

Sommaire :

Avant-propos	1
Chapitre 1. Introduction à la commande numérique	2
1.1 Historique	2
1.2 Impact industriel de la CN, son environnement et ses développements	2
1.3 Comparaison de la MO à CN avec les machines classiques	2
Chapitre 2. Eléments de la machine-outil à commande numérique	4
2.1 Définition	4
2.1.1 Schéma de la machine-outil à commande numérique	4
2.1.2 Principe de fonctionnement	5
2.2 Particularités de fonctionnement	5
2.2.1 Eléments de la commande principale	5
2.2.2 Eléments du mécanisme d'avance	6
2.2.3 Exemple de calcul d'une commande d'avance	6
2.3 Modes de fonctionnement de la machine-outil à commande numérique	7
2.3.1 Systèmes à boucle fermée	8
2.3.2 Systèmes à boucle ouverte	8
Chapitre 3. Classification des machines-outils à commande numérique	9
3.1 Classification suivant le déplacement de la table	9
3.1.1 Machines point par point	9
3.1.2 Machines paraxiales	9
3.1.3 Machines de contournage	10
3.2 Classification selon le nombre d'axes	10
3.2.1 Deux axes simultanés	10
3.2.2 Trois axes commutables	10
3.2.3 Deux axes plus un	11
3.2.4 Trois axes simultanés	11
3.2.5 Trois axes commutables	11
3.2.6 Quatre axes	11
3.2.7 Plus de quatre axes	11
3.3 Selon le mode de fonctionnement du système de mesure	11
3.4 Selon le mode d'entrée des informations	11
Chapitre 4. Types de machines-outils à commande numérique	12
4.1 Centre d'usinage	12
4.2 Centre de tournage	12
4.3 Machines à commande numérique adaptative	13
4.4 Cellules flexibles	13
4.4.1 Caractéristiques des systèmes flexibles	14
4.4.2 Objectifs des systèmes flexibles	14
4.4.3 Exemple d'une cellule flexible	15
Chapitre 5. Traitement de la mesure sur les machines-outils à commande numérique	17
5.1 Traitement de la mesure sur machine CN	17
5.2 Traitement de la mesure sur machine CNC	18
5.3 Systèmes de mesure	19
5.3.1 Mesure indirecte	19
5.3.2 Mesure directe	19
5.3.3 Systèmes de mesure mixte	20
5.4 Principe de mesure	20
5.4.1 Mesure incrémentale	20

5.4.2	Mesure absolue	20
5.4.3	Mesure absolue cyclique	20
5.5	Contrôle de déplacements	21
5.5.1	Capteurs numériques	21
5.5.2	Capteurs analogiques	21
Chapitre 6.	Programmation manuelle sur machines-outils à commande numérique	23
TD N°1.	Repérage des axes	23
1.1.	Définition et implantation des axes	23
1.2.	Modes de cotation	24
1.3.	Systèmes de référence	25
TD N°2.	Etude de la programmation	27
2.1	Choix du type de programmation	27
2.2	Programmation manuelle	27
2.2.1	Langage de programmation	28
2.2.2	Formats des langages	28
2.2.3	Fonctions de programmation	30
2.2.4	Fonctions usuelles de programmation	32
TD N°3.	Manipulation des fonctions de programmation par des exercices	34
Exercice N°1	.....	34
Exercice N°2	.....	35
Exercice N°3	.....	36
TD N°4.	Programmation sur un tour	37
TD N°5.	Programmation sur une fraiseuse	39
Devoir à domicile	.....	41
Références bibliographiques	.....	42

Avant-propos :

Apparue il y a seulement quelques dizaines d'années, la commande numérique impose actuellement sa technologie dans le monde de l'usinage. Dans un premier temps, elle a permis de franchir un pas important dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles telles que les tours, fraiseuses, perceuses et aléseuses qui sont devenues capables d'assurer, en quantité comme en qualité, une production à peine imaginable quelques années auparavant.

La commande numérique est également à l'origine de nouvelles conceptions de machines polyvalentes comme les centres d'usinage et les cellules flexibles. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la micro-électronique et de l'informatique, la commande numérique voit ses performances et sa convivialité augmenter régulièrement. En revanche, son prix et son encombrement ne cessent de diminuer. De ce fait, la commande numérique devient accessible à tous les secteurs industriels faisant appel aux procédés de positionnement ou de suivi de trajectoire à partir des instructions d'un programme sans intervention directe de l'opérateur.

Symbole de précision, de répétitivité, de fiabilité et de flexibilité, qualités primordiales dans une économie de marché où les produits se caractérisent en termes de prix, de qualité et de délai de mise à disposition, la commande numérique se montre économiquement intéressante pour produire à l'unité ou en série toutes les sortes de pièces, même les plus simples. Il convient en outre, de souligner que la commande numérique ouvre de nouvelles perspectives en permettant la définition de pièces complexes qu'il est pratiquement impossible de concevoir et de fabriquer sur des machines-outils conventionnelles.

Ce cours vise à apporter aux étudiants les connaissances fondamentales de la commande numérique. Après un bref rappel historique de son évolution, on s'attache à justifier son utilisation, à décrire la constitution physique des machines qui en sont pourvues. A la fin, les nombreux outils mis à la disposition de l'opérateur pour faciliter la programmation et la conduite de la machine sont également évoqués par des exemples.

Chapitre 1. Introduction à la commande numérique

1.1 Historique.

La commande numérique est une technique dont les applications semblent destinées à un développement important en raison de très grands avantages qu'elle apporte, non seulement dans l'usinage proprement dit, mais aussi dans de nombreux domaines tels que la métrologie, le soudage, l'oxycoupage, le guidage des faisceaux Laser, l'électroérosion, le découpage par jet d'eau, etc.

La commande numérique a fait son apparition aux USA pendant la dernière guerre mondiale (la première MOCN date de 1942) pour l'usinage des pièces de réacteurs si complexes qu'il fallait les usiner à la main auparavant. Le vrai lancement de cette technologie a eu lieu à l'exposition de Chicago (USA) en 1952 par les sociétés Cincinnati Milling Corporation, MIT, etc. mais c'est vers 1960 que l'usinage sur MOCN a commencé à entrer dans la pratique courante dans ce pays. Quelques années plus tard, les pays Européens ainsi que le Japon ont entrepris le développement de cette technique dans leurs industries. A l'heure actuelle, la commande numérique encore en pleine évolution, se répond dans les ateliers de fabrication d'une manière significative. En France, les implantations de MOCN ont atteint 60000 machines environ sur la période allant de 1990 à 1998 pour la modernisation de l'outil de production dans les PME. Le Japon, à son tour, détient au-delà de 50% du marché mondial des MOCN. Au Canada, les MOCN ont pénétré la grande majorité des entreprises manufacturières surtout au Québec. D'après ce bref historique, on peut dire que la commande numérique répondait principalement à un problème technique et non pas à un problème économique.

La terminologie employée dans le domaine de la commande numérique peut être présentée de la manière suivante :

- ✓ La technologie CN (Numerical Control) : terme utilisé pour le contrôle numérique avec des verniers, des appareils de mesure, etc.
- ✓ La technologie CNC (Computerized Numerical Control) : l'ordinateur est utilisé pour contrôler les déplacements dans les MOCN.
- ✓ La technologie DCN (Distributed Numerical Control) : ce système est utilisé pour piloter un ensemble de MOCN. Actuellement, le terme DCN (Direct Numerical Control) signifie souvent qu'une machine est pilotée par un ordinateur.

1.2 Impact industriel de la CN, son environnement et ses développements.

Dans le domaine de l'usinage, le but de cette technique est de réaliser la préparation et l'exécution du travail par des procédés tels que l'intervention humaine est pratiquement supprimée.

Les avantages de cette technique sont de deux sortes : d'une part, les données relatives à un usinage déterminé sont enregistrées et peuvent être rappelées au moment désiré et d'autre part, des usinages extrêmement difficiles sont réalisables sur ce type de machines sans avoir recours à un travail manuel complémentaire grâce au guidage automatique de tous les déplacements relatifs des outils par rapport à la pièce.

L'emploi de la commande numérique représente une véritable escalade dans le domaine de l'usinage. Elle a conduit, d'une part, à une suppression presque totale des ouvriers qualifiés auprès des machines et d'autre part, elle exige l'intervention d'un personnel dont la qualification est de plus en plus proche à celle des Ingénieurs pour préparer les programmes de fabrication.

1.3 Comparaison de la MO commande numérique avec les machines classiques.

Afin de comparer les MO à commande numérique avec celles classiques, on doit fixer des critères :

A) Par rapport à la structure et les caractéristiques :

- ✓ Les fonctions remplies sont les mêmes qu'une MO conventionnelle ;
 - Positionner et maintenir la pièce ;
 - Positionner et maintenir l'outil ;
 - Assurer les mouvements relatifs entre l'outil et la pièce.
- ✓ La qualité mécanique générale de ces machines est de beaucoup supérieure aux MO conventionnelles ;
 - Motorisation plus puissante ;
 - Chaîne cinématique plus simple et plus robuste à variation continue, capable d'encaisser des accélérations et des décélérations importantes ;
 - Commande des chariots par vis à billes avec rattrapage automatique du jeu ;
 - Glissières sans frottements utilisant des galets, des billes, lubrification hydrostatique et des garnitures rapportées ;
 - Bâtis largement dimensionnées, très rigides avec un excellent amortissement.

B) Par rapport aux caractéristiques principales :

- ✓ Puissance et vitesse élevées ;
- ✓ Robuste et bonne résistance à l'usure ;
- ✓ Déplacement rapide, précis, accélérations et décélérations très élevées ;
- ✓ Spécifications métrologiques très serrées ;
- ✓ Frottements et jeux très faibles ;
- ✓ Peu de vibrations ;
- ✓ Faible échauffement.

C) Par rapport à la commande :

- ✓ Commande souple : le calculateur a la possibilité de mémoriser les instructions de commande et les informations relatives à la pièce et de les réutiliser autant de fois. Par contre, la commande des machines conventionnelles est rigide. Elle est assurée par des mécanismes mécaniques tels que les baladeurs, les cames, les embrayages, etc.

Chapitre 2. Eléments de la machine-outil à commande numérique

2.1 Définition.

Une machine-outil à commande numérique est une machine d'usinage à cycle automatique programmable. Le directeur de commande numérique (calculateur) assure la commande des organes mobiles de la machine à l'aide des consignes numériques en vitesse et en position. Les consignes relatives à la commande et à la forme des pièces sont introduites soit directement par le clavier ou à travers des supports indépendants tels que les bandes perforées et les bandes magnétiques.

2.1.1 Schéma de la machine-outil à commande numérique.

Ce type de machines se compose de deux parties : (figure 2.1)

- La partie opérative : représente la machine elle-même. Elle est identique aux machines conventionnelles dans la fonction "usinage" mais elle possède des performances supérieures. Elle peut posséder plusieurs têtes d'usinage motorisées selon un ou plusieurs systèmes d'axes indépendants et elle comporte également des éléments annexes pour commander les dispositifs de serrage et de lubrification.
- La partie commande : c'est le cerveau de la machine, appelé directeur de commande numérique (DCN). Ce dernier envoie des ordres de commande de rotation et de déplacement aux organes mobiles de la machine à partir des valeurs de consignes décrites dans le programme de la pièce à réaliser.

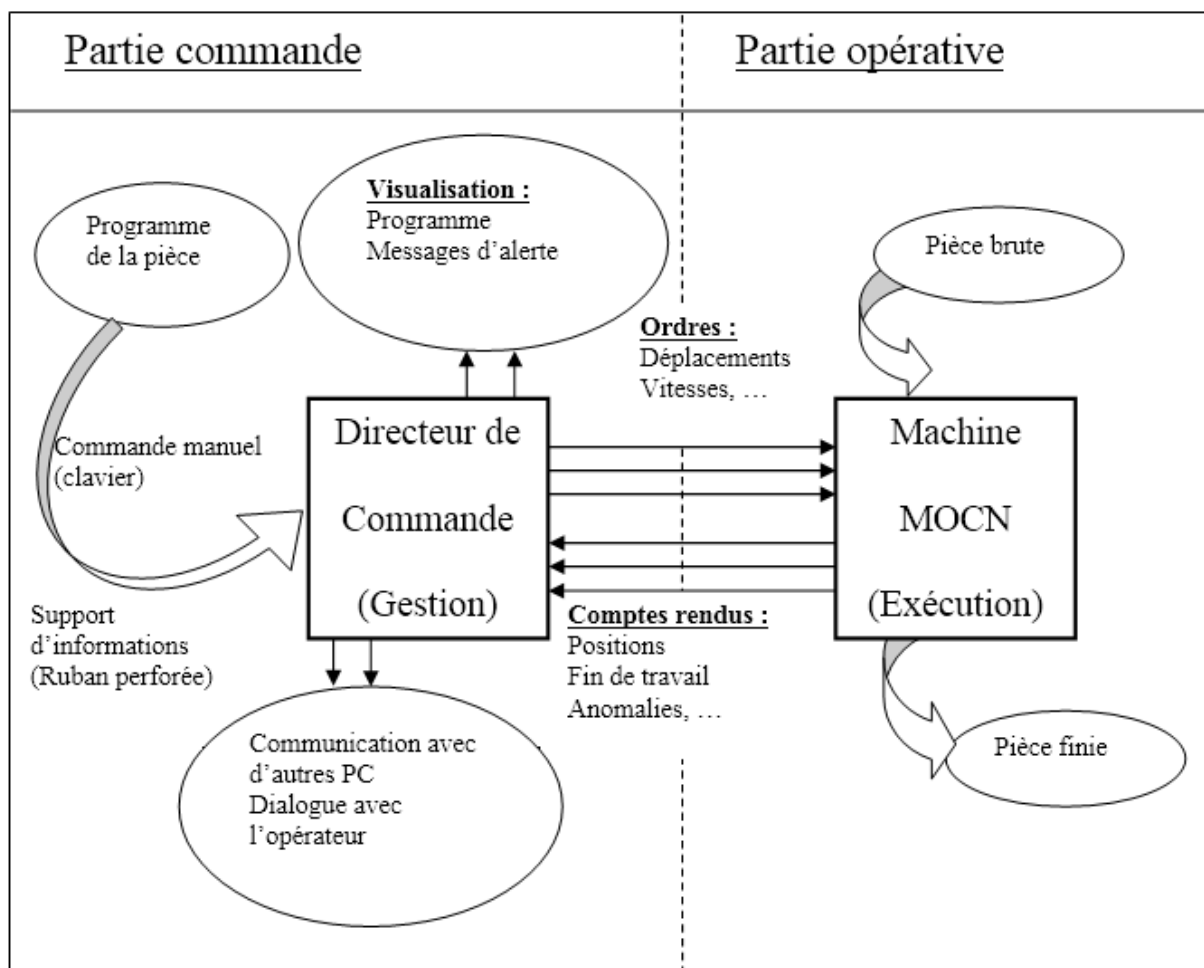


Figure 2.1. Structure d'une machine-outil à commande numérique

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

On peut citer les fonctions suivantes :

- Interprétation du programme d'application,
- Détermination des phases de travail (blocs exécutables),
- Calcul des consignes successives sur la trajectoire,
- Elaboration de l'écart de poursuite et des corrections nécessaires,
- Gestion des données et des mesures,
- Surveillance des erreurs.

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

- Commande des actionneurs auxiliaires,
- Modes de marche et d'arrêt,
- Commande de distribution d'énergie,
- Traitement des informations de sécurité.

Enfin, elle assure une fonction dialogue avec l'opérateur.

2.1.2 Principe de fonctionnement.

Le fonctionnement d'une machine commandée numériquement revient presque toujours à obtenir un signal déclenché par les consignes contenues dans une bande perforée ou par l'introduction du programme à travers le clavier. Ce signal, suffisamment amplifié, agit sur le moteur intéressé dans le sens et la vitesse désirés.

2.2 Particularités de fonctionnement.

L'asservissement précis, rapide et stable de la position des différents organes mobiles a conduit les constructeurs de machines à redessiner complètement leurs systèmes d'entraînement. Une attention particulière a été apportée notamment sur les notions de rigidité, de réduction des frottements et de maîtrise des forces d'inertie de manière à favoriser des mouvements fréquents à vitesses et accélérations élevées, sans apparition d'usure intensive ni perte de précision. La plupart des solutions retenues pour la réalisation des déplacements adoptent des solutions faisant appel à des moteurs à faible inertie et fort couple, des vis à billes précontraintes et des principes de montage rigide sans jeu.

2.2.1 Eléments de la commande principale.

La commande des broches de machines est essentiellement confiée à des moteurs asynchrones. Conçus pour être utilisés à puissance constante sur la plus large plage de vitesses possible, ces moteurs peuvent délivrer des puissances de plus de 100 kW et peuvent tourner à des vitesses de rotation allant jusqu'à 12000 tr/min. Des vitesses nominales plus faibles (en général, 750 tr/min) sont également proposées pour des applications demandant un couple élevé à basse vitesse. Les moteurs synchrones autopilotés à courant alternatif sont aujourd'hui les plus fréquemment utilisés. Plus connus sous le nom de moteurs sans balais (*brushless*), ils se caractérisent par une grande robustesse, une très bonne dissipation thermique, des vitesses élevées (entre 4000 et 10000 tr/min), un entretien pratiquement nul, une puissance massique élevée (moteur plus compact pour un même couple) et un moment d'inertie du rotor très faible. Le principe de commande le plus couramment retenu pour ces moteurs est de type sinusoïdal, en raison de la bonne stabilité qu'il procure à basse vitesse.

2.2.2 Eléments du mécanisme d'avance.

La chaîne cinématique assurant les déplacements dans une machine-outil à commande numérique est très simple, mais elle garantit une bonne précision. Elle doit assurer le déplacement de l'organe mobile et doit être la plus courte et la plus directe possible.

Pour faire déplacer un chariot, si les caractéristiques et l'encombrement du moteur le permettent, on entraîne directement la vis. Dans le cas contraire, on réalise un étage de réduction sans jeu avec une paire de roues dentées ou avec une transmission par courroie crantée (figure 2.2).

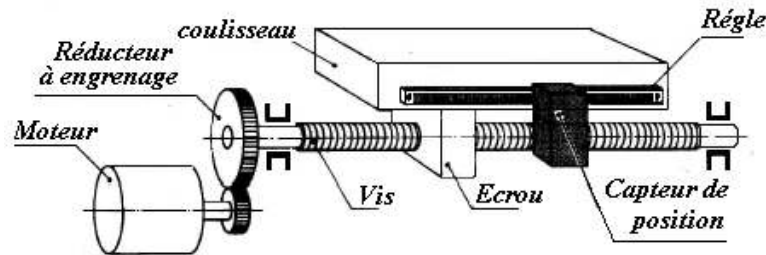


Figure 2.2. Mécanisme d'avance

Les moteurs pas à pas sont conçus de manière à tourner d'une valeur angulaire fixe donnée à chaque impulsion transmise par leur électronique de commande. Le contrôle du nombre d'impulsions permet la réalisation d'un déplacement très précis. Ces moteurs peuvent fournir des couples importants à des vitesses moyennes. En contrepartie, ils ont tendance à chauffer rapidement et perdent leur capacité d'accélération à haute vitesse.

Des variateurs électroniques de vitesse peuvent être installés pour que la vitesse de déplacement d'un mobile reste constante quelle que soit la variation de charge qui lui est appliquée. Les plus répandus se raccordent directement sur le réseau triphasé 380V. Ils bénéficient de la technique de contrôle vectoriel de flux qui leur permet de maîtriser parfaitement la vitesse et le couple du moteur et offrent la capacité de freiner celui-ci jusqu'à l'arrêt complet, même en cas de disparition intempestive du réseau d'alimentation.

Au niveau même de l'organe du mobile, le dispositif le plus couramment utilisé est du type vis-écrou à billes (figure 2.3). Il se compose d'un filet de précision, d'un jeu de billes recirculantes et de deux écrous précontraints en traction pour compenser les dilatations thermiques. Cette solution se traduit par un frottement minimum et une absence de jeu lorsque la précharge est correctement choisie.

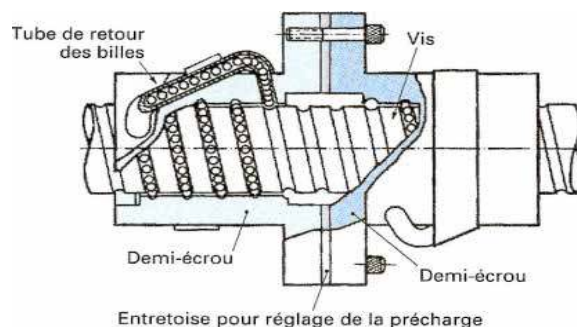


Figure 2.3. Vis à billes

2.2.3 Exemple de calcul d'une commande d'avance.

Selon la figure 2.4, le moteur pas à pas tourne exactement au nombre d'impulsions et s'arrête en fin de la dernière impulsion.

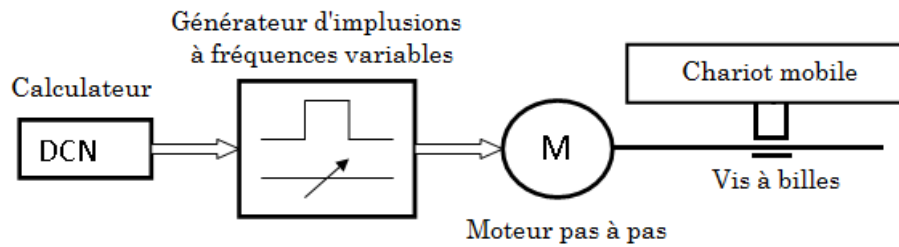


Figure 2.4. Chaîne cinématique d'avance

Le déplacement demandé correspond donc au nombre d'impulsions (figure 2.5).

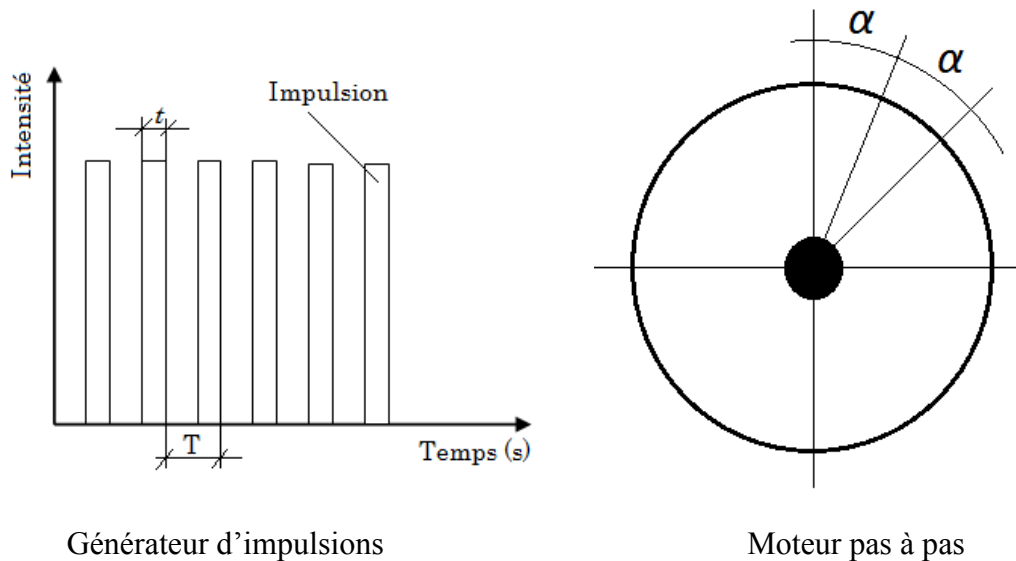


Figure 2.5. Mode de génération des impulsions pour piloter le moteur pas à pas

Exemple :

Calculer la vitesse d'avance et le nombre d'impulsions N_i nécessaire pour se déplacer d'une valeur $X = 60\text{mm}$ si :

- Le pas de la vis à billes : $P_v = 3\text{mm}$
- La durée d'une impulsion : $t = 0,025\text{s}$ (α correspondant = 1.2°)
- La périodicité des impulsions : $T = 0.03\text{s}$

La précision de la machine (le pas linéaire généré par une impulsion) :

$$P = P_v \times \alpha / 360^\circ = 3 \times 1.2^\circ / 360^\circ = 3.6 / 360 = 0.01\text{mm}$$

Le nombre d'impulsion total :

$$N_i = X / P = 60 / 0.01 = 6000 \text{ Impulsions}$$

Le temps total de déplacement :

$$t_u = N_i \times T = 6000 \times 0.03 = 180\text{s}$$

La vitesse d'avance :

$$a = X / t_u = 60 / 3 = 20\text{mm/min}$$

2.3 Modes de fonctionnement de la machine-outil à commande numérique.

D'après le principe de fonctionnement d'une machine-outil à commande numérique, un déplacement doit correspondre à une valeur déterminée lors de la préparation de travail et qu'on l'appelle « grandeur de consigne ». Il se peut, pour des raisons variées (jeu

cinématique, échauffement, etc.) que le déplacement réel ne correspond pas exactement à la valeur de consigne. Alors, deux systèmes de réception des ordres de déplacement fixent le mode de fonctionnement de la machine.

2.3.1 Systèmes à boucle fermée

Le système est dit à boucle fermée si un dispositif de correction permet de donner le déplacement juste nécessaire par comparaison de la position réelle de l'organe mobile avec celle imposée comme valeur de consigne. Dans ce cas, soit le capteur attend l'organe mobile et le ramène à la position exacte ou bien il l'accompagne constamment et en corrige sans cesse la position. Dans ce système, la précision est garantie mais son coût est élevé suite à la mise en place des moyens de contrôle sur la machine comme montre la figure 2.6.

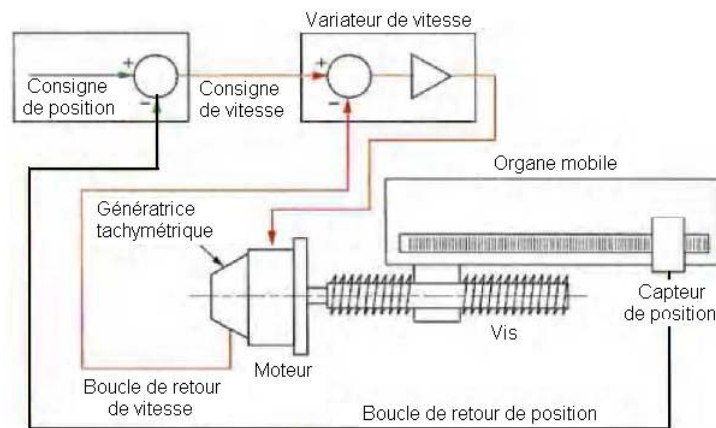


Figure 2.6. Système en boucle fermée

2.3.2 Systèmes à boucle ouverte

Le système est dit à boucle ouverte s'il ne dispose pas de retour de l'information (pas de comparaison). Dans ce système, on admet que les erreurs de fonctionnement sont suffisamment faibles étant donnée des progrès réalisés dans la fabrication des moteurs pas à pas et des vis à billes. Ce système est extrêmement simple comme montre la figure 2.7.

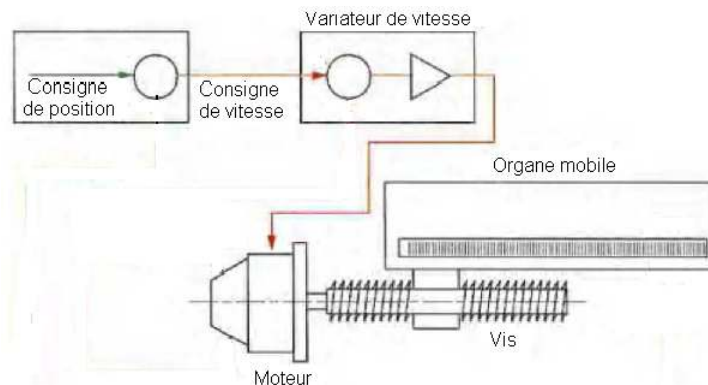


Figure 2.7. Système en boucle ouverte

Chapitre 3. Classification des machines-outils à commande numérique

Les MO à CN se classent en fonction de quatre critères :

3.1 Classification suivant le déplacement de la table.

En fonction du mode de fonctionnement qui définit les positions successives de l'outil par rapport à la pièce et qui sont toujours schématisées par un déplacement de l'outil et ce quelque soit le type de machine, on rencontre trois cas :

3.1.1 Machines point par point.

La commande numérique point à point est la forme la plus élémentaire des CN. Elle trouve son utilisation sur les perceuses où elle commande les déplacements de la table selon les axes X et Y (figure 3.1).

Elles sont destinées essentiellement aux travaux de pointage, de perçage, d'alésage et le soudage par point. Dans le cas de perçage, on peut amener tour à tour les centres des trous à percer sous l'axe Z de l'outil. Pour passer d'un centre à un autre, aucune trajectoire précise n'est imposée. Le plus souvent, les déplacements à vide se font simultanément sur les deux axes et à la vitesse maximale, le positionnement est réalisé à vitesse réduite.

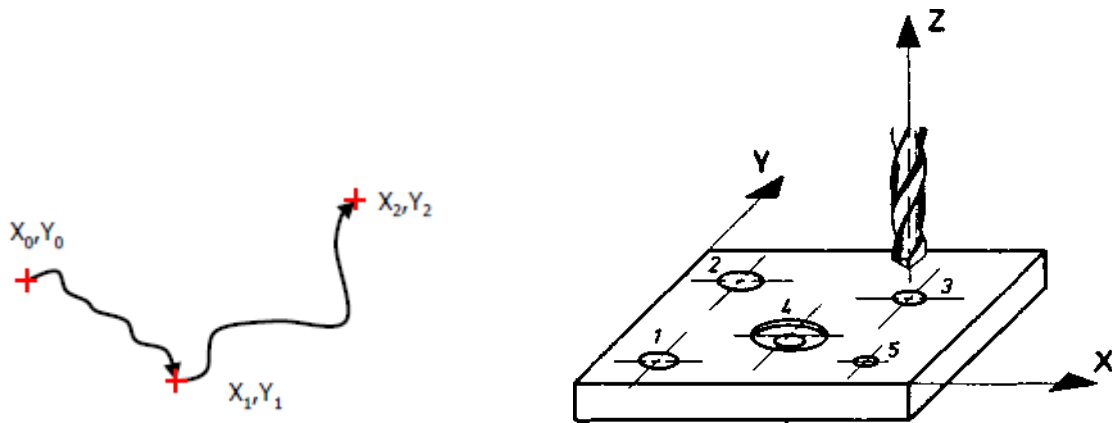


Figure 3.1. Commande numérique point à point

3.1.2 Machines paraxiales.

Outre le positionnement précis point par point, la commande numérique paraxiale (figure 3.2) permet de contrôler la vitesse des déplacements s'effectuant parallèlement aux axes de coordonnées (x, y, et z) pour des travaux de tournage, fraisage, rectification, etc. La vitesse d'avance est programmée et un usinage peut être fait pendant le déplacement. Ce genre de CN équipe certaines fraiseuses simples, quelques aléseuses fraiseuses et des perceuses pouvant exécuter de petits fraisages.

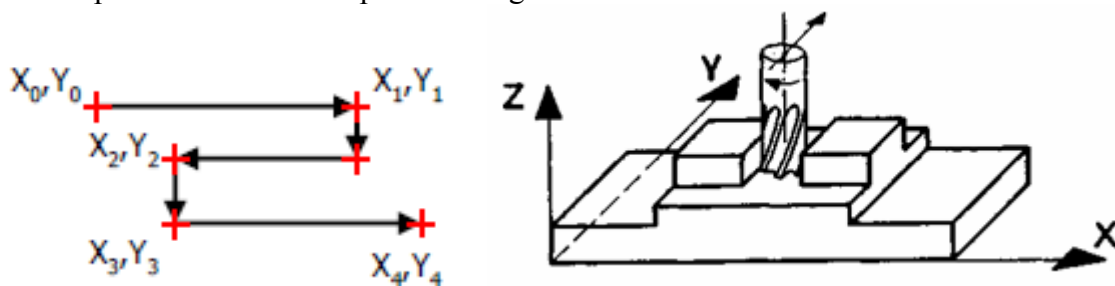


Figure 3.2. Commande numérique paraxiale

3.1.3 Machines de contournage.

La commande numérique de contournage (figure 3.3) est la plus courante des CN. Elle est nécessaire sur tous les tours pour l'usinage des cônes et des arrondis, les fraiseuses et les centres d'usinages. Le calculateur intégré dans le directeur de CN permet l'interpolation linéaire et circulaire.

Dans le cas de l'interpolation linéaire, les coordonnées des points A et B sont données à la CN lors de la programmation. Lors de l'usinage, le calculateur calculera les coordonnées d'un certain nombre de points de la droite AB et permettra ainsi de conduire l'outil de A à B suivant cette trajectoire oblique.

Dans le cas de l'interpolation circulaire, les coordonnées des points A et B ainsi que celui du centre C sont données à la CN lors de la programmation. Au cours de l'usinage, le calculateur fournit les coordonnées de points rapprochés de l'arc de cercle AB et permet ainsi de conduire l'outil le long de cet arc.

Les CN de contournage permettent donc d'usiner tous les contours formés de droites et d'arcs de cercle. Certaines CN offrent la possibilité d'une interpolation parabolique ou selon d'autres courbes définies mathématiquement.

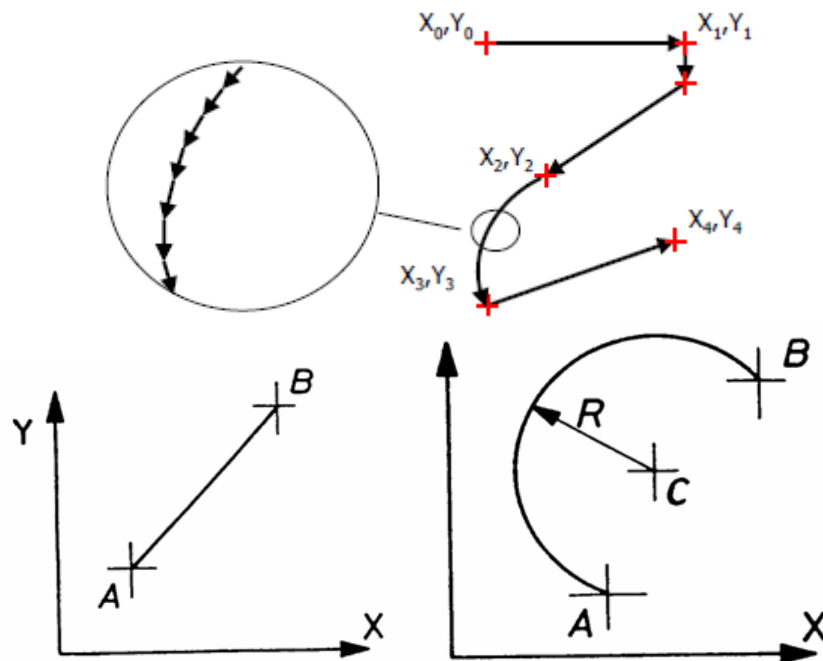


Figure 3.3. Commande numérique de countournage (interpolation linéaire et circulaire)

3.2 Classification suivant le nombre d'axes.

On compte un axe par degré de liberté des éléments de la machine si le mouvement est commandé numériquement et d'une manière continue. Le nombre d'axes varie généralement entre 2 et 7 axes.

3.2.1 Deux axes simultanés :

Les deux axes doivent être commandés simultanément pour que l'usinage soit réalisé. Cas de tournage, de fraisage, de perçage, etc.

3.2.2 Trois axes commutables :

Les axes commutables permettent un usinage successif dans chaque plan. Sur la fraiseuse 3 axes par exemple, on peut réaliser le fraisage dans les 3 plans successivement.

3.2.3 Deux axes plus un :

Deux axes peuvent être commandés simultanément. Après blocage des deux axes précédents, le troisième axe peut être commandé. Cas des chariots en plongée en tournage après blocage des mouvements dans le plan horizontal, déplacement de la broche en fraisage après blocage des mouvements dans le plan horizontal, etc.

3.2.4 Trois axes successifs :

Dns ce type de machines, un seul moteur assure la commande du déplacement. L'asservissement d'un axe (X ou Y ou Z) se fait en sélectionnant un embrayage (EX, EY, EZ) correspondant à la trajectoire à contrôler.

3.2.5 Trois axes simultanés :

Les trois axes doivent être commandés simultanément pour que l'usinage soit réalisé. Cas d'usinage d'une rainure hélicoïdale sur un cône en tournage ou en fraisage.

3.2.6 Quatre axes :

Le quatrième axe est souvent la rotation d'une plate forme sur une fraiseuse ou un travail simultané avec deux outils sur un tour.

3.2.7 Plus de quatre axes :

Dans cette catégorie, on trouve les machines de complexité élevée :

- Fraiseuse 5 axes,
- Tours 7 axes : 3 axes linéaires, un axe de rotation sur une tourelle avant, une broche principale, broches secondaires en rotation et en déplacement.

3.3 Selon le mode de fonctionnement du système de mesure.

D'après ce critère, on trouve les systèmes en boucle ouverte et en boucle fermée.

3.4 Selon le mode d'entrée des informations.

D'après ce critère, les informations peuvent être introduites manuellement par clavier, par ruban perforée ou magnétique, par ordinateur principal (DCN) ou en clair (par conversation).

Chapitre 4. Types de machines-outils à commande numérique :

Les machines-outils à commande numérique sont de différents types :

4.1 Centres d'usinage

La commande numérique est à la base du développement de ce qu'on appelle les centres d'usinage. Au début, ces machines étaient de simples aléseuses-fraiseuses dont les possibilités d'usinage étaient améliorées au moyen d'accessoires variés. Les centres d'usinage sont dotés de nombreux outils qui permettent des usinages extrêmement variés, le changement d'outils se fait généralement de manière automatique à partir d'un magasin d'outillage.

Un centre d'usinage peut être présenté selon le schéma de la figure 4.1.

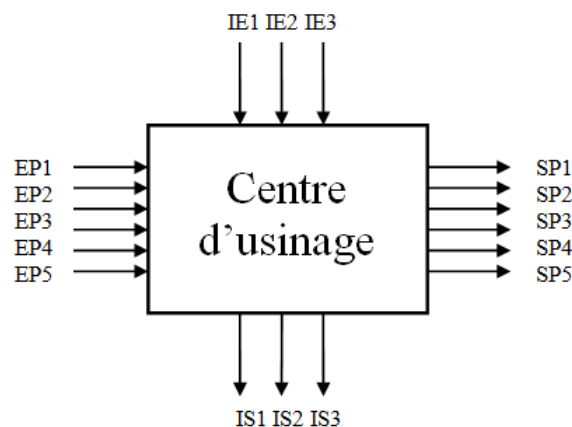


Figure 4.1. Représentation symbolique d'un centre d'usinage

Nomenclature :

Entrées physiques :

Ep1	pièces brutes ou semi-finies ;
Ep2	outils et porte-outils ;
EP3	rubans perforés ;
EP4	main d'oeuvre opérateur ;
EP5	montages d'usinage ;
EP6	liquide de coupe.

Informations d'entrée :

IE1	programme pièce ;
IE 2	programme jauges d'outils ;
IE3	.....

Sorties physiques :

Sp1	pièces usinées ;
Sp2	outils à nettoyer et à vérifier ;
Sp3	outils cassés ;
Sp4	montage à nettoyer et à vérifier ;
Sp5	liquide de coupe usagé ;
Sp6	copeaux.

Informations de sortie :

IS1	incident d'usinage ;
IS2	appel opérateur ;
IS3	fin de cycle.

4.2 Centres de tournage

Outre les axes principaux, un centre de tournage dispose d'une ou plusieurs broches de fraisage-perçage, montées sur la tourelle ou sur le chariot porte-outil, qui permettent de parachever la pièce alors qu'elle est sur le tour. Ces têtes peuvent fraiser ou percer axialement ou radialement et rendent possible tout fraisage hélicoïdal.

Le centre de tournage possède au moins 3 axes, la broche devant être obligatoirement contrôlée par le CNC, soit pour les indexages, soit pour les déplacements angulaires de la pièce. Lorsque la machine est équipée de deux chariots indépendants, elle a alors 5 axes.

Les équipements suivants complètent l'automatisation des centres de tournage :

- Changeur et magasin d'outils de tour ;
- Changeur et magasin d'outils rotatifs ;
- Changeur et convoyeur de pièces ou dispositif d'avance de la barre ;
- Contre-pointe programmée ;
- Palpeur de mesure relié à la CNC ;
- Convoyeur des pièces vers un poste de contrôle ;
- Convoyeur assurant l'évacuation des copeaux.

Ces machines font souvent partie d'un ensemble appelé atelier flexible, car sa disposition permet d'optimiser un type de fabrication.

4.3 Machines outil à commande numérique adaptative

La commande adaptative est une forme évoluée de la commande numérique basée essentiellement sur la cinématique. Dans la commande numérique ordinaire, les vitesses sont déterminées à l'avance sans qu'il soit possible de les modifier au cours d'usinage. Or beaucoup de pièces ne peuvent être usinées dans toutes les parties avec les mêmes vitesses, soit parce que la nature de la matière de la pièce varie, soit à cause des formes extérieures ne pouvant être usinées avec une vitesse uniforme.

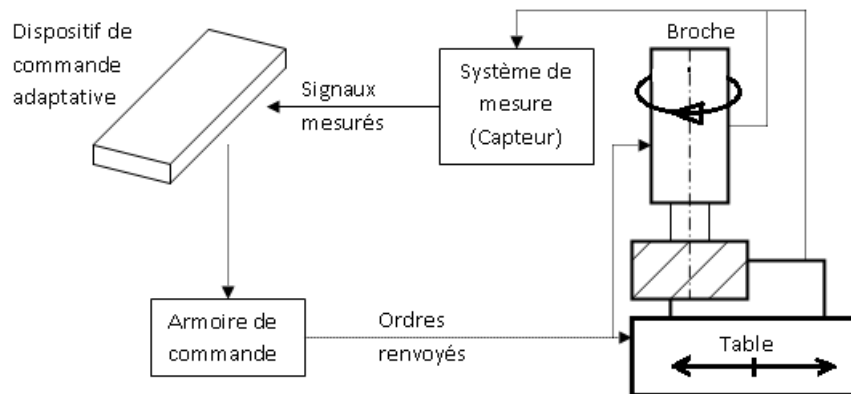


Figure 4.2. Dispositif de commande adaptative

Dans la commande adaptative (figure 4.2), des capteurs sont placés en certains endroits, notamment dans les broches pour réaliser d'une façon continue et automatique l'adaptation des conditions de coupe. Ces capteurs relèvent les valeurs du couple sur la broche, l'amplitude de vibration de la broche, la température dans la zone de coupe, etc. les informations relevées par ces capteurs sont transmises à une unité spéciale qui les envoie à l'armoire de commande qui à son tour donne des ordres de ralentissement ou d'accélération aux moteurs de la machine-outil.

La commande adaptative permet une meilleure qualité de travail, un gain de rendement dans l'ensemble de l'usinage et une plus grande sécurité. Le prix de revient que caractérise la commande adaptative est ainsi assez vite amorti.

4.4 Cellules flexibles

On entend par « la flexibilité », la possibilité de fabriquer d'autres pièces différentes que celles prévues au moment de la conception de l'atelier. Cela entraîne une étude technologique nouvelle de l'ensemble et des modifications coûteuses. Les MOCN assurent cette notion puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme et peuvent ainsi usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un nouveau programme.

Une cellule flexible de fabrication est un système d'usinage automatisé et intégré qui se compose de deux ou plusieurs MO identiques ou non et de dispositifs de chargement et de déchargement automatique des pièces (bande transporteuse, chariot de convoyage, robot

manipulateur, robot portique, etc.). A partir de cette définition, un centrage d'usinage comportant un chargeur automatique d'outils représente, lui-même, une cellule flexible.

Les cellules flexibles sont conçues, en général, pour fonctionner sans surveillance humaine aussi longtemps qu'elles sont alimentées en pièces et en outils de coupe puisqu'elles disposent d'équipements appropriés permettant de détecter toute anomalie de fonctionnement et d'arrêter la cellule si cette anomalie ne peut pas être corrigée automatiquement.

Comme il est difficile de trouver un compromis entre les objectifs contradictoires de flexibilité et de rentabilité d'une cellule flexible pour passer d'un type de fabrication à un autre dans un minimum de temps et avec un minimum d'organisation, les ateliers dits « flexibles » peuvent résoudre ces problèmes. Ce système est piloté par ordinateur et peut regrouper plusieurs machines et équipements reliés les uns aux autres par des dispositifs de transports des pièces d'un point à l'autre du système. L'ordonnancement de la production, la gestion des programmes d'usinage, le contrôle et le magasinage des pièces ainsi que les données relatives au fonctionnement (rapports, données statistiques, etc.) font également partie du système.

4.4.1 Caractéristiques des systèmes flexibles

Un système flexible possède deux caractéristiques essentielles :

A. La grande souplesse d'utilisation : les MOCN largement utilisées pour composer un système flexible ont cette caractéristique qui en découle plusieurs avantages :

- changement aisé du programme d'usinage ;
- réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- réduction des temps de préparation et de réglage des postes de travail ;
- prise en compte rapide des modifications d'usinage en modifiant les programmes ;
- réduction de nombre de prises de pièces ;
- diminution du temps d'attente entre les diverses machines ;
- gain de surface sur sol.

B. La sécurité du travail : d'une part, des simulations graphiques hors usinage des programmes nouvellement créés peuvent être réalisées pour éviter des risques éventuels de collision et d'autre part, les courses d'outils sont préalablement programmées. Le système de commande peut décider d'interrompre le déroulement d'une opération et d'alerter l'opérateur en cas d'incident.

4.4.2 Objectifs des systèmes flexibles

Un système flexible a deux objectifs principaux :

A. Amélioration de la productivité : la productivité est apparue comme la mesure du progrès technologique qui résulte des effets d'un très grand nombre de facteurs distincts mais inter-indépendants tels que la quantité et la qualité de l'équipement employé, améliorations techniques, efficacité de la direction, circulation des matières premières et des pièces, capacité professionnelle et efforts des travailleurs, etc.

L'amélioration de la productivité est possible si on respecte certaines règles :

- Analyse préalable du processus productif ;
- Maîtrise des tâches productives (qualité, fiabilité, bonne connaissance des paramètres, ...) et suppression des tâches ne créant pas de la valeur ajoutée ;
- Pré-automatisation avec des technologies simples et peu coûteuses ou automatisation coûteuse avec suppression des tâches ne créant pas de la valeur ajoutée ;
- Modernisation avec les moyens de haute technologie.

La productivité peut être améliorée de 40% à 50% si une nouvelle technologie est particulièrement bien adaptée au problème posé (robots, CFAO, automatisation intégrée, systèmes flexibles, ...). Cette amélioration est généralement locale.

Elle peut être améliorée de 15% à 25% par simplification des tâches (changement rapide des outils, amélioration de la maintenance, application d'une politique de qualité, amélioration de la gestion, ...). Cette amélioration est généralement globale.

B. Accroissement de la rentabilité : la rentabilité d'un investissement productif dans une entreprise se fait à l'aide des calculs comparatifs entre diverses solutions techniques et en appliquant les méthodes comptables les plus récentes surtout lorsqu'on envisage à remplacer une des machines outils par une autre.

En utilisant les indices économiques, le coût total de fabrication d'une pièce varie en fonction du nombre total de pièces à fabriquer d'une manière hyperbolique. A cet effet, le domaine de rentabilité économique des cellules flexibles se situe dans la production en moyenne série. Pour des grandes séries, le recours à des machines à automatisation rigide (machines de transfert, tours automatiques, ...) se montre encore très avantageux.

4.4.3 Exemple d'une cellule flexible

La cellule (figure 4.3) reproduit une chaîne d'assemblage qui, à un facteur d'échelle près, à toutes les caractéristiques de ce que l'on peut rencontrer en milieu industriel.

A. Partie opérative :

La partie opérative de la cellule est organisée autour d'un système de convoyage qui permet un acheminement flexible vers les différents postes de travail de palettes qui reçoivent les plaques support des produits.

Six postes de travail peuvent être distingués :

- Un poste R1 de montage des composants A et D (robot Adept One équipé d'un système de vision programmé en V+),
- Un poste R2 de montage des composants C et D (robot IBM 7576 programmé en AML2),
- Un poste R3 de montage des composants B et C (robot Staübli Puma 500 programmé en Val2),
- Un poste R4 de montage des composants A et B (robot ACMA TH8 programmé par apprentissage),
- Un poste R5 d'inspection des produits par vision (système Sherlock32 d'Imaging Technology avec éclairage Laser), réalisant le contrôle des produits finis,
- Un poste R6 de chargement et de déchargement de plaques supports sur les palettes (robot Citroën RM à 7 axes programmé en LM).

Les plaques support sont, dans un premier temps, chargées sur les palettes par le poste R6. Ces palettes sont ensuite acheminées vers les postes de montage en empruntant les bandes de convoyage et des transferts (T1 à T8). Elles se présentent, en fonction des nomenclatures des produits, aux différents postes de montage. A chacun de ces postes, un robot est capable d'assurer le montage de deux types de composants, disposés dans des stocks. De plus, il existe toujours deux postes capables de monter chaque composant. Cette redondance introduit une certaine flexibilité, utile en cas d'indisponibilité d'un des postes de montage (panne, maintenance).

B. La partie commande :

Celle-ci est composée d'un pilote temps réel, d'un superviseur, de quatre automates programmables industriels et de différents réseaux locaux industriels. Le pilote temps réel, constitué d'un PC et d'un exécutif temps réel, contrôle la production et détermine dynamiquement le routage des palettes. Il met en oeuvre la stratégie de routage élaborée en phase de conception à l'aide de l'outil de simulation.

Le superviseur (Panorama) permet de gérer diverses vues d'exploitation de la cellule. Les 4 automates (Schneider TSX PREMIUM) assurent la commande des convoyeurs et des transferts, le dialogue avec les robots et le système de vision, et les accès en lecture et écriture

sur les étiquettes magnétiques qui permettent d'identifier les palettes avant chaque embranchement.

Chaque automate prend en charge une zone géographique de la cellule parcourue par le convoyeur. Chaque zone a une complexité à peu près équivalente.

Les réseaux locaux assurent la communication entre les divers équipements de la partie commande. Une liaison FIP permet l'échange d'informations entre automates, sur la base d'une table de données partagées dans laquelle chaque automate peut lire et/ou écrire des données. Les bus AS-I assurent un lien logique entre les automates et des modules d'entrées sorties TOR répartis dans les 4 zones géographiques de la cellule. Chaque automate communique avec les plots de lecture écriture de sa zone par l'intermédiaire d'un bus Unitelway. L'un des automates communique de façon bidirectionnelle avec le pilote par liaison série (RS232). Enfin, chaque automate peut éventuellement être exploité à distance grâce à une liaison « Industrial Ethernet ».

La cellule est pré-câblée de manière à assigner à chaque robot ainsi qu'au poste de vision un nombre réputé suffisant d'entrées et de sorties TOR. Ce câblage réalise entre les différents équipements une interconnexion physique. En revanche, le paramétrage des communications n'est pas effectué par défaut, et aucune fonction particulière n'est pré-affectée aux différentes entrées sorties.

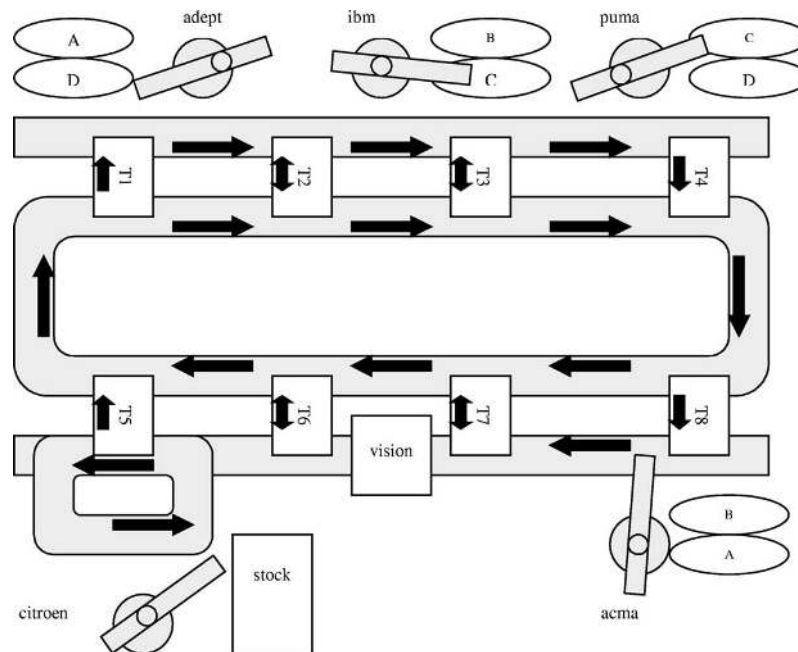


Figure 4.3. Schéma de la partie opérative de la cellule

Enfin, les critères d'emploi des machines outils à commande numérique dans une unité de production se sont modifiés :

Anciens critères :

- cadence maximale ;
- qualité de production acceptable ;
- prix d'achat minimal.

Nouveaux critères :

- cadence homogène avec les autres équipements de production. ;
- garantie de fiabilité ;
- solution la plus compétitive.

Chapitre 5. Traitement de la mesure sur les MO à commande numérique

Le traitement de la mesure dépend de la nature de la commande.

5.1 Traitement de la mesure sur machine CN

Une commande numérique (CN) à logique électronique câblée est installée dans une armoire appelée (DCN). Elle peut être représentée fonctionnellement par la figure 5.1.

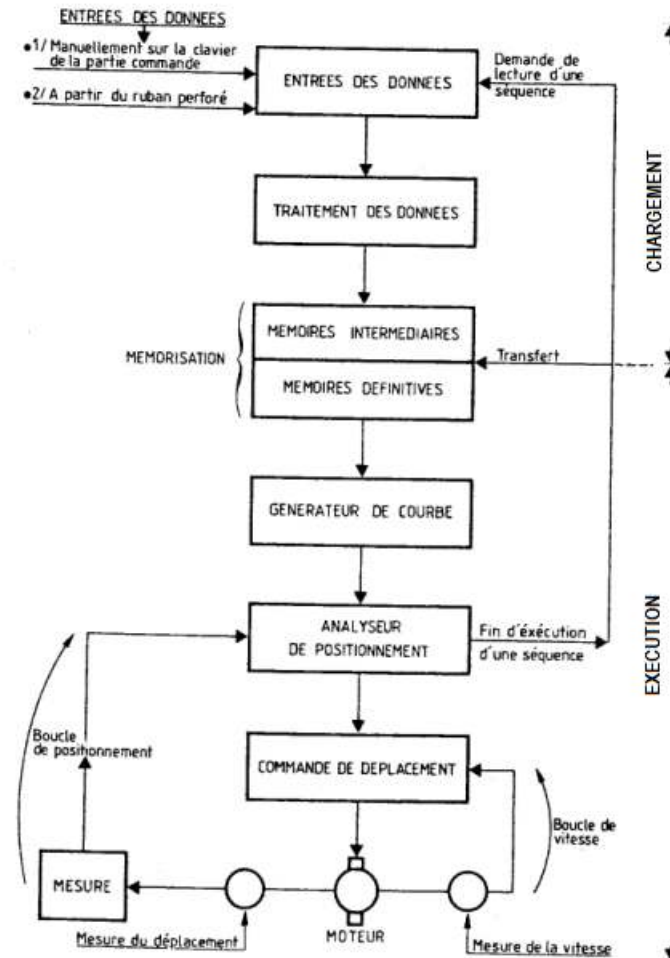


Figure 5.1. Analyse du synoptique de la machine CN

Analysons le rôle des divers éléments dans la cette partie.

- **Entrée des données** : c'est la lecture des informations sous forme codée contenues dans un support d'informations (bande perforée, bande magnétique, ...) ou des informations introduites manuellement en utilisant le clavier de la partie commande.
- **Traitement des données** : les données ci-dessus sont analysées (reconnaissance des informations codées, diagnostic des erreurs de syntaxe éventuelles, traduction en valeurs numériques des informations codées) qui nécessitent dans certains cas des modifications de valeurs. Par exemple : un décalage des axes en tenant compte de correction sur l'outil sélectionné.
- **Mémoires intermédiaires** : elles permettent la lecture à l'avance d'un bloc complet (les informations nécessaires à une opération d'usinage).

- Mémoires définitives (actives) : ce sont les mémoires directement prises en compte par la machine pour exécuter les opérations d'usinage successives.
- Générateur de courbe (Interpolateur) : il réalise les fonctions linéaires ou circulaires en commandant les axes numériques pour exécuter les trajectoires à tout point.
- Analyseur de position : il examine si le référentiel de l'élément mobile a effectué ou non le parcours programmé suivant les axes numériques.
- Commande de déplacement : c'est l'ensemble de commandes du mouvement suivant chacun des axes (variateur, moteur).
- Chaîne de mesure : la mesure peut être réalisée par des capteurs de vitesse et de position.

Les informations transmises sont analysées et comparées avec les valeurs de consigne afin d'accélérer ou ralentir les mouvements des éléments mobiles.

5.2 Traitement de la mesure sur machine CNC

En logique électronique programmée (à partir d'un microprocesseur), le DCN est remplacé par un ordinateur (CNC) qui offre des possibilités plus grandes par rapport à celles des machines équipées d'un DCN. Le calculateur est chargé du traitement sous forme de programme (logiciel) de certaines fonctions. Par exemple : le logiciel d'un CNC (inaccessible à l'utilisateur) peut prendre en compte la gestion de tous les organes de la machine-outil (chargeur d'outil, transpalette, ...). Il assure également la mise en mémoire du programme pièce qui rend très facile sa mise au point. La synoptique de la machine CNC peut être présentée par la figure 5.2.

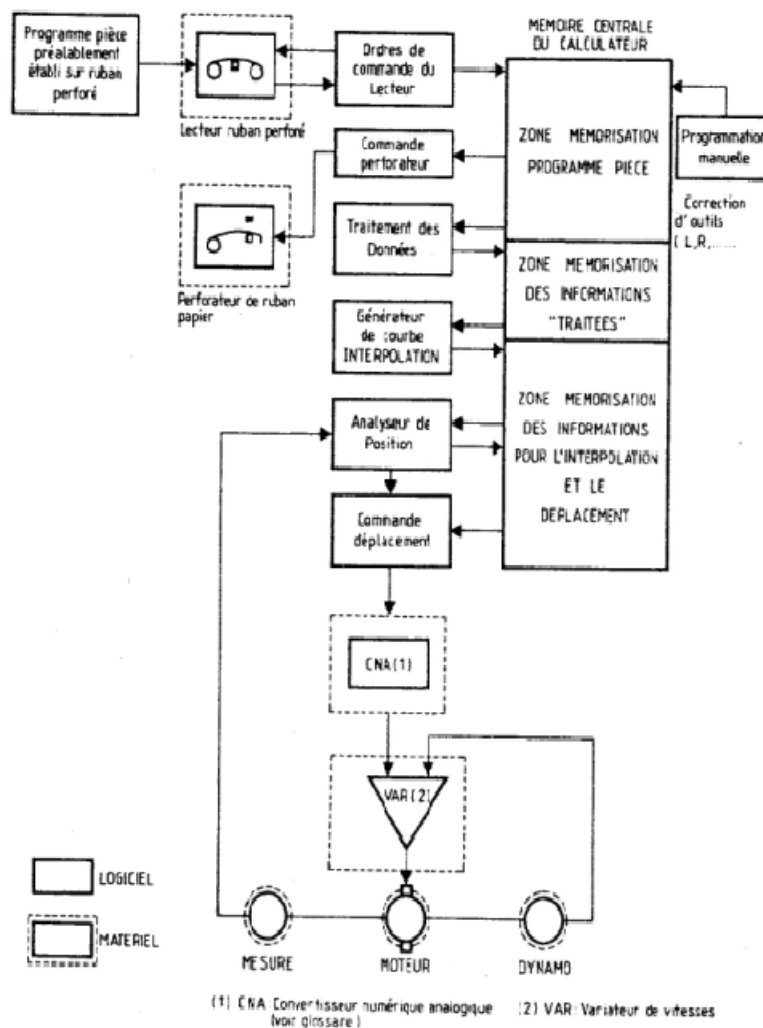


Figure 5.2. Analyse du synoptique de la machine CNC

Analysons le rôle des divers éléments dans la cette partie.

- Entrée des données : deux types de données sont nécessaires :
 - Le programme « logiciel CNC », perforé sur un ruban papier initialement chargé en mémoire central du calculateur.
 - Le programme « pièce » : la lecture de ce programme se fait par le lecteur de ruban perforé. Il est ensuite chargé dans la mémoire du calculateur suivant un processus contrôlé par le « logiciel CNC ». Le programme « pièce » peut être également modifié ou chargé en mémoire par un processus manuel.
- Traitement des données : le but de cette tâche est de corriger, si nécessaire, les informations relatives au programme « pièce » pour les amener à leur valeur réelle d'usinage (correction d'outil). Le processus est totalement exécuté par le « logiciel CNC ».
- Mémoires : toutes les mémoires sont celles du calculateur utilisé. La taille du mémoire centrale est variable suivant les utilisateurs.
- Générateur de courbe : c'est la fonction d'interpolation de la trajectoire à exécuter sur la machine-outil (linéaire ou circulaire). Cette fonction est totalement réalisée par le « logiciel CNC » sous l'appellation « interpolateur ».
- Analyseur de position : cette fonction est également réalisée par le « logiciel CNC » et elle a pour rôle la détermination des vitesses d'avance, le point d'arrêt, etc.
- Commande de déplacement : cette fonction est commandée par le « logiciel CNC » mais elle est réalisée par un convertisseur numérique-analogique, variateur, etc.
- Perforation : certaines CNC offrent la possibilité de perforer un ruban à partir du programme pièce, mémorisé en mémoire centrale.
- Chaîne de mesure : la mesure des vitesses de rotation, des positions des outils et le couple sur la broche est réalisée par des capteurs qui envoient les informations pour être analysés (éventuellement corriger) et mémoriser dans la mémoire centrale du calculateur.

5.3 Systèmes de mesure

Dans tous les systèmes de pilotage avec boucle de retour, on compare en permanence la position réelle du mobile avec la valeur de consigne délivrée par la CN. Le résultat de cette comparaison, appelé *erreur de poursuite*, sert à élaborer le signal de commande du moteur d'entraînement. Les capteurs, appelés aussi transducteurs, qui relèvent les positions ou les déplacements des organes mobiles le long de l'axe et les transforment en signaux électriques envoyés à la CN. Un transducteur au moins est nécessaire pour chaque axe.

En fonction de l'emplacement du capteur sur la machine, la méthode de mesure est directe ou indirecte.

5.3.1 Mesure directe : Dans un système à mesure directe, le capteur de position est fixé directement sur l'organe mobile à positionner. Ce montage évite les erreurs de mesure, dues au manque de précision éventuel de la vis à billes et du mécanisme d'entraînement et de ce fait, il est le plus satisfaisant du point de vue de la précision. (figure 5.3).

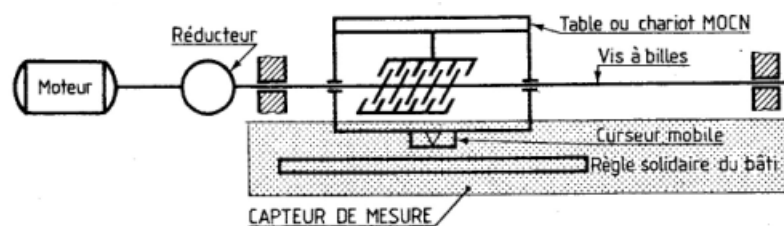


Figure 5.3. Système à mesure directe

5.3.2 Mesure indirecte : Dans un système à mesure indirecte, le capteur de position est monté en bout de la vis à billes ou sur le mécanisme d'entraînement. Ce type de montage fait

intervenir un certain nombre d'imprécisions dues à la prise en compte des contraintes mécaniques qui affectent l'ensemble de la chaîne cinématique. Ce montage est particulièrement adopté aux grandes machines où les erreurs de la chaîne cinématique sont intégrées dans le logiciel de gestion. (figure 5.4).

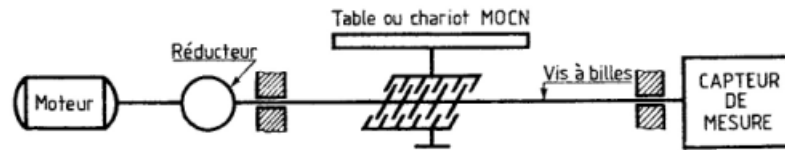


Figure 5.4. Système à mesure directe

5.3.3 Systèmes de mesure mixtes : Certains systèmes associent la mesure directe fine et la mesure indirecte grossière.

5.4 Principe de mesure

Les différents systèmes de mesure sont présentés par la figure 5.5.

5.4.1 Mesure incrémentale (relative) : le capteur est un générateur d'impulsions qui fournit un signal chaque fois que la position varie de l'incrément minimal possible. Un déplacement provoque la génération d'un nombre déterminé d'impulsions qui sont comptées et mémorisées. Il est nécessaire de reprendre avec précision, le zéro absolu à la mise en marche de la CN. En mesure incrémentale, le déplacement est assuré comme agrandissement de la coordonnée par rapport à la position précédente.

5.4.2 Mesure absolue : le capteur fournit, pour chaque point relevé sur la course de l'axe, un signal différent. Ce système utilise trois résolveurs au moins, ou la règle inductosyn à trois pas différents.

Dans un système de mesure absolue, toutes les coordonnées sont mesurées par rapport à une origine fixe sans faire référence à la position précédente.

5.4.3 Mesure absolue cyclique (semi-absolue) : le capteur fournit un signal analogique qui se répète cycliquement à intervalles constants sur la course de l'axe (2 à 10mm de pas). Ce signal est différent pour chaque valeur prise dans le pas (tensions électriques différentes). La valeur est reçue en considérant la cote absolue et le nombre de pas dépassés. Il est nécessaire de reprendre l'origine machine à la mise en marche de la machine, pour dire au système le nombre de pas entiers qui séparent le point de référence de l'origine absolue.

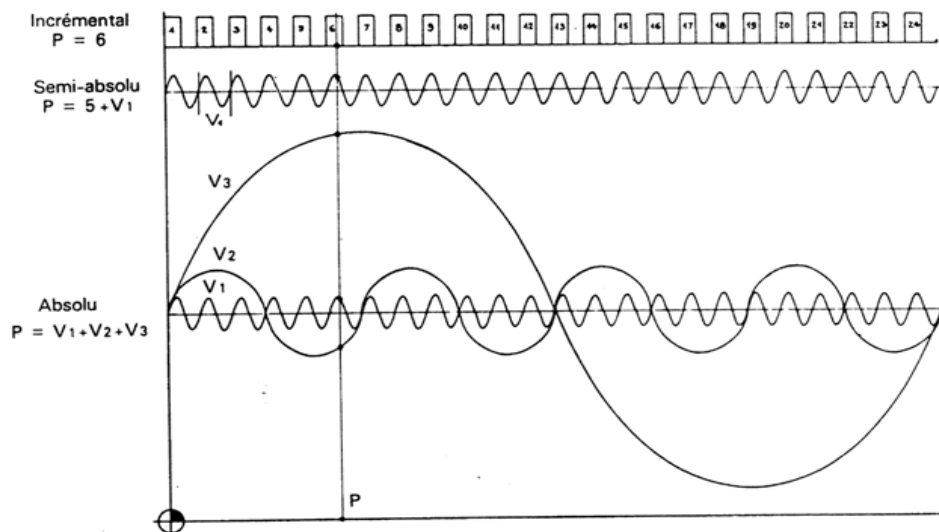


Figure 5.5. Principe de mesure

5.5 Contrôle de déplacements

Le contrôle de déplacements sur les machines-outils ordinaires est réalisé par le vernier de la manivelle et les règles graduées. Sur les machines-outils semi-automatiques et automatiques, les déplacements sont contrôlés par des contacteurs électriques, par des cames, par des butées, etc. A la différence des précédentes, les machines-outils à commande numérique utilisent des capteurs numériques incrémentaux ou digitaux ainsi que des capteurs analogiques.

5.5.1 Capteurs numériques : dans ce type de capteurs, le déplacement est mesuré par le comptage d'impulsions nécessaires pour atteindre la position programmée sans qu'on puisse apprécier les valeurs entre l'apparition de deux chiffres successifs (comme une montre digital).

Il existe deux solutions pour représenter ces capteurs.

- **Systèmes à codage :** dans les systèmes à codage, on code les informations en système binaire. Ce système se concrétise à l'aide des circuits grâce auxquelles on peut réaliser des fonctions de codage. Par exemple la fonction « ET » est définie ainsi. Pour que la fonction A (position de consigne) et B (position réelle) puissent se combiner pour donner une fonction F, il faut que A et B soient dans la position 1 (figure 5.6).

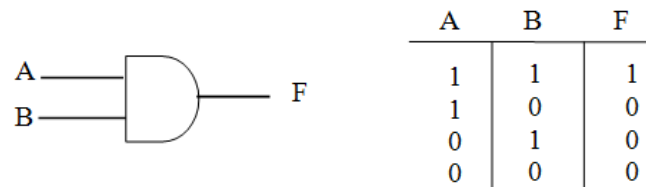


Figure 5.6. Système de codage

- **Systèmes à comptage :** dans le système à comptage, les déplacements sont indiqués par des impulsions dont la plus petite valeur s'appelle « incrément ». Les impulsions sont engendrées au moyen de règles spéciales telles que la règle Heidenhain (figure 5.7). Les impulsions correspondant respectivement à la valeur de consigne A et à la valeur réelle B se retranchent jusqu'au moment où l'on obtient l'égalité $A=B$. Le système de comptage est, évidemment, de beaucoup plus simple mais il faut s'assurer que les impulsions sont régulières car l'erreur est cumulable.

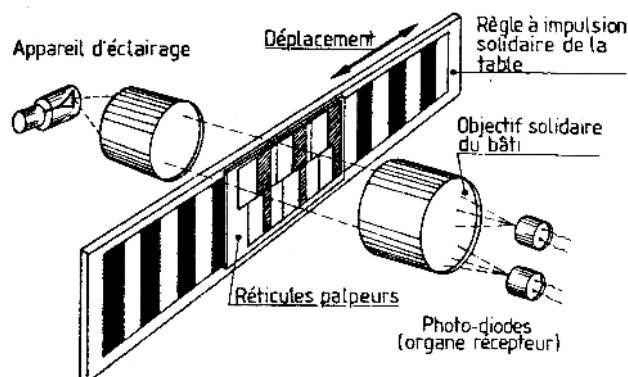


Figure 5.7. Système à comptage - mesure incrémentale par la règle Heidenhain

5.5.2 Capteurs analogiques : La grandeur de consigne ne pouvant être donnée que sous forme numérique, il faut donc lui donner une forme analogique à l'aide d'un transducteur numérique-analogique. Le déplacement linéaire d'un mobile (grandeur physique) est

représenté par la variation d'une tension électrique (effet de potentiomètre). Les signaux de sortie du capteur varient d'une façon continue en fonction du déplacement à la manière d'une montre à aiguilles. Cette variation peut être représentée par une fonction continue en mathématique. Il existe plusieurs modèles de capteurs ; les plus connus sont la règle inductosyne et les résolveurs (figure 5.8).

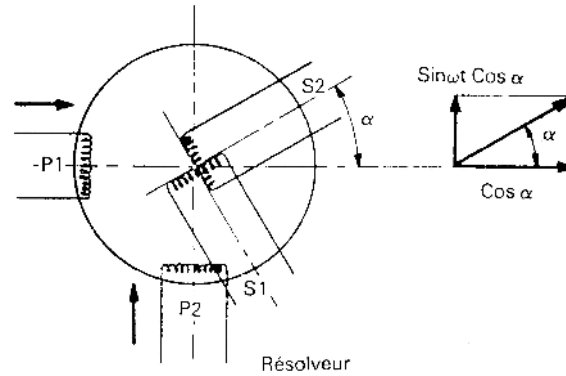


Figure 5.8. Mesure analogique par Résolveur

Chapitre 6. Programmation manuelle sur machines-outils à commande numérique

TD N°1. Repérage des axes

1.1 Définition et implantation des axes

Les systèmes d'axes d'une MOCN répondent aux normes NFZ-020 et ISO841 qui précisent leurs désignations et leurs sens de déplacement.

Sur le tour comme sur la fraiseuse, la mise en position d'une pièce sur la machine se fait par rapport à un repère lié au support de pièce (il en est de même pour la mise en position de l'outil sur la tourelle). A chacun de ces repères peuvent se définir six mouvements associés aux axes (trois translations suivant X, Y, Z et trois rotations notées respectivement A, B, C), appelés degrés de liberté (figure 6.1).

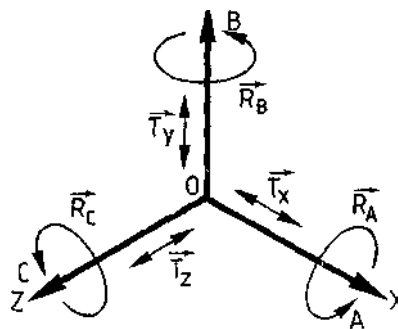


Figure 6.1. Système d'axes

Pour positionner le système d'axes, il est simple d'utiliser la règle des trois doigts. L'axe du majeur étant, par convention, parallèle à celui de la broche de travail (figure 6.2). Les axes additionnels présents sur certains centres d'usinage, définissant les mouvements secondaires parallèles aux axes principaux (X, Y et Z), sont repérés par U, V et W.

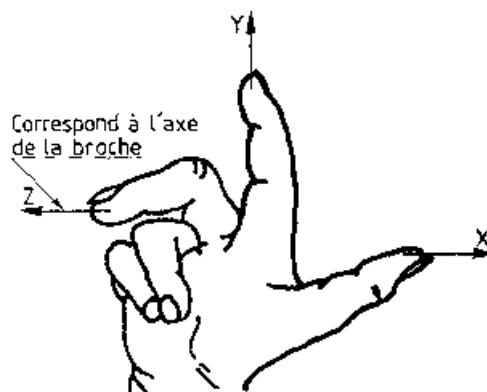


Figure 6.2. Règle des trois doigts

Les axes sur les sur un tour ou sur une fraiseuse sont définis comme suit :

L'axe Z correspond à l'axe de la broche. Le sens positif est celui qui correspond à un dégagement de l'outil (accroissement de la distance entre la pièce et l'outil). Le sens positif de rotation de la broche est celui des aiguilles d'une montre.

L'axe X correspond à l'axe ayant le plus grand déplacement. Pour une fraiseuse, c'est généralement l'axe longitudinal (directement perpendiculaire à l'axe Z). Pour un tour, l'axe X de mouvement est radial. Le sens positif du mouvement est celui qui correspond à l'accroissement de la distance entre l'outil et l'axe de rotation de la pièce.

L'axe Y forme un trièdre trirectangle avec les deux autres axes. Pour une fraiseuse, c'est l'axe transversal.

1.2 Mode de cotation

Afin d'assurer l'usinage d'une pièce sur une MOCN, le programmeur reçoit son dessin de définition avec toutes les exigences dimensionnelles selon l'un des modes de cotation suivants :

A. Cotation en système de référence (cotation absolue) : D'après la figure 6.3, on remarque que toutes les coordonnées sont données par rapport à une origine fixe fournie par les surfaces de référence

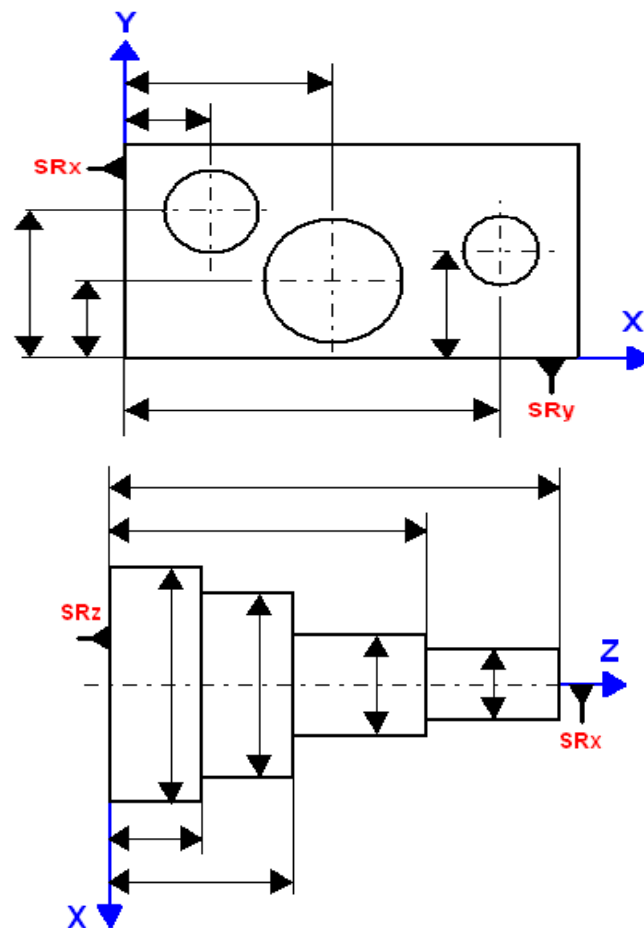


Figure 6.3. Cotation absolue

B. Cotation itérative (cotation relative) : Comme la cotation se fait par empilage, les coordonnées sont données par rapport au point précédent (figure 6.4).

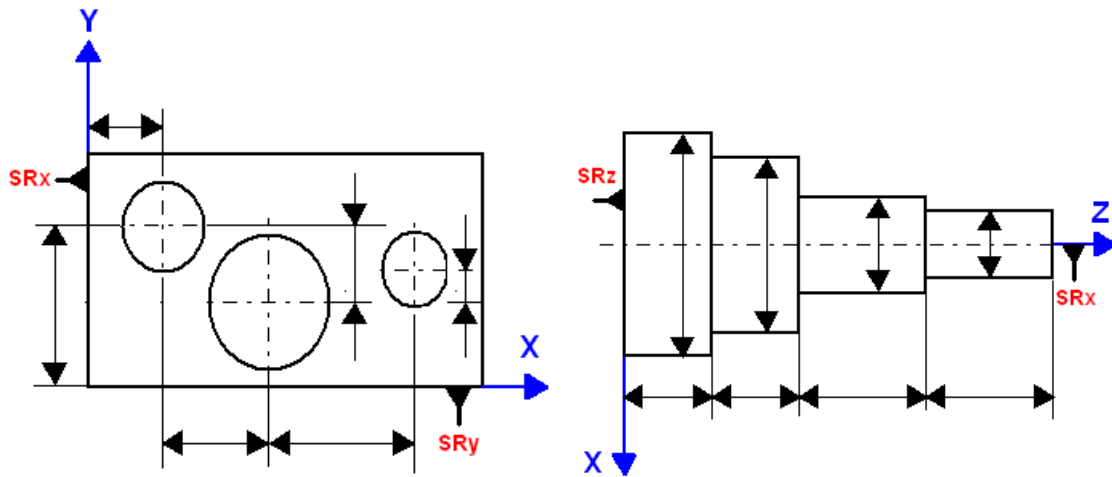


Figure 6.4. Cotation itérative

- C. **Cotation conventionnelle (cotation mixte)** : Ce système de cotation résulte de la combinaison de la cotation absolue et la cotation relative qui découle généralement d'une cotation fonctionnelle (figure 6.5).

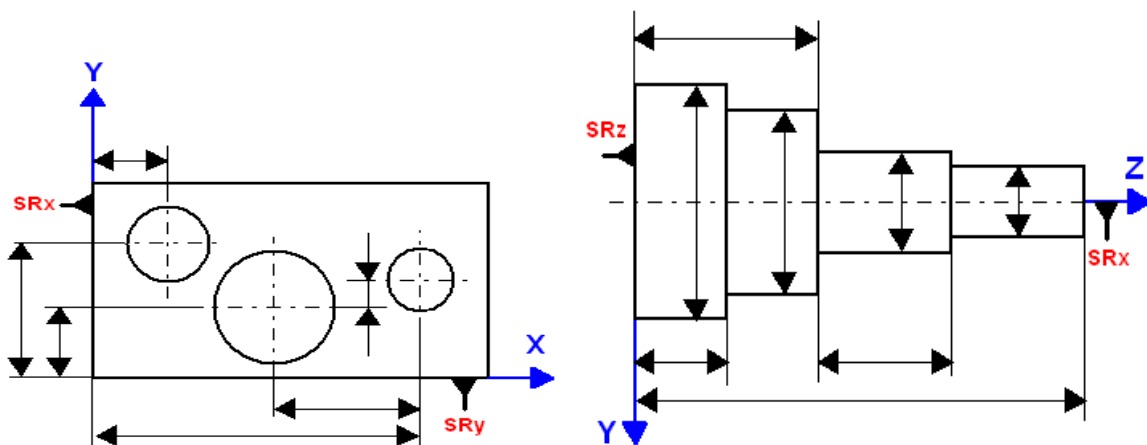


Figure 6.5. Cotation mixte

1.3 Système de références :

A la mise sous tension de la machine, si les capteurs de position des organes mobiles ne sont pas des systèmes de mesures absolus, la CN ne connaît pas la position courante de ces différents éléments par rapport à un repère fixe. Il faut alors effectuer une procédure d'initialisation pour connaître l'Origine absolue de la mesure (**Om**). Cette opération consiste à définir le point du référentiel mesure (**Prise d'Origine mesure POM**) par détection de l'impulsion zéro du capteur de mesure sur chaque axe. L'Origine Machine (**OM**) et l'Origine mesure (**Om**) sont confondus par les paramètres machine (cotes X, Y, Z de Om/OM). A ce stade, les coordonnées d'un point fixe du mobile **OT** Origine Tourelle sur tour (figure 6) ou **OB** Origine Broche sur fraiseuse (figure 7) par rapport à **Om** sont connues de la CN.

Le programmeur établit le programme d'usinage par rapport à un repère lié à la pièce (départ de cotation). L'origine de ce repère est appelée Origine de Programmation (**OP**). Les projections du vecteur OMOP sur les axes X, Y, Z, représentant les Prises de REFérences (**PREF**), sont introduites sur la CN pour indiquer au système la position de l'Origine de Programmation (**OP**) par rapport à l'origine mesure (**Om**).

Lorsque la prise d'origine ne peut pas s'effectuer directement sur l'origine de programmation (**OP** inaccessible), l'opérateur se sert d'un point de la pièce ou du montage d'usinage sur lequel il peut se mettre en position référentielle, soit directement, soit en se servant de cales étalon et/ou d'un comparateur. Ce point est appelé origine pièce ou plus couramment **Prise d'Origine (PO)**. Lorsque **OP** et **PO** ne sont pas confondus, l'opérateur entre au clavier les valeurs en X, Y, Z de ce décalage (**DEC1**).

Dans ce cas, $OMOP = OMPO + POOP = PREF + DEC$

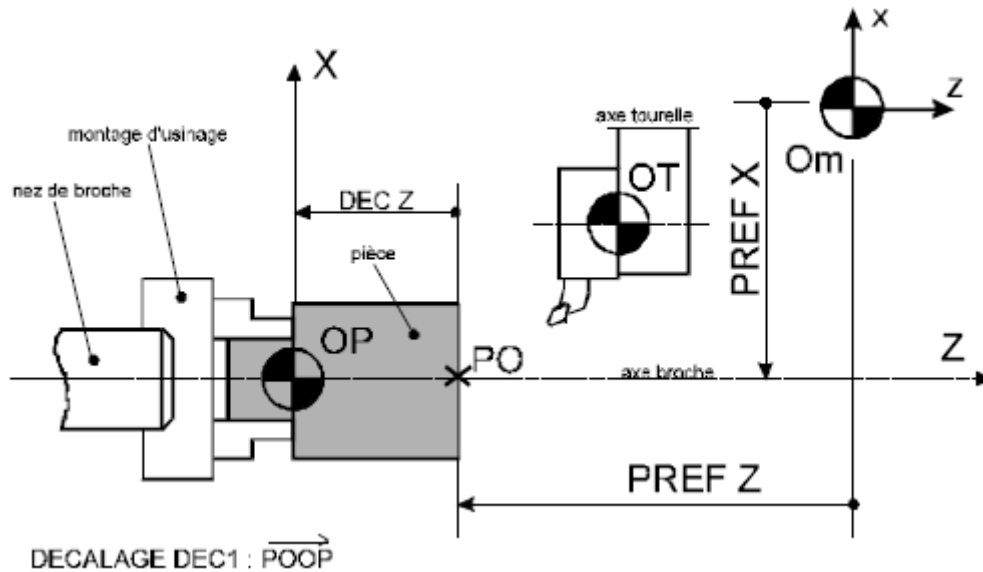


Figure 6.6. Représentation des origines en tournage

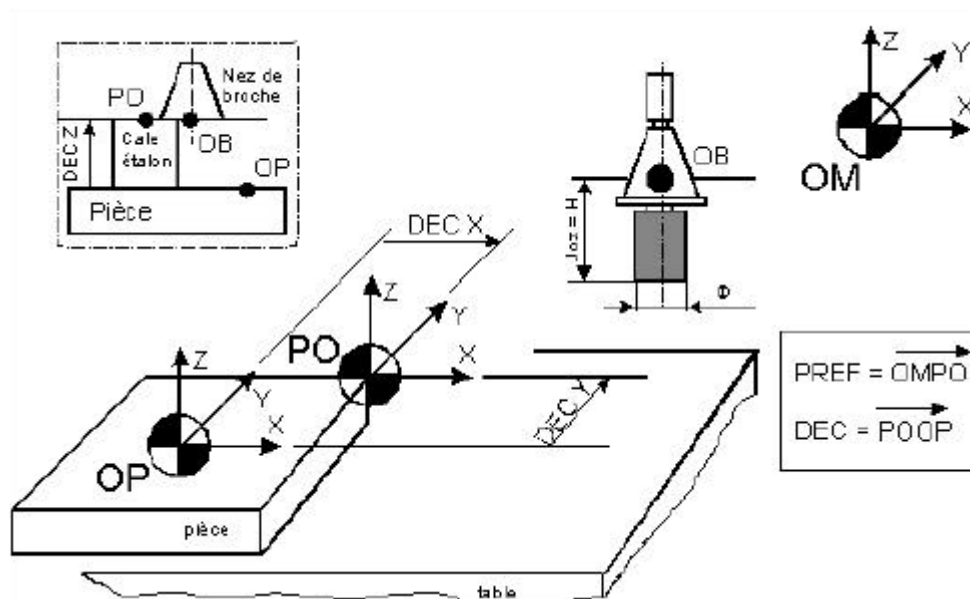


Figure 6.7. Représentation des origines en fraisage

TD N°2. Etude de la programmation

2.1 Choix du type de programmation

La programmation est le travail de préparation qui consiste à transposer, sous forme de texte alphanumérique, la gamme d'usinage de la pièce en un ensemble ordonné d'instructions comprises et exécutées par la CN en vue de réaliser son usinage. Ce travail peut être effectué manuellement ou avec l'assistance d'un ordinateur utilisant un langage de programmation évolué. De plus, certaines surfaces complexes sont extrêmement difficiles, voire impossibles à programmer en manuel. C'est pourquoi les CN modernes disposent de logiciels intégrés d'aide à la programmation et de cycles fixes d'usinage. La méthode de programmation est choisie en fonction des compétences du programmeur et de la complexité des machines à piloter (figure 6.8). Quelque soit le langage de programmation utilisé pour le développement des programmes pièces, le seul langage compréhensible par la machine est le langage ISO. Le passage d'un langage de haut niveau au langage ISO est possible en utilisant un logiciel de traduction.

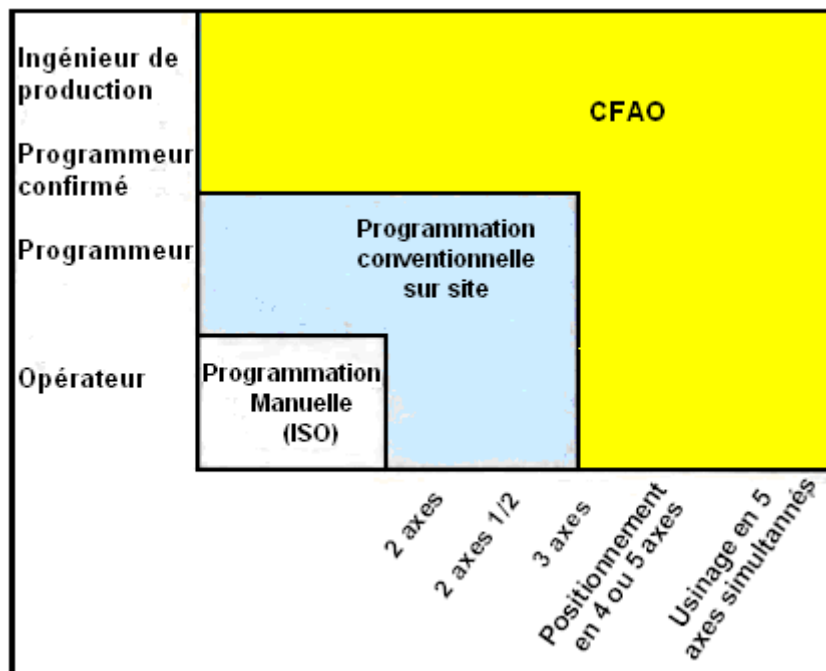


Figure 6.8 Types de programmation

2.2 Programmation manuelle

La programmation manuelle consiste à écrire, ligne par ligne, les étapes successives nécessaires à l'élaboration d'une pièce donnée. Après décomposition du cycle de travail, le programmeur procède au calcul des coordonnées des points intermédiaires, définit tous les déplacements pour chaque passe d'usinage et réalise lui-même la codification des instructions en respectant le format spécifique prévu pour la CN et la machine. Ce mode de programmation nécessite une profonde connaissance du langage ISO, des mathématiques (géométrie et trigonométrie) et des techniques d'usinage.

La programmation manuelle peut être efficace lorsque les opérations d'usinage sont simples. Mais dès que les formes de pièces deviennent compliquées et qu'elles nécessitent un grand nombre de mouvements, cette méthode devient vite fastidieuse avec des risques d'erreur importants.

2.2.1 Langage de programmation

Le langage ISO peut être introduit sur pupitre de la CN mais cette solution mobilise la machine. La majorité des systèmes offrent, par ailleurs, une interface peu conviviale permettant la programmation et le téléchargement sur la CN.

Le poste de programmation peut être soit :

- Une console spécialisée reproduisant l'interface utilisateur de la C.N.
- Un ordinateur standard utilisant un logiciel spécialisé ou un éditeur de texte. L'écriture du programme s'effectue en temps masqué, mais les tests syntaxiques et la simulation graphique doivent se faire sur la MOCN ou nécessite alors l'utilisation d'un logiciel de simulation.

Les instructions programmées doivent contenir toutes les données nécessaires à la commande et au séquençement des opérations à réaliser pour assurer l'usinage de la pièce sur la machine. Elles regroupent :

- Les commandes ;
- Les données géométriques, qui indiquent la forme et les dimensions de la pièce à usiner et permettent à la CN de calculer les positions successives de l'outil par rapport à la pièce pendant les diverses phases de l'usinage. Les positions sont définies par rapport à une origine connue. Certaines instructions viennent compléter les données géométriques en indiquant la nature du traitement numérique qu'elles doivent subir: le mode d'interpolation, le choix du mode de cotation, le choix du cycle d'usinage, le choix de l'outil, etc.
- Les données technologiques, qui précisent, compte tenu des caractéristiques et des performances de la machine (puissance des moteurs d'entraînement, performances de la broche et des organes mobiles), les conditions de coupe optimales dans lesquelles pourra s'effectuer l'usinage. Elles concernent principalement la vitesse de rotation de la broche, les vitesses d'avance et la commande de l'arrosage.

2.2.2 Formats des langages

Les instructions d'un programme sont écrites dans un langage codé appelé langage machine dont le format variable et les adresses répondent aux normes internationales : ISO 6983-1 (NF Z 68-035), NF Z 68-036 et NF Z 68-037.

Le langage utilisé pour décrire les opérations d'usinage sur une MOCN comporte un certain nombre de lignes d'écriture appelées blocs d'information, chaque ligne correspondant à une étape particulière du processus d'usinage (figure 6.9). Chaque bloc, ou séquence d'usinage, contient plusieurs mots qui sont la combinaison de lettres d'identification appelées adresses et d'une série de chiffres accompagnés ou non d'un signe (+) ou (-).

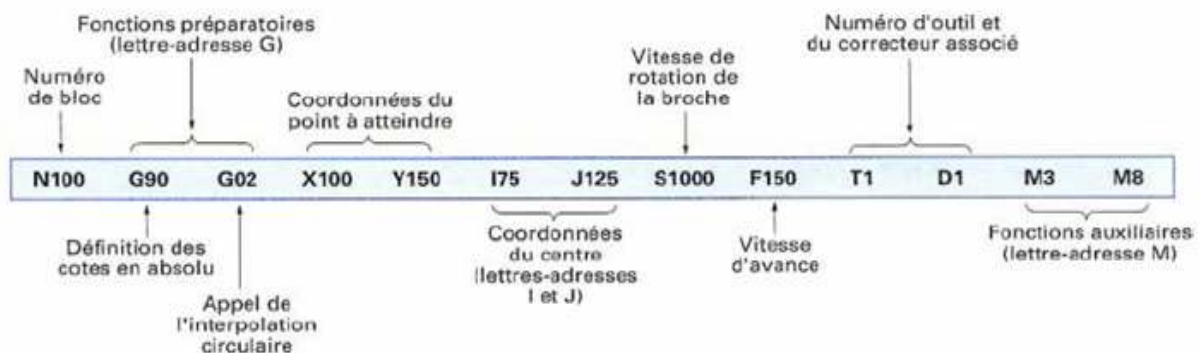


Figure 6.9. Structure d'un programme d'usinage avec l'organisation d'un bloc

La plupart des machines actuelles acceptent des blocs à format variable dans lesquels ne figurent que les seules instructions nécessaires à leur exécution. Celles déjà fournies et encore actives n'ont pas à être répétées. Chaque fabricant de CN spécifie, dans son manuel de

programmation, la façon d'écrire les données numériques allouées aux différentes lettres-adresses (nombre de chiffres avant et après la virgule, mode de séparation des entiers et des décimales, etc.). A titre d'exemple, les lettres-adresses usuelles retenues par NUM sont indiquées sur le tableau 1.

▪ Un programme commence toujours par le signe "%", suivi du N° du programme et éventuellement un commentaire entre parenthèses de 40 caractères maximum.

Exemple : % 250 (Carter en AU5GT Réf.79-80100)

▪ Le numéro de bloc (adresse N suivie d'un nombre de 1 à 5 chiffres) figure obligatoirement au début de chaque bloc. Les blocs sont numérotés dans un ordre croissant de 5 en 5 ou de 10 en 10 permettant ainsi l'insertion des lignes en cas d'erreur.

▪ Les fonctions préparatoires (adresse G suivie d'un nombre de 1 à 2 chiffres – tableau 2) définissent le déroulement de certaines fonctions de commande et préparent la CN à exécuter une action bien précise. Ce sont généralement des ordres de déplacement, de décalage, d'appels de cycles spécifiques d'usinage, etc. Ces fonctions peuvent être modales, c'est-à-dire auto-maintenues tant qu'elles ne sont pas révoquées par une fonction contradictoire, ou non modale lorsqu'elles ne sont actives que dans le bloc où elles sont programmées. Un bloc d'information peut contenir plusieurs fonctions préparatoires si elles ne sont pas contradictoires.

▪ Les ordres de déplacement, composés d'une adresse accompagnée de sa valeur formatée, sont les suivants :

- X, Y, Z pour les mouvements principaux,
- U, V, W pour les mouvements secondaires,
- I, J, K pour les paramètres d'interpolation,
- A, B, C pour les coordonnées angulaires ;

▪ Les mots correspondant aux fonctions diverses sont appelés par leurs adresses :

- S pour la vitesse de rotation de la broche,
- F pour la vitesse d'avance demandée aux organes mobiles,
- T pour le numéro d'outil,
- D pour le numéro du correcteur d'outil,
- R pour la programmation d'un cercle par son rayon en interpolation circulaire.

▪ Les fonctions auxiliaires (adresse M suivie d'un nombre de 1 à 3 chiffres – tableau 3) servent essentiellement à la programmation des fonctions de commutation de la machine.

Tableau 1.

ADRESSE ET FORMAT [...]	DESIGNATION
% [04]	Début du programme avec précision de son numéro
N [05]	Numéro de séquences (0 à 32767)
G [02]	Fonctions préparatoires
H [04]	N° de sous-programme d'usinage dans la séquence d'appel comportant G77
X [±053]	Déplacement en X : premier axe principal. Programmé au diamètre ou au rayon en tournage
Y [±053]	Déplacement en Y : Deuxième axe principal en fraisage
Z [+053]	Déplacement en Z : coïncide avec l'axe de l'élément tournant
I [±053]	En G2 ou G3, coordonnées absolues ou relatives du centre du cercle
J [±053]	En G33 ou G38, K pas du filet projeté sur X ou Z suivant l'angle de cône
K [±053]	En G64 ou G65, surépaisseur d'ébauche suivant X ou Z
C [033]	Axe broche indexé modulo 360°

P [053]	En G33, profondeur totale du filet En G64 ou G65, pénétration à chaque passe suivant X En G66, valeur du pas suivant X En G83 ou G87, valeur de la première pénétration
F [052]	En G94, vitesse d'avance exprimée en mm/mn. Max. 15 m/mn En G95, F023 : vitesse d'avance en mm/tr. Max. 16 mm/tr En G33, F01 : nombre de filets En G04, F022 : valeur de la temporisation. Max. 99.99s.
M [03]	Fonctions auxiliaires : 32 décodées, 224 codées
S [05]	En G97, vitesse de rotation de broche en tr/mn En G96, vitesse de coupe en m/mn En G92, vitesse de broche maximum en tr/mn En G33, nombre de passes En G77, nombre de répétitions d'un sous-programme
T [05]	Numéro d'outil de 0 à 65000
D [02]	Numéro de correcteur de 0 à 99
L [03]	Variables programmes de 0 à 19 et de 100 à 199

2.2.3 Fonctions de programmation

Tableau 2. Fonctions préparatoires (G).

CODE	REVOCACTION	DESIGNATION
G00	G01 – G02 – G03 - G33	Interpolation linéaire en rapide
G01*	G00 – G02 – G03 - G33	Interpolation linéaire à la vitesse programmée
G02	G00 – G01 – G03 - G33	Interpolation circulaire à la vitesse tangentielle programmée, sens horaire
G03	G00 – G01 – G02 - G33	Identique à G02 mais en sens anti-horaire
G04	Fin de bloc	Temporisation programmable avec l'adresse F
G09	Fin de bloc	Arrêt précis en fin de bloc avant enchaînement sur le bloc suivant
G10	Fin de bloc	Arrêt d'usinage sur acquisition du signal "Butée fin de bloc" ou sur détection d'un seuil mesuré, et saut à un autre bloc ou enchaînement sur le bloc suivant
G12	Fin de bloc	Survitesse par manivelle
G16*	Fin de bloc	Définition de l'axe de l'outil à l'aide des adresses PR
G20*	G21	Programmation en X et Z
G21	G20	Programmation cartésienne sur le couple d'axes rotatif (C) et rectiligne (X)
G33	G00 – G01- G02 – G03	Filetage à pas constant
G38	G00 – G01- G02 – G03	Filetage enchaîné sur cône
G40	G41 – G42	Annulation de la correction d'outil suivant le rayon
G41	G40 – G42	Correction de rayon d'outil à gauche du profil
G42	G40 – G41	Correction de rayon d'outil à droite du profil
G52	Fin de bloc	Programmation absolue des cotes par rapport à l'origine mesure
G53	G54	Suspension du zéro programme par rapport au zéro machine
G54*	G53	Validation du zéro programme par rapport au zéro machine

G59	Fin de bloc	Décalage d'origine programmé. S'ajoute au décalage validé par G54
G64	G80	Cycle d'ébauche paraxial
G65	Fin de bloc	Cycle d'ébauche de gorge
G66	Fin de bloc	Cycle de défonçage
G70	G71	Entrée des données en pouce
G71*	G70	Entrée des données en métrique
G75	Fin de bloc	Validation d'un sous-programme de dégagement d'urgence
G76	Fin de bloc	Transfert des valeurs courantes des paramètres dans le programme pièce
G77	Fin de bloc	Appel inconditionnel d'un sous-programme ou d'une suite de séquences avec retour
G79	Fin de bloc	Saut conditionnel ou inconditionnel à une séquence sans retour
G80*	G64 – G83 - G87	Annulation de cycle d'usinage
G83	G80 – G64 - G65 - G66 - G87	Cycle de déburrage
G87	G80 – G64 - G65 - G66 - G83	Cycle de brise-copeaux
G90*	G91	Programmation absolue par rapport à l'origine programme
G91	G90	Programmation relative par rapport au point de départ du bloc
G92 Sxx	M02	Limitation de la vitesse de broche
G92 X (Z)	Fin de bloc	Présélection de l'origine programme
G94*	G93 – G95	Vitesse d'avance exprimée en mm/mn
G95	G93 – G94	Vitesse d'avance exprimée en mm/tr
G96	G97	Vitesse de coupe constante
G97*	G96	Vitesse de broche en tr/mn (choix automatique de gamme)
G98		Définition du rayon ou du diamètre de départ lors de l'usage d'un plateau interpolé avec X et Z ou seul pour le calcul de la vitesse de rotation
* Fonctions initialisées à la mise sous-tension ou à la suite d'une remise à 0.		

Tableau 3. Fonctions auxiliaires (M).

CODE	FONCT. AVANT	FONCT. APRES	REVOCATION	DESIGNATION
M00		X	Action sur DCY	Arrêt programmé
M01		X	Action sur DCY	Arrêt optionnel
M02		X	% ou EOR	Fin de programme pièce
M03	X		M4-M5-M0-M19	Rotation de broche sens horaire
M04	X		M3-M5-M0-M19	Rotation de broche sens anti-horaire
M05*		X	M3-M4	Arrêt de broche
M06		X	Compte-rendu	Changement d'outil
M07	X		M9-M2	Arrosage n°2
M08	X		M9-M2	Arrosage n°1

M09*		X	M7-M8	Arrêt des arrosages
M10		X	M11	Blocage d'axe
M11	X		M10	Déblochage d'axe
M19		X	M3-M4-M5	Indexation broche
M24		Fonction Codée		Fermeture porte
M25		Fonction Codée		Ouverture porte
M40-M45	X			6 gammes de broche
M48*		X	M49	Validation des potentiomètres de broche et d'avance
M49	X		M48	Inhibition des potentiomètres de broche et d'avance
M64*	X		M65	Commande broche 1
M65	X		M64-M2	Commande broche 2
M66*	X		M67	Utilisation mesure broche 1
M67	X		M66-M2	Utilisation mesure broche 2
* Fonctions initialisées à la mise sous tension ou à la suite d'une remise à 0.				

2.2.4 Fonctions usuelles de programmation

Les fonctions que l'on est appelé à rencontrer sur une MOCN peuvent prendre des formes diverses. Les plus courantes sont :

- **Positionnement rapide (G00)**, qui impose aux organes mobiles d'atteindre le point programmé en effectuant une trajectoire linéaire, à la vitesse maximale permise par la machine. Des vitesses de plusieurs dizaines de mètres par minute sont des valeurs courantes sur la plupart des MOCN modernes ;
- **Interpolation linéaire (G01)**, qui permet d'atteindre le point programmé en parcourant une trajectoire linéaire à la vitesse d'avance spécifiée par le programmeur sous l'adresse F ;
- **Interpolation circulaire (G02 et G03)**, qui a pour fonction de décrire des cercles complets ou des arcs de cercle à partir de certains éléments géométriques caractéristiques qui les définissent, comme les coordonnées du centre et celles des points extrêmes ;
- **Programmation absolue (G90)**, la plus répandue lorsque les points à atteindre sont systématiquement cotés par rapport à l'origine programme (OP) ;
- **Programmation relative (G91)**, lorsque chaque point à atteindre est coté par rapport au point programmé dans le bloc précédent ;
- **Cycles d'usinage** : On appelle cycles d'usinage des programmes fixes stockés dans la mémoire de la CN en vue de faciliter l'exécution d'opérations d'usinage répétitives. A partir d'un nombre limité d'instructions fournies par le programmeur, la CN élabore un cycle complet d'usinage et le décompose suivant ses phases successives.

Généralement appelés par une fonction préparatoire, les cycles fixes d'usinage sont propres à chaque type de machine. Ils peuvent être :

- Des cycles d'ébauche, de dressage, de perçage, d'usinage de gorges, d'usinage avec outil tournant, de filetage sur les machines de tournage ;
 - Des cycles de perçage, de taraudage, d'alésage, de surfaçage, de rainurage, de contournage, d'usinage de poches sur les machines de fraisage ;
 - Des cycles de plongée, de balayage, d'épaulement de profilage et de diamantage des meules sur les machines de rectification.
- **Vitesse de rotation (S)** : Avec cette adresse, nous pouvons programmer la vitesse de rotation de l'outil sur une fraiseuse, perceuse, tour, etc.

Cette vitesse de rotation est programmée en tours par minute ou en mètres par minute.

Exemple: N5 G97 S1250 (tr/mn) / N5 G96 S80 (m/mn)

- **Avance de travail (F)** : Cette adresse permet de programmer la vitesse d'avance de travail sur une fraiseuse, perceuse, tour, etc.

Cette vitesse de déplacement est programmée en millimètre par minute ou en millimètre par tour de l'élément tournant.

Exemple : N50 G94 F300 (mm/min) / N50 G95 F0.3 (mm/tour)

Les vitesses et les avances sont à déterminer en fonction de l'outil utilisé, la matière à usiner et la nature du procédé. Les valeurs de S et de F une fois introduites dans le programme sont mémorisées et restent valables pour la suite du programme. Elles ne seront modifiées qu'au moment où l'on introduit une autre valeur correspondante qui sera à son tour mémorisée pour la suite du programme.

- **Fin de programme (M02)** : La fonction auxiliaire M02 est peut-être la plus importante de toutes. Elle indique la fin du programme et elle annule aussi la rotation de la broche et l'arrosage. Son but premier est de remettre en position de départ (premier bloc à exécuter).

- **Rotation de la broche (M03-M04)** : Ces deux fonctions auxiliaires donnent l'ordre de mise en rotation de la broche à droite (sens horaire) ou à gauche (sens anti-horaire). Elles se trouvent en principe dans le premier ou deuxième bloc d'un programme.

- **Arrêt de la broche (M05)** : Fonction auxiliaire qui commande l'arrêt de la rotation de broche et annule donc les fonctions M03, M04. Cette fonction est utilisée lors d'un changement d'outil dans le bloc précédant le bloc du changement d'outil et à la fin d'un programme à l'avant-dernier bloc. Cette manière de faire permet de vaincre l'inertie de la broche en rotation si celle-ci n'est pas équipée de frein.

- **Changement d'outil (M06)** : cette fonction auxiliaire prescrit un changement manuel ou automatique d'outils. Le choix des outils n'est pas régi par cette fonction, mais par la numérotation des outils. Cette fonction peut arrêter ou non automatiquement l'arrosage et la broche. Le choix du fabricant de CN doit être précisé dans le mode d'emploi de la commande numérique.

- **Commande d'arrosage (M07-M08)** : Fonctions auxiliaires qui enclenchent l'arrosage de type brouillard ou liquide par exemple.

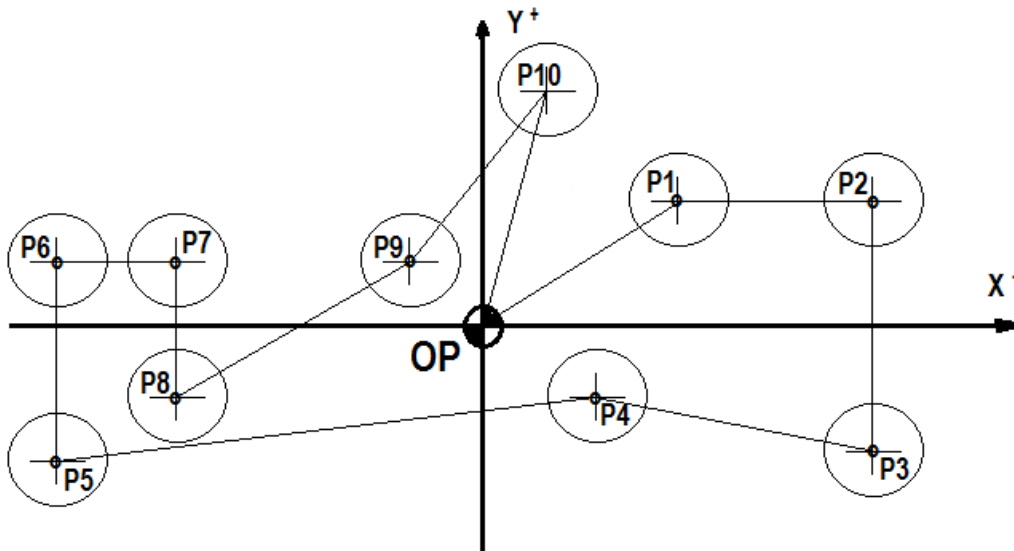
Arrêt d'arrosage (M09) : Fonction auxiliaire qui arrête les arrosages. Elle annule donc les fonctions M07 et M08. Ces trois fonctions peuvent être situées n'importe où dans un programme selon les besoins de l'usinage.

TD N°3. Manipulation des fonctions de programmation par des exercices

Exercice 1 :

Réaliser le perçage de 10 trous débouchant sur MOCN, répartis sur la face d'une plaque en acier de 10 mm d'épaisseur.

Si le format variable est de type $X\pm 3.2$ et $Y\pm 3.2$, écrire deux programmes de la trajectoire aller-retour à OP en programmation absolue et relative.



Coordonnées des points :

Point	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X	50	150	150	30	-185	-185	-130	-130	20	-25
Y	50	50	-51	-28	-45	20	20	-18	85	18

Point P1 : Ecriture brute du bloc 1 :

```
N001 G00 X+050.00 Y+050.00
```

A) Ecriture du bloc 1 avec suppression du signe (+) et les zéros de tête.

```
N1 G X50.00 Y50.00
```

B) Ecriture du bloc 1 avec suppression du signe (+), du point séparateur et les zéros de tête.

```
N1 G X5000 Y5000
```

C) Ecriture du bloc 1 avec suppression des zéros de queue.

```
N1 G X+05Y+05
```

Cas B) : Programmation absolue :

```
% 254
```

```
N1 G X5000 Y5000
```

```
N2 G X15000
```

Cas C) : Programmation relative :

```
% 255
```

```
N1 G X+05 Y+05
```

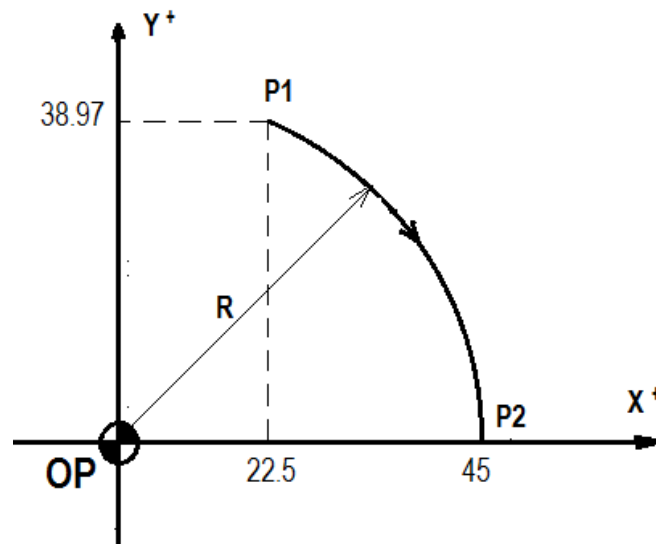
```
N2 G X+1
```

N3	G	Y-5100		N3	G	Y-101	
N4	G	X3000	Y-2600	N4	G	X-12	Y+025
N5	G	X-18500	Y-4500	N5	G	X-215	Y-019
N6	G	Y2000		N6	G	Y+065	
N7	G	X-13000		N7	G	X+055	
N8	G	Y-1800		N8	G	Y-038	
N9	G	X2000	Y8500	N9	G	X+15	Y+103
N10	G	X-2500	Y1800	N10	G	X-045	Y-067
N11	G	X	Y	N11	G	X+025	Y-018
N12	G	M2		N12	G	M2	

Exercice 2 :

Réaliser le contournage du point P1 au point P2 sur la face d'une plaque en acier de 10 mm d'épaisseur.

Si le format variable est de type $X\pm 3.2$ et $Y\pm 3.2$, écrire deux programmes de la trajectoire P1-P2 en programmation absolue et relative avec suppression du signe (+) et les zéros de tête. Le point séparateur sera présent.



En contournage, on utilise la fonction G02/G03, les coordonnées du point d'arrivée P2 et les coordonnées du centre de rotation par rapport au point de départ P1. Dans le plan XY, on introduit I et J.

Point P1-Point P2 : Ecriture brute du bloc 2 :

```
N002 G02      X+045.00      Y+000.000 I-022.50  J-038.97
```

Ecriture du bloc 2 avec suppression du signe (+) et les zéros de tête.

```
N2  G2      X45.00      Y  I-22.50  J-38.97
```

Programmation absolue :

```
% 256
N1  G  X22.50 Y38.97
N2  G2 X45.00 Y I-22.50 J-38.97
N3  G  X      Y
N4  M2
```

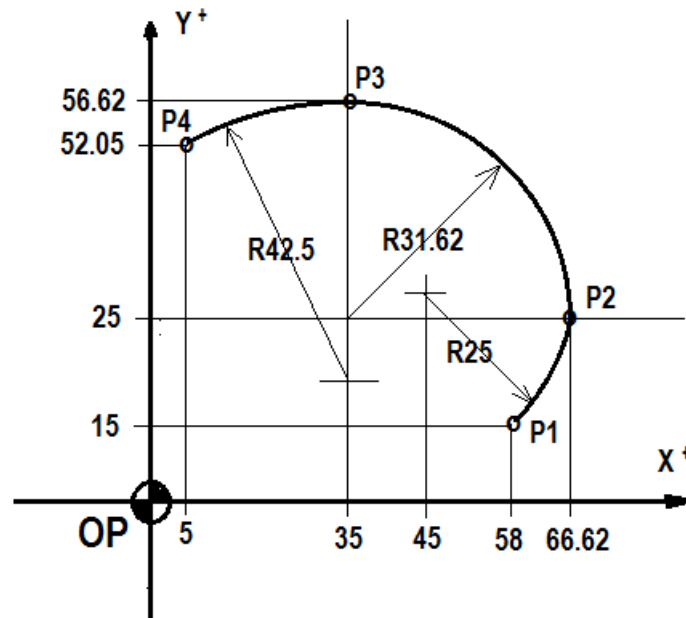
Programmation relative :

```
% 257
N1  G  X22.50 Y38.97
N2  G2 X22.50 Y-38.97 I-22.50 J-38.97
N3  G  X-45.00 Y
N4  M2
```

Exercice 3 :

Réaliser le contournage du point P1 au point P4 sur la face d'une plaque en acier de 10 mm d'épaisseur.

Si le format variable est de type X±3.2 et Y±3.2, écrire deux programmes de la trajectoire P1-P4 en programmation absolue et relative avec suppression du signe (+) et les zéros de tête et le point séparateur.



En contournage, pour se déplacer du point P1 au point P4, il faut séparer les arcs qui n'ont pas le même rayon. Dans ce cas, les coordonnées du point d'arrivée et les coordonnées du centre de rotation par rapport au point de départ de chaque segment.

Dans le plan XY, on introduit I et J du segment P1-P2, P2-P3 et P3-P4.

Point P1-Point P2 : Ecriture brute du bloc 2 :

N002 G03 X+066.62 Y+025.00 I-013.00 J+021.35

Calcul : $J=(25^2-13^2)^{1/2}=21.35$

Ecriture du bloc 2 avec suppression du signe (+), des zéros de tête et du point séparateur.

N2 G3 X6662 Y2500 I-1300 J2135

Programmation absolue :

```
% 258
N1 G X5800 Y1500
N2 G3 X6662 Y2500 I-1300 J2135
N3 X3500 Y5662 I-3162 J
N4 X500 Y5205 I J-4250
N5 X Y
N6 M2
```

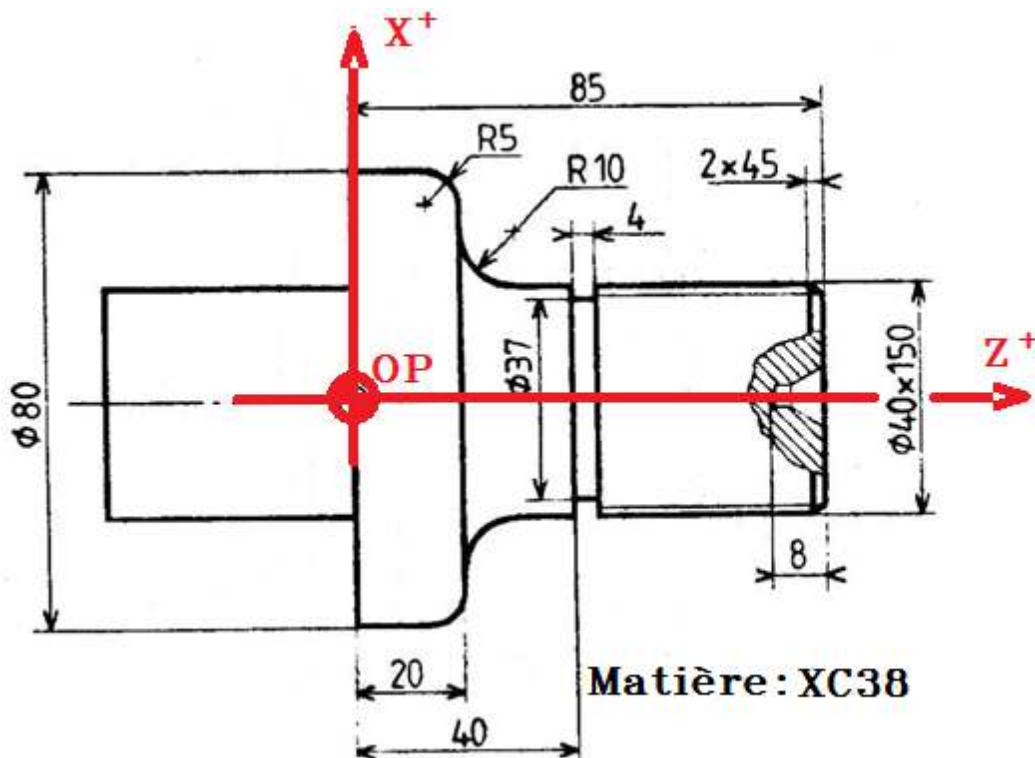
Programmation relative :

```
% 259
N1 G X5800 Y1500
N2 G3 X862 Y1000 I-1300 J2135
N3 X-3162 Y3162 I-3162 J
N4 X-3000 Y-457 I J-4250
N5 X-500 Y-52.05
N6 M2
```

TD N°4. Programmation sur un tour

Il s'agit de réaliser le tournage de la pièce ci-dessous.

- La forme extérieure est très proche à celle de la pièce finie ;
- Le plus grand diamètre est de 85mm ;
- La précision de la machine est de 1/1000 ;
- Le tournage est réalisé de gauche à droite pour l'ébauchage et de droite à gauche pour la finition ;
- La programmation doit se faire avec suppression du signe +, des zéros de tête et le point séparateur.



Listing du programme

% 2018 (Pièce en XC38)					
N10	G52	G	X	Z	
N20	T1D1	M6			
N30	S400	M43			
N40	G92	S2500			
N50	X	Z86000	S1000	M3	
N60	G1G95	Z77000	F50	M8	
N70	G4	F200			
N80	G	Z86000	M9		
N90	X120000	Z100000	M5		
N100	T2 D3	M6			
N105	G59	X1000	Z200		
N110	X42500	Z87000	M4		
N120	G96	Z	S150	M8	
N130	G64	Z-2000	F350	P1250	
N140	X40000				
N150	Z15000				
N160	G2	X35000	Z20000	I-5000	K
N170	G1	X30000			
N180	G3	X20000	Z30000	I	K10000
N190	G1	Z83000			
N200	X17000	Z86000			
N210	G	G80	X120000	Z100000	
N220	G97	S800			
N230	T3D5	M6			
N240	G59	X	Z		
N250	X16000	Z87000			
N260	G96	X16000	S180		
N270	G 64	G42	F200		
N280	G	G40	X120000	Z100000	
N290	G97	S1000			
N300	T4D4	M6			
N310	X21000	Z40000			
N320	G1	X18500	F100		
N330	X21000	F1000			
N340	Z41000				
N350	X18500	F100			
N360	Z40000	F50			
N370	X21000	F1000			
N380	G	X120000	Z100000	M5	
N390	T5D11	M6			
N400	X22000	Z88000	M3		
N410	G33	Z-46000	K1500F-200	S2	
N420	F-150	S3			
N430	F-20	S1			
N440	G	X120000	Z100000	M5	
N450	M9				
N460	M2				

↳ Début programme pièce.

↳ Programmation absolue des cotes / 0M.

↳ Outil 1, correcteur 1, évolution tourelle (Centrage).

↳ Vitesse (tr/min), Choix de la gamme de fréquences.

↳ Limitation de vitesse de broche (25000tr/min).

↳ Positionnement en aller rapide, Nb (1000tr/min).

↳ Interpolation linéaire, avance (0.05mm/tr), arrosage.

↳ Arrêt temporisé de 0.2s.

↳ Positionnement en retour rapide.

↳ Fin de centrage, arrêt de broche.

↳ Outil 2, correcteur 3, évolution tourelle (Chariotage).

↳ Décalage d'origine (prof. X=1mm, Z=0.2mm).

↳ Positionnement rapide, rotation broche sens horaire

↳ Vitesse de coupe constante, arrosage.

↳ Cycle débauche. Pénétration à chaque passe P / X.

↳ Interpolation circulaire. Valeurs de I et K.

↳ Interpolation linéaire.

↳ Interpolation circulaire.

↳ Interpolation linéaire.

↳ Positionnement.

↳ Positionnement et annulation du cycle d'usinage.

↳ Vitesse de rotation exprimée en tr/min.

↳ Outil 3, correcteur 5, évolution tourelle.

↳ Décalage origine (Programmé seul dans un bloc).

↳ Positionnement rapide

↳ Cycle de finition dans le sens inverse du profil

↳ Correction du rayon d'outil à droite du profil G42.

↳ Positionnement rapide et annulation du G42.

↳ Vitesse de rotation exprimée en tr/min.

↳ Outil 4, correcteur 4.

↳ Positionnement en rapide.

↳ Interpolation linéaire.

↳ Retour en interpolation linéaire.

↳ Déplacement en interpolation linéaire (2mm).

↳ Interpolation linéaire (1mm de largeur qui reste).

↳ Finition en interpolation linéaire selon Z.

↳ Retour en interpolation linéaire.

↳ Positionnement rapide, arrêt de la broche.

↳ Outil 5, correcteur 11, évolution tourelle.

↳ Positionnement en rapide, rotation sens anti-horaire

↳ Cycle de filetage à pas constant (Pas=1.5mm/Z).

↳ P1=0.2mm (S2=2passes), P2=0.15mm

↳ (S3=2passes), P3=0.02mm (S1=1passe).

↳ Positionnement rapide, arrêt de la broche.

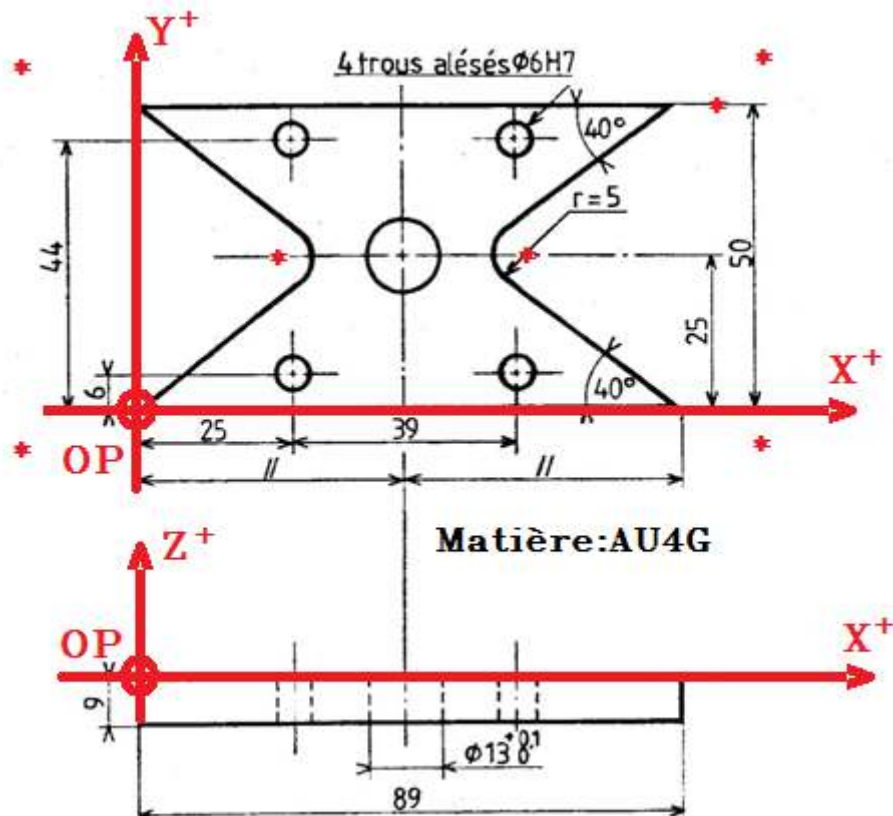
↳ Arrêt arrosage

↳ Fin de programme pièce.

TD N°5. Programmation sur une Fraiseuse

Il s'agit de réaliser le fraisage, le perçage et l'alésage sur la pièce ci-dessous.

- La forme extérieure est très proche à celle de la pièce finie ;
- La précision de la machine est de 1/1000 ;
- Le fraisage est réalisé en programmation absolue par rapport à l'origine mesure situé par rapport à OP des valeurs suivantes : X=100mm, Y=60mm et Z=40mm ;
- La programmation doit se faire avec suppression des zéros de tête et le point séparateur.



L'origine de la programmation OP est prise en général au point de départ de cotation et l'usinage se fait sans correction de l'outil en utilisant une fraise de 10mm de diamètre. Si on démarre le fraisage de la partie droite arrière, les coordonnées des points particuliers en programmation absolue sont regroupées dans le tableau suivant :

Fraisage							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
X	96.778	66.985	102.736	-13.736	22.015	-13.736	105.000
Y	50.000	25.000	-5.000	-5.000	25.000	55.000	55.000
Z	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000
Perçage et Alésage							
	P8 (13mm)	P9	P10	P11	P12	OP	OM
X	44.500	64.000	25.000	25.000	64.000	0.000	100.000
Y	25.000	44.000	44.000	6.000	6.000	0.000	60.000
Z	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	-12.000	0.000	40.000

Listing du programme

```

% 2016 (pièce en AU4G)
N10 G52 G X Y Z
N20 T1 M6
N30 G97 S3000 M3
N40 X96778 Y50000
N50 Z-12
N60 G1 G95 X66985 Y25000 F100 M8
N70 X102736 Y-5000
N80 X-13736
N90 X22015 Y25000
N100 X-13736 Y55000
N110 X105000
N120 G Z40000 M5 M9
N130 X100000 Y60000
N140 T2D2 M6
N150 S500 M3
N160 X44.500 Y25000
N170 Z2000
N180 G1 G94 Z-12.000 F500 M8
N190 Z2000 F2000
N200 G Z40000 M5 M9
N210 X100000 Y60000
N220 T3D3 M6
N230 S200 M3
N240 X64000 Y44000
N250 Z2000
N260 G1 Z-12.000 F200 M8
N270 Z2000 F2000
N280 G X25000
N290 G1 Z-12000 F200
N300 Z2000 F2000
N310 G Y6000
N320 G1 Z-12000 F200
N330 Z2000 F2000
N340 G X64000
N350 G1 Z-12000 F200
N360 Z2000 F2000
N370 G Z40000 M5 M9
N380 X100000 Y60000
N390 T4D4 M6
N400 S1000 M3
N410 X64000 Y44000
N420 Z2000
N430 G1 Z-12.000 F200 M8
N440 Z2000 F2000
N450 G X25000
N460 G1 Z-12000 F200
N470 Z2000 F2000
N480 G Y6000
N490 G1 Z-12000 F200
N500 Z2000 F2000
N510 G X64000
N520 G1 Z-12000 F200
N530 Z2000 F2000
N540 G Z40000 M5 M9
N550 X100000 Y60000
N560 M2

```

Références bibliographiques :

- [1] Technologie et usinage à commande numérique, Eléments de fabrication assistée par ordinateur, Ronald Cameron, Édition Saint-Martin 1996, ISBN2-89035-295-1, TS155.6.c35 1996 ;
- [2] La commande numérique des machines-outils, Claude Hazard, Édition Foucher, 1984, ISBN 2-2 16-00287-9, TJ1189 H29 ;
- [3] La commande numérique par calculateur, Paul Gonzalez, Édition Casteilla Educalivre, 1993, ISBN 2-7135-1229-8, TJ1189 G6593
- [4] Guide Pratique de l'usinage, 1 Fraisage, Rimbaud, Layes, Moulin, Édition Hachette Technique, 1992, ISBN 2-01-01 8900-0, TJ1189 G85 (T01) ;
- [5] Guide Pratique de l'usinage, 2 Tournage, Jacob, Malesson, Ricque, Édition Hachette Technique, 1992, ISBN 2-01-01 8899-3, TJ1189 G85 (T02) ;
- [6] Méthodes d'usinage; Méthodologie, production, normalisation, Dietrich, Garsaud, Gentillon, Nicolas, Édition Nathan AFNOR, 1981, ISBN 2-09-194015-1, TJ1185 P74 ;
- [7] Documentation technique des MOCN (consultation en laboratoire uniquement) ;
- [8] Documentation des logiciels (disponible en ligne) ;
- [9] Site Internet : <http://www.gpa.etsmtl.ca/cours/gpa664/index.htm>
- [10] Consulter les ouvrages disponibles à la bibliothèque centrale sur :
<http://www.univ-guelma.dz/bibliotheque/catalogue.asp>