

CHAPITRE II LA MACHINE OUTIL A COMMANDE NUMERIQUE

2.1 Définition d'une Machine Outil à C.N.

Les machines à C.N. sont des machines totalement ou partiellement automatiques auxquelles les ordres de mouvements sont communiqués grâce des signes symboliques portés sur un support matériel (ruban perforé, disque ou bande magnétique)

2.2 Schéma de la MO à C. N.

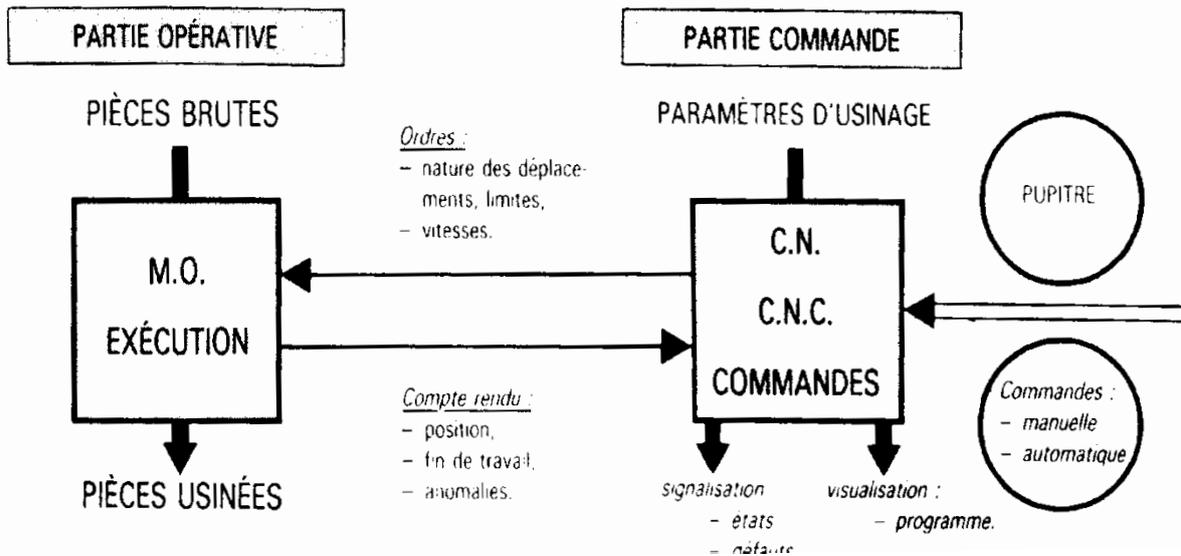


Figure 1. Schéma simplifié de la machine à commande Numérique

La fonction de la machine est d'usiner complètement ou partiellement une pièce conforme au dessin de définition à partir d'une pièce brute. La valeur ajoutée entre l'entrée et la sortie du système est obtenue par apport d'énergie et d'informations ; l'opération réalisant le processus d'informations en commande numérique, consiste à introduire les paramètres d'usinage et à sélectionner le mode de marche. Par comparaison à une machine classique, le savoir faire de l'opérateur est remplacé par un système capable d'exploiter les données de forme et les données technologiques pour délivrer les ordres de mouvements et garantir la validité de ces mouvements pendant l'exécution.

2.2.1 Partie commande

La fonction de la partie commande est de transformer les informations codées du programme en ordres aux servomécanismes de la partie opérative, afin d'obtenir les déplacements des organes mobiles.

La partie commande peut être réalisée en :

- logique électronique câblée, installée dans une armoire appelée directeur de commande numérique (DCN).
- logique électronique programmée (à partir de microprocesseur) ; dans ce cas le directeur de commande est remplacé par un ordinateur (commande numérique par ordinateur : C.N.C.) qui augmente les performances de l'ensemble.

Microprocesseur : circuit intégré complexe qui peut assurer toutes les fonctions d'une unité centrale d'ordinateur, ses fonctions sont commandées par un programme.

La partie commande comprend :

- le support d'information (bande perforée, bande ou disque magnétique) sur lequel est consigné le programme d'usinage dans un langage compréhensible par le directeur de commande numérique.
- l'élément logique ou comparateur, ayant pour fonction la confrontation permanente de la position actuelle du mobile avec la position programmée.

Les tâches effectuées sur le site de la partie commande sont :

- le chargement du programme-pièce en mémoire.
- référencer " les origines-machines "
- référencer " les origines-pièces "
- introduire les dimensions des outils.
- modifier les correcteurs des outils.
- modifier le programme.
- lire le déroulement du programme
- utiliser, au niveau du pupitre, les touches de commande.

2.2.2 Partie Opérative

La partie opérative se compose :

- de la table support de pièces, équipée de systèmes de commande (vis et écrou à billes), mobile selon deux ou trois axes.
- des moteurs d'entraînement de la table suivant les divers axes.
- de l'élément de mesure ou capteur de position qui informe à tout instant sur la position du mobile (sur chaque axe).
- le capteur de vitesse (dynamo- tachymétrique) qui mesure la vitesse de rotation.

Si la partie opérative est dotée d'un magasin d'outils avec un dispositif de changement automatique d'outils ; la machine est appelée centre d'usinage. Le magasin est géré par la partie commande de la C. N.

Les tâches effectuées sur le site de la partie opérative sont :

- chargement et déchargement des (pièces et portes pièces), la mise en position et maintien en position.
- chargement et déchargement des (outils et portes outils), mise en position et maintien en position de l'un par rapport à l'autre.
- interventions manuelles nécessitées par l'usinage et l'entretien.
- surveillance de l'usinage.
- contrôler dans le cas d'incidents non prévus ou non détectables par la technologie de la machine.

2.2.3 Liaison entre la partie commande et la partie opérative

La liaison entre la partie commande et la partie opérative est représentée sur la figure 2.

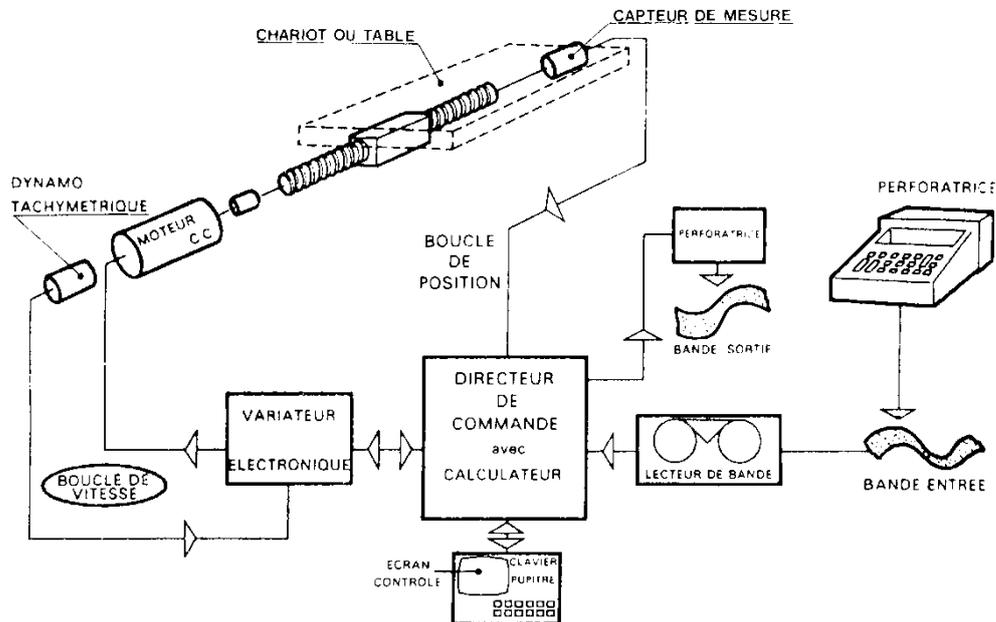


Figure 2. Liaison de la partie Commande et la partie opérative

Les machines outils commandées numériquement sont dotées de servomécanismes qui permettent d'assurer un mouvement relatif entre l'outil et la pièce suivant les grandeurs de consigne précisées par le support d'informations.

Le déplacement de l'élément mobile (outil ou pièce) d'une position à une autre implique la connaissance :

- de l'axe (X, Y, Z, ...) de déplacement
- des coordonnées de la position à atteindre
- du sens de déplacement

- de la vitesse de déplacement

Ces données consignées (mémorisées) sur le support de programme (bande perforée, ou magnétique) lues par le lecteur de bande et traitées par le DCN ou la CNC, commandent automatiquement le fonctionnement du moteur intéressé dans le sens et à la vitesse précisées. Les déplacements sont obtenus mécaniquement au moyen d'une chaîne cinématique.

2.3 Particularité de construction des M-O à C.N.

2.3.1 Commande de déplacement

Le matériel nécessaire à l'entraînement d'un mobile de la machine outil à commande numérique est généralement composé de :

- le variateur de vitesses
- le moteur, associé généralement à une génératrice tachymétrique

- éventuellement un réducteur
- un mécanisme vis-écrou assurant le déplacement de l'élément mobile

Le mécanisme vis-écrou est remplacé par un système pignon-crémaillère dans les machines outils de grande dimension. On utilise parfois des moteurs hydrauliques pilotés par servo-valves lorsque les charges à déplacer sont importantes.

2.3.2 Les moteurs

Les principaux types de moteurs utilisés sont :

- moteurs à courant continu
- moteurs pas à pas
- moteurs hydrauliques linéaires et rotatifs, ils sont pilotés par servovalves

Les moteurs électriques employés sur les MO à CN sont d'une construction particulière, leurs rotors doivent avoir de faible moment d'inertie afin de réagir rapidement et avec précision aux moindres variations de leur courant de commande. Ils doivent pouvoir tourner avec régularité à des vitesses très faibles et assurer une vitesse suffisamment élevée pour garantir les déplacements brefs en avance rapide.

Les moteurs électriques les plus convenables aux asservissements (servomoteurs) sont des moteurs à courant continu avec champ magnétique crée par des aimants permanents ; leurs rotors sont réalisés sous forme d'un disque mince ou d'un cylindre allongé dans le but d'avoir une faible inertie. La commande du moteur est assurée par un dispositif électronique appelé variateur de vitesse

2.3.3 Variateur de vitesse

Le variateur de vitesse est composé des éléments suivants :

- le comparateur faisant la différence entre le signal de consigne de vitesse et le signal de vitesse mesurée.
- le régulateur qui assure une réponse suffisamment rapide et sans oscillations du moteur (d'où régulation).
- l'amplificateur délivrant la puissance nécessaire au moteur

Le variateur de vitesse assure aussi bien l'accélération que le freinage du servomoteur dans les deux sens de rotation. On rencontre deux types de variateurs :

- le variateur à thyristors ; plus économique pour commander les moteurs à fort couples.
- le variateur à transistors, qui est d'une mise en oeuvre plus simple et est utilisée sur les machines rigides à faible temps de réponse et à grande précision dynamique.

2.3.4 Transmission

La transmission du mouvement est réalisée à l'aide d'une chaîne cinématique. La chaîne cinématique assure donc le déplacement de l'élément mobile à partir de l'arbre du servomoteur ; tous les éléments de la chaîne doivent être rigides et sans jeu afin de garantir un positionnement précis. Par ailleurs, la chaîne cinématique doit avoir une faible inertie dans le but d'assurer une mise en position rapide. Les chaînes cinématiques doivent être les plus courtes et les plus directes possibles ; si les caractéristiques du moteur et l'encombrement le permettent, le moteur peut être lié directement à la vis. Dans le cas contraire, l'entraînement de la vis est réalisé au moyen d'un étage de réduction sans jeu avec une paire de roues dentées ou avec une transmission par courroie crantée.

Les vis de transmission des M-O à C.N. sont à circulation de billes (vis à double écrou à billes mobiles voir figure 3). Cette solution a pour objet d'éliminer le jeu cinématique et le jeu élastique dans le système vis-écrou de la chaîne cinématique. Une telle disposition permet de réduire le frottement entre la rainure hélicoïdale de la vis et l'écrou. Par conséquent le rendement dépasse 90 % et dans les

conditions difficiles l'échauffement reste minime. Grâce à ces excellentes propriétés, il est possible d'installer sur la vis un système de mesure de parcours par rotation, ce qui permet d'avoir des solutions économiques bien suffisantes et précises pour les conditions difficiles.

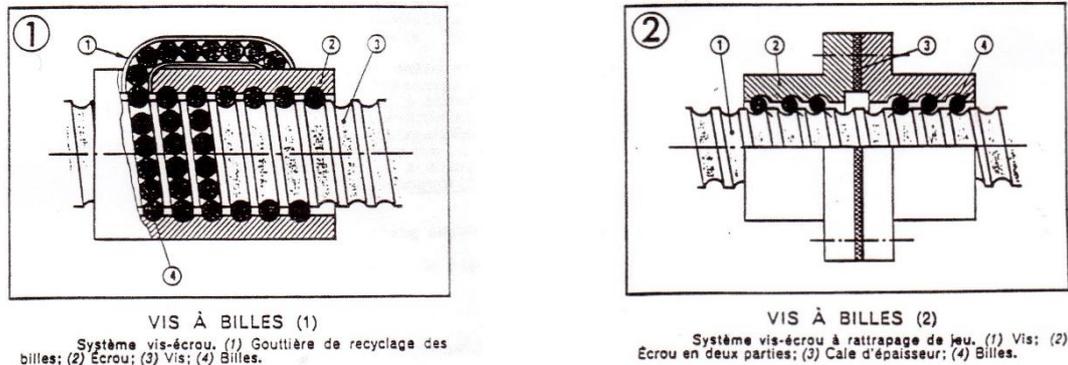


Figure 3. Vis-écrou à billes de recirculation

On utilise également les systèmes vis-écrou hydrostatique ; cette disposition permet d'atténuer le frottement et le jeu (voir figure 4).

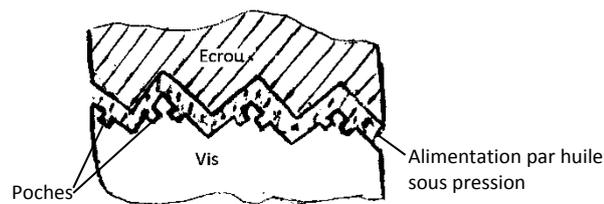


Figure 4. Vis-écrou hydrostatique

Remarque : pour les machines outils de grande dimension le système vis-écrou est remplacé par un système pignon-crémaillère.

2.3.5 Glissière

Le guidage des chariots de machines à C.N. est amélioré grâce à l'amélioration des glissières, on rencontre les solutions suivants :

- Glissières de chariot sur cage de roulement (voir figure 5)
- Glissières de chariot ouvertes supportées sur des roulements à aiguilles de différents diamètres (voir figure 6)
- Glissières en queue d'aronde avec quatre cages cylindriques séparées (voir figure 7)

Ces types de glissières permettent d'atténuer le frottement et d'améliorer la précision de déplacement des chariots de la machine outil.

- Glissière fluide (voir figure 8) ; dans cette disposition les surfaces de guidage sont séparées par une mince couche d'huile sous pression. la lubrification automatique garantit le bon fonctionnement des divers organes.

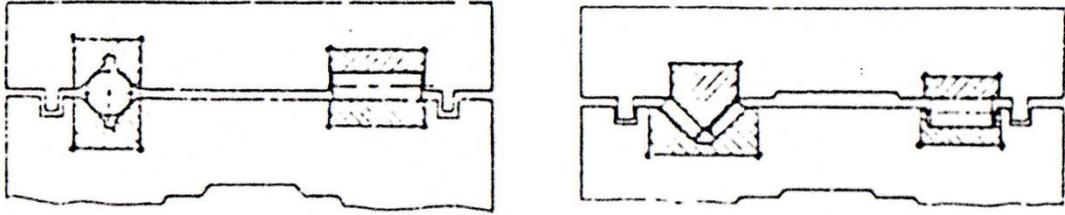


Figure 5. Glissières à cages de roulements

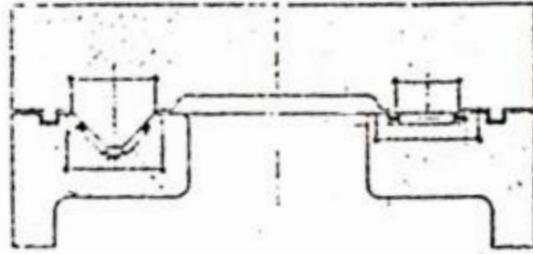


Figure 6. Glissières supportées par roulements à aiguilles

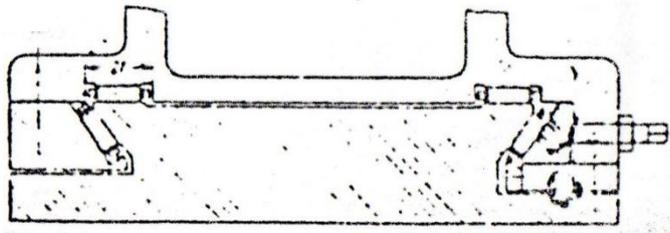


Figure 7. Glissières en queue d'aronde avec 4 cages cylindriques

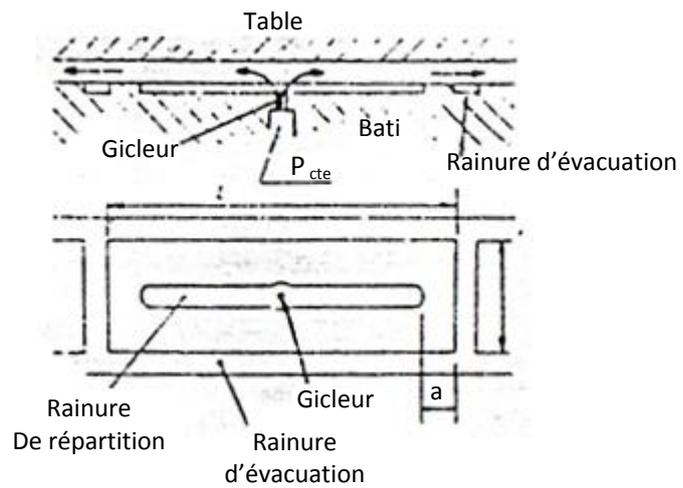
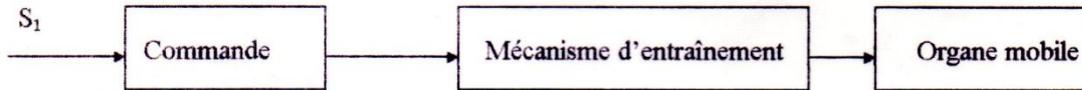


Figure 8. Glissières hydrostatiques

2.4 Mode de fonctionnement de la M O à C.N.

2.4.1 Commande Numérique à boucle ouverte



Ce type de C.N. ne dispose pas de retour d'informations ; il permet des réalisations simples et économiques.

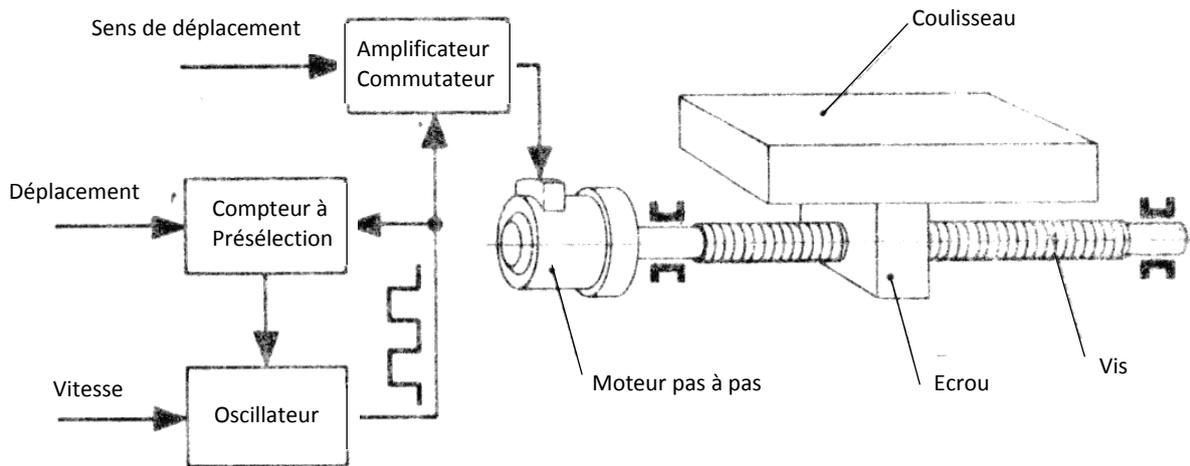


Figure 9. Asservissement à boucle ouverte

i) Principe de fonctionnement :

Le déplacement est affiché dans le compteur, ce dernier compte les impulsions de commande envoyées au moteur 'Pas à Pas' par le générateur d'impulsion. La porte logique (circuit logique à ouverture ou à fermeture) effectue la comparaison de la valeur affichée avec le nombre d'impulsions correspondant au déplacement demandé. Lorsqu'il y'a égalité des valeurs le moteur s'arrête et le mobile est stoppé.

Le couple du moteur ' Pas à Pas ' est limité, s'il existe une surcharge sur l'entraînement (effort exagéré, graissage incorrecte), le moteur perd des pas ; par conséquent la côte ne peut pas être réalisée correctement. la commande ne peut pas contrôler telle erreur car elle n'est pas dotée d'aucun moyen de contrôle effectif des déplacements.

Les commandes numériques à boucle ouverte ne sont appliquées que sur les M-O de faible puissance et à faible déplacement.

ii) Les Moteurs "Pas à Pas"

a) Généralités

Un moteur " Pas à Pas " est connu de manière à tourner d'un angle proportionnel au nombre d'impulsions qu'on lui fournit ; ainsi le contrôle du nombre d'impulsions permet la réalisation d'un déplacement angulaire précis, et la fréquence des impulsions permet d'obtenir la vitesse de rotation voulue. Cependant le moteur " Pas à Pas " permet de garantir une précision comparable à celle que l'on obtient avec une boucle fermée en utilisant un capteur de position, un capteur de vitesse et un moteur à courant continu. En outre ce type d'actionneur offre des avantages substantiels relativement à d'autres

solutions de motorisation, sur le plan de l'interface (la conversion digitale/ analogique est réalisée en fait par le moteur lui même), au niveau de l'asservissement il n'existe aucune boucle de contre réaction mais plutôt l'usage d'un simple commutateur électronique commandé par un circuit logique permettant de convertir les impulsions en une séquence d'états pour assurer la rotation du moteur.

Il existe trois types de moteurs " Pas à Pas " :

- moteur à aimant permanent
- moteur à réluctance variable
- moteur hybride

b) Moteur à aimant permanent

Il est constitué d'un aimant permanent bipolaire compris entre deux roues dentées décalées angulairement de la moitié du pas de denture (voir figure 10).

Lorsque les enroulements des pôles statoriques 1 et 3 sont alimentés, ils produisent respectivement un pôle nord et un pôle sud, alors le rotor prend une position stable comme présentée sur la figure 10 a; si l'on excite ensuite les enroulements 2 et 4 de façon à créer un pôle nord en 2 et un pôle sud en 4, le rotor prend une nouvelle position d'équilibre (figure 10 b) ayant ainsi pivoté d'un angle de 30° , les figures 1 c et 1 d montrent comment effectuer les Pas suivants.

c) Moteur à réluctance variable

Dans le moteur à réluctance variable, on utilise la propriété que possède une pièce en matériau magnétique doux placée dans un champ magnétique de prendre une position de réluctance minimale, provoquant ainsi un couple de rappel. Les dents taillées sur les pôles du rotor et du stator permettent d'exploiter cette propriété.

d) Moteur hybride

Chaque pôle du moteur hybride comporte un bobinage bifilaire et une structure dentée au niveau de l'entrefer. Les dentures des pôles successifs sont disposées de la manière d'un vernier par rapport à la denture rotative (voir figure 11). Un aimant annulaire, installé dans le rotor produit des polarités magnétiques opposées dans chaque culasse rotative ; celles ci comportent le même nombre de dents et sont angulairement décalées de demi-pas de denture. Lorsque l'une des phases du bobinage statorique est alimentée par un courant électrique, certains pôles du stator manifestent une force magnétomotrice qui s'ajoute à l'effet produit par l'aimant, par contre d'autres pôles prennent une nouvelle magnétisation qui tend à s'opposer au flux produit par l'aimant ; par conséquent, il en résulte un couple de maintien très important qui provient d'une part du flux produit par l'aimant permanent et d'autre part de l'effort d'attraction entre les dentures rotatives et statoriques dû au fonctionnement par réluctance variable. Lorsque le courant d'excitation est établi dans une autre phase du bobinage statorique, le changement du trajet du flux provoque le déplacement du rotor en avançant ainsi d'un pas,

soit $1^{\circ}8$ dans le cas d'un moteur à 200 Pas par tour. Donc à l'aide d'une séquence d'alimentation appropriée, on arrive à contrôler la rotation du moteur soit par Pas de $1^{\circ}8$ comme indiqué dans le tableau 1, soit par Pas de $0^{\circ}9$ comme indiqué dans le tableau 2. Dans ce cas, pour réaliser ce type de séquence d'alimentation, dit mode demi-Pas, on excite alternativement tous les pôles, puis la moitié des pôles, réalisant ainsi en quelque sorte une interpolation par rapport à la séquence précédente, dite mode Pas complet.

Tableau 1. Séquence d'excitation en mode "Pas complet"

Pas N°	Pôles							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	N	N	S	S	N	N	S	S
2	S	N	N	S	S	N	N	S
3	S	S	N	N	S	S	N	N
4	N	S	S	N	N	S	S	N
5	répétition du pas N° 1							
.								
.								
.								
.								
200 Pas / tr , rotor 50 dents								

Tableau 1. Séquence d'excitation en mode "demi-pas"

Pas N°	Pôles							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	N	N	S	S	N	N	S	S
2		N		S		N		S
3	S	N	N	S	S	N	N	S
4	S		N		S		N	
5	S	S	N	N	S	S	N	N
6		S		N		S		N
7	N	N	S	S	N	N	S	S
8	N		S		N		S	
9	Répétition du Pas N° 1							
400 Pas / tr , rotor 50 dents								

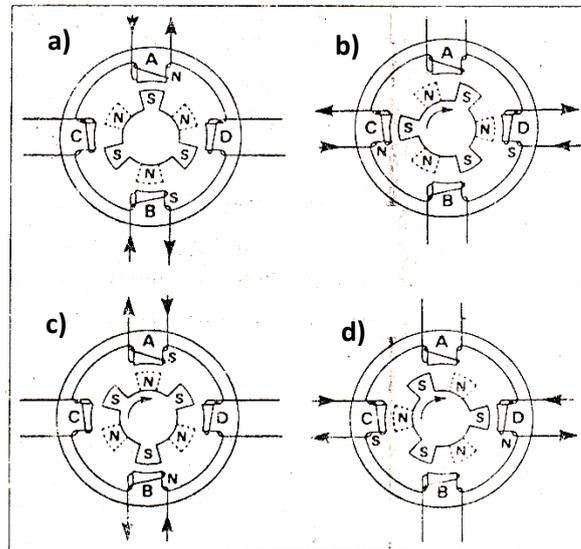


Figure 10. Schéma du moteur à aimant permanent ; (La rotation est obtenue par excitation séquentielle de bobinage)

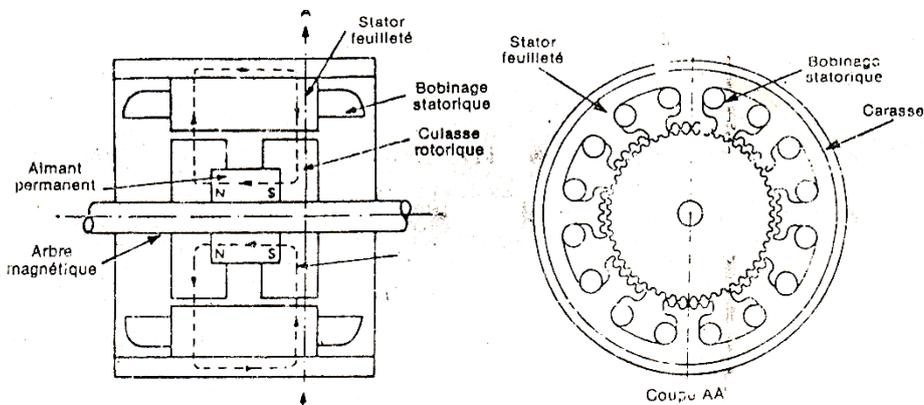


Figure 10. Schéma d'un moteur pas à pas de type hybride

2.4.2 Commande numérique boucle fermée (figure 11)

Ce type de commande fonctionne avec deux courants d'information (asservissement)

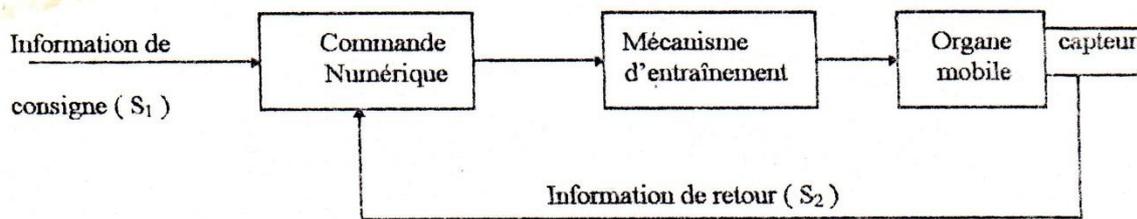


Figure 11. Schéma simplifié d'une commande Numérique à boucle ouverte

2.4.2.1 Principe de l'asservissement d'un mobile

la fonction principale de la C. N. est le contrôle des déplacements, que ce soit au moment de la mise en position (pour une commande point à point) ou de manière permanente (pour une commande de contournage). Pour assurer le déplacement conforme de l'élément mobile de la M-O à C.N. à la valeur programmée on réalise un asservissement de position (c'est à dire un système en boucle fermée).

2.4.2.2 Asservissement en position

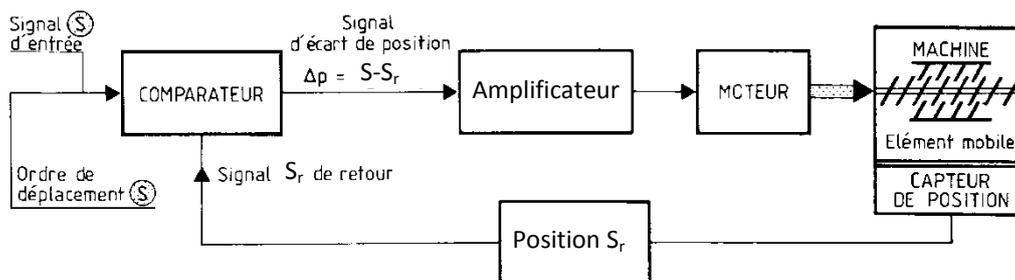


Figure 12. Schéma simplifié d'une commande Numérique à boucle fermée

La grandeur de sortie (la position effective de l'organe mobile) est mesurée continuellement par un capteur et est transmise au moyen d'une boucle de retour au comparateur pour y être comparée avec la grandeur d'entrée (position S). Le comparateur confronte les signaux S et S_r et délivre un signal d'écart de position $\Delta P = S - S_r$. Ce signal d'erreur assure la commande de la rotation du moteur dans le sens adéquat afin de rattraper l'écart de position entre la valeur d'entrée et la valeur actuelle. Lorsque ΔP s'annule ($\Delta P = 0$) alors le moteur s'arrête, autrement dit la position prescrite est atteinte.

2.4.2.3 Asservissement en position et en vitesse

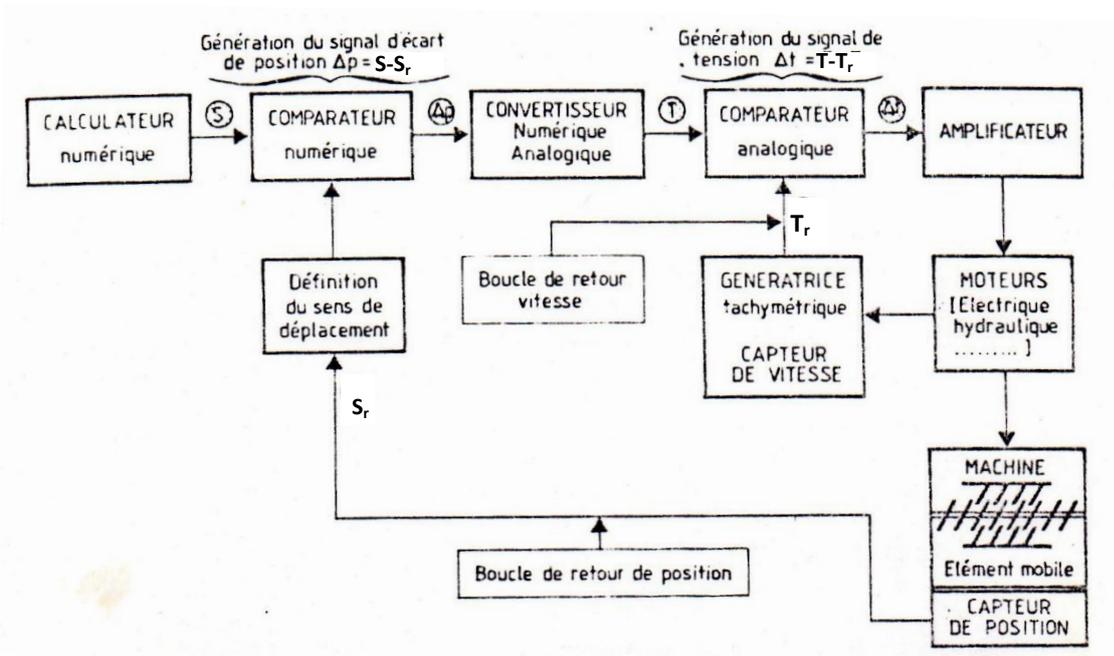


Figure 13. Schéma de l'asservissement en position et en vitesse

S - position affichée de l'élément mobile

Sr - position réelle de l'élément mobile

ΔP - signal d'écart de position

T - signal ΔP transformé en grandeur électrique au moyen du convertisseur Numérique / analogique.

Tr - signal de la vitesse réelle de l'élément mobile délivré par la génératrice tachymétrique.

Δt - signal de l'écart de vitesse ($\Delta t = T - Tr$)

Si $S = Sr \implies \Delta P = 0$ d'où $T = 0$; $\Delta t = 0$; $Tr = 0$

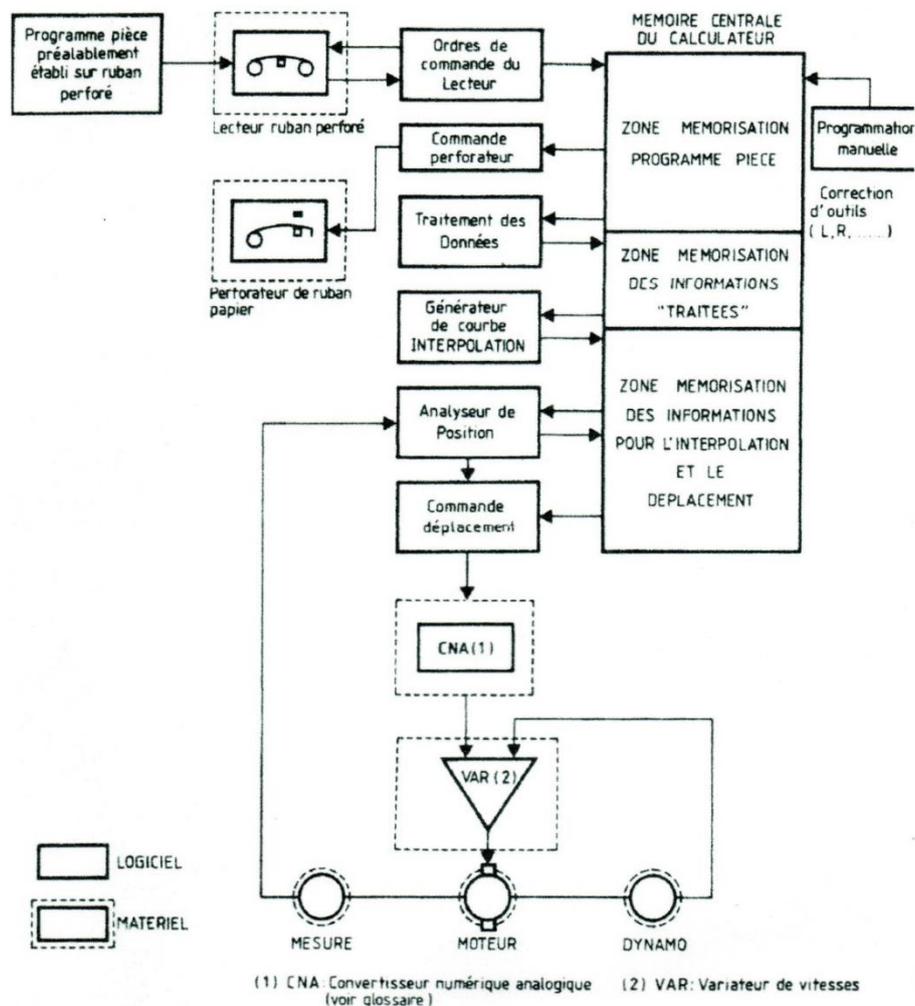
2.5 Traitement de la mesure sur machine à commande numérique par ordinateur (CNC)

La CNC utilise un ordinateur qui se charge du traitement sous forme de programme (logiciel) de certaines fonctions, ce qui offre ainsi de grandes possibilités aux machines-outils. Le logiciel d'une CNC permet d'accomplir par le ordinateur la gestion de tous les organes d'une machine-outil, par exemple (changeur d'outil, transpalette,...). Par ailleurs, il assure la mise en mémoire du programme pièce, ce qui permet de le mettre au point plus facilement d'où un grand avantage par rapport à la CN à logique câblée.

Nous admettons deux types de programmes :

- Le logiciel CNC, c'est le programme du ordinateur (programme machine) et qui est inaccessible par l'utilisateur
- Programme pièce réalisé par l'utilisateur pour l'exécution d'une pièce sur la machine-outil à CN

2.5.1 Synoptique de la machine CNC



2.5.2 Analyse du synoptique de la CNC

- Entrée des données :
 - 1- Le programme "logiciel CNC", perforé sur ruban est initialement chargé en mémoire centrale du ordinateur.
 - 2- Le programme pièce et les indications chargées manuellement, indispensables à l'exécution d'une pièce donnée.

Le programme pièce lu par le lecteur de ruban perforé est chargé dans les mémoires du calculateur, suivant un processus contrôlé par le logiciel CNC.

Un certain nombre de paramètres peuvent être chargés en mémoire à partir des commandes manuelles, à savoir :

- les corrections de rayons d'outil, de longueur d'outils,...
- les décalages d'origine
- etc.

Le programme pièce peut être aussi modifié (ajout, suppression, correction de blocs), il peut être chargé en mémoire par clavier.

- **Traitement des données :**

Cette fonction a pour but de traiter les informations (données) du programme pièce, afin de les rectifier en les ramenant à leurs valeurs d'usinage (par exemple correction d'outil). Cette fonction est totalement exécutée par le Logiciel CNC.

- **Mémoires**

Le calculateur dispose d'une mémoire centrale scindée en trois zones, sa taille est variable selon l'utilisation

- **Générateur de courbe**

C'est la fonction interpolation de la trajectoire à exécuter sur la machine-outil : droite, arc de cercle, ... Cette fonction est totalement effectuée par le Logiciel CNC, appelés interpolateurs

- **Analyseur de position :**

Cette fonction a pour rôle de déterminer la vitesse d'avance, le point d'arrêt, ...etc. Elle est opérée par le Logiciel CNC.

- **Commande de déplacement :**

Cette fonction est commandée par le Logiciel CNC, mais exécutée par une partie matériel (convertisseur numérique analogique (N/A), variateur de vitesse (VAR), capteur de mesure, ...etc.).

- **Perforation :**

A l'aide de cette fonction, il est possible de perforer un ruban à partir du programme pièce enregistré dans la mémoire centrale du calculateur. Cette fonction est régie par le logiciel CNC, elle n'existe pas dans une machine CN.