonte grise	à faible Rés. traction	150-226	49
	à forte Rés. traction	200-300	38
Fonte nodulaire	ferritique	125-200	45
	perlitique	200-300	31
Fonte en coquille		40-60 HRC	14
Alliage d'aluminium		100	82

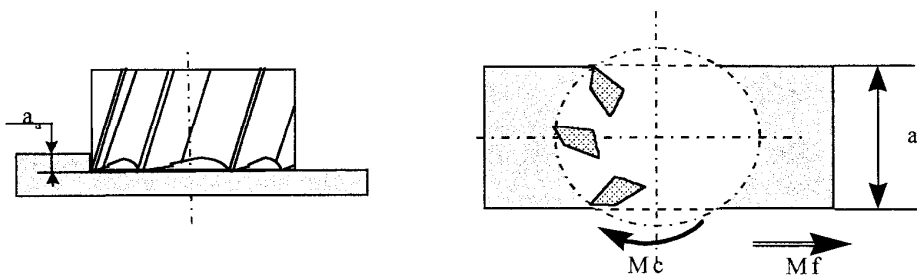
Pour une épaisseur de copeau h_m différente, il faut appliquer le coefficient correcteur k à V_p :

$h_m \text{ (mm)}$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70	0.80	1.00
k	1.50	1.23	1.10	1.00	0.94	0.89	0.85	0.81	0.79	0.76	0.72	0.69	0.66	0.62

A partir de la puissance, il est possible de déterminer l'effort de coupe F_c

$$F_c = P_c \cdot 60\,000 / V_c \quad (F_c \text{ en N, } P_c \text{ en kW, } V_c \text{ en m/min})$$

Exercice d'application : On réalise une opération de surfacage comme schématisé ci-après :



Données : fraise ARS $\varnothing 63 \text{ mm}$, $Z = 8$ dents, $K_r = 90^\circ$, $\gamma = 0^\circ$

pièce en C35, $a_r = 50 \text{ mm}$

$a_a = 4 \text{ mm}$, $f_z = 0,2 \text{ mm/dent}$, $V_c = 40 \text{ m/min}$, fraise centrée sur la pièce

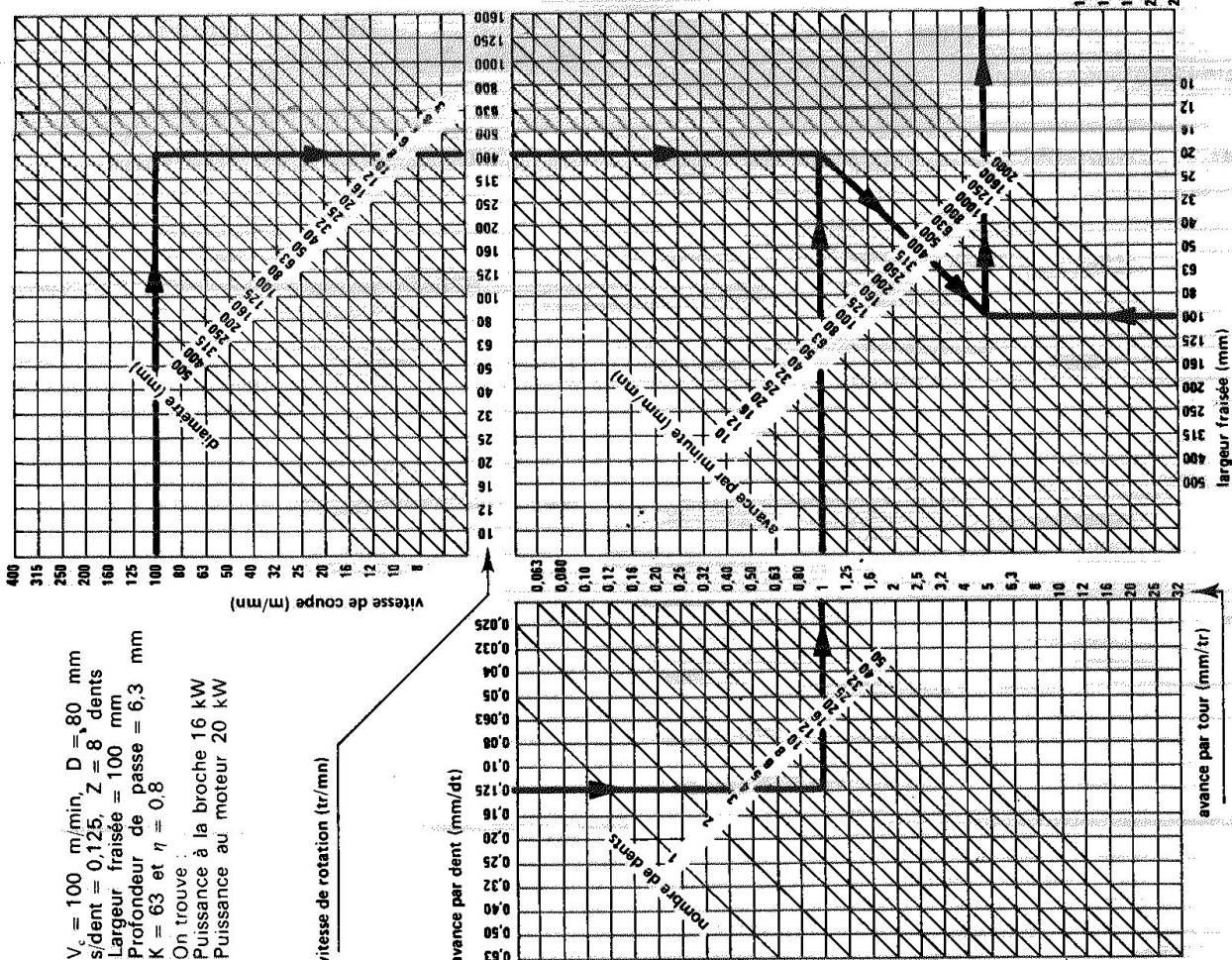
Question : déterminer par les deux méthodes (analytique et globale) la puissance nécessaire à la coupe pour cette opération. Comparer les résultats.

■ Puissance totale absorbée en fraisage (D'après le CETIM)

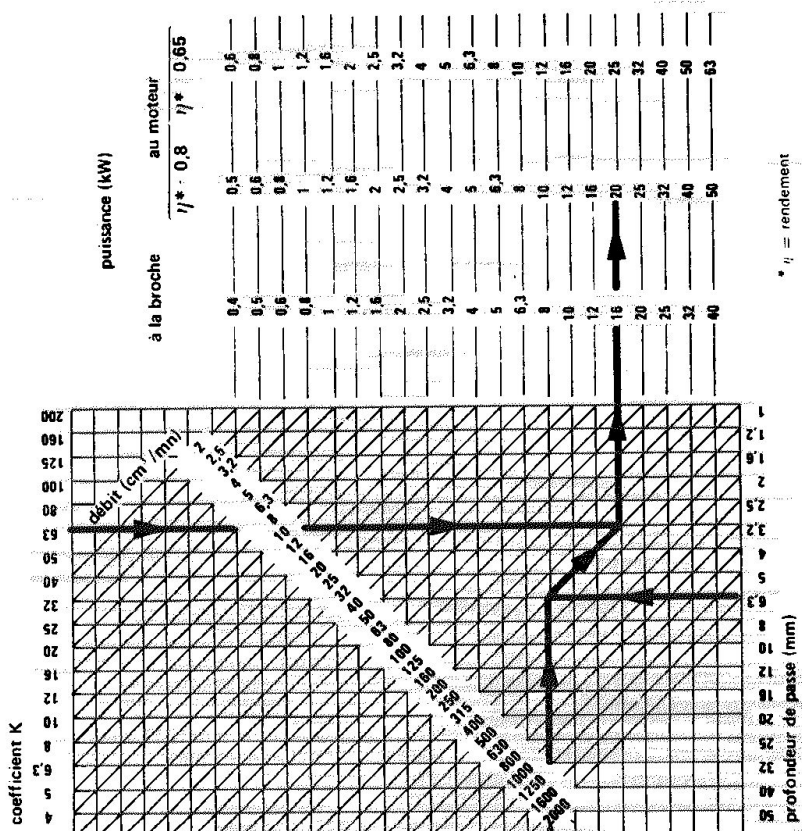
Matériau à usiner	Valeurs de K			
	Fraisage en bout		Fraisage en roulant	Fraisage de rainurage
	s < 0,2	0,2 < s < 0,3		
Acier 45 < R < 90	55	50	55	60
Acier 110 < R < 150	85	70	95	100
Acier 150 < R < 200	100	85	110	100
Fontes	40	35	45	50
Alliages légers	13	10	13	15
Alliages cuivreux	35	25	35	36

Exemple (suivre le trait)

$V_c = 100$ m/min, $D = 80$ mm
 $s/dent = 0,125$, $Z = 8$ dents
 Largeur fraisée = 100 mm
 Profondeur de passe = 6,3 mm
 $K = 63$ et $\eta = 0,8$
 On trouve :
 Puissance à la broche 16 kW
 Puissance au moteur 20 kW



surface fraisée par minute (cm²/min)



* η = rendement

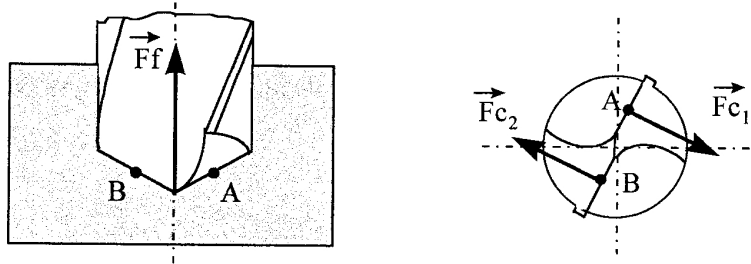
6) - ETUDE DES EFFORTS DE COUPE ET DE LA PUISSANCE EN PERÇAGE

6-1) Efforts de coupe en perçage :

Les efforts de coupe dépendent de la matière pièce, de la section du copeau, de l'affûtage du foret ainsi que du type de perçage : sans ou avec avant trou.

6-1-1) Perçage sans avant trou :

Les efforts de coupe en perçage peuvent être représentés comme ci-dessous :



Lors d'un perçage sans avant trou, on constate qu'il y a un effort axial (ou effort d'avance) F_f très important dû à la pénétration de la partie centrale (ou âme) du foret qui ne coupe pas. Cet effort devra être inférieur à la poussée axiale disponible sur la broche qui est donnée par les constructeurs de machines CN.

Les efforts de coupe F_{c1} et F_{c2} vont engendrer un couple C qui lui va être limité par la puissance de la machine.

Le CETIM nous donne les caractéristiques suivantes définies expérimentalement, applicables uniquement pour un perçage sans avant trou :

$$F_f = K_f \cdot f \cdot D$$

avec : F_f : effort axial en N
 f : avance en mm/tour
 D : diamètre du foret
 K_f : coefficient en N/mm^2

$$C = K_m \cdot f \cdot D^2$$

avec : C : couple de perçage en Nm
 K_m : coefficient en Nm/mm^3

Tableau des coefficients K_f et K_m

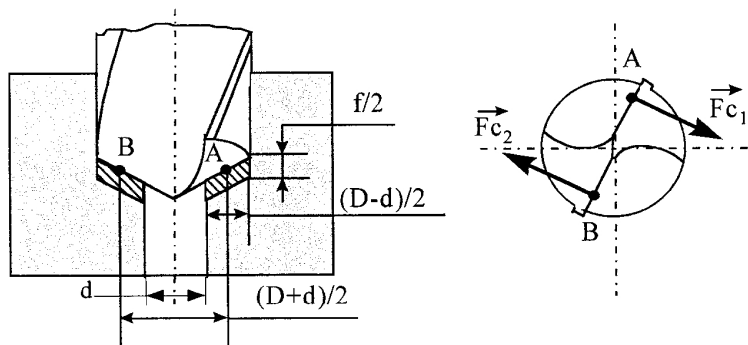
Matière usinée	$f < 0,2 \text{ mm}$		$0,2\text{mm} \leq f \leq 0,45\text{mm}$		$f > 0,45 \text{ mm}$	
	K_f (N/mm^2)	K_m (Nm/mm^3)	K_f (N/mm^2)	K_m (Nm/mm^3)	K_f (N/mm^2)	K_m (Nm/mm^3)
Acier non allié S185 (A33)	1160	0.39	1030	0.33	950	0.27
C45 (XC48)	1360	0.38	1170	0.34	1130	0.30
Acier faiblement allié 35 Cr Mo 4	1580	0.45	1550	0.38	1610	0.32
16 Ni Cr 6	970	0.37	790	0.32	700	0.37
Acier fortement allié X 30 Cr 13	2000	0.5	1500	0.41	1500	0.39
X 6 Cr Ni 18-10	1810	0.56	1310	0.45	1080	0.36
Fonte grise FGL 250	780	0.26	650	0.24	600	0.21
Fonte malléable FGS420-2	1300	0.35	900	0.22	900	0.22
Alliage aluminium 2017 (AU4G)	1070	0.2	760	0.16	670	0.15

Remarque 1: les coefficients K_f et K_m , bien qu'homogènes à une pression de coupe ne sont pas directement comparables avec les valeurs courantes de K_c utilisées en tournage. En effet, dans le cas du perçage, la pression n'est pas homogène le long de l'arête de coupe, elle est beaucoup plus importante vers l'âme du foret. D'autre part, un coefficient $1/8$ apparaît dans le calcul du couple du fait que la résultante de la force F_c se trouve à $d/4$ (voir dans le calcul du couple avec avant trou).

Remarque 2 : L'effort axial d'avance F_f va dépendre de l'affûtage du foret. Un amincissement de l'âme va réduire cet effort. (affûtage 3 pentes).

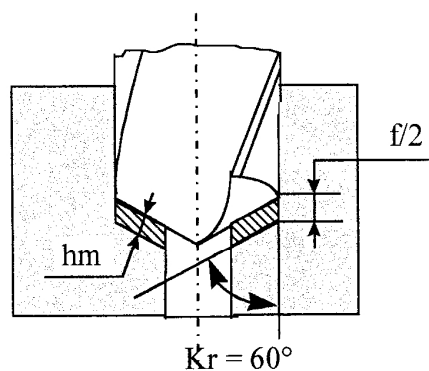
6-1-2) Perçage avec avant trou :

Si les efforts de perçage sont trop importants pour les possibilités de la machine (très souvent c'est la poussée axiale qui limite) il faut faire un avant trou d'un diamètre supérieur à l'âme du foret.



Dans ce cas l'effort axial est considérablement réduit et seul le couple C est à déterminer. On peut alors utiliser la notion de pression spécifique de coupe K_c définie en tournage.

Remarque : pour un foret classique en ARS l'angle de pointe est de 120° donc l'angle de direction d'arête K_r est de 60° , l'épaisseur moyenne du copeau est donc :



$$hm = f/2 \cdot \sin 60^\circ$$

$$F_{c1} = F_{c2} = K_c \cdot \text{section du copeau} = K_c \cdot f/2 \cdot (D - d)/2$$

$$C = F_{c1} \cdot (D + d) / (2 \cdot 1000)$$

$$C = K_c \cdot f/2 \cdot (D - d) / 2 \cdot (D + d) / 2000$$

avec : C en Nm
 F_{c1} en N
 $(D + d)$ en mm

$$C = K_c \cdot f \cdot (D^2 - d^2) / 8000$$

L'avance f est donnée en mm/tour, **une règle pratique consiste à prendre :**

$$f = \frac{\text{Ø foret}}{100}$$

6-2) Puissance de coupe en perçage :

La puissance dissipée par le perçage est : $P_c = F_f \cdot V_f / 60 + C \cdot \omega$

P_c : puissance consommée par la coupe en W

F_f : effort d'avance en N

V_f : vitesse d'avance en m/min ($V_f = f \cdot N$)

C : couple de perçage en Nm

ω : fréquence de rotation en radian/seconde ($\omega = 2 \pi N / 60$)

N : fréquence de rotation en tour/min

La puissance nécessaire pour F_f est négligeable devant le couple à la broche, on a donc :

$$P_c = \frac{C \cdot 2 \pi N}{60}$$

La puissance P_m absorbée par le moteur sera $P_m = P_c / \eta$ η : rendement

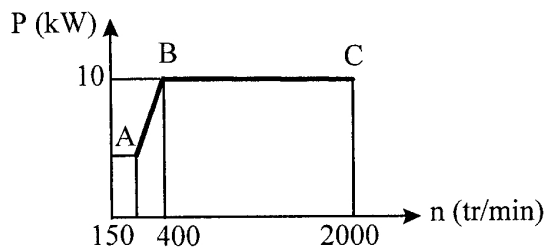
Exercice d'application :

Lors de la réalisation d'un alésage de diamètre fini $42 \pm 0,1$, on se propose de faire une opération de perçage avec un foret de diamètre 40 mm, $\gamma = 0^\circ$.

Données : * Machine : tour à commande numérique, puissance moteur 10 kW, rendement 0,9.

 Poussée axiale disponible à la broche : 6000 N

 Moteur de broche à courant continu dont la caractéristique est :



* Pièce : matière C45

* Foret : diamètre 40 mm, avance $f = \text{Ø foret} / 100$, $V_c = 20$ m/min

Questions :

- Calculer l'effort d'avance et le couple nécessaires pour percer à 40 mm, que constatez-vous ?
- Déterminer le diamètre de l'avant trou permettant de travailler aux valeurs maximales disponibles sur la machine.

GLOSSAIRE

VB : usure frontale.

KT : usure en cratère.

Taylor : associé à un modèle de durée de vie.

Gilbert : associé à un modèle de durée de vie.

Tc : temps de coupe.

Vc : vitesse de coupe.

Vf : vitesse d'avance.

Ve : vitesse économique de coupe.

Lc : longueur de coupe.

Tc : temps de coupe.

Copeau minimum : minimum de matière qu'un outil peut enlever dans de bonnes conditions.

Re : rayon de bec d'outil.

Fc : effort de coupe tangentiel.

Fp : effort radial de pénétration.

Ff : effort de coupe axial.

Pc : puissance de coupe.

Kc : pression spécifique de coupe.

hm : épaisseur moyenne de copeau.