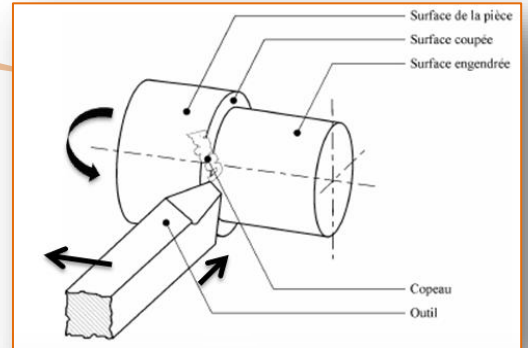


I. PROCÉDES D'USINAGE

I.1. Usinage conventionnel

I.1.a. Principe général

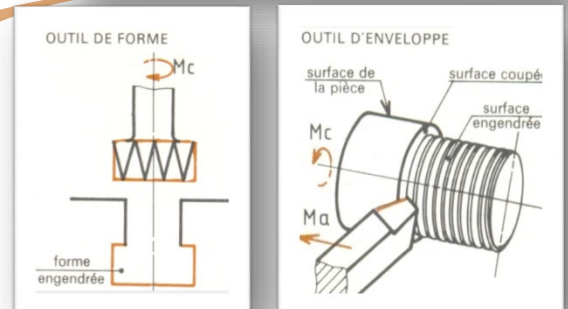
- **Définition** : L'usinage rassemble tous les procédés visant la production de pièces aux cotes et tolérances demandées à partir de pièces brutes et ce, par à l'aide d'un outil Les pièces brutes peuvent être des lingots coulés ou aussi des produits d'autres procédés comme le moulage, le frittage ou le forgeage.
- **Phénomène** : L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire de façon progressive les dimensions de la pièce à usiner. La matière est enlevée sous forme de qui se détachent de la pièce en cours d'usinage suite à un intense provoqué par une concentration de contraintes.
- **Machines** : La machine qui sert d'intermédiaire entre la pièce et l'outil est appelée machine-outil. Sa fonction principale est la de la pièce et de l'outil pour ensuite leur communiquer les nécessaires à la coupe.
- **Mouvements** : En usinage, on distingue trois types de mouvement:
 - **Le mouvement de coupe (Mc)** : c'est le mouvement directement responsable de l'enlèvement de la matière. Il indique la direction dans laquelle ce dernier se produit.
 - **Le mouvement d'avance (Ma)** : C'est le mouvement permettant la génération du profil à usiner.
 - **Le mouvement de position ou de profondeur (Mp)** : C'est le mouvement déterminant la profondeur de coupe.



– Outils :

Les outils sont classés essentiellement selon leurs taillants ou leur emploi:

- Les outils à taillant unique (ex. :)
- Les outils à taillants multiples (ex. :)
- Outils de forme : la forme de la surface générée est intimement liée à celle de l'outil. (ex. :)
- Outils d'enveloppe: la forme de la surface générée ne dépend que du mouvement relatif Ma. (ex. :)



– Avantages et limitations

- 🌱 La versatilité : utilisé autant en grande qu'en
- 🌱 La flexibilité : de point de vue réalisables
- 🌱 Les tolérances dimensionnelles et le bon sont souvent des facteurs qui dirigent le choix de procédé de fabrication vers l'usinage.
- 🌱 Des pertes considérables sont des conséquences inévitables de l'utilisation de ce mode de fabrication.
- 🌱 Pour certains matériaux trop durs ou trop fragiles, l'usinage peut s'avérer

I.1.b. Tournage

– Principe général

- Le tournage permet, par le biais d'un outil, d'obtenir des formes aussi bien intérieures qu'extérieures : (surfaces cylindriques, surfaces coniques, filetages)
- Lors du tournage est animée par un mouvement (Mc) alors que, par le biais du porte outil et de la machine-outil (tour), est animé par deux mouvements de (Ma et Mp).



- **Équipement** : La machine-outil utilisée en tournage est le tour. Il en existe plusieurs sortes (parallèle à chariotier et à fileter semi-automatique, revolver, automatique, ...).

– Principales opérations réalisables

- **Chariotage** : travail d'enveloppe permettant la génération de formes de révolution par une diminution de diamètre
- **Dressage** : Travail d'enveloppe permettant de réaliser des surfaces planes par le biais d'un mouvement relatif Ma orthogonal à l'axe de la broche.
- **Filetage** : exécution d'une rainure hélicoïdale dont le profil est celui de l'outil (outil de forme) par synchronisation des mouvements de coupe et d'avance.

– Montage de la pièce

- **En l'air (ou en mandrin)** : Unique mode de montage pour la réalisation de formes intérieures. Ce mode est

réservé aux pièces courtes (longueur inférieure à deux fois le diamètre). Des mandrins à 3 mors à serrage concentrique sont utilisés pour des pièces de révolutions alors que des mandrins à 4 mors à serrage indépendant servent au montage de pièces prismatiques ou à la réalisation d'excentriques.

- **entre pointes** : montage utilisé uniquement pour la réalisation des formes extérieures et préconisé surtout pour la finition et la reprise des pièces car la mise en position offerte est plus favorable à la minimisation des défauts géométriques. L'entraînement est assuré par un toc.
- **Mixte** : Ce mode, faisant intervenir un mandrin et une contre-ponte assure un meilleur entraînement que le montage précédent. Il est préconisé pour des opérations extérieures sur des pièces relativement longues.
- **Sur plateau équerre** : montage (par bridage) pour des pièces ne pouvant être montées en mandrin.

I.1.c. Fraisage

Principe général

- Le fraisage permet, par le biais d'un outil à tranchants multiples appelé fraise, d'obtenir des formes (profils, hélices, cames, ...).
- Lors du fraisage, la pièce est solidaire d'une table animée par de multiples mouvements dans l'espace (translations, rotations, ..). Ces mouvements de la table génèrent les mouvements alors que le mouvement de la rotation de la fraise, solidaire à la broche de la machine-outil, génère le mouvement

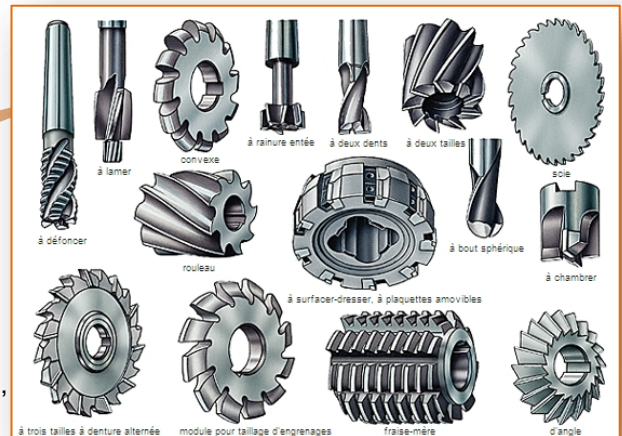


Équipement

La machine-outil utilisée en tournage est la fraiseuse. Il en existe plusieurs sortes appelées selon la direction de leurs broches : horizontale, verticale, universelle (direction réglable). Les deux premières sont illustrées à la figure ci-dessous.

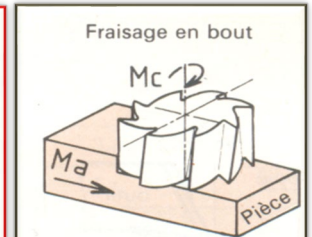
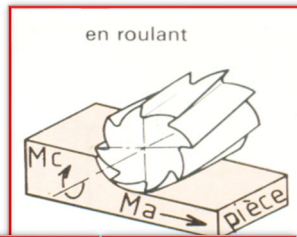
Caractéristiques des fraises :

- **type** : monobloc (en acier rapide) ou à dents amovibles (en carbure).
- **fonctionnalité (taille)** : à une taille (coupent uniquement sur la périphérie : surfaçage, tronçonnage, ..), à deux tailles (coupent en périphérie et en bout : cavités, faces planes perpendiculaires, ..) et à trois tailles (coupent en périphérie et sur chacune des faces : rainurage, ...)
- **forme** : cylindrique, coniques et de forme et ce, selon l'orientation de leur génératrice par rapport à l'axe de rotation.
- **denture** : nombre de dents ; orientation de la denture (droite, hélicoïdale à droite, à gauche, alternée...); forme des dents (triangulaire, arrondie, ...)
- **sens de la coupe** : à droite (sens horaire pour un obsrv. du côté entraînement) ou à gauche (le cas échéant)
- **Mode de fixation** : à trou (lisse ou taraudé) ou bien à queue (cylindrique ou conique)
- **Dimensions** : diamètre, hauteur taillée, diamètre de l'alésage (pour des fraises à trou), angle du cône (pour les fraises coniques)



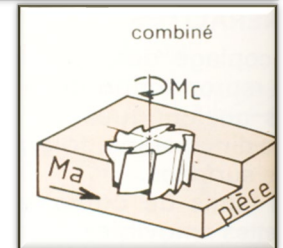
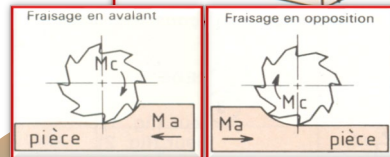
Modes de fraisage

- **De face ou aussi en bout** : l'axe est à la surface usinée.
- **De profil ou aussi en roulant** : l'axe est à la surface usinée. Ce mode peut s'exécuter en avalant ou en opposition. Le premier n'est approprié qu'en CNC.



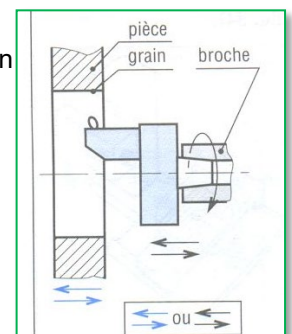
Montage de la pièce

- **sur étai** : pour les petites et moyennes pièces
- **sur table** : pour les pièces de formes ou de dimensions rendant impossible l'utilisation d'un étai. Il se fait par le biais de brides, de cales, de vis,
- **sur diviseur** : pour des pièces dont la géométrie exige une mesure précise des angles (méplats, hexagonales, cannelures, rainures hélicoïdales...)
- **sur plateau circulaire** : pour la réalisation de formes de révolution.



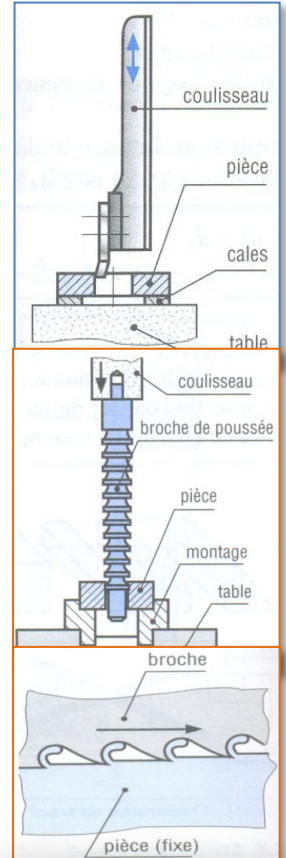
I.1.d. Alésage

- **Principe et applications** : Ce procédé consiste à mettre aux cotes désirées, à l'aide d'un outil à tranchant unique (appelé grain) ou multiples (alésoir), des trous cylindriques (borgnes ou débouchants).
- **Machine** : Ce procédé est réalisé sur des machines à aléser (également utilisées comme fraiseuses) possédant des tables sur lesquelles les pièces sont fixées (ce qui évite de faire tourner les pièces lourdes ou encombrantes). Ainsi le mouvement de coupe est donné à l'outil par la broche alors que les mouvements d'avance et de profondeur sont donnés soit à la pièce par la table ou à l'outil par le montant mobile (selon le type de machine).



I.1.e. Mortaisage

- **Principe** : Ce procédé permet, par le biais d'un outil à tranchant unique, d'obtenir des surfaces à génératrices rectilignes et parallèles.
- **Machine** : Ce procédé est réalisé sur des machines à mortaiser. Ainsi les mouvements d'avance et de profondeur sont donnés à la pièce par la table alors que le mouvement de coupe est donné à l'outil par le coulisseau vertical.
- **Applications** : Il est utilisé pour générer des ajours de forme à partir de trous cylindriques usinés ou d'ajours bruts de moulage (rainures de clavetage, cannelures, ...). Les formes réalisables sont généralement débouchantes afin de permettre le mécanisme de retour de l'outil.



I.1.f. Brochage

- **Principe** : Ce procédé permet de réaliser de façon rapide des surfaces à génératrices rectilignes (ou aussi hélicoïdales pour des surfaces intérieures) et ce, à l'aide d'outils à tranchants multiples appelés broches.
- **Machine** : Il s'agit de la machine à brocher qui confère le mouvement de coupe à la broche.
- **Util** : Chaque dent de la broche est décalée de celle qui la précède d'une distance équivalente à l'épaisseur du copeau à enlever par cette dernière. Ainsi un seul passage de la broche équivaut à plusieurs passes d'usinage (ébauche et finition).
- **Applications** : Ce procédé est réservé aux grandes séries à cause du coût élevé des broches (si le volume de production est faible il faudrait plutôt utiliser le mortaisage). Les formes réalisables sont : généralement des rainure de clavetage, des cannelures droites ou hélicoïdales,

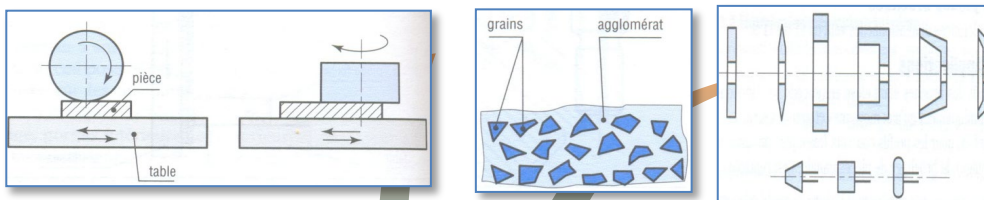


I.1.g. Perçage

- **Principe** : Ce procédé permet, de façon économique et par le biais d'un outil à tranchant multiples appelé mèche ou foret, de réaliser des trous cylindriques.
- **Machine** : Ce procédé est réalisé sur des perceuses (machines relativement simples et peu coûteuses) ou des perceuses - aléuseuses. Ces machines transmettent donc les mouvements de coupe et d'avance à l'outil.
- **Applications** : Trous sans précision (foret) , trous précis en forme et en dimension (foret -> foret aléueur -> alésoir de finition); trous précis en forme, en dimension et en position (foret -> foret aléueur -> alésoir de finition avec guide); trous fraisurés (foret -> fraise conique) ; trous lamés (foret -> fraise à lamer) ;

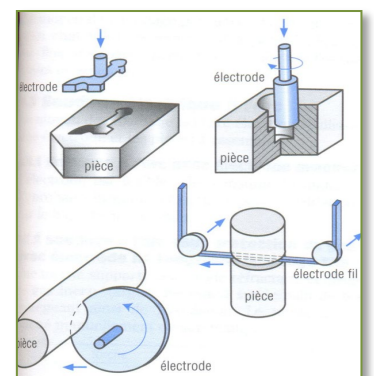
I.1.h. Rectification

- **Principe** : Ce procédé met en œuvre un grand nombre d'outils tranchants minuscules (abrasifs) incorporés dans une meule, pour donner au pièces à usiner un excellent état de surface. De part leur nature, les abrasifs sont capables d'usiner des métaux plus durs que ceux usinables par les procédés déjà vus.
- **Équipement** : L'opération est généralement réalisée sur des machines à table rectangulaire ou circulaire, dépendamment du mouvement qu'on souhaite imprégner à la pièce.
- **Applications** : pièces de précision usinées et traitées thermiquement.



I.1.i. Electroérosion

- **Principe** : L'usinage se passe par arrachement de particules de la pièce à usiner. Cette opération se passe dans un liquide diélectrique par la création d'un arc électrique entre l'outil et la pièce qui se comportent comme deux électrodes.
- **Types** : au fil (couper) ou par enfonçage (empreinte)
- **Applications** : Ce procédé est appliqué pour: l'usinage de métaux très durs (matrices et outils); l'obtention de surface complexes (empreintes de matrices); des applications nécessitant un usinage sans déformation



I.2. Usinage avec commande numérique (CNC)

I.2.a. Machines outil à commande numérique (MOCN)

- **Physionomie d'une MOCN**
 - **Structure mécanique** : Elle permet le déplacement précis des outils selon ses axes et ce, malgré les efforts engendrés par la coupe du métal. Elle permet également le déplacement de l'outillage servant à la coupe du métal et à la fixation de la pièce.
 - **Système de contrôle** : Il commande les déplacements relatifs de l'outil par rapport à la pièce. Il s'occupe également des différentes tâches connexes à l'opération de la machine.
- **Principales caractéristiques** (relativement à une machine-outil conventionnelle)
 - Possibilité d'interpolation circulaire ou autre.
 - Plus grande précision.
 - Plus grande résistance à l'usure des rails, vis, et transmissions.
 - Plus d'axes : Traditionnellement on retrouvait des machines à trois axes, pouvant faire des interpolations circulaires dans l'espace et des machines à deux axes et demi ne pouvant interpoler que dans un des plan principaux. Ensuite, apparaissent les machines à six axes : trois en translation X, Y et Z et trois en rotation A, B et C, relativement à X, Y et Z respectivement. Plus récemment, on retrouve des machines à 20 ou même 30 axes.
- **Désignation des axes principaux** : Comme pour les machines conventionnelles, Z est généralement choisi parallèlement à la broche et X horizontalement et suivant la longueur de la machine. Pour l'axe Y, présent uniquement en , il complète la base directe avec les 2 autres axes.

I.2.b. Principaux types

- **Tours à C.N.** : Ils ont généralement deux axes, Z orienté selon l'axe de la broche et X selon la direction transversale à l'horizontale. La structure des premiers tours à C.N. était reprise directement à partir des tours traditionnels. Aujourd'hui cependant, les bâtis sont beaucoup plus *robustes*.
- **Fraiseuses et centres d'usinage à C.N.** : Il en existe plusieurs types, dont les verticaux et les horizontaux qui sont les plus courants. Les plus versatiles sont les centres d'usinage universels.
- **Centres de tournage à C.N.** : Ils possèdent un troisième axe conféré par une poupée indexable (axe C : rotation autour de Z). Ils sont également équipés d'outils vivants (motorisés) permettant la réalisation de plusieurs opérations comme le fraisage latéral et de surface, le perçage excentrique, ...)



I.2.c. Principaux aspects mécaniques

- **Structure** : Elle comprend généralement des glissières doubles pour une rigidité accrue. De plus, des roulements linéaires sont de plus en plus utilisés à cause des grandes vitesses utilisées.
- **Bâti** : C'est la fonte grise qui utilisée comme matériau pour bâti et ce, en raison du rôle du graphite dans l'amortissement des vibrations. Afin d'améliorer la précision de la machine, le bâti est généralement conçu en fonction de la minimisation des variations thermiques internes.
- **Broche et moteur** : Afin d'atteindre des vitesses élevées, la broche est généralement supportée par des paliers à roulements et refroidie pour maintenir sa stabilité dimensionnelle.
- **Capacité d'une M.O.C.N.** : Elle est généralement exprimée en fonction des courses des différents axes (volume d'usinage), de la capacité du magasin à outil, de la gamme des vitesses de la broche, de la force du moteur, etc.
- **Mandrin** : Ils sont généralement hydrauliques et commandables à partir du programme de FAO.
- **Magasin d'outil** : Monté sur une tourelle ou un magasin à chaîne, il peut contenir généralement de 20 à 200 outils, dont certains peuvent être motorisés.
- **Magasin de pièces** : Il permet une utilisation intensive des machines (minimisation des temps morts) par la facilitation de la préparation de pièces pendant que d'autres sont en cours d'usinage.
- **Évacuation des copeaux** : De plus en plus, cette tâche est réalisée de façon automatique par la M.O.C.N. sans interruption de la production.
- **Fluides de coupe** : Comme pour l'usinage conventionnel, ces fluides sont abondamment utilisés pour un meilleur fini de surface, de meilleures tolérances, de moindres efforts de coupe et une plus facile évacuation des copeaux.

1.2.d. Fonctions de base du système de commande

- **Déplacement des axes** : opère sur les vis d'entraînement de chacun des axes. Elle utilise un encodeur rotatif ou linéaire pour mesurer la position de la table ou de l'outil. L'erreur sur la position est donc le résultat d'une erreur dans le décompte des impulsions de l'encodeur ou également une erreur d'interpolation linéaire quand des profils curvilignes sont à réaliser (5 à 10 µ).
- **Interpolation linéaire, circulaire et autres** : effectue des opérations mathématiques permettant la coordination des mouvements des différents axes pour obtenir un mouvement résultant linéaire, circulaire ou curviligne.
- **Fonctions de la console** : permettent à l'utilisateur d'afficher l'état de la machine, d'éditer et d'exécuter des programmes de fabrication et de régler certains paramètres d'opération.
- **Faciliter l'élaboration des programmes de fabrication** : à l'aide de différentes fonctions de calcul, de routines fixes (cycles de filetage, d'évidement et autres), de fonction de compensation pour la longueur et le rayon de l'outil, etc.
- **Détection de surcharge et de collision** : par le biais de senseurs de force.
- **Détection de l'usure des outils** : à l'aide de senseurs qui mesurent systématiquement la longueur des outils (détection de bris incluse) et qui mettent à jour ces données dans la base de données de la M.O.C.N.
- **Dispositif de localisation des pièces à usiner** : à l'aide de palpeurs qui permettent également de déterminer la quantité de métal à enlever et de vérifier la précision des pièces après usinage.
- **Fonctions de commandes adaptatives** : permettant l'ajustement des paramètres de coupe (profondeur, vitesse, ..) en fonction de certains critères (taux d'enlèvement de matière, puissance, ..).
- **Interfaces avec le monde extérieur** : pour la communication de données (programmes, statistiques) dans les deux sens.

1.2.e. Programmation manuelle en langage ISO

- **Structure d'un programme en langage ISO**
 - Ce langage, est articulé autour des codes G qui sont les codes des fonctions préparatoires de la machine. Les principaux codes G sont décrits plus loin dans cette section. Un programme en langage ISO est constitué de blocs. Chacun des blocs est l'ensemble de plusieurs "mots" standards à leurs tours constitués d'adresses suivies d'informations numériques
 - Un programme comprend en général, le bloc d'identification, l'en-tête, des sélections d'outil, des déplacements rapides, des passes de coupe, des retraits d'outils et le bloc de fin de programme. Seuls les éléments de programmation de la trajectoire sont au programme.
 - Il existe de légères différences entre l'organisation d'un bloc de programmation pour un centre de tournage et celle d'un bloc pour centre d'usinage (fraisage).
- **Principales Adresses**

MOT	DESCRIPTION
O mmm	mmm : numéro du programme (uniquement pour le premier bloc) ... ou aussi %
N nnnn	nnnn : numéro du bloc
G nn	Fonctions préparatoires (voir tableau de description plus loin)
X xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée absolue en X
Y xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée absolue en Y !!! FRAISAGE UNIQUEMENT
Z xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée absolue en Z (longueur)
I xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée (relative/ point de départ) en X du centre du cercle (interpolation circulaire)
J xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée (relative/ point de départ) en Y du centre du cercle (interpolation circulaire) !!! FRAISAGE UNIQUEMENT
K xxx.xxx	xxx.xxx : coordonnée (relative/ point de départ) en Z du centre du cercle (interpolation circulaire)
R xxx.xxx	xxx.xxx : Rayon de l'arc de cercle (interpolation circulaire)
F xxx.x	Avance en mm/ minute ou en mm par tour et ce, selon la fonction préparatoire préalablement choisie (G94 ou G95)
S xxxx.	xxxx.: vitesse rotationnelle (tr/min) ou en vitesse périphérique (m/min) et ce, selon la fonction préparatoire préalablement choisie (G97 ou G96)
T nnmm	Identification de l'outil où nn est la position de l'outil dans le magasin et mm est le registre de mémoire contenant sa correction.
M nn	Fonctions technologiques (voir tableau de description plus loin)

Identification des principales fonctions préparatoires G et fonctions technologiques M

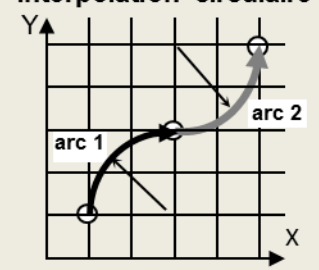
CODE	FONCTION	CODE	FONCTION
G00	Déplacement rapide à un point	M30	Fin du programme ou aussi M02
G01	Interpolation linéaire entre deux points	M03	Rotation de la broche en sens horaire
G02	Interpolation circulaire en sens horaire	M04	Rotation de la broche en sens anti-horaire
G03	Interpolation circulaire en sens anti-horaire	M05	Arrêt de la broche
		M08	Arrosage du fluide de coupe
		M09	Arrêt de l'arrosage

– Interpolation linéaire (G01- G00)

- La fonction G01 permet l'interpolation linéaire à partir du point **actuel** jusqu'au point cible en prescrivant les coordonnées de ce dernier.
- Lors des séquences utilisant G01, l'outil avance à la vitesse définie par le dernier mot F (vitesse d'avance) contrairement à la fonction G00 qui permet le déplacement rapide (100% de la vitesse permise par la machine) et qui n'est utilisée que pour des déplacements hors zone d'usinage (soit en attaquant la matière ou même en dégagement).

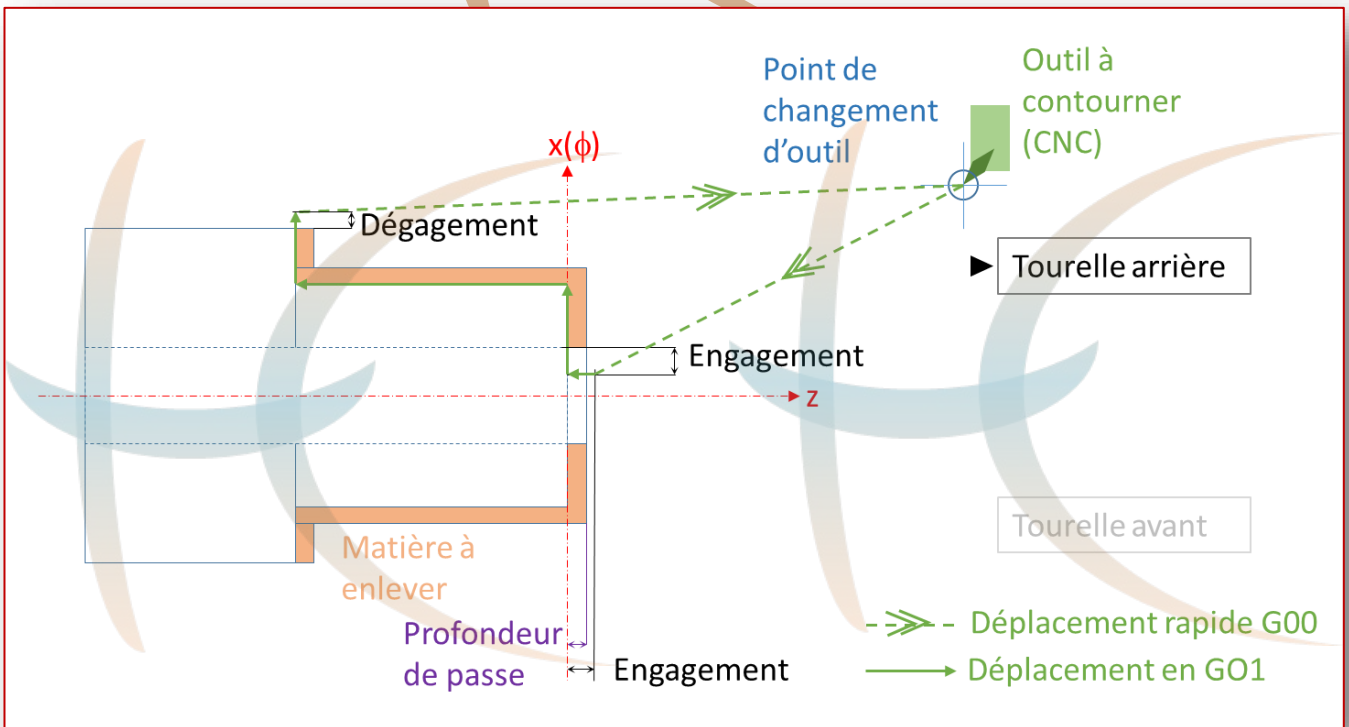
– Interpolation circulaire (G02 et G03)

- Le sens horaire (G02) ou antihoraire (G03) doit être déterminé par une observation du côté positif du troisième axe (axe perpendiculaire au plan d'interpolation).
- L'interpolation se fait en prescrivant
 - » les coordonnées du point cible [adresses X, Y, Z] ainsi que
 - » des coordonnées relatives du centre d'interpolation (par rapport au point de départ) [adresses I, J, K] ou le rayon de l'arc de cercle (dans ce cas l'arc ne doit pas dépasser 180°) [adresse R]

en utilisant les coordonnées du centre d'interpolation N1000 (1 ^{er} arc) N1010 (2 ^{em} arc) ou en utilisant les rayons N1000 (1 ^{er} arc) N1010 (2 ^{em} arc)	Interpolation circulaire 
--	--

– Engagement (pré-coupe) et dégagement

- Par souci de sécurité, l'approche rapide par la fonction G00 doit obligatoirement s'arrêter à quelques mm de la matière. L'approche de la pièce se poursuit alors avec l'avance de coupe (G01). Cette distance est appelée engagement ou pré-coupe. Elle doit être obligatoirement supérieure à la profondeur de la passe à exécuter.
- A la fin de l'usinage et pour les mêmes raisons, le dégagement rapide de l'outil (G00) ne peut s'amorcer qu'après un éloignement de la matière de quelques millimètres. Cette distance est appelée dégagement.
- Note : en tournage, l'axe X désigne les diamètres (pour plus de convenance de point de vue contrôle).

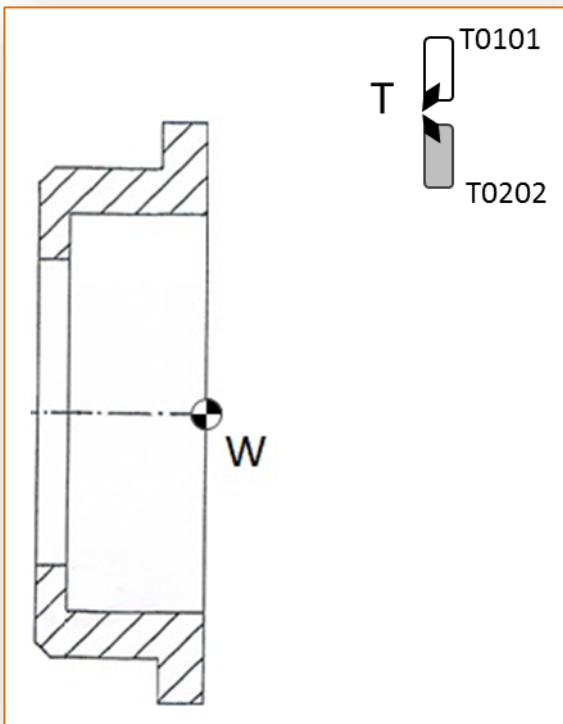
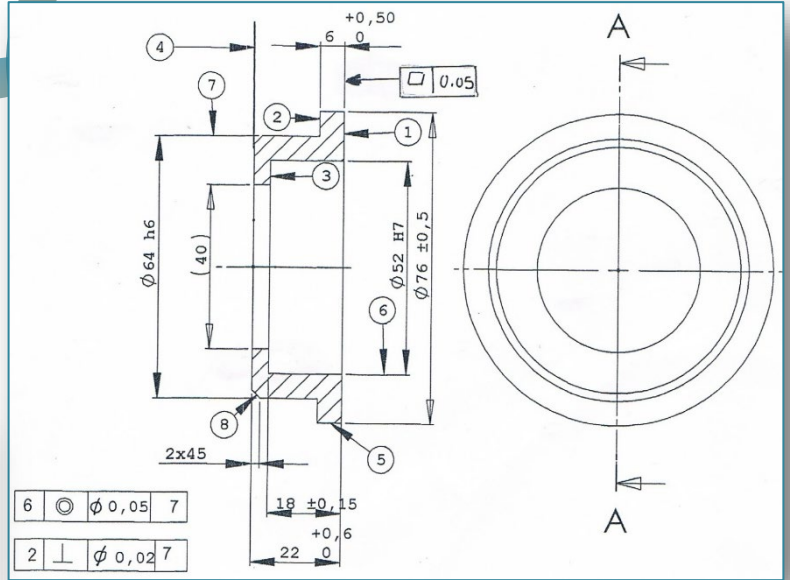


Application

Dans cette partie on se propose d'étudier la fabrication du boîtier (24) dont le dessin de définition est représenté ci-dessous. Le brut de ce boîtier est en EN-GJL 150. Il est obtenu par moulage en sable noyauté. La surépaisseur d'usinage est de 2mm sur les longueurs et sur les rayons. Les surfaces usinées sont numérotées de 1 à 8. Les autres surfaces resteront brutes.

On s'intéresse à la finition, sur un tour à commande numérique à tourelle arrière, des surfaces 1 et 5 à l'aide d'un outil à contourner (T0101) et des surfaces 6 et 3 à l'aide d'un outil à aléser et dresser (T0202). Les deux outils sont montrés ci-contre au point de changement d'outil T de coordonnées (X80, Z60).

Sur le graphique ci-dessous, représenter la trajectoire de l'outil en distinguant les avances rapides des avances en vitesse de coupe.



O1014				
N0010	G55	T0101	G96	S150
N0020	G95	F0.1	M03	M08
N0030	G92	S3000		
N0040				

Complétez le programme donné ci-contre sachant que la profondeur de passe est de $p=0.5$ mm (sur rayons et longueurs) et que le changement d'origine vers le point W est effectué par le mot G55. On conserve les mêmes conditions de coupe durant tout le programme. De plus on désire avoir un engagement (précoupe) et un dégagement de 2 mm quand cela est possible.