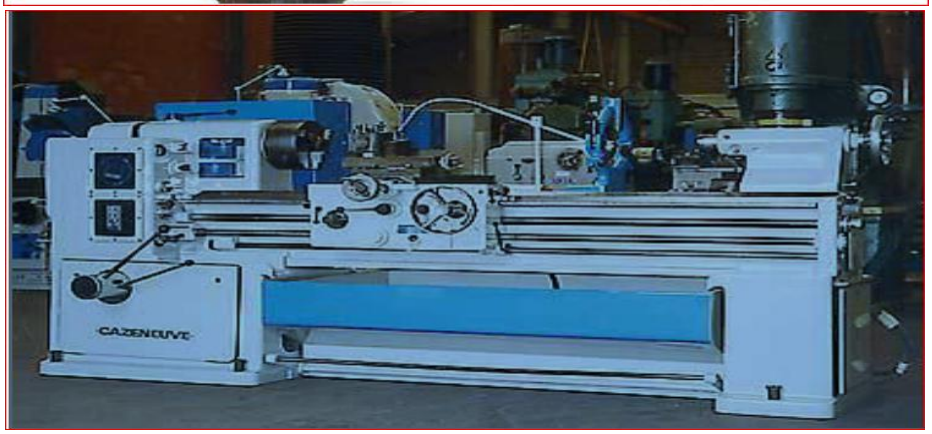
Institut National Supérieur des Sciences et Techniques d'Abéché (INSTA)

Département de Génie Mécanique

Niveau 2

Fabrication Mécanique 3





Ce cours de FM 3 permettra d'outiller les étudiants de la deuxième année universitaire, les différentes techniques d'obtention des objets (pièces) par enlèvement de matières à travers les différentes machines installées dans les ateliers mécaniques entre autres les fraiseuses, les tours et les perceuses etc.

Chargé de cours Dr. ABDALLAH BAN-NAH Mahamat

Année académique 2025-2026

PROGRAMME DE FABRICATION MECANIQUE III

I. GENERALITE SUR L'USINAGE 4
1. Introduction 4
2. Obtention par enlèvement de matière (copeaux) 5
2.1. Obtention des formes de copeaux 5
2.2. Différents types de copeaux 6
2.3. Évolution du copeau en fonction de sa section 6
2.4. Évolution du copeau en fonction de Vc 7
3. Étude isostatique 7
3.2. Élimination des degrés de liberté 8
3.3. Équivalence isostatique 9
3.4. Moyens de contrôle 9
3.5. Référentiels 9
3.6. Maintien en position de la pièce 10
4. Matériaux des outils 11
4.1. Principales propriétés des matériaux à outils 11
4.2. Aciers Rapides Supérieurs (ARS) 11
4.3. Carbures métalliques 12
4.4. Céramiques 12
4.5. Diamant 13
5. Outil de coupe 13
5.1. Géométrie de l'outil 14
5.1.1. Angles d'arête 14
5.1.2. Angles des faces 15
6. Usure de l'outil 15
6.1. Phénomène de l'usure 15
6.1.1. Usure de la face en dépouille principale ou usure frontale 16
6.1.2. Usure de la face de coupe ou usure en cratère 17
6.1.3. Usure en peigne 17
6.1.4. Arête rapportée 17
6.1.5. Écaillage 17
6.1.6. Déformation du bec de l'outil (affaissement plastique) 18
6.1.7. Rupture 18
7. Durée de vie d'un outil de coupe. 18

I. TOURNAGE 19
1. Définition 19
2. Différentes machines 20
3. Différents types d'opérations 21
3.1. Tournage extérieur 21
3.2. Tournage intérieur 21
4. Paramètres dynamiques 21
4.1. Puissance de coupe 24
4.2. Puissance spécifique de coupe 24
5. Paramètres de coupe 24
5.1. Vitesse de coupe 24
5.2. Vitesse d'avance 25
5.3. Débit de copeaux 25
6. Sécurité 25
7. Différents outils de tournage 25
7.1. Aciers Rapides Supérieurs (ARS) 26
7.2. Plaquette en carbures métalliques 28
II. FRAISAGE 29
1. Définition : 29
2. Différents types de fraiseuses 29
3. Principes de base du fraisage 30
3.1. Fraisage en avalant 30
3.2. Fraisage en opposition 30
4. Analyse de processus d'une opération en fraisage 31
5. Trajectoire de la fraise 31
6. Modes d'action des fraises 31
7. Rugosité 33
8. Principe de fraisage 33
9. Principales définitions cinématiques et géométriques 34
10. Détermination des paramètres de coupe à l'aide des abaques 35
11. Formes simples usinables et les outils associés 36
12. Porte-outils 37
13. Différents types d'outils 39
13.1. Aciers Rapides Supérieurs (ARS) 39
13.2. Plaquette en carbures métalliques 40

III. PERÇAGE 40
1. Grandeurs géométriques et cinématiques de perçage 40
1.1. Grandeurs cinématiques de perçage 40
1.2. Grandeurs géométriques de perçage 40
1.3. Illustration de ces grandeurs 41
2. Principale opération de perçage 41
3. Outils de perçage 41
4. Machines de perçage 42
5. Condition de coupe en perçage 42
5.1. Effort de coupe en perçage 43
5.2. Puissance de coupe en perçage 43
V. GAMMES D'USINAGE 44
II. Définition 45
1. Définition de quelques termes 45
2. Contenu d'un contrat de phase 46
1. Règles principales 46
1.1. Choix du brut 46
1.2. Association des surfaces 46
1.3. Création des phases 46
1.4. Mise en position sur surfaces usinées 46
3.5. Démarche à suivre 47
2. Choix des machines pour la réalisation 47
3. Application 47
4. Contrat de Phase 48
4.1. Définition 48
4.2. Contenu d'un contrat de phase 48

I. GENERALITE SUR L'USINAGE

1. Introduction

Dans un monde en perpétuelle évolution, les industries de la mécanique doivent s'adapter aux contraintes de la mondialisation qui entraînent une concurrence accrue. Les critères de choix du client sont la qualité, le prix et la disponibilité du produit. Si les prix et la disponibilité sont des critères chiffrables et ne prêtent pas de confusion, la qualité reste dans notre société, autant pour le consommateur que pour le fabricant, une notion très vague et complexe. La tendance actuelle est la qualité totale, le souci primordial des entreprises est de bien répondre au cahier de charges dans lequel le client exprime ses besoins.



***Figure N°1* : Triangle de qualité**

Dans le domaine de fabrication mécanique et plus particulièrement de l'usinage, la qualité c'est de produire des pièces conformes au dessin de définition et ayant une bonne tenue en service.

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

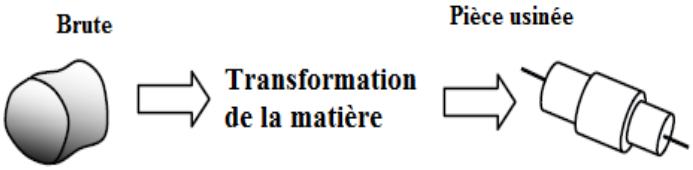


***Figure N°2* : Principe de l'usinage**

L'ouverture des frontières aux produits et service, imposée par l'économie de marché, fait que le champ de compétition entre les entreprises ne va plus se limiter à une région ou à un pays, mais s'étendra à l'échelle mondiale. La plus grosse part du marché reviendra incontestablement à l'entreprise qui saura le mieux satisfaire les exigences du client sur les caractéristiques techniques et le prix du produit proposé.

L'objectif de l'étude des phénomènes de coupe (échauffement, effort, déformation, usure) qui se produisent à l'interaction outil-matière est d'optimiser les paramètres de coupe afin d'améliorer la qualité de la pièce usinée et de minimiser le prix de revient de la production. Les différentes liaisons entre la qualité de la pièce et les phénomènes de coupe sont résumées dans l'organigramme ci-après.

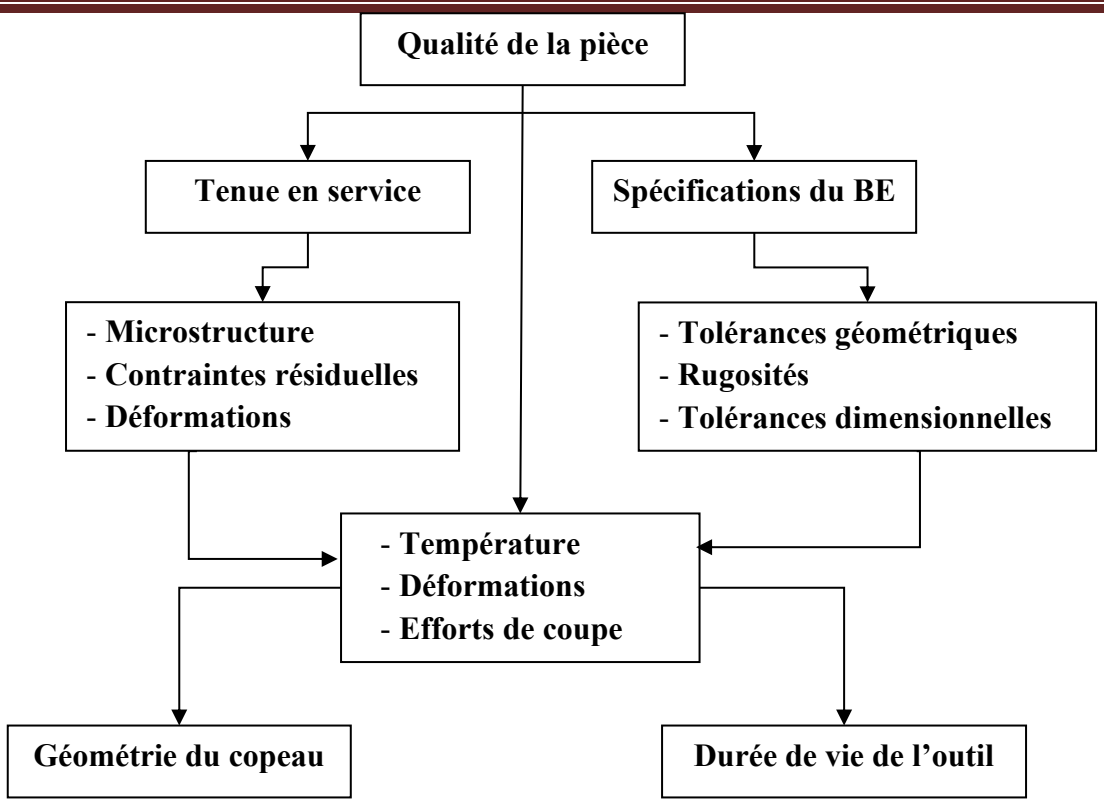


***Figure N°3** : Relation entre les caractéristiques de la pièce usinée et le phénomène d'usinage*

2. Obtention par enlèvement de matière (copeaux)

Généralement l'usinage est une opération consistant à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste à un enlèvement de matière. Le terme usinage, synonyme du mot enlèvement de matière ou enlèvement de copeaux est le moyen le plus fiable pour obtenir des formes des pièces précises et désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des côtes et des tolérances fixées à l'avance, à partir d'une pièce brute venue de la forge ou de la fonderie. L'usinage d'une pièce mécanique met en œuvre un ensemble de(s) procédé(s), à savoir : le tournage, le fraisage, le perçage…

Ce procédé est, par contre couteux (machines, outils, hommes qualifiés) et relativement lent. C'est pour quoi on essaye d'obtenir maintenant des pièces de moulage qui ne nécessitent pas d'usinage telles que le plastique ou le zamak (alliage de zinc, d'aluminium et de magnésium).

2.1. Obtention des formes de copeaux

2.1.1. Généralité dans le cas de tournage

Lors de la coupe, l'outil vient séparer le métal en deux. La facilité de la coupe, donc l'usure et la puissance nécessaire, dépendent d'une série de paramètres :

- ✓ les matériaux en présence ;
- ✓ les angles de l'outil ;
- ✓ la vitesse de coupe ;

✓ la section du copeau.

Pour trouver l'influence des différents paramètres sur l'usure des outils, Monsieur Taylor a usiné des kilomètres de barre d'acier, afin de déterminer la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe que nous verrons ses théories plus loin en tournage.

2.1.2. Étude de cas en tournage.

Lors de la séparation de la matière, le copeau glisse sur la face de coupe de l'outil. Il y a une forte déformation plastique que l'on peut observer dans le plan P, parallèle à l'axe de rotation de la pièce et passant par le milieu du copeau.

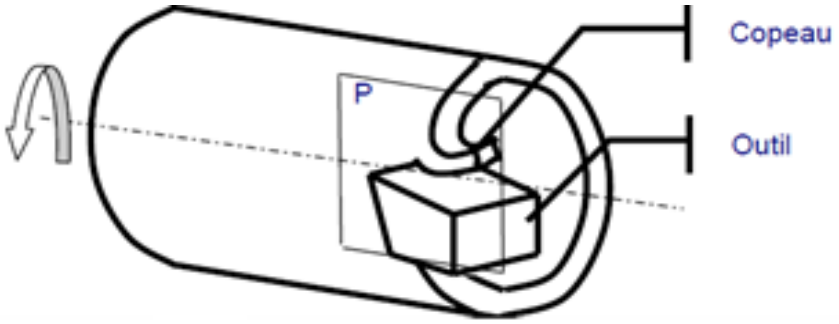
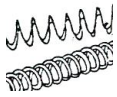
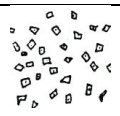
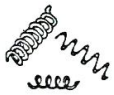


Figure N°4 : ***Coupe dans le plan P***

2.2. Différents types de copeaux

Une norme existe pour classifier les copeaux obtenus en usinage (**NFE 66 505**)

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long 	21 : Long 	32 : plat 	41 : Long 	51 : Long 	61: Enchevêtré 		
12 : Court 	22 : Court 	32 : Conique 	42 : Court 	52 : Court 	62 : détaché 		
13 : Enchevêtré 	23 : Enchevêtré 		43 : Enchevêtré 	53 : Enchevêtré 			

2.3. Évolution du copeau en fonction de sa section

La forme du copeau influe sur l'usinage. En effet un copeau filant risque d'abîmer la surface usinée, et sera difficile à évacuer vers les bacs à copeaux.

Pour chaque forme d'outil, on peut établir un diagramme qui donne la forme du copeau en fonction de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe.

La zone intéressante se situe au centre (forme de chaussette).

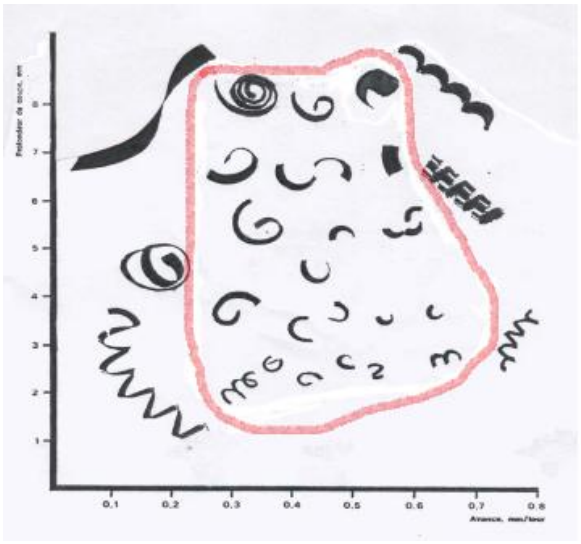


Figure N°5 : Formes des copeaux les plus utilisées

Lors de l'utilisation d'un nouvel outil, il est important de se reporter aux spécifications du fabricant de l'outil.

2.4. Évolution du copeau en fonction de Vc

La vitesse de coupe influe fortement sur la formation du copeau. Une vitesse (Vc inférieure à 65 m/min) de coupe trop faible entraine un copeau collant (ou arête rapportée). Une vitesse (Vc supérieure à 200 m/min) trop grande déclenche une usure accélérée de l'outil.

3. Étude isostatique

3.1. Notion de degré de liberté

Tout mouvement d'un solide libre dans l'espace peut s'exprimer par la somme vectorielle d'une rotation et d'une translation dont les composants sont respectivement Rx, Ry, Rz et Tx, Ty, Tz dans un repère (o, x, y, z). Il est nécessaire de connaitre ces six paramètres qu'on appelle **degré de liberté.** Quand un solide possède (6 - p) degrés de liberté, alors ce solide à p valeurs ou degrés de ses six degrés de liberté sont fixées.

Si p = 6 alors le solide n'a aucun degré de liberté donc il est fixe, aucun mouvement de ce dernier, alors sa position est facilement définie.

Mise en position d'une pièce

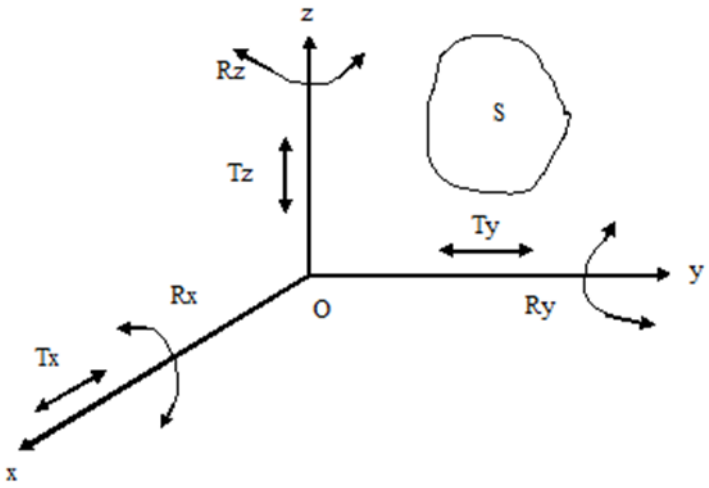


***Figure N°6** : Disposition d'un solide S dans l'espace*

3.2. Élimination des degrés de liberté

La position des normales au solide **S** n'est pas choisie de façon arbitraire. Leur nombre et leur disposition dépendent de la forme de la surface géométrique du solide sur lequel s'effectuent les contacts.

✓ ***Une surface plane*** peut au plus éliminé trois degrés de liberté représentés par trois normales parallèles et non coplanaires. Selon les dimensions du solide le nombre des degrés de liberté éliminés peut être réduit à deux ou à un.

✓ ***Une surface cylindrique*** peut éliminer au plus quatre degrés de liberté représentés par quatre normales. Selon la longueur et le diamètre du cylindre le nombre des degrés de liberté éliminés peut être réduit à deux ou à un.

✓ Certaines formes de surface du solide (ni planes ni cylindriques) peuvent éliminer un nombre de degré de liberté plus ou moins important (trois degrés de liberté pour une surface sphérique et cinq degrés de liberté pour une surface conique)

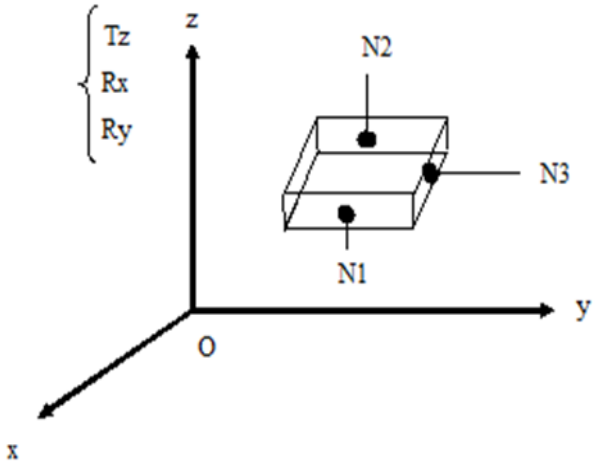


***Figure N°7** : Mise en position d'une pièce prismatique*

3.3. Équivalence isostatique

Les liaisons qu'on aura à utiliser lors d'usinage (respectivement en fraisage et tournage) sont les deux colorées et sont en gras dans le tableau ci-dessous

Liaison	Ponctuelle	Rectiligne linéaire	**Plane**	**Pivot glissant**	Pivot	rotule
Type de surface	Point	Ligne	**Plan**	**Cylindre**	Cône	Sphère
Nombre des normales	1	2	**3**	**4**	5	3

Nous détaillons les mouvements supprimés dans le tableau suivant

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

3.4. Moyens de contrôle

Le moyen le plus simple est le vernier : tambour gradué sur lequel on lit les déplacements de l'outil. Les machines comportant ce dernier sont appelées **machines conventionnelles.** C'est l'operateur qui contrôle la position de l'outil et qui arrête l'avance de l'outil lorsque la position est atteinte.

Les pièces fabriquées sont limitées à des formes simples. Ces machines sont de plus en plus rares dans l'industrie, car elles sont peu productives. On les trouve dans les ateliers de réparation.

La machine la plus courante est la **machine à commande numérique**. Un codeur permet de connaître la position de l'outil, et une boucle d'asservissement permet de contrôler l'alimentation des moteurs, c'est-à-dire contrôler l'avance de chacun des outils pour une opération désirée. Ces machines nécessitent donc une programmation pour être mise en œuvre, mais celle-ci devient de plus en plus transparente grâce aux logiciels de FAO (fabrication assistée par ordinateur) qui génèrent le programme à partir du fichier CAO (conception assistée par ordinateur) de la pièce.

3.5. Référentiels

Il est important d'avoir une définition commune des références et des axes.

L'axe Z est toujours l'axe tournant. $\mathbf{Z}_+$ en tournage tout comme en fraisage et doit éloigner la pièce de l'outil.

En fraisage, il est l'axe de rotation de l'outil, par contre en tournage, il est l'axe de rotation de la pièce (mandrin)

L'axe X est l'axe du plus grand déplacement

L'axe Y forme un repère direct avec X et Z

Remarque : En tournage l'axe **Y** n'existe pas. Deux déplacements suffisent pour faire toutes les opérations sur les pièces de formes de révolution.

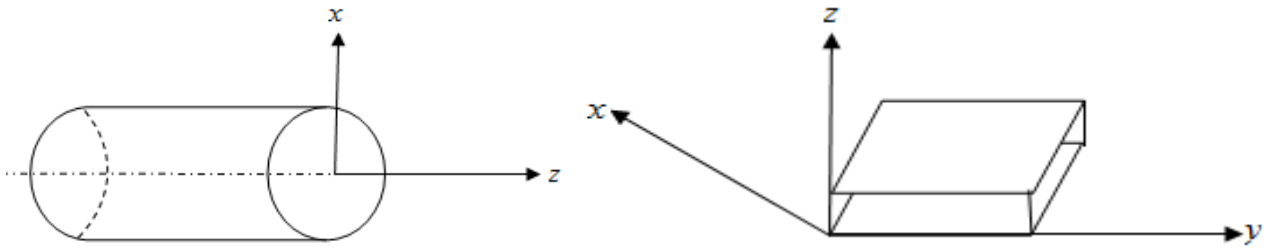


Figure N°8 *: Principaux axes en tournage et en fraisage*

3.6. Maintien en position de la pièce

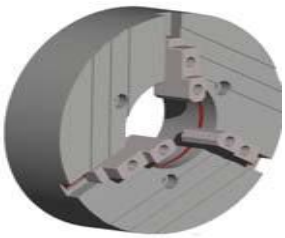
Pour empêcher, la pièce de bouger lors de l'usinage, il faut la maintenir en contact avec les zones de mise en position (mors des mandrins en tournage et le mors de l'étau de la table en fraisage). Quelques règles à respecter pour les mettre en place.

- S'opposer aux forces de coupe.
- Ne pas déformer la pièce lors du serrage.

Les technologies de maintien en position

Nous prenons toujours l'exemple sur nos deux machines ; en tournage on serre la pièce (qui a une forme cylindrique) par les mors de mandrin donc serrage centrifuge par contre en fraisage on serre l'outil (queue conique) par adhérence car dans ce procédé d'usinage c'est l'outil qui est animé d'un mouvement de rotation.

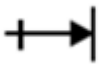
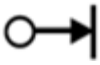
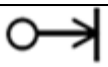
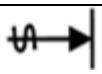
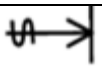
On peut classer ces dernières selon le type et la nature :

Centrifuge	**Adhérence**
Mandrin à serrage concentrique	Surface conique
	

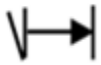
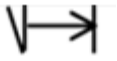
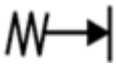
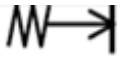
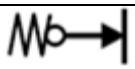
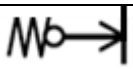
➢ ***Nature de la surface de contact***

Contact ponctuel	Contact surfacique	Contact strié	***Pointe fixe***	***Pointe tournante***
				
Contact dégagé	Cuvette	Vé	Palonnier	
				

- ***Type de technologie***

Appui fixe		Piece d'appui touche…		Touche de pré-location
Centrage fixe		Centreur, broche …		Pré-centreur
Système à serrage		Mise en position et serrage symétrique…		Bride, verin …
Système à serrage concentrique		Mandrin, pinces expansibles		Entraineur…

- ***Autres types de technologie***

Système de réglage irréversible		Appui réglage de mise en position…		Appui reglage de de soutien
Système de réglage réversible		Vis d'appui…		Antivibreur
Centrage réversible		Pied conique…		Pied conique broche conique

4. Matériaux des outils

4.1. Principales propriétés des matériaux à outils

Pour que l'outil puisse enlever le métal de la pièce, quelques contraintes doivent être respectées :

- Resistance mécanique élevée à la flexion et à la compression pour résister aux efforts de coupe,
- Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille pour pouvoir pénétrer dans le métal à usiner,
- Résistance à l'abrasion élevée pour résister à l'usure en cratère et en dépouille,
- Resistance à la température élevée (de 600° à 1000°C) qui diminue la résistance à l'abrasion et à la dureté,
- Bonne rugosité des surfaces de coupe et de dépouille (R_a< 1,6 µm)

4.2. Aciers Rapides Supérieurs (ARS)

Les outils ARS sont élaborés à partir des aciers fortement alliés subissant un traitement thermique spécial : trempe à l'air ou à l'huile à partir d'une température proche de la température de fusion (1350°C) suivie d'un revenu à une température de 600°C. Ils sont toujours utilisés pour certains types d'outils comme les forets, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement (déformation du bec) rapide de l'arête de coupe.

Fabrication : par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres

Composition : 0,7 % de Carbone minimum

5 % de Chrome environ

Quelques % de Tungstène, de Molybdène, et de Vanadium

Dureté : de 63 à 66 Hrc ; en plus les éléments ci-dessus il faut ajouter le Cobalt pour les rendre plus durs.

4.3. Carbures métalliques

Les outils en carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide.

Ils sont souvent revêtus de substances plus dures (70 à 90 % de carbure). On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure. Elles sont obtenues par frittage puis revêtues.

Fabrication **:** par frittage de poudre, puis revêtement

Composition : Noyau

- en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°),
- en carbure de titane (3100°),
- en carbure de tantale (3780°)

Revêtements :

- nitrure de titane (TiN),
- carbure de titane (TiC),
- oxyde d'aluminium (Al_2O_3)

Dureté :

- TiN environ de 2000 HV,
- TiC environ de 3900 HV,
- Al_2O_3 environ de 2400 HV

4.4. Céramiques

Il existe de deux grandes familles à savoir :

- Les céramiques à base d'aluminium sous deux aspects, les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et de carbure métallique ;
- Les céramiques à base de nitrure de silicium et d'oxyde métallique.

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

4.5. Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage).

Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphite… On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables…

Les paramètres ou conditions de coupe varient en fonction des matériaux de l'outil et de la pièce. Le tableau ci-dessous regroupe les plages de vitesses de coupe et d'avances généralement utilisés pour l'usinage des matériaux métalliques. La valeur de la température maximale au contact outil-pièce est fortement liée à la vitesse de coupe.

	Acier supérieur rapide	Carbure métallique	Céramique
Vitesse de coupe	Jusqu'à 100 m/min	Jusqu'à 300 m/min	À partir de 300 m/min
Avance	Jusqu'à 0,7 mm/tr	Avances élevées	Avances faibles
Température maximale de l'arête de coupe	650 °C	1300 °C	1550 °C

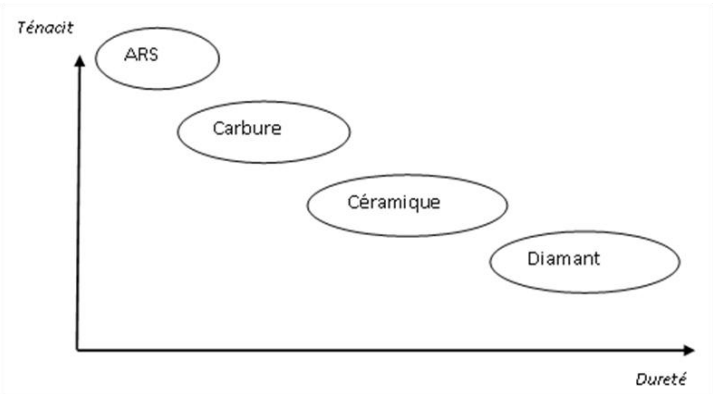


Figure N°9 : Matériaux les plus utilisés

5. Outil de coupe

Les angles d'outil sont définis dans deux références :

- ✓ Référence outil en main : qui est utile pour la fabrication de l'outil et son affûtage ;

✓ Référence outil en travail : qui définit les angles de l'outil en fonction d'un repère lié à l'orientation de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance donc la vitesse effective V_e.

5.1. Géométrie de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps et d'une partie active en matériau à outil. L'élément essentiel de la partie active est l'arête de coupe qui est l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille.

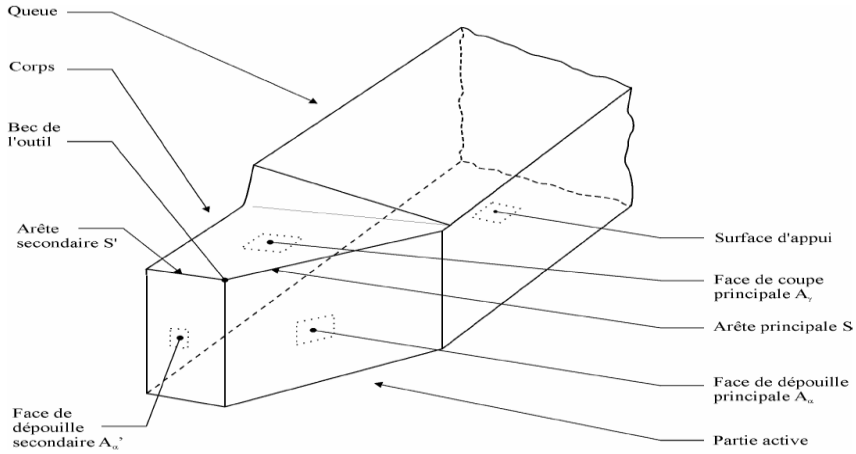


Figure N°10 : ***Outil de coupe***

5.1.1. Angles d'arête

- Angle de direction de l'outil ***Kr*** ou angle de direction de l'outil en travail ***Kre.*** C'est angle aigu mesuré dans le plan de référence Pr (ou Pre) entre le plan d'arête Ps (ou Pse) et le plan de travail Pf (ou Pfe).
- Angle d'inclinaison d'arête de l'outil **λs** ou a angle d'inclinaison d'arête en travail **λse** c'est l'angle entre arete et le plan Pr
- Angle de direction complémentaire de l'outil **Ψr** ou angle de direction complémentaire de travail **Ψre.**

On a donc la somme de : **Kr + Ψr = 90°** en valeur absolue.

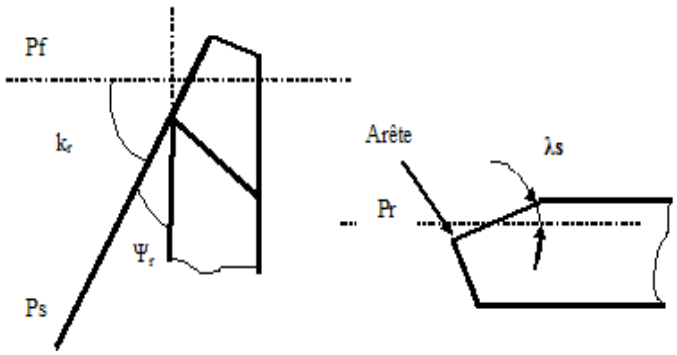


Figure N°14 : Angles d'arête

5.1.2. Angles des faces

- **α** : angle de dépouille principal : c'est un angle aigu entre la face de dépouille Aα et le plan d'arête Ps (ou Pse) ;
- **β** : angle de taillant : c'est également un angle aigu entre la face de coupe Aγ et la face de dépouille Aα
- **γ** : angle de coupe : c'est aussi un angle aigu la face de coupe Aγ et le plan de référence Pr (ou Pre)

NB : L'angle de coupe augmente d'autant que l'angle de dépouille diminue ; en effet, dans les plans Pi, on a toujours : **α + β + γ = 90°** ou bien **π/2** avec **β** = ***Cte***

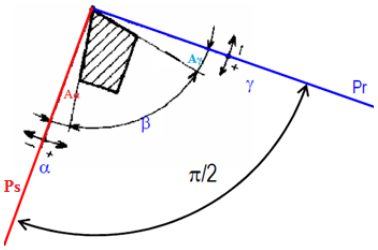


Figure N°15: Angles des faces

Les autres angles de l'outil subissent des variations mais cette variation est infime et n'a que peu d'intérêt pour l'usinage, sauf en travail de forme (filetage par exemple) où le profil obtenu peut être légèrement modifié.

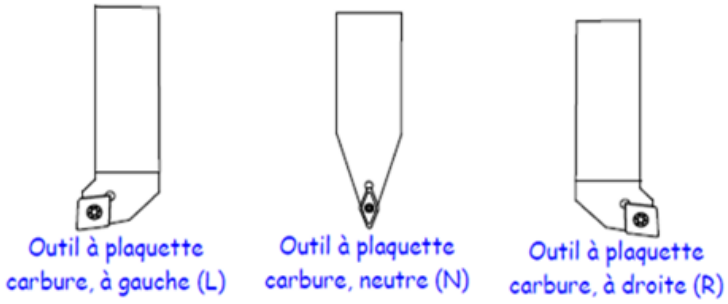


Figure N°16: Différentes orientations d'arête.

6. Usure de l'outil

6.1. Phénomène de l'usure

Il existe deux principaux phénomènes de l'usure :

➢ ***Phénomènes mécaniques*** :

- Usure par adhésion : c'est une usure par arrachement mécanique des particules d'outil, après formation des microsoudures favorisées par les pressions locales importantes et les températures élevées.
- Usure par abrasion : due à, l'enlèvement de matière sur l'outil par des constituants durs dans le matériau usiné causé par le frottement de glissement aux diverses interfaces ;

- Affaissement plastique : due aux efforts de coupe. Il prend toute son importance lorsque les températures sont élevées.

➢ ***Phénomènes d'usure physico-chimiques*** :

- Usure par diffusion : transfert des constituants de l'outil dans le copeau. La perte de certains constituants et les réactions provoquées par la diffusion, affaiblissement de la résistance mécanique ;
- Usure par oxydation : apparait quand il y a présence de l'air ou de lubrifiant et peut être chimique au niveau moléculaire et électrochimique au niveau ionique.

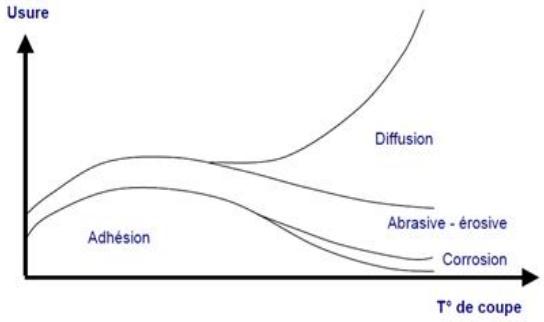


Figure N°17: ***Différents domaines d'usure***.

Il existe sept types d'usures élémentaires :

- ✓ Usure de la face en dépouille principale ou usure frontale ;
- ✓ Usure de la face de coupe ou usure en cratère (coupe) ;
- ✓ Usure en peigne;
- ✓ Arête rapportée;
- ✓ Déformation du bec de l'outil (affaissement plastique) ;
- ✓ Ecaillement et fissuration (Ecaillage).
- ✓ Rupture.

6.1.1. Usure de la face en dépouille principale ou usure frontale

Se présente sous la forme d'une bande striée et brillante sensiblement parallèle à l'arête principale de coupe.



Effet: L'usure en dépouille est la plus importante. Elle influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface.

Cause : Du au frottement de la surface coupée sur la face en dépouille principale (abrasion) et à l'oxydation du métal neuf à l'air ou au lubrifiant (physico-chimique). La vitesse de coupe Vc est trop importante.

Remède: Réduire la vitesse de coupe Vc ou changer de nuance de plaquette.

Revêtement en oxyde d'aluminium Al_2O_3.

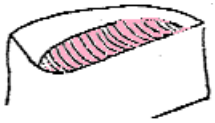
Pour les matériaux réfractaires avec des plaquettes céramiques, il faut au contraire augmenter la vitesse de coupe Vc.

Les matériaux à outil concernés sont entre autre les ARS, les carbures et les céramiques

Valeurs de référence de vitesse VB

6.1.2. Usure de la face de coupe ou usure en cratère

Se présente le plus couramment sous la forme d'un petit cratère parallèle à l'arête principale de coupe

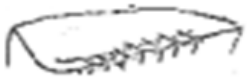


Effet : Elle entraîne une fragilité de l'arête (du bec de l'outil); changement des angles de coupe; lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre.

Cause : Du au frottement du copeau sur la face de coupe ; zone où la température est élevée (usure par diffusion).

Remède: Choisir une plaquette avec un γ positif, prendre une plaquette revêtue. Réduire la vitesse de coupe Vc puis la vitesse d'avance Vf pour obtenir une température plus basse. L'usure en cratère est plus importante pour les outils en carbure.

6.1.3. Usure en peigne



Effet : Des fissures perpendiculaires à l'arête en entrainant son effritement c'est-à-dire des fissures sur les deux faces qui vont entrainer une désagrégation progressive en poussière en fins fragments.

Cause : due a des fluctuations thermiques lors de l'usinage ; arrosage intermittent et usinage intermittent.

Remède: Sélection d'une nuance tenace offrant une bonne résistance aux chocs thermiques, un arrosage abondant ou un usinage à sec

6.1.4. Arête rapportée



Effet : Un copeau se dépose sur la plaquette, entraînant un état de surface médiocre.

Cause : la vitesse de coupe V_c est trop faible et une géométrie male adaptée au matériau.

Remède : Augmenter la vitesse de coupe V_c ; revoir les catalogues (cas de l'inox, de certains aluminium).

6.1.5. Écaillage



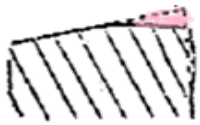
Effet : petite fracture entrainant un état de surface médiocre et une usure en dépouille excessive

Cause : nuance trop fragile, géométrie trop fragile et arête rapportée.

Remède: prendre une nuance tenace, augmenter l'angle de taillant β, le chanfrein de bec et réduire l'avance au début de la coupe.

6.1.6. Déformation du bec de l'outil (affaissement plastique)

Se présente à une température très élevée.



Effet: L'arête de coupe s'est déformée entraînant une dépression de l'arête et un renflement sur la face de dépouille.

Cause: Efforts de coupe trop importants ; température de coupe trop importante.

Remède: La lubrification est nécessaire ; Réduction des vitesses d'avance Vf et de coupe Vc.

6.1.7. Rupture



Effet : Risque d'endommager la pièce, le porte outil.

Cause : Nuance trop fragile. Charge excessive sur la plaquette. Choc lors de l'usinage (plan de joint).

Remède : Prendre une nuance tenace. Réduire la vitesse d'avance V_f et f. Dans ce cas : augmenter la profondeur de passe a pour absorber le choc.

7. Durée de vie d'un outil de coupe.

La détérioration de la partie active d'un outil ne doit pas être trop rapide afin de garantir une production satisfaisante. Cette durée de vie d'un outil de coupe (pour un critère donné) dépend :

- ✓ De l'outil utilisé : son matériau et sa géométrie ;
- ✓ de la pièce à usiner : sa matière et ses caractéristiques mécaniques ;
- ✓ de conditions de coupe : la vitesse de coupe Vc, l'avance f, la profondeur de passe ap et la lubrification.

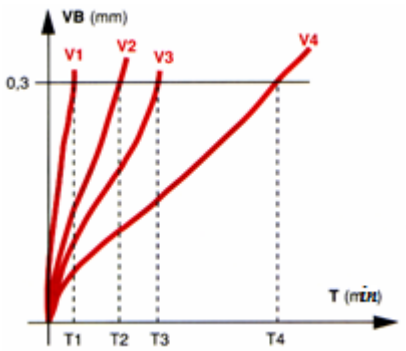
Pour un critère fixé, on pourra exprimer la durée de vie d'un outil de coupe sous la forme d'une fonction : T = f (condition de coupe, outil, pièce). La durée tient en compte les deux usures principales précitées (usure en face de dépouille V_B et usure en face de coupe K_T) mais la première est retenue pour faire le calcul. La norme fixe V_B = 0,3 mm ($V_{B\,max}$ = 0,6 mm) qui est la largeur moyenne de bande striée.

Loi d'usure et modèle mathématique

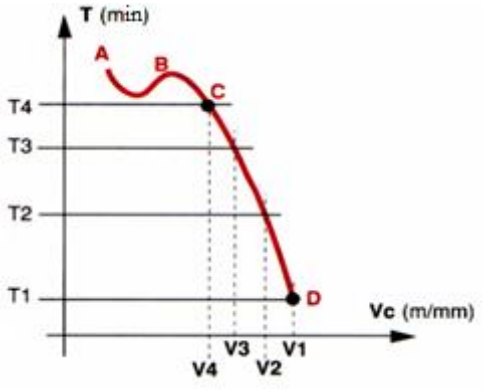
- ➢ ***Modèle de Taylor***

La loi d'usure représente la variation de temps effectif de coupe T en fonction des conditions géométriques et cinématiques de l'usinage.

D'abord lecture à l'échelle cartésienne :



Puis à l'échelle logarithmique :



Sur cette courbe, nous pouvons observer trois zones :

- AB : faibles vitesses de coupe, non utilisé
- BC : zone ou la durée de vie est indépendante de Vc, non utilisé
- CD : vitesses de coupe normales et importantes ; l'usure croît quasi linéairement avec Vc.

Comme le montre le graphe, la zone CD peut être assimilée à une droite : c'est la droite de Taylor. Elle permettra d'adapter les conditions de coupe afin de trouver le meilleur compromis entre la productivité et la durée de vie de l'outil de coupe.

$T = C_V V^n$ Avec :

T : durée de vie de l'outil de coupe en minute (min) ;

V : vitesse de coupe en mètre par minute (m/min) ;

n : constante fonction du matériau de l'outil ($-8 < n < -1$) ;

Cv : constante fonction du matériau usiné ($10^4 < Cv < 10^{14}$).

- ***Autres modèles***

Modèle de Gilbert (ou Modèle de Taylor généralisé)

Il prend en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe :

$$T = C_V V^n f^x a^y$$

II. TOURNAGE

1. Définition : Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui consiste à l'obtention de pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tour. L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance permettant de définir le profil de la pièce, la pièce est animée d'un

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

Le tournage est une discipline un peu particulière dans le domaine de l'usinage car c'est la seule pour laquelle on a à la fois :

- une pièce mobile
- un outil à dent unique
- une coupe continue (la matière défile en continu sur la face de coupe de l'outil)

2. Différentes machines

✓ Les tours parallèles à charioter et à fileter :

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables.

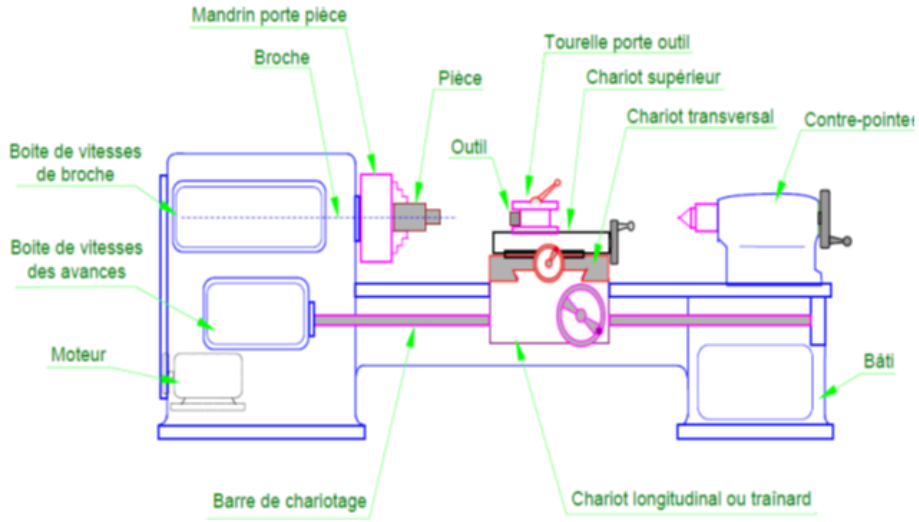


***Figure N°1* : schéma d'un tour conventionnel**

✓ Les tours semi-automatiques

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série.

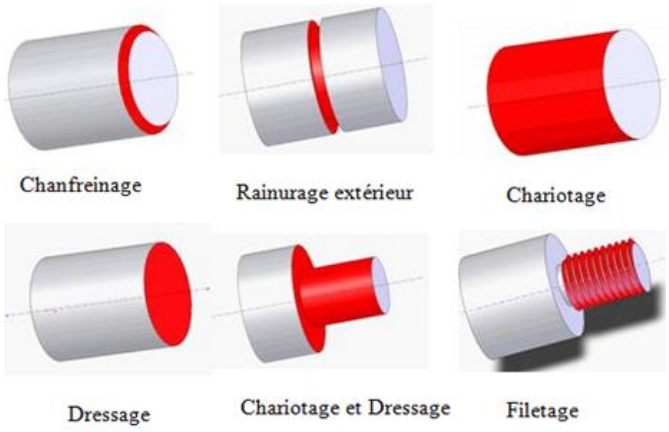
✓ Les tours automatiques:

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries.

3. Différents types d'opérations

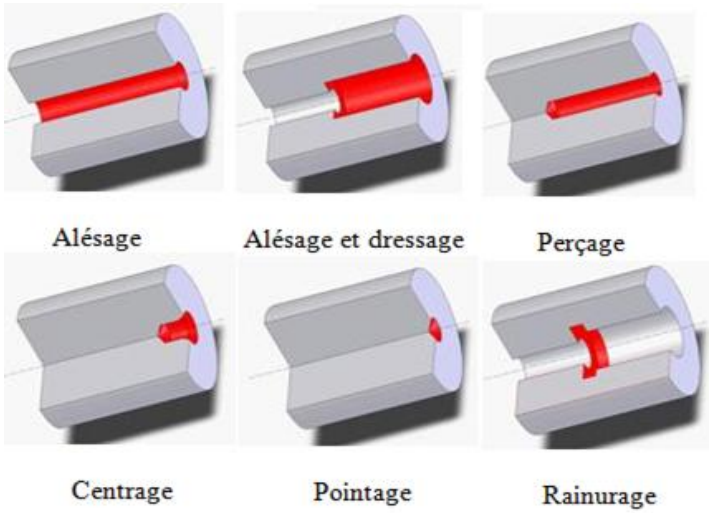
3.1. Tournage extérieur

Entre autre le tournage longitudinal (chariotage), réalisation d'un diamètre suivant une longueur, le tournage transversal (dressage), réalisation d'une face, le tournage de gorges, dégagements, le filetage, réalisation d'un pas de vis et le tronçonnage



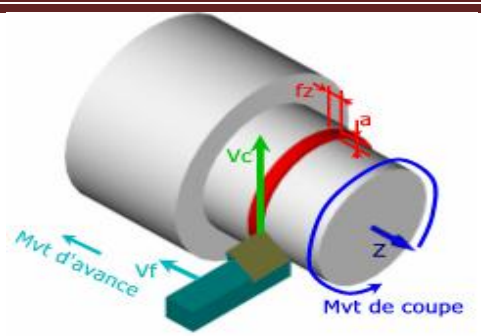
3.2. Tournage intérieur

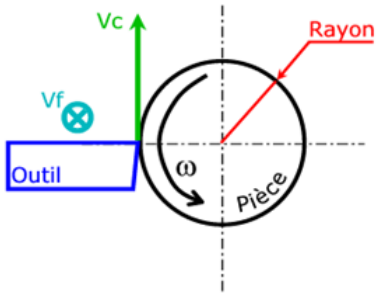
On peut aussi citer l'alésage, le dressage, le perçage, le tournage de dégagement, gorges ou rainurage et le taraudage, réalisation d'un pas de vis intérieur



4. Paramètres dynamiques

- F_c : force de coupe ;
- F_f : force d'avance ;
- F_p : force de pénétration ;

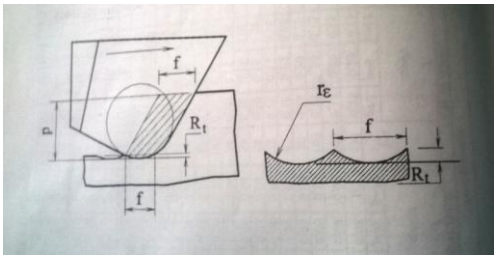




- **La section de copeaux** : $S = f.a_p$ en effet :
- **la largeur de coupe est** : $b = \dfrac{a_p}{\sin(k_r)}$ et
- **l'épaisseur de coupe est** : $h = f.\sin(k_r)$

d'où $S = \dfrac{a_p}{\sin(k_r)} \times f \sin(k_r) = a_p \times f$

- **Pression spécifique de coupe** : $K_C = \dfrac{F_C}{S} = \dfrac{F_C}{f.a_p}$
- **La rugosité :** en tournage elle dépend surtout de l'avance et du rayon de bec de l'outil de coupe $\mathbf{r_\varepsilon}$. En effet, quand la pièce fait un tour, l'outil avance de *f*. Cependant, l'outil retrace la forme du bec d'outil sur la surface usinée et la distance entre deux traces consécutives est égale à l'avance.



Pour les faibles valeurs de l'avance par rapport à la valeur du rayon de bec d'outil $\mathbf{r_\varepsilon}$ (opération de finition) $\mathbf{R_t}$ et $\mathbf{R_a}$ s'expriment : $R_t = \dfrac{125 f^2}{r_\varepsilon}$ et

$$R_a = \frac{1}{18\sqrt{3}} \frac{125 f^2}{r_\varepsilon}$$

Le tableau ci-dessous indique la valeur de l'avance pour une valeur de rugosité imposée (dessin de définition) et pour un rayon de bec d'outil $\mathbf{r_\varepsilon}$ connu.

Rugosité		**Rayon r_ε (mm)**							
		0,4	**0,8**	**1,2**	**1,6**	**2,4**	**10**	**12**	**16**
R_a (µm)	**R_t(µm)**	**Avance (mm/tr)**							
0,6	**1,6**	**0,07**	**0,1**	**0,12**	**0,14**	**0,17**	**0,25**	**0,28**	**0,32**
1,6	**4**	**0,11**	**0,15**	**0,19**	**0,22**	**0,26**	**0,4**	**0,44**	**0,51**

3,2	**10**	**0,17**	**0,24**	**0,29**	**0,34**	**0,42**	**0,63**	**0,69**	**0,8**
6,3	**16**	**0,22**	**0,3**	**0,37**	**0,43**	**0,53**	**0,8**	**0,88**	**1,01**
8	**25**	**0,27**	**0,38**	**0,47**	**0,54**	**0,66**	**1**	**1,1**	**1,26**

Par approximation $F_f \approx 0{,}5.F_C$ avec (F, Fr) = 60°

Alors qu'on a une autre relation empirique entre les différentes composantes de l'effort en Acier Rapide Supérieur (ARS) résumée dans le tableau ci-dessous :

	Outil à charioter à 45°		**Outil couteau**	
	F_f	**F_P**	**F_f**	**F_P**
Acier	$\frac{2}{5}F_C$	$\frac{2}{5}F_C$	$\frac{2}{3}F_C$	$\frac{1}{10}F_C$
Fonte	$\frac{1}{5}F_C$	$\frac{1}{5}F_C$	$\frac{2}{3}F_C$	$\frac{1}{10}F_C$

- **La cadence des travaux d'usinage**

Les deux méthodes (travail de forme et travail d'enveloppe) peuvent s'exécuter en une, deux ou trois étapes pour avoir la forme finale de la surface requise à savoir :

✓ **L'ébauche** : elle permet d'enlever un maximum de matière en un minimum de temps. Durant ce type de travail, l'outil devra résister à des efforts de coupe importants: il est donc massif.

✓ **La demi-finition** : elle permet d'avoir une bonne approche de la surface finale, d'assurer la régularité du copeau de finition et la précision géométrique de position.

✓ **La finition** : Elle doit être précédée d'une ébauche et d'une demi-finition. On en cherche le plus souvent une bonne qualité de surface : dimensions, forme et rugosité dans les tolérances permises par le dessin de définition. Les efforts sont plus faibles que pour une ébauche, l'outil est donc plus fin.

Nombre d'opérations / contrainte	**1**	**2**	**3**	**4**
Qualité ⩾ 12	x			
Qualité 9-10-11		x		
Qualité 7- 8			x	
Qualité⩽ 6				x
Ra ⩾3,2	x			
1,6 ⩽ Ra < 3,2		x		
0,8 < Ra < 1,6			x	
Ra⩽ 0,8				x
IT > 0,4	x			
0,15 < IT < 0,4		x		
0,02⩽ IT < 0,15			x	

IT $\leqslant$ 0,02				x

4.1. Puissance de coupe

La puissance de coupe se calcule par :

$P_c = \vec{F}.\vec{V}_0 = F_c.V_c + F_f.V_f + F_p.0$ Soit approximativement : $P_C \approx F_C.V_C$ par contre la puissance totale fournie s'exprime :

$P_C = \frac{F_C.V_C}{60} + \frac{10^{-3} F_f.V_f}{60}$ Le second terme de l'expression de la puissance est faible par rapport au premier terme. Généralement on utilise le terme suivant : $P_C = \frac{F_C.V_C}{60}$

4.2. Puissance spécifique de coupe

$Pcs = \frac{P_C}{Q}$ S'exprime en watts par centimètres cube par minute (W/cm^3/min)

Remarque **:** $$Pcs = \frac{P_C}{Q} = \frac{F_C.V_C}{V_C.f.a_p} = \frac{F_C}{S} = K_C$$

5. Paramètres de coupe

5.1. Vitesse de coupe

En tournage, la vitesse de coupe est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce. Il s'agit donc de la vitesse tangentielle au point de la pièce coïncidente avec la pointe de l'outil. Cette vitesse s'exprime en mètre par minute (m/min) se calcule ainsi :

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

Avec :

V_c : vitesse de coupe en m/min

D : diamètre en mm au point d'usinage

N : correspond à la fréquence de rotation de la pièce en tours/min

En permutant les termes de la formule précédente, on obtient : $N = \frac{1000.V_c}{\pi.D}$

Cette formule permet de faire le réglage de la machine, c'est-à-dire le réglage de la vitesse de rotation de la pièce en fonction du travail à faire. Il faut donc connaître V_c dont la valeur est le plus souvent issue de méthodes empiriques. La vitesse de coupe est déterminée en fonction de différents facteurs :

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

- du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse (qui ne s'utilise presque plus dans l'industrie moderne, remplacé par l'UGV, l'Usinage à Grande Vitesse)
- de la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées.

5.2. Vitesse d'avance

En tournage, l'avance est la vitesse avec laquelle progresse l'outil suivant l'axe de rotation pendant une révolution de la pièce, cette vitesse est déterminée expérimentalement en fonction des critères précités. Cela correspond, en première approximation à l'épaisseur du copeau.

$$V_f = f.N$$

où :

- f : l'avance par tour en (mm)
- N : correspond à la fréquence de rotation de la pièce en (trs/min)

5.3. Débit de copeaux

Le débit des copeaux est le produit de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur et est exprimé en centimètre cube par minute Q ($cm^3\ min^{-1}$).

$$Q = V_C.f.a_p$$

6. Sécurité

Les particularités du tournage sont aussi sa principale source d'accident :

- c'est la pièce qui tourne, elle doit donc être la plus équilibrée possible au départ et très soigneusement bridée (ne pas hésiter à utiliser la contrepointe).
- la coupe est continue (l'outil ne sort pas de la pièce pendant sa phase d'usinage)

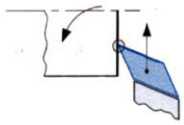
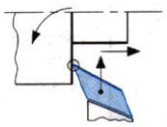
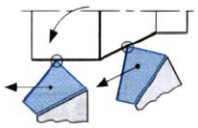
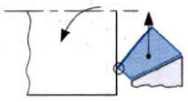
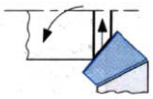
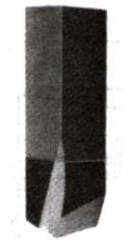
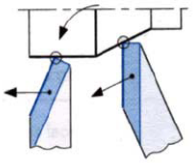
La conséquence malheureuse de la coupe continue est que l'on peut se retrouver avec un copeau filant (qui ne se fractionne pas).

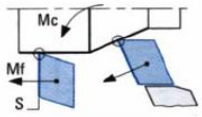
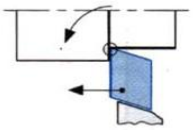
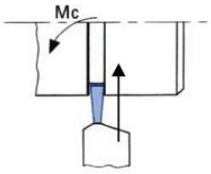
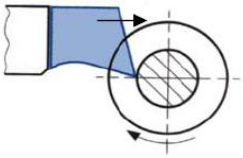
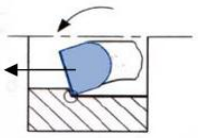
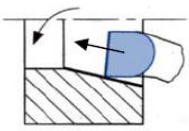
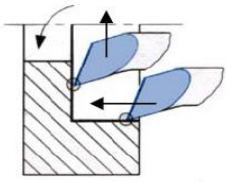
7. Différents outils de tournage.

On distingue deux principaux outils monobloc et a plaquette amovible.

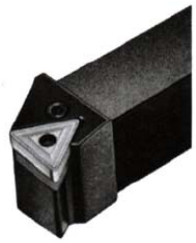
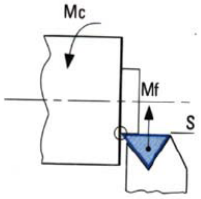
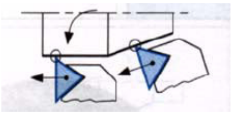
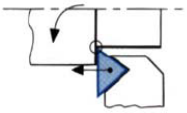
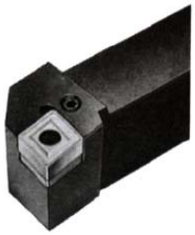
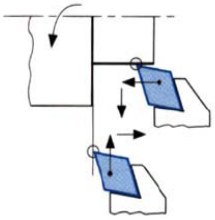
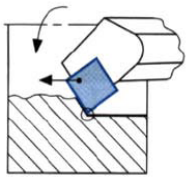
Les outils monoblocs sont à base des Aciers Rapides Supérieurs par contre ceux à plaquette amovible sont à base de céramique.

7.1. Aciers Rapides Supérieurs (ARS)

Visualisation	Identification de l'outil	Type d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Outil à dresser les angles NF E 66-364	Dressage	
		Dressage et chariotage combinés	
	Outil à charioter coudé NF E 66-362	Chariotage cylindrique et conique	
		Dressage	
		Chanfreinage	
	Outil droit à charioter NF E 66-361	Chariotage cylindrique et conique	

	Outil couteau NF E 66-363	Chariotage cylindrique et conique	
		Chariotage et dressage combinés	
	Outil à saigner NF E 66-366	Rainurage de petite dimension	
	Outil à tronçonner NF E 66-368	Tronçonnage de pièces *Exemple : Débit dans une barre en laminé ou étiré*	
	Outil à aléser NF E 66-370	Alésage d'un cylindre droit de révolution à partir d'un trou brut ou ébauché	
		Alésage d'un cône droit de révolution à partir d'un trou brut ou ébauché	
	Outil à aléser et à dresser NF E 66-371	Alésage et dressage combinés à partir d'un trou brut ou ébauché	

7.2. Plaquette en carbures métalliques

Visualisation	Identification de l'outil	Types d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Outil à dresser	Dressage	
	Outil **couteau**	Chariotage cylindrique ou conique	
		Chariotage et dressage combinés	
	Outil **à charioter et à dresser**	Chariotage et dressage combinés	
	Outil **à aléser**	Alésage d'un cylindre (ou cône) droit de révolution à partir d'un trou brut noyauté (écroutage)	

III. FRAISAGE

1. Définition :

Le **fraisage** est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Autrement dit, l'outil est toujours animé d'un mouvement de rotation sur son axe **Mc (mouvement de coupe).** Il est situé et bloqué sur un système porte - fraise, lui-même fixé dans la broche de la machine. Un ensemble de chariots se déplaçant suivant trois axes orthogonaux (figure N°1), permet d'animer la pièce d'un mouvement d'avance dans l'espace **Ma (mouvement d'avance).**

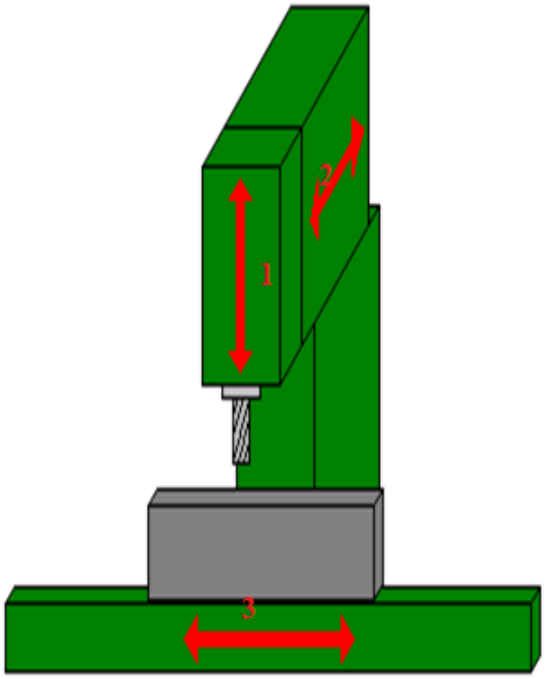


Figure N°1 : les trois axes d'une fraiseuse

Ces trois axes font trois mouvements rectilignes :

1- Mouvement vertical ;

2- Mouvement transversal ;

3- Mouvement longitudinal.

2. Différents types de fraiseuses

Elles peuvent être classées en deux grandes catégories.

Les fraiseuses de production : destinées au travail en série, elles sont à broche verticale ou horizontale, les mouvements des chariots sont en général automatisés.

Les fraiseuses universelles : elles sont généralement utilisées dans les ateliers d'outillage. Elles tirent leur nom de la position verticale que peut prendre l'axe de la broche porte-outil et de la variété des surfaces qu'elles sont susceptibles d'usiner (planes...)

Les fraises universelles peuvent travailler avec l'axe fraise horizontal, par fixation d'une tête universelle, l'axe broche peut prendre une position verticale ou oblique.

3. Principes de base du fraisage

Indépendamment du type de fraise choisie, l'opération de fraisage fera fondamentalement intervenir une des deux méthodes suivantes ou une combinaison de celles-ci. Compte tenu du choix de méthodes qui s'offrent en fraisage, il est important, au préalable, d'établir une distinction entre les différentes directions d'avance par rapport à l'axe de rotation de l'outil.

3.1. Fraisage en avalant

Dans la pièce, la trajectoire de rotation de la fraise est dans le **même sens** que le mouvement d'avance. Chaque dent attaque la matière sur une épaisseur maximale de coupeau, solution favorable à l'obtention d'une bonne rugosité. Les efforts de coupe *F1* et *F2* tendent à appliquer la pièce sur ses appuis. Autrement dit, chaque dent attaque par une épaisseur maximale de copeau. Les efforts de coupe générés ont tendance à « éloigner » la fraise de la matière usinée. Ce mode de travail permet d'éviter le retour de copeau sur la surface précédemment usinée.

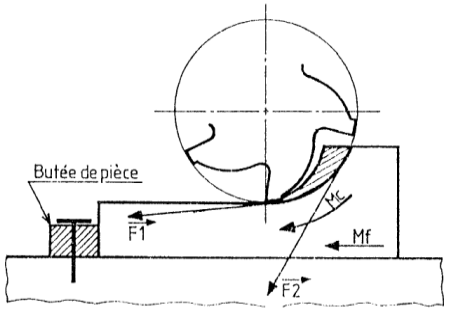


Figure N°2 : *fraisage en concordance*

3.2. Fraisage en opposition

Dans la pièce la trajectoire de rotation de la fraise est **opposée** à celle du mouvement d'avance. Chaque dent attaque la matière sur une épaisseur minimale de coupeau. L'outil travaille dans de moins bonnes conditions, la rugosité augmente. Les efforts de coupe *F1* et *F2* tendent à soulever la pièce. Autrement dit chaque dent attaque par une épaisseur de copeau minimale. Les efforts de coupe générés ont tendance à tirer la pièce du montage. Ce mode de travail peut conduire au retour du copeau précédemment formé sur la surface déjà usinée.

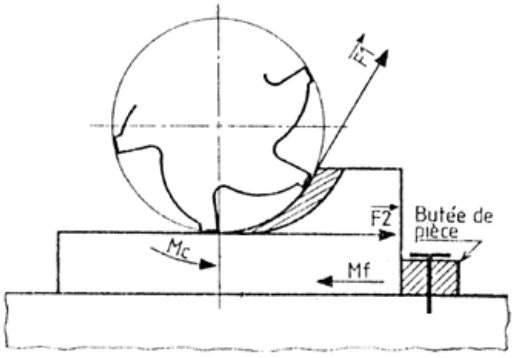


Figure N°3 : *fraisage en opposition*

4. Analyse de processus d'une opération en fraisage

Le fraisage est un procédé qui réalise un état de surface par enlèvement progressif d'une certaine quantité de matière de la pièce usinée à un taux de mouvement ou d'avance relativement faible par une fraise tournant à une vitesse comparativement élevée.

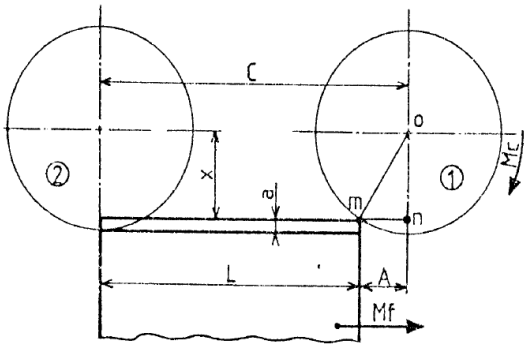


Figure N°4: *analyse d'un procédé de fraisage*

La course C est égale :

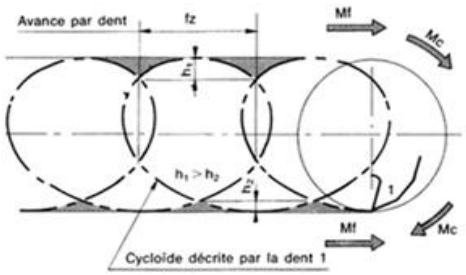
$C = L + mn$ Or le triangle omn est rectangle en n, en appliquant le théorème de Pythagore on a :

$om^2 = mn^2 + on^2$ Avec $om = R$ et $on = x = R - a$ donc $mn^2 = R^2 - (R-a)^2$

finalement la course $C = L + \sqrt{R^2 - (R-a)^2}$ on peut exprimer la course en fonction du diamètre $R = \frac{1}{2}D$ donc $C = L + \sqrt{\frac{1}{4}D^2 - \left(\frac{1}{2}D - a\right)^2} = L + \frac{1}{2}\sqrt{D^2 - (D-4a)^2}$

5. Trajectoire de la fraise

L'épaisseur étant sensiblement uniforme, la fraise travaille dans de bonnes conditions de coupe. L'état de surface dépend de l'avance par dent f_z

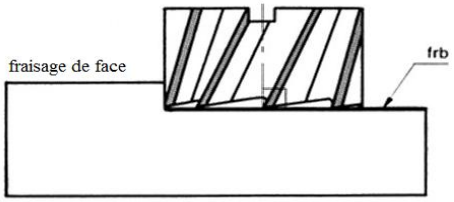


6. Modes d'action des fraises

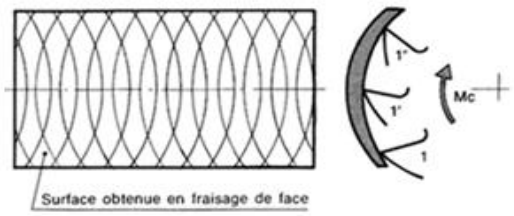
On distingue trois modes d'action des fraises : **le fraisage de face, le fraisage de profil et le fraisage mixte**.

- ✓ **Fraisage de face ou "en bout"**

L'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraise. Ce procédé permet d'obtenir de surfaces planes ou l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. Ce mode de fraisage est symbolisé par frb.



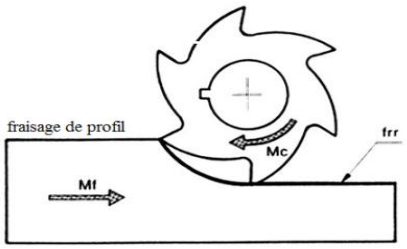
Après le passage de fraise on obtient la figure suivante



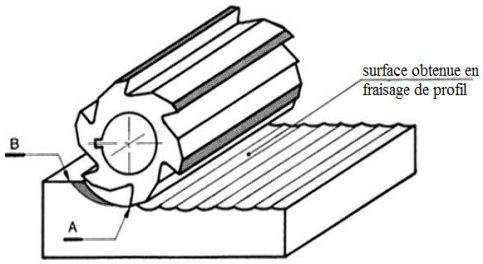
L'épaisseur moyenne en fraisage en bout se calcule de la façon suivante : $h_1(moy) = f_Z\sqrt{\frac{e}{D}}$

- ✓ **Fraisage de profil ou "en roulant"**

La génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée. Procédé d'obtention de surfaces planes ou quelconque dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est symbolisé par frr.



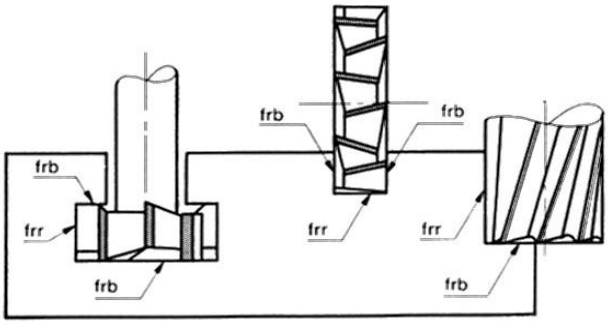
Après le passage de la fraise on obtient la figure suivante :



En fraisage en roulant l'épaisseur maximale de coupe h_1 est calculée de la manière suivante :

$$h_1(\max) = 2f_Z\sqrt{\frac{a_p}{D}(1-\frac{a_p}{D})}$$

- ✓ **Le fraisage mixte** : les deux modes de fraisage "en bout et en roulant" peuvent se trouver en application au cours d'une même opération. C'est le cas des fraises 2tailles, 3tailles, travaillant simultanément de face et de profil.



7. Rugosité

L'état de surface des pièces dépend du type de fraisage. Dans le cas du fraisage en profil l'état de surface dépend de l'avance par dent et du diamètre de la fraise. Plus l'avance par dent est petite moins profonds sont les sillons. Comme l'avance par dent est toujours faible (souvent dans l'intervalle de 0,05 à 0,15), c'est le diamètre qui intervient le plus dans l'état de surface. Plus le diamètre est grand moins profonds sont les sillons. La hauteur maximale de la rugosité s'exprime par :

Fraisage en opposition :

$$R_t = 125\frac{f_Z^2}{\frac{D}{2} - \frac{f_Z \times Z}{\pi}}$$

Fraisage en avalant

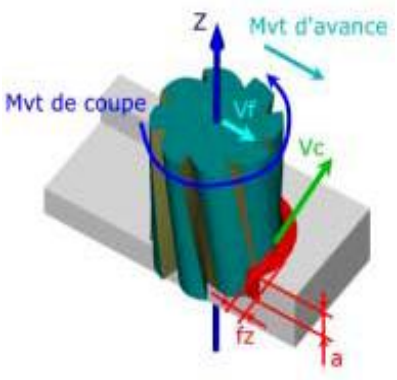
$$R_t = 125\frac{f_Z^2}{\frac{D}{2} + \frac{f_Z \times Z}{\pi}}$$

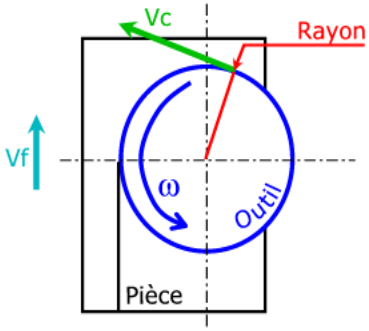
On note bien que le terme $\frac{f_Z \times Z}{\pi}$ est négligeable devant la valeur de $\frac{D}{2}$. Cependant la rugosité pourra s'exprimer pour les deux modes de fraisage, comme en tournage par :

$$R_t = 125\frac{f_Z^2}{R} \quad \text{Où} \quad R = \frac{D}{2}$$

8. Principe de fraisage

Le fraisage est une opération de mise en forme par enlèvement de matière réalisée à l'aide d'un outil coupant appelé « fraise ». Celui-ci comporte plusieurs arêtes tranchantes disposées autour de son axe de rotation, il est animé d'un mouvement de rotation et d'avance. Cette opération est réalisée sur une machine appelée fraiseuse.





9. Principales définitions cinématiques et géométriques

Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage, il convient en premier lieu d'établir quelques définitions s'appliquant aux caractéristiques dynamiques de l'outil de fraisage dont le diamètre (**D**) se déplace contre la pièce.

- ✓ **Effort de coupe**

L'effort de coupe qui s'applique à chaque dent a pour valeur :

$$F_C = k.S.R_r$$

Avec :

S : Section du copeau étant le produit de son épaisseur (profondeur de coupe radiale) $\mathbf{a_e}$ par la largeur (profondeur de coupe axiale) $\mathbf{a_p}$ **;**

$\boldsymbol{R_r}$: Résistance spécifique à la rupture par compression ;

$\boldsymbol{k}$: Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière.

- ✓ **Puissance de coupe**

La puissance exprimée en watts est égale au produit de la force par la vitesse

$$P_C = \frac{F_C.V_C}{60}$$

- ✓ **La vitesse de broche ou la fréquence de rotation** (**N** en tr /min)

Elle est le nombre de tours par minute de l'outil, ce dernier est monté sur la broche de la machine-outil. Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine.

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

- ✓ **La vitesse de coupe** ($\mathbf{V_c}$ en m/min)

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

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

- ✓ **L'avance par minute ou la vitesse d'avance** ($\mathbf{V_f}$ en mm/min)

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

$$V_f = f.N$$

- ✓ **L'avance par tour** (**f** en mm/tr)

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

$$f = \frac{V_f}{N}$$

- ✓ **L'avance par dent** (**f_z** en mm/dent)

Est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil a arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes.

L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil **(z)** et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour.

$f_Z = \frac{V_f}{Z.N}$ Ce qui entraine la vitesse d'avance en fraisage est : $V_f = f_Z \times N \times Z$

- ✓ **Les profondeurs de coupe axiale (a_p) et radiale (a_e)**

En surfaçage radiale (**a_e**) ou axiale **(a_p)** pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. Elles sont exprimées en millimètre.

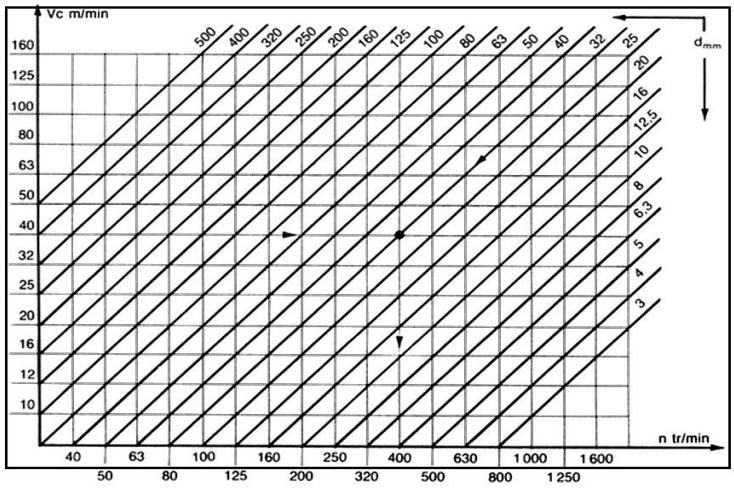
- ✓ **Le volume de matière enlevée par unité de temps (Q** en mm^3/min**)**

Ce volume correspond à la profondeur de coupe multipliée par la largeur de coupe, multipliées par la distance dont l'outil se déplace au cours de l'unité de temps. Le volume d'enlèvement de matière est exprimé en millimètres cubes par minute.

$$Q = a_e . a_p . V_f$$

10. Détermination des paramètres de coupe à l'aide des abaques

Certains paramètres tels que les vitesses de coupe, de la broche et le diamètre sont liés, c'est pourquoi il est nécessaire d'utiliser quelques fois des abaques.



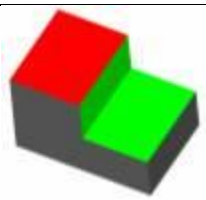
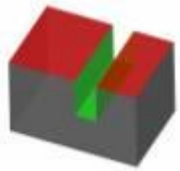
Exemple : pour un diamètre de 32 mm, on trouve une vitesse de coupe de 40 m/min et une vitesse de rotation de 400 tr/min.

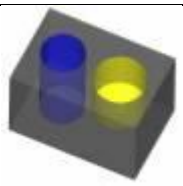
Coefficients de correction à apporter à l'avance par dent en ébauche

Fraise 1 taille à surfacer k = 1	**Fraise 2 dents à rainurer : k = 0,4**
Fraise 2 tailles à queue : k = 0,4	**Fraise 3 tailles : k = 0,4**
Fraise à tailles à trou : k = 0, 7	**Fraise à profil constant : 0,4**

11. Formes simples usinables et les outils associés

Le déplacement de l'outil suivant les axes définis permet de générer des formes usinées.

Dessin	Opération	
	**Surfaçage** Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (surface rouge)	Fraise à surfacer 
	**Plans épaulés** C'est l'association de 2 plans (perpendiculaires surfaces vertes)	 Fraise de tailles
	**Rainure** C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (surfaces vertes)	  Fraise 2 tailles Fraise 3 tailles
	**Poche** La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan)	 Fraise 2 tailles

Dessin	Opération	
	**Perçage** Ce sont des trous. Ils sont débouchant (surface bleu) ou borgnes (surface jaune).	 Foret Alésoir Fraise 2 tailles

12. Porte-outils

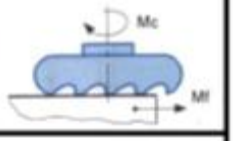
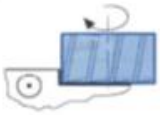
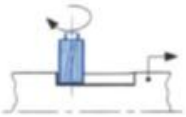
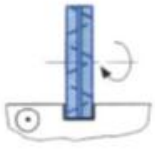
Il existe différents systèmes pour placer les outils sur la machine, voici un petit récapitulatif non exhaustif.

Nom / utilisation	Photos
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 la queue de l'outil.	
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.	
Adaptateur de cône (tournage / fraisage / perçage) Certain outil comme les forets de diamètre supérieur à 13 mm ont des embases coniques. Ces cônes nécessitent parfois des adaptateurs suivant les machines.	

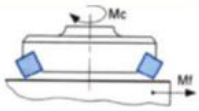
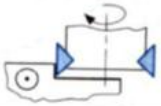
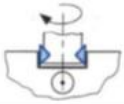
Nom / utilisation	**Photos**
Pour désolidariser le cône et le foret, on utilise un chasse-cône. Il suffit de l'enfoncer dans la lumière latérale et de frapper à l'aide d'un maillet.	

13. Différents types d'outils

13.1. Aciers Rapides Supérieurs (ARS)

Visualisation	Identification de l'outil	Type d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise 1 taille à surfacer	Surfaçage en roulant ou de profil	
	Fraise cloche à surfacer	Surfaçage en bout ou de face	
	Fraise 2 tailles à queue conique	Surfaçages combinés à prédominance en roulant Surfaçage en roulant	
	Fraise 2 tailles à alésages et à entraînement par tenon	Surfaçages combinés à prédominance en bout	
		Restrictivement : -surfaçage en bout (a) - surfaçage en roulant (b)	
	Fraise 2 tailles à queue cylindrique	Rainurage de profil peu précis	
	Fraise à rainurer deux lèvres à coupe centrale	*Rainurage de profil en pleine matière* Exemple : rainure de clavetage	
	Fraise 3 tailles à dentures alternées	Rainurage en bout Qualité usuelle obtenue /9	
	Fraise 3 tailles extensible à denture alternées	Rainurage en bout qualité usuelle obtenue : 7-8	

13.2. Plaquette en carbures métalliques

Visualisation	Identification de l'outil	Types d'opérations réalisées	Schéma d'usinage
	Fraise à surfacer	Surfaçage en bout	
	Fraise **à surfacer et à dresser**	Surfaçages combinés à prédominance en bout	
	Fraise **à rainurer**	Rainurage de profil	
	Fraise **3 tailles à dentures alternées**	Rainurage en bout	

IV. PERÇAGE

1. Grandeurs géométriques et cinématiques de perçage

Le perçage est une opération de forage dans laquelle, l'outil appelé foret reçoit le mouvement de coupe $\mathbf{M_c}$ par rotation autour de son axe. Le mouvement d'avance $\mathbf{M_f}$ est également donné par une translation suivant l'axe du foret.

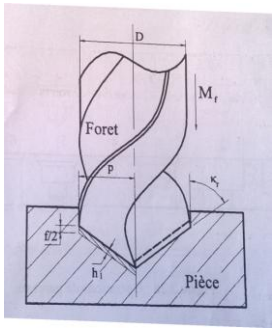
1.1. Grandeurs cinématiques de perçage

Paramètres théoriques	Paramètres utiles au réglage de la machine
- **Vitesse de coupe V_c (m/min)** - **Avance par tour f (mm/tr)** - **Le foret a deux lèvres :** **f (mm/tr/lèvre) = $\frac{f}{2}$**	- **Vitesse de rotation N (tr/min)** $N = \frac{1000Vc}{\pi D}$ - **Avance par tour f (mm/tr)**

1.2. Grandeurs géométriques de perçage

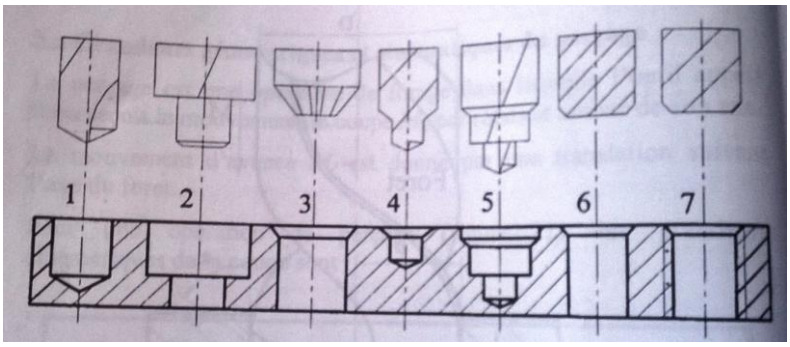
Paramètres théoriques	Paramètres utiles au réglage de la machine
- **Diamètre du foret D (mm)** - **Géométrie de l'outil** - **Profondeur de passe : $p = \frac{D}{2}$** - **Si la pièce contient un avant trou :** $p = \frac{D-d}{2}$	- **Diamètre du foret D (mm)**

1.3. Illustration de ces grandeurs



2. Principale opération de perçage

Sur une perceuse, on peut effectuer les opérations suivantes :



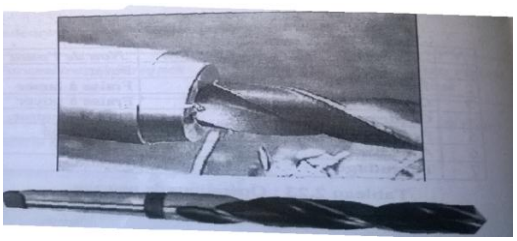
Les opérations ainsi que les outils sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N°	Désignation de l'opération	Nom de l'outil
1	Perçage	Foret
2	Lamage	Fraise à lamer
3	Chanfreinage	Fraise à noyer
4	Centrage	Foret à centrer
5	Perçage étagé	Foret étagé
6	Alésage	Alésoir
7	Taraudage	Taraud

3. Outils de perçage

On distingue les perçages longs et perçages courts par des profondeurs de perçages égales de 5 à 10 fois le diamètre des forets.

La profondeur maximale de perçage recommandée varie de 2,5 à 3 fois le diamètre nominal du foret.



4. Machines de perçage

On repartit les perceuses selon des critères différents comme par exemple, la construction, l'utilisation, la position et le nombre de broches etc.

Parmi les perceuses, on présentera les plus importantes :

i- La perceuse d'établi

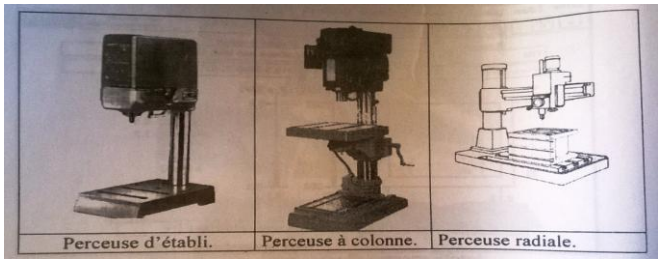
Ces machines sont utilisées pour les perçages de faibles profondeurs (jusqu'à 12 mm). L'unité de perçage se trouve sur une colonne courte, elle-même fixée sur plaque d'assise. La pièce est fixée sur table qui peut être déplacée en hauteur.

ii- La perceuse à colonne

Cette machine son nom de la colonne qui est montée sur la table d'assise. A l'extrémité supérieure de la colonne se trouve l'unité de perçage. La table porte pièce peut être déplacée en hauteur et pivote le plus souvent pour permettre des perçages inclinés. Ces machines peuvent être également utilisées pour tarauder.

iii- La perceuse radiale

Les perceuses radiales se révèlent particulièrement précieuses pour l'usinage des grandes pièces. L'unité de perçage avec l'arbre moteur peut coulisser longitudinalement sur un bras console. Le bras console lui-même peut également être en hauteur dans le sens de la longueur de la colonne.



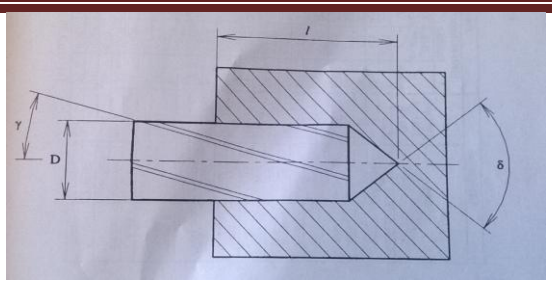
5. Condition de coupe en perçage

Les impératifs de rigidité, d'angle de coupe, d'affutage, de lubrification, de dégagement correct des copeaux étant respectés les conditions de coupe sont établies à partir des hypothèses suivantes :

- La durée de vie de l'outil de coupe correspond à une longueur de perçage ou d'alésage fixe à **L = 4,5 m,**
- Les conditions de coupe sont établies pour une longueur percée inferieur à trois fois le diamètre du foret (referez vous tableau N°1). Pour les perçages plus profonds (de profondeur égale à **l** figure ci-dessous), il faut prendre les facteurs de correction $\mathbf{k_1}$ pour la vitesse de coupe et $\mathbf{k_2}$ pour l'avance. Ces facteurs de correction sont dans le tableau suivant :

L	**3D**	**4D**	**5D**	**6D**	**8D**
$\mathbf{k_1}$	**0,90**	**0,80**	**0,70**	**0,65**	**0,60**
$\mathbf{K_2}$	**0,95**	**0,90**	**0,85**	**0,80**	**0,80**

Tableau des facteurs de correction pour les perçages longs



5.1. Effort de coupe en perçage

La résultante des efforts de coupe appliquée par l'outil sur la pièce a trois composantes qui sont :

- L'effort tangentiel de coupe $\boldsymbol{F_c}$: c'est l'effort tangent à la surface usinée, il est parallèle à la vitesse de coupe ;
- L'effort d'avance $\boldsymbol{F_f}$: il est parallèle à la direction de l'avance f ;
- L'effort de pénétration $\boldsymbol{F_p}$: il est parallèle à la direction de pénétration de la profondeur de passe p.

L'effort de coupe se calcule en utilisant la formule suivante :

$F_c = K_s \times A$ Où A = S est la section de coupe par arête exprimée par :

$$A = \frac{f}{2} p = \frac{f}{2} \times \frac{D}{2} = \frac{f \times D}{4}$$

Si la pièce est déjà percée à un diamètre plus faible (d) on a :

$$A = \frac{f}{2} p = \frac{f}{2} \times \frac{D-d}{2} = \frac{f(D-d)}{4}$$

Et K_s est la pression spécifique de coupe, variable en fonction de l'avance et du matériau usiné. Les valeurs sont regroupées dans le tableau ci-dessous

Matière		**K_s(N/mm^2)**
Acier	**40<R_p<60**	**1500**
	60<R_p<80	**1800**
	80<R_p<100	**2800**
Fontes		**1900**
Laitons		**1400**
Alliage d'aluminium		**1200**

5.2. Puissance de coupe en perçage

La puissance fournie pendant la coupe s'exprime en :

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60}$$

✓ **Le temps de coupe en perçage**

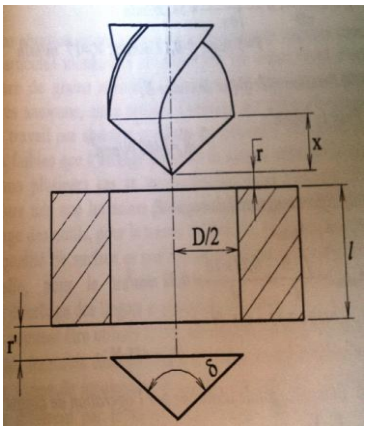
$$t_c = \frac{60(l+x)}{V_f}$$ Avec $x = \frac{D}{2\tan(\frac{\delta}{2})}$ et l (mm) est la profondeur percée.

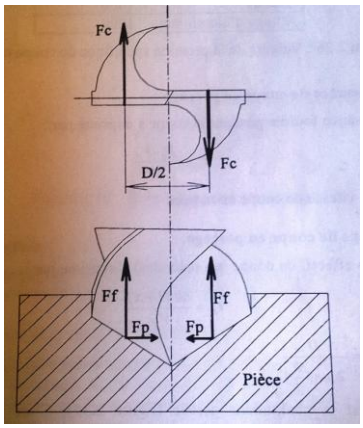
Le temps technologique de perçage de coupe (t_t en secondes) s'exprime en tenant compte des distances d'engagement et de dégagement de l'outil :

$$t_c = \frac{60L}{V_f}$$

L est la course totale de l'outil en tenant compte des distances d'engagement et de dégagement.

$$L = l + r + x + r'$$





V. GAMMES D'USINAGE

I. Fonction production mécanique

La **fonction production mécanique** représente dans le cadre de l'industrie manufacturière un élément majeur qui conditionne le niveau des performances économiques de l'entreprise. On peut schématiquement décrire la structure d'une entreprise industrielle par l'organigramme de la figure ci-dessous où l'on retrouve les principales fonctions contribuant au fonctionnement d'un ensemble industriel :

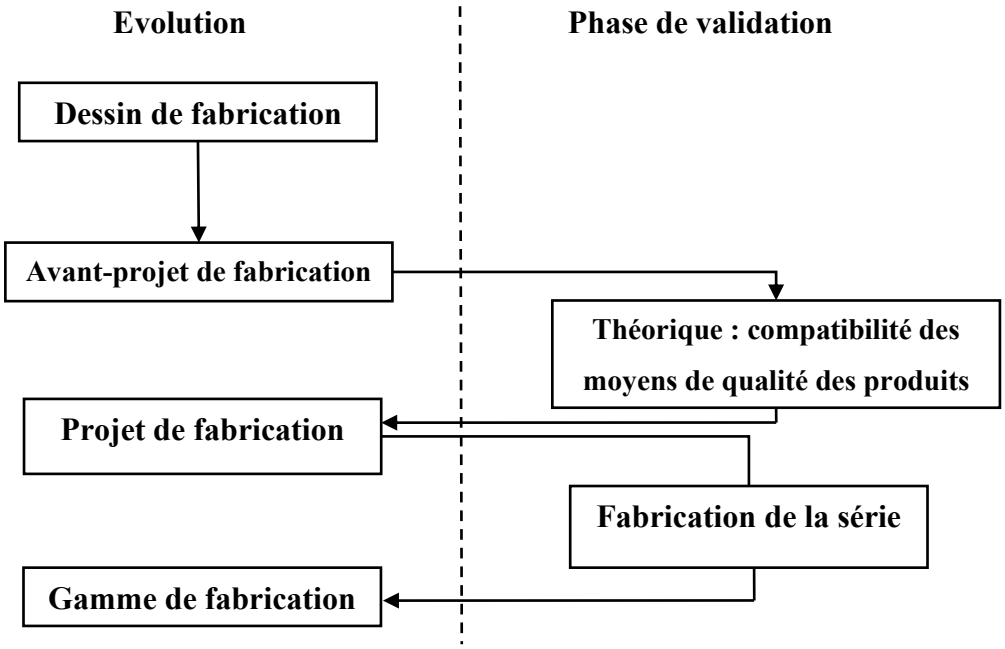
- **Direction générale** chargée des plannings à long terme, des politiques financières, du personnel, du marketing, etc. ;
- **Bureau d'études BE** chargé des conceptions de produits nouveaux et des projets détaillés ;
- **Gestion de fabrication générale** comprenant la gestion de production (ordonnancement), la maintenance, la gestion des stocks et des en-cours, et la préparation des fabrications ou bureau des méthodes ;
- **Bureau des méthodes BM** qui choisit les techniques de production mécanique, comprenant les techniques de mise en forme, les techniques d'assemblage, le contrôle de qualité, les techniques de manutention et de transport, et la finition. Il se situe donc entre la fonction de conception (bureau

d'études) et la fonction de production. Il a pour but de définir les moyens de production (machines, outillages, procédés) qui permettront de réaliser les produits conçus au bureau d'études.

II. Définition

Une gamme d'usinage est une méthode développée qui permet d'établir l'ordre chronologique des différentes opérations d'usinage d'une pièce à réaliser compte tenu des moyens disponibles. La gamme générale reste au bureau des méthodes (B.M). L'objectif de la gamme est de définir l'ordre des opérations d'usinage et les différentes prises de pièces associées (phases et sous phases).

Toute pièce mécanique évolue d'un état initial correspondant à la pièce brute, vers un état final, (produit obtenu) représentatif du contrat de départ qu'est le dessin de définition. La valeur ajoutée représente l'ensemble des opérations (usinage, traitement, etc.) à effectuer.



1. Définition de quelques termes

✓ **Phase** : C'est l'ensemble des opérations élémentaires effectuées à un même poste de travail par les mêmes personnes et les mêmes outillages. Elle comprend la suite des sous-phases et des opérations effectuées. On repère les phases par des nombres (10, 20, 30, etc.)

✓ **Sous-phase** : C'est une fraction de phase délimitée par des prises de pièces différentes. Elle comprend la suite logique des opérations effectuées sur une pièce sans modifier son positionnement. Les sous-phases sont repérées par des nombres (21, 22, 23 etc. pour la phase par exemple 20) ou encore dans certains documents les sous-phases sont repérées par des lettres majuscules A, B, C etc. pour une phase considérée.

✓ **Opération** : C'est le plus petit élément de la gamme. Elle correspond à un passage de l'outil sur la pièce produisant une modification de celle-ci. Autrement dit c'est une transformation de la pièce qui met en œuvre un seul des moyens dont est doté le poste de travail. A leur tour elles sont repérées

par des chiffres (210, 211, 212, etc.) pour la sous-phase 21 ou bien par des lettres minuscules a, b, c, etc. pour une sous-phase considérée.

2. Contenu d'un contrat de phase

Un contrat de phase complètement élaboré doit contenir des renseignements relatifs :

- à la phase : poste de travail ; porte-pièce utilisé ; numéro de phase.
- à la pièce : nom de la pièce et de l'ensemble auxquels elle appartient ; nombres de pièces à fabriquer ; matière et origine du brut ; croquis (formes globales de la pièce) de la pièce dans l'état où elle se trouvera en quittant le poste de travail à la fin de la phase.
- Analyser les spécifications suivant les trois axes : valeurs des IT, spécifications géométriques, surfaces fonctionnelles.

Les contraintes sont nombreuses :

• Utilisation du parc machine présent

• Utilisation des outils présents

• Respect des spécifications du dessin de définition

• Coût minimum…

1. Règles principales

1.1. Choix du brut

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

1.2. Association des surfaces

On réalise dans la même phase les surfaces liées entre elle par des « cotes serrée » ou des spécifications géométriques (coaxialité, perpendicularité, parallelisme …)

1.3. Création des phases

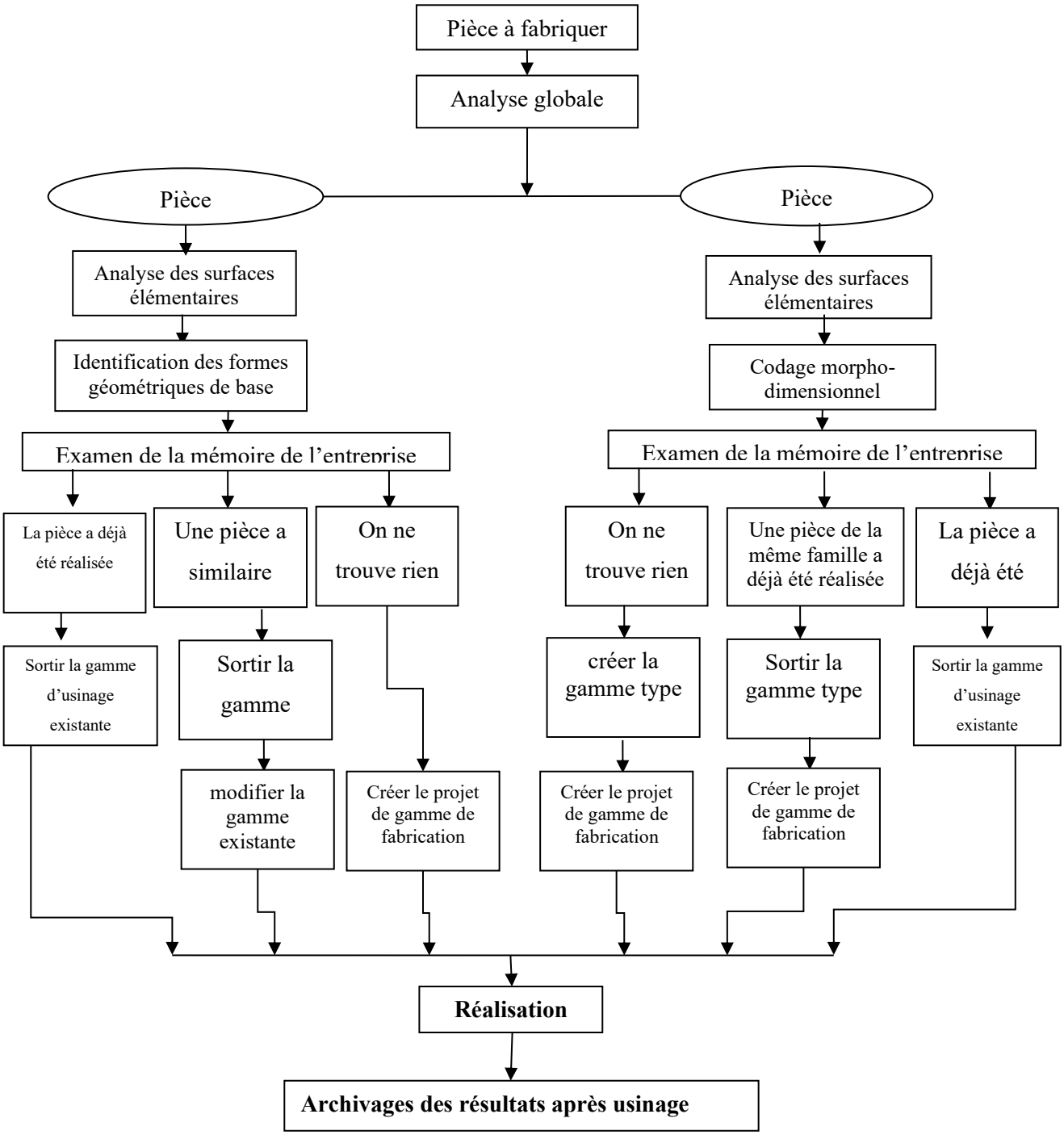
On minimise le nombre de montage-démontage de la pièce. On réalise un maximum des surfaces pour une mise en position donnée afin d'éviter de repasser sur les surfaces précédemment usinées.

1.4. Mise en position sur surfaces usinées

L'iso-statisme 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.

3.5. Démarche à suivre



2. Choix des machines pour la réalisation

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

3. Application

Gamme d'usinage vierge est une gamme où aucune information n'est contenue dans celle-ci.

Phase	Sous-phase	Opération	Désignation	Machine-outil	Montage /ablocage (appareillages)	Outillage	Contrôle & vérification	Croquis

10	A ou 11	a ou 111						
		B						
	B ou 12							
20								

4. Contrat de Phase

4.1. Définition

Le contrat de phase est le document de référence de l'opérateur. Il décrit l'ensemble des opérations, éventuellement groupées en sous-phases, réalisées sur un même poste de travail.

Il est réalisé à partir de l'avant-projet de fabrication, il permet à l'opérateur de :

- déterminer la cotation de fabrication,
- mettre en place les montages d'usinage,
- réaliser les réglages de la machine,
- préparer le poste de contrôle.

Il devient définitif lorsque les responsables de production ont validé le processus de fabrication et que celle-ci peut être qualifiée de fabrication stabilisée.

4.2. Contenu d'un contrat de phase

- Le numéro de la phase : il permet de repérer la phase dans l'ordre chronologique de la nomenclature et la désignation des phases.
- Les références de la pièce (ensemble, pièce, matière, nombre...)
- La machine-outil utilisée : dans une unité de production importante, la machine est désignée de façon précise (type, numéro,…) en fonction de la planification de la gestion de production (en d'autre terme l'ordonnancement).
- Le croquis de phase (dessin de la pièce à usiner, symbolisation technologique de la mise en position, cotation de fabrication, repérage des surfaces, ''surface(s) usinée(s) repassée(s) en trait fort afin de faire la différence aux surfaces non usinées'', dessin de l'outil de coupe, M_c mouvement de coupe et M_f mouvement d'avance, les axes machines).
- Les opérations d'usinage.
- Les éléments de coupe.
- L'outillage de fabrication et de vérification.