

Chapitre 3. Classification des Machines-outils à C. N.

3.1- Introduction

Le classement des machines-outils est indispensable car il aide à leurs choix pendant l'étude de la gamme fabrication du produit. Classiquement, les machines sont classées en fonction des formes de pièces à réaliser (cylindrique sur tour, ou parallélépipédique sur fraiseuse). Avec l'arrivée des commandes numériques et les nouvelles solutions de conceptions des parties opératives, les machines-outils sont maintenant classées selon la nature et le nombre de mouvements élémentaires qu'elles peuvent mettre en œuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce.

3.2- Classification suivant le mode de déplacement des tables support de pièces

On distingue trois types :

- Machine à déplacement par positionnement "point à point"
- Machine à déplacement "paraxial"
- Machine à déplacement "continu"

Dans les deux premiers types, les déplacements s'effectuent soit successivement, soit de manière combinée avec une commande unique. Le troisième type dispose d'une relation de fonctionnement entre les déplacements sur les axes de coordonnées ; il y'a donc autant de moteurs que d'axes.

3.2.1 Déplacement par positionnement "point à point"

Le positionnement des organes de la machines s'effectue dans des points fixes. Ces points définissent les positions de la pièce par rapport à l'outil, comme montré sur la figure 1.

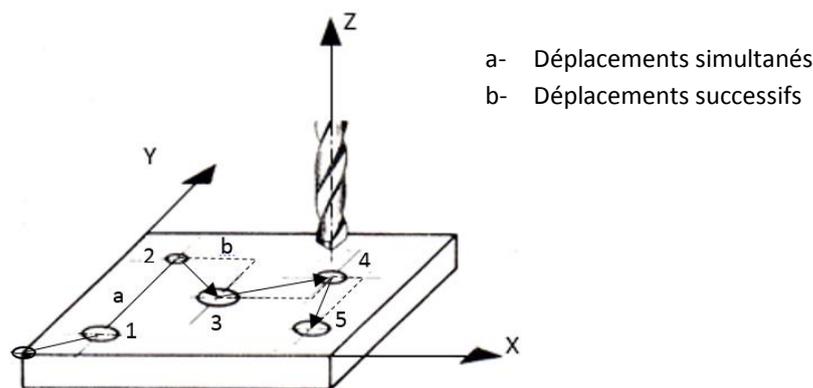


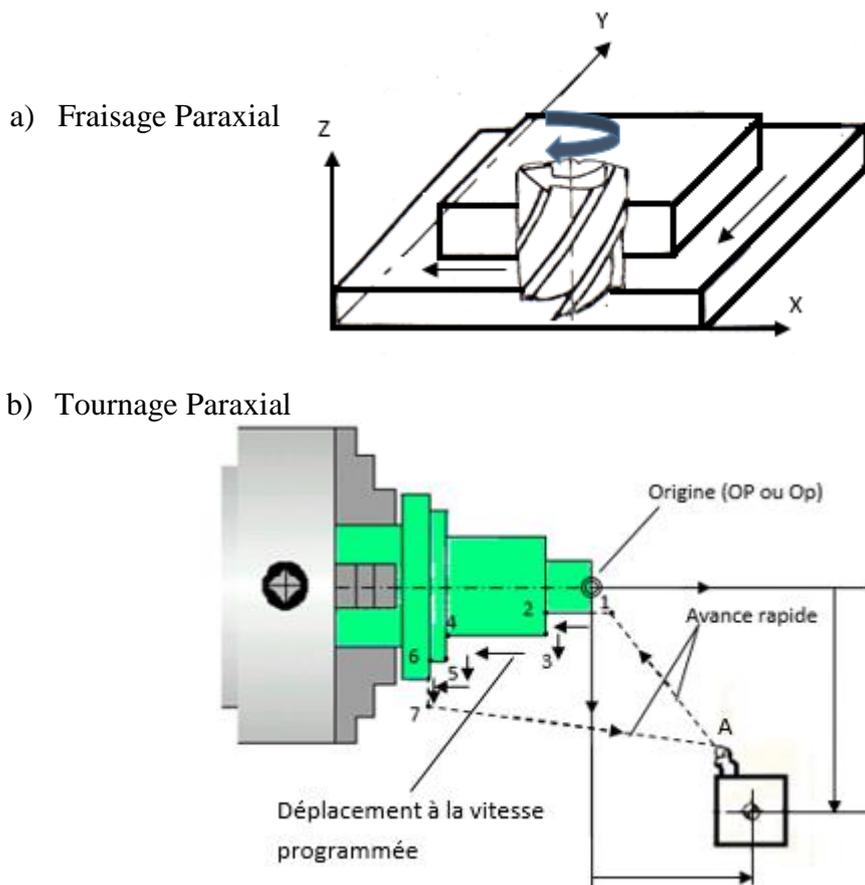
Figure 1. Travail par positionnement point à point

Pour passer d'un centre à l'autre, les déplacements se font successivement suivant les axes OX, OY ou simultanément sur les deux axes, aucune trajectoire n'est requise. Les déplacements se font à la vitesse maximale et le positionnement à vitesse réduite. Ce type de machine est

caractérisé par l'absence d'usinage au cours des déplacements. Les machines-outils équipées de ce type de CN sont : les perceuses, les poinçonneuses, les machines à souder par point... etc.

3.2.2 Déplacement paraxial

Sur ce type de machine, en plus du positionnement précis point à point, la CN permet de contrôler la vitesse de déplacement parallèlement aux axes. La vitesse de déplacement est programmée et commutée successivement à chaque axe. Ce système de contrôle ne permet pas les déplacements suivant des directions quelconques. Les machines de ce type, permettent d'effectuer les travaux de tournage, de fraisage suivant des trajectoires parallèles à chacun des axes de déplacement OX, OY, OZ, comme illustré sur la figure 2.



Trajectoire de l'outil (cycle d'usinage) : A-1-2-3-4-5-6-7-A

Figure 2. Travail paraxial

3.2.3 Déplacement continu

Ce type de machine permet l'usinage des pièces de formes (les filetages, les ailettes de turbine, pièces tridimensionnelles complexes,... etc.). Les informations de parcours sont liées par une loi mathématique, ainsi les déplacements sont contrôlés sur des trajectoires quelconques. Ce mode de fonctionnement permet de réaliser des travaux de contournage (voir figure 3).

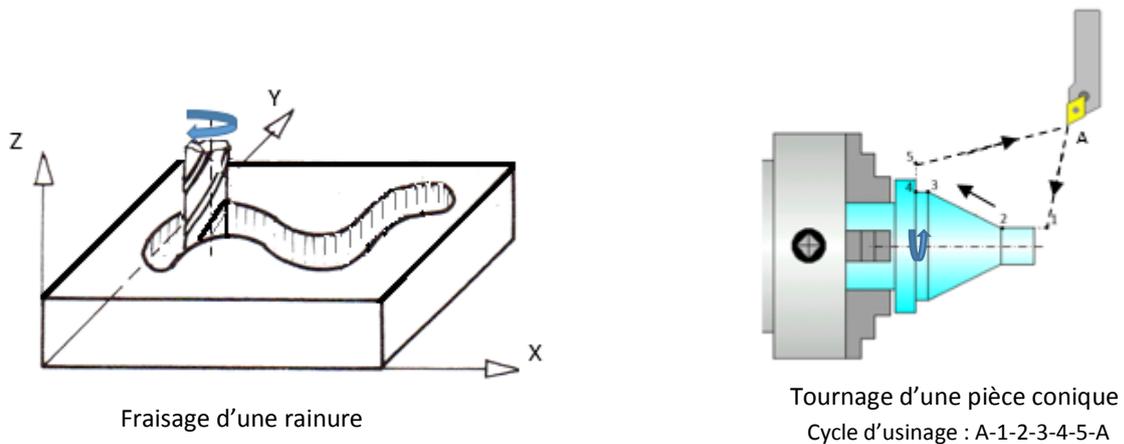


Figure 3. Travail de contournage

Pour la définition des trajectoires, les commandes numériques de ce type font appel aux interpolations linéaire et circulaire. L'interpolation permet de contrôler instantanément l'outil durant l'usinage. La commande numérique de contournage est la plus utilisée, elle est nécessaire sur les tours pour l'usinage des cônes, des arrondies, sur les fraiseuses pour la réalisation des formes compliquées (matrices d'estampage, outil d'emboutissage, ailettes, ...).

a) **Interpolation linéaire G01 (G1)** (figure 4) :

L'interpolation linéaire permet de contrôler instantanément la position de l'outil pendant l'usinage suivant une droite quelconque dans le plan. Il suffit de préciser les coordonnées du point d'arrivée par rapport au point de départ connu et la vitesse de déplacement.

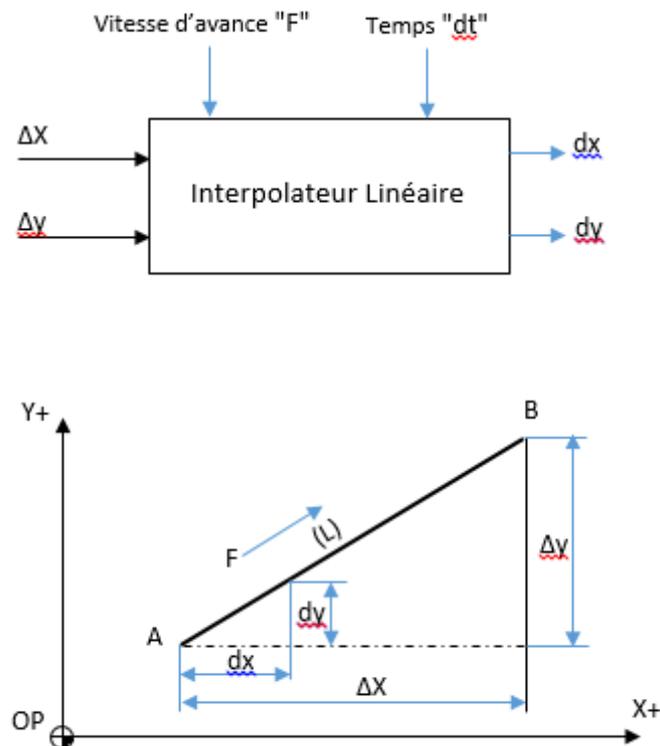


Figure 4. Interpolation linéaire

L'interpolation linéaire permet de décrire une trajectoire linéaire dans les plans XY, XZ, YZ. Le point d'origine étant connu, le mobile (outil) est en "A" au départ et en "B" à la fin de déplacement (L : longueur de la droite). Pour tracer la droite, il suffit d'avoir le rapport (dy/dx) constant. Le système de contrôle a pour tâche de réaliser une distribution incrémentale rythmée sur X et Y.

Il faut que :

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad \text{et} \quad dx = \frac{F}{L} \Delta x dt$$

$$dy = \frac{F}{L} \Delta y dt$$

Le déplacement est continu de A vers B à la vitesse d'avance F. Les points A et B représentent les points de référence du programme.

b) **Interpolation circulaire G02, G03** (figure 5) :

L'interpolation circulaire permet de contrôler instantanément la position de l'outil pendant l'usinage suivant des arcs de cercles dans le plan. Pour décrire les trajectoires en arcs de cercle, en plus des coordonnées des points de départ et d'arrivée, il est nécessaire de préciser les informations relatives à la position du centre du cercle au moyen des paramètres I, J et K. les paramètres (I, J) correspondent à l'interpolation dans le plan (XY) ; pour l'interpolation dans le plan (Y Z), on considère les paramètres (J, K) ; les paramètres (I, K) sont pris en compte lors de l'interpolation dans le plan (X, Z).

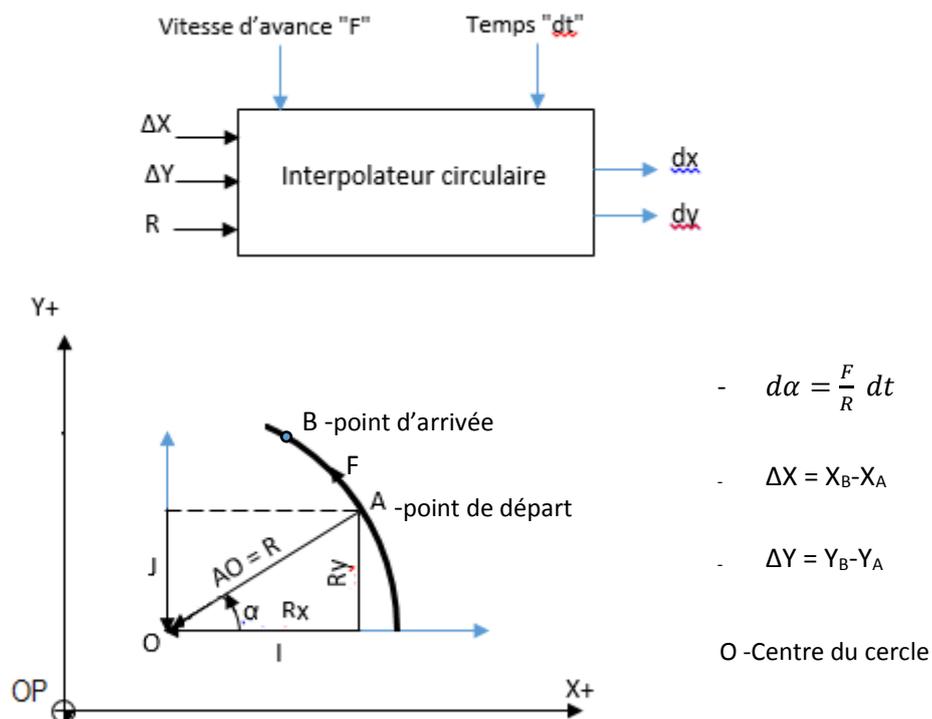


Figure 5. Interpolation circulaire dans le plan XY

Les paramètres d'interpolation représentent les projections sur leurs axes respectifs d'un vecteur orienté ayant pour origine le point de départ de l'interpolation, le centre comme point d'arrivée et le rayon du cercle comme valeur du module.

I et J, sont les projections respectives du vecteur AO sur X et Y. L'interpolation circulaire est accomplie selon l'équation du cercle :

$$X = R \cos \alpha = R x \quad \text{et} \quad dx = -R \sin \alpha \, d\alpha$$

$$Y = R \sin \alpha = R y \quad \text{et} \quad dy = R \cos \alpha \, d\alpha$$

Considérons l'exemple de la figure 6.

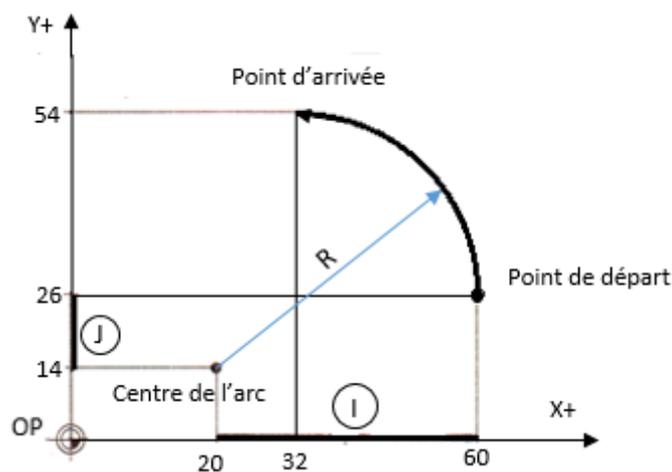


Figure 6. Définition des paramètres I et J

L'interpolation est réalisée sur le plan XY, alors les paramètres à considérer sont "I" et "J". Ces paramètres représentent les composantes scalaires du vecteur ayant pour origine le centre du cercle et pour extrémité le point de départ de l'interpolation. Dans ce cas, I et J ont pour valeurs (I = 40 mm et J = 12 mm).

A noter que pour la détermination des contours quelconques, ce qui est très répandu lors de l'usinage des surfaces complexes, les trajectoires sont morcelées en parties élémentaires où des points repères (points directeurs) sont déterminés pour réaliser l'interpolation.

3.3- Classification suivant le nombre d'axes

3.3.1- Notion d'axe

La machine-outil à commande numérique est composée d'éléments mobiles indépendants pouvant être commandés individuellement chacun selon sa direction. Les mouvements de base ainsi définis sont appelés **axes de machine**. Généralement, les axes sont orthogonaux et leur association constitue des chariots croisés. Les axes sont repérés par des adresses conformément à la norme ISO.

La structure d'un axe de machine est représentée sur le schéma de la figure 7, elle est composée de :

- Un chariot mobile
- Un système de transmission vis-écrou (généralement à bille) précontraint
- Eventuellement un réducteur
- Un moteur
- Un dispositif de mesure de position

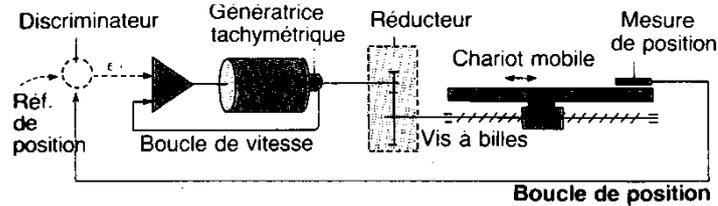


Figure 7. Schéma d'un axe de machine-outil à commande numérique

Chaque axe de la machine est asservi en position par la commande numérique.

3.3.2 Typologie et Classification

La classification des machines-outils à commande numérique suivant le type de machine et le nombre d'axes, est présentée sur le tableau ci-dessous :

Nombre d'axes	Mouvements	Machines et types d'usinage	
1	Z	Brochage, presse	
2	X, Z	Machines de tournage	Tournage, les formes réalisées possèdent le même axe de symétrie (fig. 8)
3	X, Z, C		Tournage avec asservissement de la broche en position (fig. 9)
4	2x(X, Z)		Tournage à deux tourelles (fig. 10)
5	2x(X, Z), C		Tournage à deux tourelles et asservissement de la broche (fig. 11)
3	X, Y, Z		Machines de fraisage
4	X, Y, Z, B	Fraisage : surfaçage, fraisage de poches, perçage, fraisage de rainure, de surfaces gauches (fig. 13)	
4	X, Y, Z, C	Fraisage surfaçage, fraisage de poches, perçage, fraisage de rainure, de surfaces gauches	
5	X, Y, Z, B, C	Fraisage de formes gauches, perçage dans toutes directions (fig. 14)	
5	X, Y, Z, A, C	Fraisage de formes gauches, usinage privilégié des pièces de dimensions importantes	
5	X, Y, Z, A, B	Fraisage de formes gauches	
5	X, Y, Z, B, W	Fraisage de formes complexes (fig.15)	

A- Machines de tournage

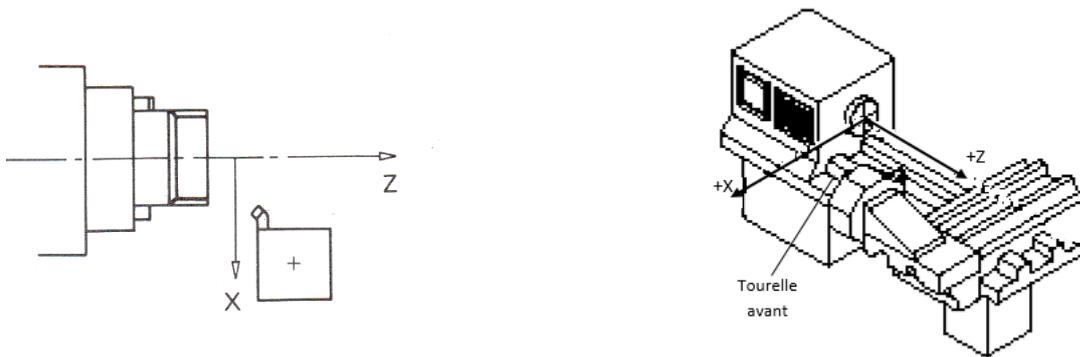
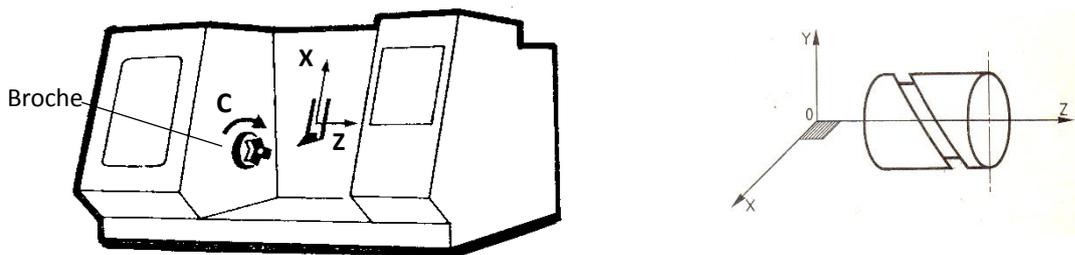


Figure 8. Tour à deux axes à tourelle avant



La broche se comporte comme un axe asservi (axe C), la commande simultanée des trois axes permet d'usiner une courbe dans l'espace.

Figure 9. Tour à trois axes à tourelle arrière

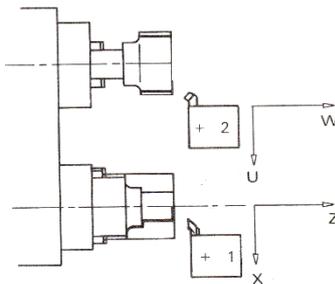


Figure 10. Tour à 4 axes, à 2 broches indépendantes

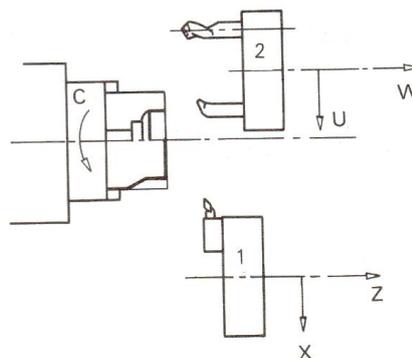
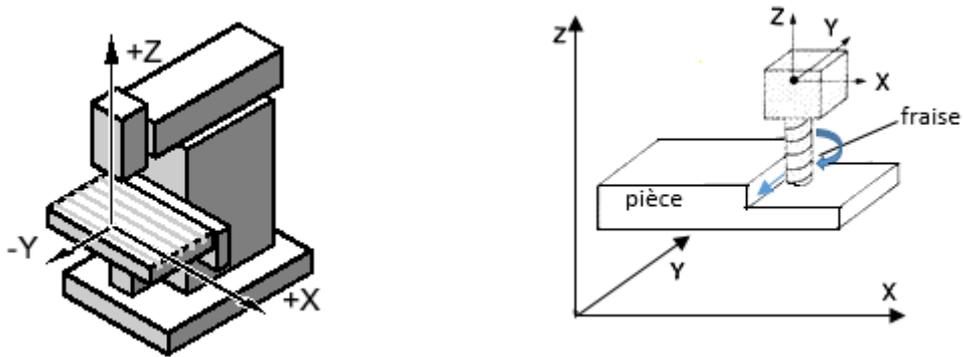


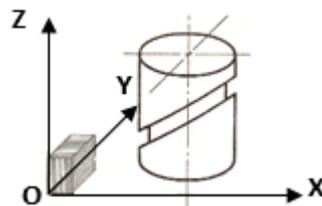
Figure 11. Tour à 5 axes, à broche indexée

*On rencontre aussi les tours à 6 axes, voire même 8 axes.

B- Machines de fraisage

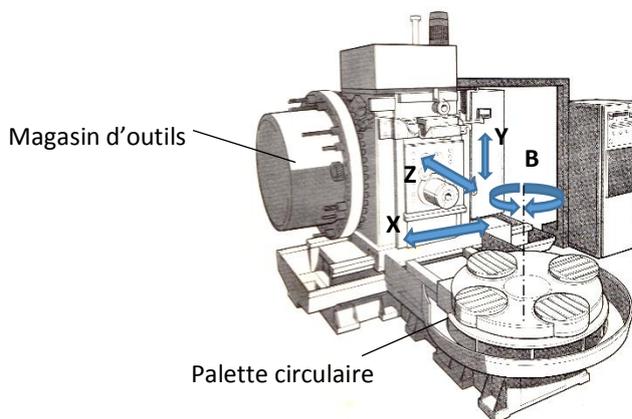


- Cas de la machine à trois axes successifs : les trois axes sont commandés successivement au moyen d'une commande unique.
- Cas de la machine à trois axes simultanés : les trois axes peuvent être commandés simultanément pour usiner des courbes dans l'espace



La forme de l'hélice est obtenue par contournage dans le plan XY, conjugué au déplacement linéaire suivant l'axe Z.

Figure 12. Fraiseuse verticale à trois axes



- La palettisation circulaire permet le chargement automatique des pièces, ce qui offre plus de souplesse à la machine et la réduction du nombre de prise de pièces
- Le magasin d'outils permet la réalisation d'une variété d'opérations.

Figure 13. Machine de fraisage à 4 axes ou centre d'usinage (CNC) équipé d'un magasin d'outils

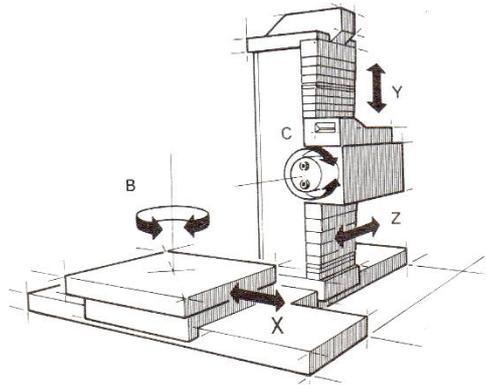


Figure 14. Fraiseuse horizontale à 5 axes (X, Y, Z, B, C)

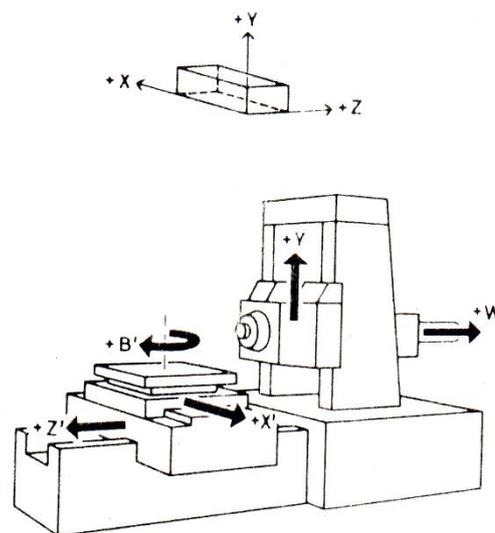


Figure 15. Fraiseuse horizontale à 5 axes (X, Y, Z, B, W)

*on rencontre aussi des machines de fraisage de différentes configurations avec un nombre d'axes dépassant 5.

3.4- Machines-outils à CN à Commande adaptative

La commande adaptative des MOCN représente la forme la plus évoluée de la commande numérique. Elle a pour objet d'optimiser à chaque instant les conditions d'usinage selon les conditions réelles de travail en tenant compte des caractéristiques présentées par la pièce ainsi que du degré d'usure de l'outil.

Le bloc de commande adaptative permet de contrôler :

- La température dans la zone de coupe
- Les valeurs du couple sur la broche
- L'amplitude des vibrations lors de la coupe
- Les déformations des organes de la machine-outil
- ...etc

3.4.1- Exemples d'intervention de la commande adaptative (figure 16)

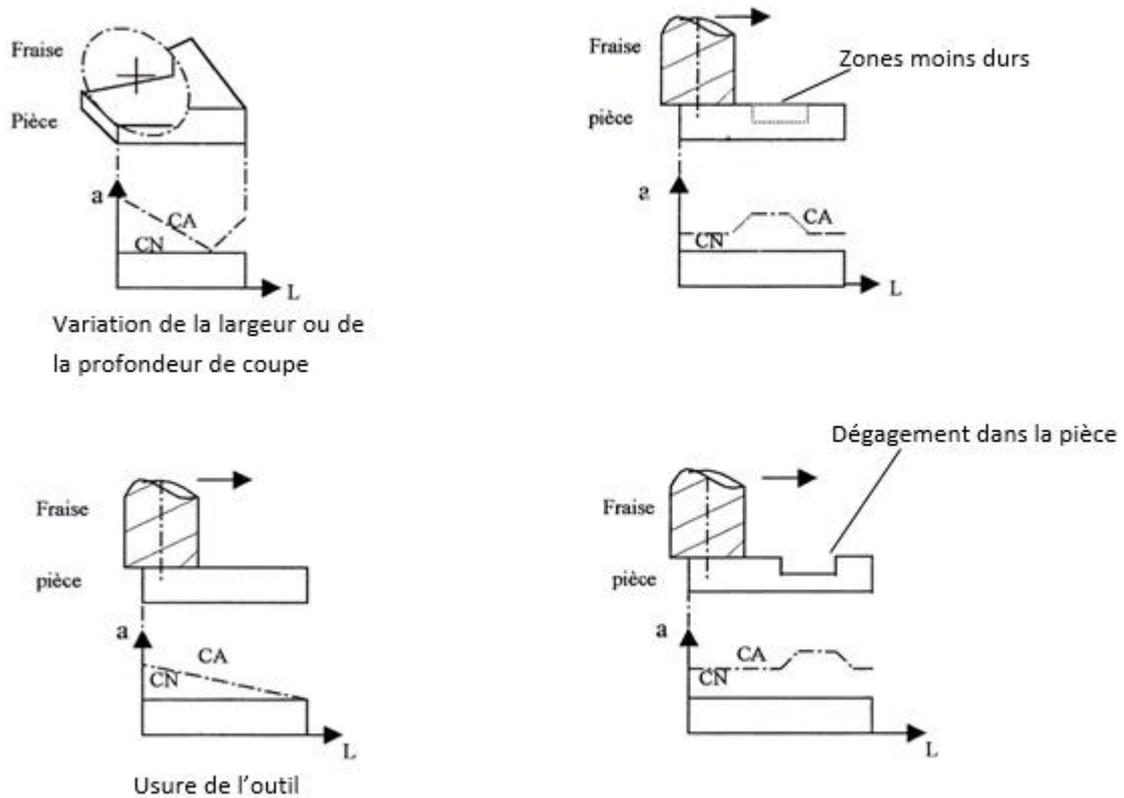


Figure 16. Cycles comparés de l'avance de l'outil dans quatre cas
a-Avance de travail numérique ; L-longueur de la pièce ;
CA-Commande Adaptative ; CN-Commande Numérique

3.4.2- Avantages de la commande adaptative

La commande adaptative offre plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Meilleure utilisation de la machine-outil
- Amélioration des conditions de travail par une adaptation constante des paramètres d'usinage aux situations réelles, ce qui engendre une durée d'usinage réduite et l'élimination des temps morts.
- Augmentation de la productivité de travail de 50%, relativement aux MO à CN ordinaires.
- Stabilisation de la précision d'usinage
- Amélioration de la durée de vie des outils de 2 à 3 fois
- Simplification sensible de la programmation (les opérations de dégrossissage ne sont plus programmées, seul est programmé le profil fini).

3.4.3- Exemple de Commande adaptative installée sur un tour

Deux paramètres sont mesurés en permanence (figure 17) :

- La vitesse de rotation de la broche, mesurée au moyen d'une génératrice tachymétrique.

- Le couple sur la broche, mesurée à l'aide d'une jauge de contrainte. La valeur mesurée est transmise par induction magnétique entre la partie tournante de la machine et la partie fixe (sans usure).

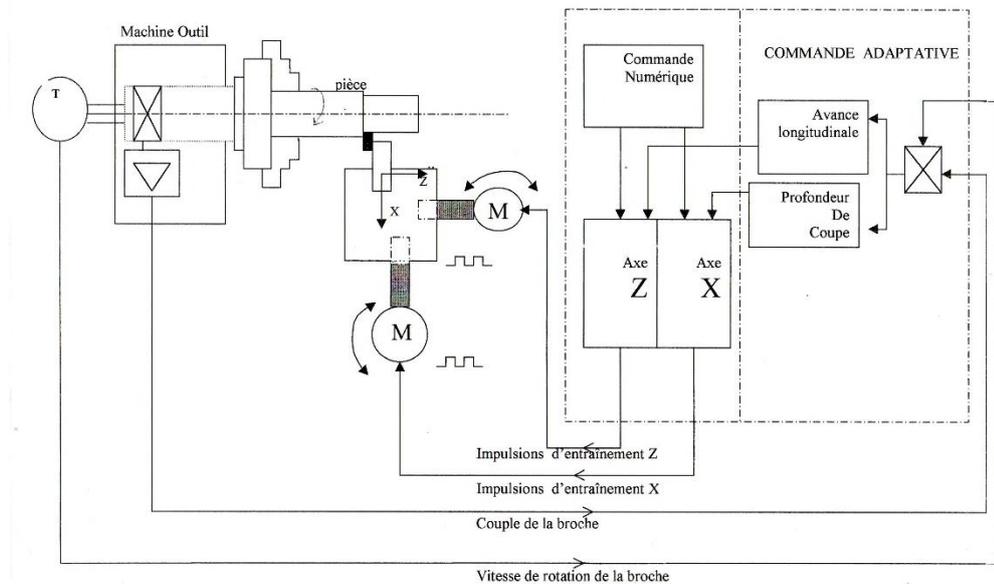


Figure 17. Commande adaptative SINUMERIK installée sur Tour

Ces deux paramètres alimentent le bloc de commande adaptative (figure 18) et permettent d'obtenir la puissance de coupe.

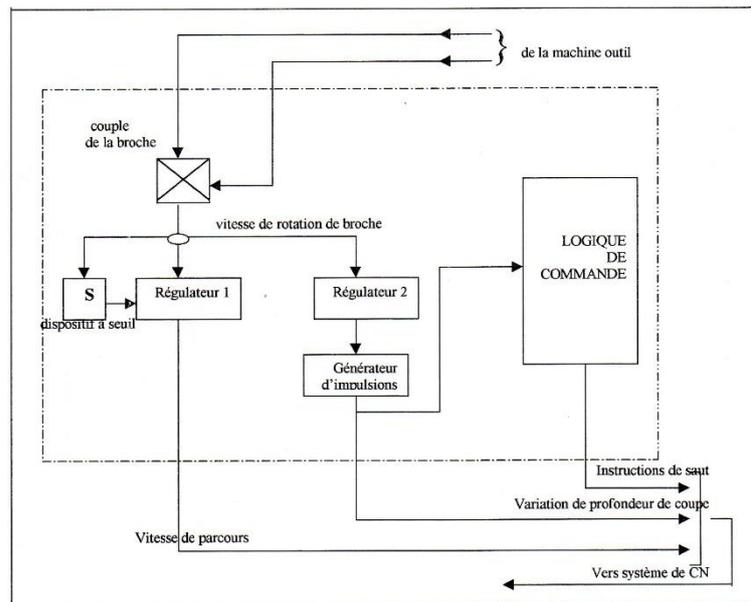


Figure 18. Schéma fonctionnel du système à commande adaptative SINUMERIK

Les données élaborées à partir de la puissance de coupe sont :

a- La vitesse de parcours (vitesse d'avance)

Le régulateur "1" règle la vitesse d'interpolation utilisée, par conséquent la vitesse de parcours. Le passage de l'avance rapide à l'avance d'usinage s'effectue automatiquement sans le contrôle

du dispositif à seuil "S" dès que ce dernier constate le dépassement de la valeur particulière de la vitesse pour laquelle il est réglé.

b- La variation de la profondeur de coupe

Le régulateur "2" reçoit comme grandeur de consigne la vitesse transversale, et commande dès que la profondeur de coupe devient importante la génération d'impulsions supplémentaires au moteur pas à pas, des déplacements dans le sens transversal.

c- Instructions de saut

Les impulsions générées sont comptées dans une logique de commande qui mémorise la distance séparant l'outil du profil programmé, et permet ainsi d'élaborer des instructions commandant des sauts de programme pendant son déroulement (seul le profil fini est programmé).