

Commande numérique des machines-outils

par **Gilles PROD'HOMME**

*Journaliste spécialisé dans le domaine de la production automatisée
Responsable des Relations Extérieures de la société NUM SA*

1. Généralités.....	B 7 130 - 2
1.1 Historique.....	— 3
1.2 Justification de la CN	— 3
1.3 Domaine d'utilisation et coût.....	— 4
2. Constitution des MOCN	— 5
2.1 Influence de la CN sur la morphologie des machines.....	— 5
2.2 Configuration des MOCN.....	— 7
2.3 Principe d'asservissement d'un organe mobile.....	— 7
2.4 Entraînement d'un organe mobile suivant un axe	— 7
2.5 Mesure des déplacements.....	— 9
2.6 La CN dans les unités de production automatisées	— 9
3. Anatomie de la CN.....	— 11
3.1 Analyse fonctionnelle.....	— 11
3.2 Architecture de l'équipement	— 12
3.3 Réalisation technologique	— 14
4. Programmation des MOCN	— 16
4.1 Instructions programmées et leurs supports	— 16
4.2 Systèmes de référence.....	— 18
4.3 Programmation manuelle	— 18
4.4 Programmation automatique (ou assistée)	— 19
4.5 Programmation des formes complexes	— 20
4.6 Autres modes de programmation.....	— 21
5. Dialogue homme-machine.....	— 22
5.1 Décalages d'origine	— 22
5.2 Correction d'outil	— 22
5.3 Interventions de l'opérateur pendant l'usinage	— 23
5.4 Diagnostic et maintenance	— 23
6. Mise en œuvre des MOCN	— 23
6.1 Critères de choix du matériel.....	— 24
6.2 Préparation de l'entreprise	— 24
6.3 Étude de rentabilité	— 25
7. Évolutions de la CN.....	— 25
7.1 État de l'art	— 25
7.2 Prochaines étapes technologiques	— 26
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 131

Apparue il y a seulement quelques dizaines d'années, la commande numérique (CN) impose actuellement sa technologie dans le monde de l'usinage. Conçue pour piloter le fonctionnement d'une machine à partir des instructions d'un programme sans intervention directe de l'opérateur pendant son exécution, elle a, dans un premier temps, permis de franchir un pas important dans l'automatisation des machines-outils traditionnelles. Tours, fraiseuses, perceuses et alésouses sont ainsi devenues capables d'assurer, en quantité comme en qualité, une production à peine imaginable quelques années auparavant. La CN est également à l'origine de nouvelles conceptions de machines polyvalentes comme le centre d'usinage, par exemple.

Aujourd’hui, de plus en plus étroitement associée aux progrès de la microélectronique et de l’informatique, la CN voit ses performances et sa convivialité augmenter régulièrement tandis que, en revanche, son prix et son encombrement ne cessent de diminuer. Elle pénètre, de ce fait, dans les plus petites entreprises et devient accessible à tous les secteurs industriels faisant appel aux procédés de positionnement ou de suivi de trajectoire.

Cet article apporte les connaissances fondamentales sur la CN. Après le bref rappel historique de sa rapide évolution, l'auteur s'emploie à justifier son utilisation et entreprend de décrire, dans le détail, la constitution physique des machines qui en sont pourvues. L'architecture de la CN, les divers procédés développés pour la programmer et les nombreux outils mis à la disposition de l'opérateur pour faciliter la conduite de sa machine sont également évoqués, de même que les différentes étapes qu'il convient de respecter avant l'acquisition d'une machine-outil à commande numérique (MOCN). Un dernier paragraphe est consacré à l'état de l'art de la CN et aux prochaines étapes technologiques qui influenceront son évolution d'ici la fin de ce siècle.

Abréviations utilisées dans cet article		Autres abréviations utilisées en CN [12]
API	: Automate Programmable Industriel	AGV : <i>Automated Guided Vehicle</i> (chariot automatique téléguidé)
APT	: <i>Automatically Programmed Tools</i> (langage de programmation automatique) et langages dérivés : EXAPT, IFAPT, MINIAPT, MINIFAPT	ATC : <i>Automatic Tool Changer</i> (changeur automatique d'outils)
CFAO	: Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur	BPS : <i>Block Processing Speed</i> (vitesse de traitement de bloc)
CIM	: <i>Computer Integrated Manufacturing</i> (fabrication assistée par ordinateur)	CAD/CAM : <i>Computer Aided Design/computer Aided Manufacturing</i> (voir CFAO)
CLFILE	: <i>Cutter Location FILE</i> (fichier de situation d'outil)	CCW : <i>CounterClockWise</i> (sens anti-horaire)
CMS	: Composant à Montage de Surface	CW : <i>ClockWise</i> (sens horaire)
CPU	: <i>Central Processing Unit</i> (unité centrale de traitement)	DRO : <i>Digital ReadOut system</i> (visualisateur de cotes)
CRT	: <i>Cathode Ray Tube</i> (tube à rayons cathodiques)	DSP : <i>Data Signal Processor</i> (processeur de signal)
DNC	: <i>Direct Numerical Control</i> (commande numérique directe)	EDM : <i>Electro Discharge Machining</i> (usinage par électroérosion)
FMS	: <i>Flexible Manufacturing System</i> (système ou atelier de fabrication flexible)	GUI : <i>Graphical User Interface</i> (interface graphique opérateur)
GPAO	: Gestion de Production Assistée par Ordinateur	IO : <i>Input/Output</i> (entrée/sortie)
IHM	: Interface Homme-Machine	LAN : <i>Local Area Network</i> (voir RLI)
IMD	: Introduction Manuelle de Données	MAP : <i>Manufacturing Automation Protocol</i> (architecture de réseau d'atelier)
LCD	: <i>Liquid Crystal Display</i> (affichage à cristaux liquides)	MDI : <i>Manual Data Input</i> (voir IMD)
MIT	: <i>Massachusetts Institute of Technology</i>	MIPS : Millions d'Instructions Par Seconde
MMI	: <i>Man Machine Interface</i> (voir IHM)	MTBF : <i>Mean Time Between Failure</i> (moyenne des temps de bon fonctionnement)
PC	: <i>Personal Computer</i> (ordinateur personnel)	OEM : <i>Original Equipment Manufacturer</i> (intégrateur ou constructeur de MOCN)
PCMCIA	: <i>Personal Computer Memory Card International Association</i>	PCB : <i>Printed Circuit Board</i> (circuit imprimé)
RAM	: <i>Random Access Memory</i> (mémoire vive, ou à accès direct)	PLC : <i>Programmable Logic Controller</i> (voir API)
RLI	: Réseau Local Industriel	RISC : <i>Reduced Instruction Set Computer</i> (calculateur à jeu réduit d'instructions)
ROM	: <i>Read Only Memory</i> (mémoire morte, ou à lecture seule)	SFP : <i>Shop Floor Programming</i> (programmation sur site)
RNS	: Recherche de Numéro de Séquence	WOP : <i>Workshop Oriented Programming</i> (programmation orientée atelier)
UAL	: Unité Arithmétique et Logique	
UC	: Unité de Commande	

1. Généralités

La CN est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents. À ce titre, la CN constitue l'un des meilleurs exemples de pénétration du traitement de l'information dans les activités de production.

Exploitant au maximum les possibilités de la micro-informatique, toutes les données sont traitées en temps réel, c'est-à-dire au moment où elles sont générées, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après une première génération de CN à logique câblée sont apparues les commandes numériques par calculateur (CNC), ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou partie des fonctions de commande.

Tous les systèmes de CN commercialisés actuellement contenant au moins un microprocesseur, les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes. Pour des raisons de simplicité, le terme CN sera le seul utilisé tout au long de cet article.

1.1 Historique

Les travaux menés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIII^e siècle ont montré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 fut le premier équipement à être doté de cette technique et, de ce point de vue, il peut être considéré comme l'ancêtre de la commande numérique.

Il faut cependant rattacher l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique pour le compte de l'US Air Force des pales d'hélicoptère par reproduction. Pour façoner ses gabarits, il utilise une méthode consistant à percer plusieurs centaines de trous faiblement espacés de manière à approcher le profil théorique. L'emplacement et la profondeur de chaque trou sont calculés avec précision par un ordinateur IBM à cartes perforées. La finition de la surface est obtenue par des opérations manuelles de polissage.

Mais, lorsque l'US Air Force confie à ce même Parsons la réalisation de pièces de formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, celui-ci réalise que sa méthode est trop approximative et que seul un usinage continu en 3 dimensions sera en mesure de donner satisfaction.

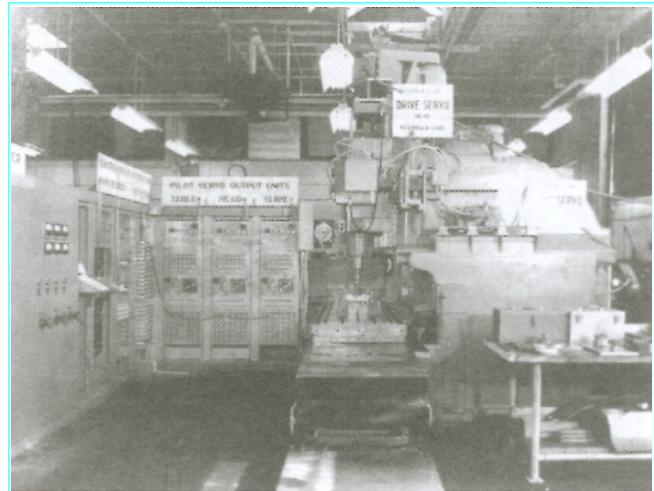
Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes.

Cette machine, une *fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale* (figure 1a), conçue pour exécuter des déplacements simultanés suivant 3 axes, est officiellement présentée en septembre 1952 dans le Servomechanisms Laboratory du MIT. L'information mathématique étant la base du concept, on lui donne le nom de *numerical control*. Il aurait pu tout aussi bien s'appeler *commande symbolique* !

Il faut encore attendre quelques années de vastes fonds de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première MOCN réellement opérationnelle.

Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes.

1954 : Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.



a) première MOCN en 1952



b) pupitre opérateur d'une CN 32 bits

Figure 1 – Évolution de la CN de 1952 à 1995

1955 : à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.

1959 : apparition de la CN en Europe (foire de Hanovre).

1964 : en France, la Télémécanique Électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais Téléstatic.

1968 : la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante.

1972 : les minicalculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.

1976 : développement des CN à microprocesseurs.

1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel.

1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM).

1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits (figure 1b).

1.2 Justification de la CN

1.2.1 Automaticité

Le premier avantage d'une CN est d'offrir aux machines qui en sont équipées un très haut niveau d'automaticité. Sur de telles machines, l'intervention de l'opérateur nécessaire pour assurer la production de pièces peut être considérablement réduite voire supprimée.

De nombreuses MOCN peuvent ainsi fonctionner sans aucune assistance pendant toute la durée de leur cycle d'usinage, laissant l'opérateur libre d'accomplir d'autres tâches en dehors du poste de travail. Cette caractéristique présente d'ailleurs un certain nombre d'avantages moins palpables mais tout aussi importants, tels qu'une diminution notable de la fatigue de l'opérateur, moins d'erreurs d'origine humaine et un temps d'usinage constant et prévisible pour chaque pièce d'une même série.

Si l'on compare une MO conventionnelle et une MOCN, on peut considérer que le temps copeau est assez voisin sur les deux types de machines. En revanche, la productivité comparée de diverses catégories de machines de niveaux d'automatisation différents, c'est-à-dire ce même temps copeau ramené au temps effectif de production, est très différente compte tenu de la réduction importante des temps non productifs que l'on enregistre sur les machines à forte taux d'automatisation (figure 2).

1.2.2 Flexibilité

Puisqu'elles sont pilotées à partir d'un programme, les MOCN peuvent usiner des pièces différentes aussi facilement que l'on charge un nouveau programme. Une fois vérifié puis exécuté pour la première série, ce programme peut être facilement rappelé lorsque la même série se représente.

Une MOCN se caractérise en outre par des **temps de réglage très courts** qui répondent parfaitement aux impératifs de la production en flux tendus.

La **grande souplesse d'utilisation** de la CN entraîne une quantité non négligeable d'autres avantages :

- changement aisément du programme d'usinage des pièces ;
- réduction des en-cours de fabrication ;
- réduction des outillages et suppression des gabarits ;
- diminution du nombre des outils spéciaux et des outils de forme ;
- réduction des temps de préparation et de réglage du poste de travail (la plupart des réglages, en particulier des outils, étant effectués hors machine) ;
- prise en compte rapide des modifications d'usinage (il est plus facile de modifier une ligne de programme qu'un outillage spécial ou un gabarit) ;
- définition plus rapide et plus fiable des conditions optimales d'usinage ;
- réduction du nombre de prises de pièces du fait de l'universalité de la machine ;
- diminution du temps d'attente entre les diverses machines d'usinage d'un atelier ;
- gain sur les surfaces au sol occupées dans l'atelier ;
- possibilité de réaliser des pièces complexes en gérant des déplacements simultanés sur plusieurs axes ;
- contrôle automatique des outils et des dimensions de pièces avec prise en compte par la CN des corrections à effectuer.

1.2.3 Sécurité

La CN a beaucoup contribué à améliorer la sécurité des machines :

- en premier lieu, parce qu'elle connaît très précisément l'enveloppe de travail dans laquelle doivent évoluer les outils (possibilité de mémorisation des courses maximales des organes mobiles) ;
- ensuite, parce qu'elle permet une simulation graphique hors usinage des programmes nouvellement créés pour vérification et détection des risques éventuels de collision ;
- enfin, parce qu'en exerçant une surveillance permanente de l'usinage en cours, elle peut décider d'en interrompre le déroulement et d'alerter l'opérateur en cas d'incident (§ 5.4).

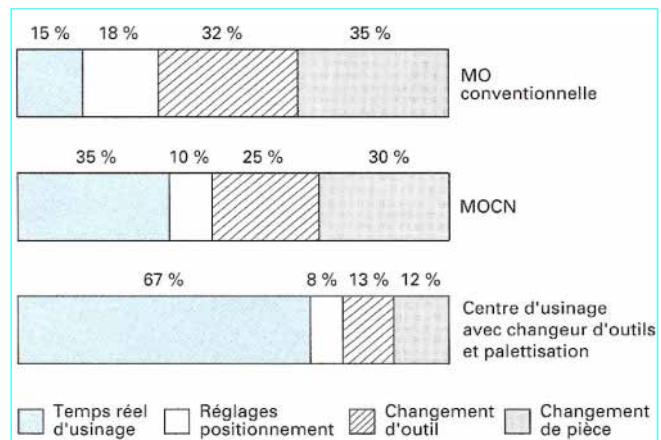


Figure 2 – Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation

Il est par ailleurs admis que le niveau de performances très élevé atteint par les MOCN conduit les constructeurs à prévoir des dispositifs de protection très élaborés (contre les projections de copeaux ou de liquide d'arrosage, notamment) qui ne s'imposent pas nécessairement sur une MO conventionnelle.

1.2.4 Nécessités économiques et techniques

Symbol de précision, de répétabilité, 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 CN se montre économiquement intéressante pour produire à l'unité ou en série toutes les sortes de pièces, même les plus simples.

Une fois vérifié et validé, un programme assure la réalisation de 2, 10 ou 1 000 pièces identiques avec la même régularité de précision et la même qualité d'usinage, sans que l'habileté de l'opérateur n'intervienne.

Il convient, en outre, de souligner que la CN ouvre de nouvelles perspectives en permettant la définition de pièces complexes qu'il est pratiquement impossible de concevoir et de fabriquer sur des MO conventionnelles.

1.3 Domaine d'utilisation et coût

Le système de fabrication le plus rentable est celui qui engendre le coût d'une pièce le plus bas. Ce coût est calculé par la formule suivante [2] :

$$C = C_u + C_r / L + C_p / ZL$$

- avec C coût total de fabrication pour une pièce,
 C_u coût d'usinage d'une pièce (matière, main d'œuvre directe, coût machine),
 C_r coût de lancement de la série et des réglages des outils et de la machine,
 L nombre de pièces d'une série,
 C_p coût de préparation (gammes et programmes d'usinage) et des outillages,
 Z nombre de séries,
 ZL nombre total de pièces fabriquées.

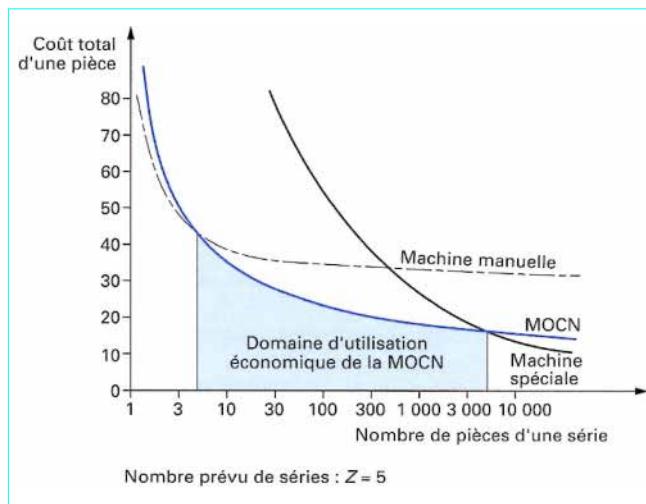


Figure 3 – Domaine d'utilisation des MOCN

On constate que le coût total de fabrication par pièce varie en fonction de la quantité ZL d'une manière hyperbolique.

Si l'on considère le nombre de pièces usinées, le **domaine d'utilisation économique de la MOCN se situe dans la petite et la moyenne séries**. Les MO conventionnelles restent rentables pour des opérations simples où elles ont malgré tout tendance à être remplacées par des MOCN d'entrée de gamme.

Pour les grandes séries, le recours à des machines spéciales à automatisation rigide (machines transfert, tours à camées, fraiseuses de copiage) se montre encore très avantageux.

Si l'on représente le coût d'une pièce en fonction du nombre d'exemplaires à fabriquer, on peut déterminer les limites économiques d'utilisation de la CN. Dans l'exemple de la figure 3, au-dessus de 5 pièces par série, l'usinage sur une MO à commande manuelle est plus rentable que sur une MOCN ; de la même façon, une machine spéciale le sera au-dessus de 5 000 pièces par série.

2. Constitution des MOCN

Nota : le lecteur pourra se reporter utilement à l'article [B 7 160] *Fraiseuses et centres d'usinage* dans ce traité.

2.1 Influence de la CN sur la morphologie des machines

Pour s'adapter à l'accroissement exceptionnel de productivité que permet la technologie CN, la constitution mécanique des MO a dû être totalement repensée.

2.1.1 Mouvements d'avance

L'asservissement précis, rapide et stable de la position des différents organes mobiles (pièce ou outil selon la machine), a conduit les constructeurs de machines à redessiner complètement leurs systèmes d'entraînement. Une attention particulière a notamment été

apportée 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 intempestive 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**.

2.1.2 Approvisionnement en outils

L'automatisation de la gestion des outils est un facteur déterminant de la productivité des MOCN. C'est pourquoi la majorité d'entre elles sont équipées de **mécanismes de changement automatique de leurs outils** qui apportent une très grande souplesse d'utilisation en permettant la réalisation d'opérations variées sans la présence d'un opérateur.

Un changeur automatique d'outils se compose d'une réserve d'outils (ou magasin) et d'un dispositif de transfert chargé de véhiculer l'outil du magasin vers le poste de travail de la machine et vice-versa, conformément aux instructions du programme d'usinage de la CN.

Il existe plusieurs sortes de *magasins d'outils* :

- *circulaire* (à disque ou à tambour) ;
- *à chaîne* (simple, double ou triple) dont la capacité peu dépasser 100 outils ;
- *à cartouche*, comportant plusieurs emplacements (ou cases).

La rotation du magasin peut s'effectuer dans un seul sens ou dans les deux, cette dernière solution permettant de sélectionner l'outil à changer par le chemin le plus court. En fonction de la gestion d'outils adoptée sur la machine, l'outil peut être sélectionné dans un ordre séquentiel fixe ou aléatoire. Dans ce cas, il est replacé n'importe où dans le magasin, une codification étant prévue soit sur l'outil ou sur l'emplacement du magasin pour lever toute ambiguïté.

Le *mécanisme de transfert* se présente généralement sous la forme d'un bras pivotant qui enlève simultanément les outils de la broche de la machine et du magasin d'outils et les dépose en sens inverse après une rotation à 180° (figure 4).

Le choix d'un changeur d'outils est lié à plusieurs facteurs :

- le temps de changement d'outil de copeau à copeau ;
- la possibilité d'extension du magasin d'outils ;
- la facilité de recharge du magasin.

(Se reporter également § 2.6.2 qui traite de la gestion des outils dans les unités de production automatisées.)

2.1.3 Approvisionnement en pièces

Les temps de montage et de démontage de la pièce revêtent souvent une importance non négligeable dans la productivité d'une MOCN.

Sur les *machines à pièces tournantes*, les solutions retenues sont les suivantes :

- bras manipulateurs situés à l'extérieur de la machine ;
- robots au sol pouvant desservir plusieurs machines ;
- portiques conçus pour le transfert de pièces par la partie supérieure du poste de travail.

Sur les *machines à outils tournants*, les systèmes à palettes sont actuellement les équipements les plus répandus. Ils présentent l'avantage de monter et de démonter les pièces en temps masqué hors du poste de travail avant d'être transférées sur la table de la machine au moment opportun.

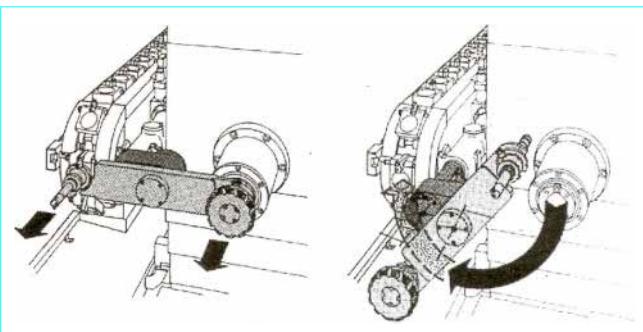


Figure 4 – Changement automatique d'outil sur centre d'usinage

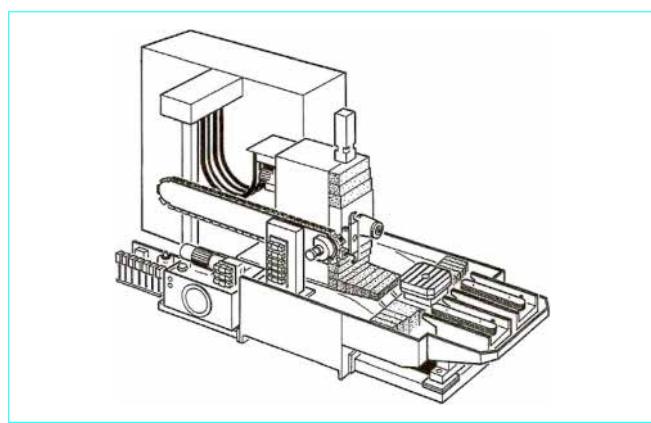


Figure 5 – Approvisionnement de pièces par palettisation

Il existe diverses configurations de palettiseurs, la plus simple étant constituée d'une **table circulaire ou linéaire** (figure 5) à deux emplacements placée à l'avant du poste de travail. Des solutions de **systèmes à transfert linéaire ou par carrousel** pouvant comporter un nombre élevé de palettes augmentent considérablement l'autonomie des machines. Ce type de configuration permet en outre une prolongation du temps productif en dehors des horaires normaux de travail, si des moyens appropriés de surveillance de l'usinage ont été prévus à cet effet.

2.1.4 Évacuation des copeaux

Le débit de copeaux très important qu'engendre un travail sur MOCN impose de prévoir des **dispositifs destinés à favoriser leur récupération et à automatiser leur évacuation** :

- bancs inclinés sur les tours horizontaux ;
- carénages conçus de manière à canaliser à la fois le liquide d'arrosage et les copeaux ;
- arrosage abondant (parfois même surabondant) pour évacuer les copeaux par entraînement ;
- présence de buses de lavage orientées pour éviter l'accumulation des copeaux dans des endroits critiques de la machine ;
- fractionnement des copeaux pendant l'usinage (géométrie d'outil adaptée, présence de brise-copeau sur l'outil, régulation programmée du mouvement d'avance) ;
- adaptation d'un convoyeur mécanisé, à vis sans fin ou à chaîne, conçu pour évacuer les copeaux hors de la machine et les déverser dans un bac extérieur.

2.1.5 Arrosage et soufflage

Un **arrosage abondant** doit être prévu pour refroidir la pièce et faciliter l'évacuation des copeaux. Un débit minimal de 20 L/min et une pression supérieure à 2 bar sont souhaitables pour les opérations d'usinage courantes. L'utilisation d'outils avec arrosage par le centre conduit à choisir des pressions plus élevées pouvant atteindre 10 bar.

Le liquide est stocké dans un bac dont la contenance correspond à environ 5 fois le débit à la minute de la pompe. La volume du bac et son refroidissement contribuent dans une large mesure à la stabilité thermique de la machine.

2.1.6 Guidages

Une MOCN se caractérise essentiellement par la *précision de déplacement de ses organes mobiles* et par des *efforts d'usinage importants*. L'assurance d'un asservissement précis, rapide et stable de la position des différents chariots a donc conduit à concevoir de nouvelles solutions pour leurs guidages.

L'un des points les plus délicats à régler a été d'éliminer le phénomène de mouvement saccadé (*stick-slip*) qui se produit principalement lors de faibles avances des chariots de la machine.

Les remèdes apportés ont été les suivants :

- réalisation de surfaces grattées pour assurer un meilleur maintien du lubrifiant ;
- lubrification automatique et sous pression des guidages ;
- remplacement du glissement par un roulement en adoptant des patins à recirculation de rouleaux cylindriques ;
- adoption de matériaux à faible coefficient de frottement (matériaux composites, notamment) ;
- utilisation de lubrifiants spéciaux ;
- développement de guidages hydrostatiques.

2.1.7 Précision et contrôle

Les MOCN sont contrôlées suivant des normes françaises et internationales (cf. *Pour en savoir plus*, en [Doc. B 7 131]) qui spécifient leur précision de mise en position et leur précision géométrique.

Le contrôle de la **précision de positionnement** a pour but essentiel de vérifier la qualité de la CN et les performances des asservissements sur les axes.

Le moyen le plus utilisé pour effectuer ces contrôles successifs en un même point de la machine est l'**interféromètre laser** (figure 6a). Compte tenu de la longueur d'onde de son rayon lumineux (laser hélium-néon), ce système offre, par sa résolution de 0,16 µm, une possibilité de mesure de longueur d'une très grande précision.

Le contrôle de la **précision géométrique** est généralement effectué à partir des résultats obtenus lors de l'usinage d'une pièce-type.

Capable de fournir des indications précieuses sur la géométrie de la machine et sur la capacité de réaction de ses asservissements, un procédé plus récent fait appel à un dispositif appelé **ball-bar**, que l'on peut traduire par **tige instrumentée à boules** (figure 6b). Un **ball-bar** est constitué d'une tige télescopique contenant un capteur qui mesure ses variations de longueur avec une précision de 1 µm. La tige est terminée à ses deux extrémités par une boule sphérique de haute qualité, chaque boule étant placée sur un support dégagéant trois points de contact qui fournissent une rotule sans jeu. L'un des supports est fixé magnétiquement sur la table, l'autre est pris en pince dans la broche de la MOCN. Le test de géométrie est réalisé en programmant un parcours circulaire de la broche dans un plan. Le capteur enregistre les variations de ce parcours par rapport au parcours théorique programmé et transmet les informations correspondantes à un PC qui établit un diagnostic précis sur les principaux défauts de la géométrie de la machine et sur l'erreur de poursuite due aux asservissements.

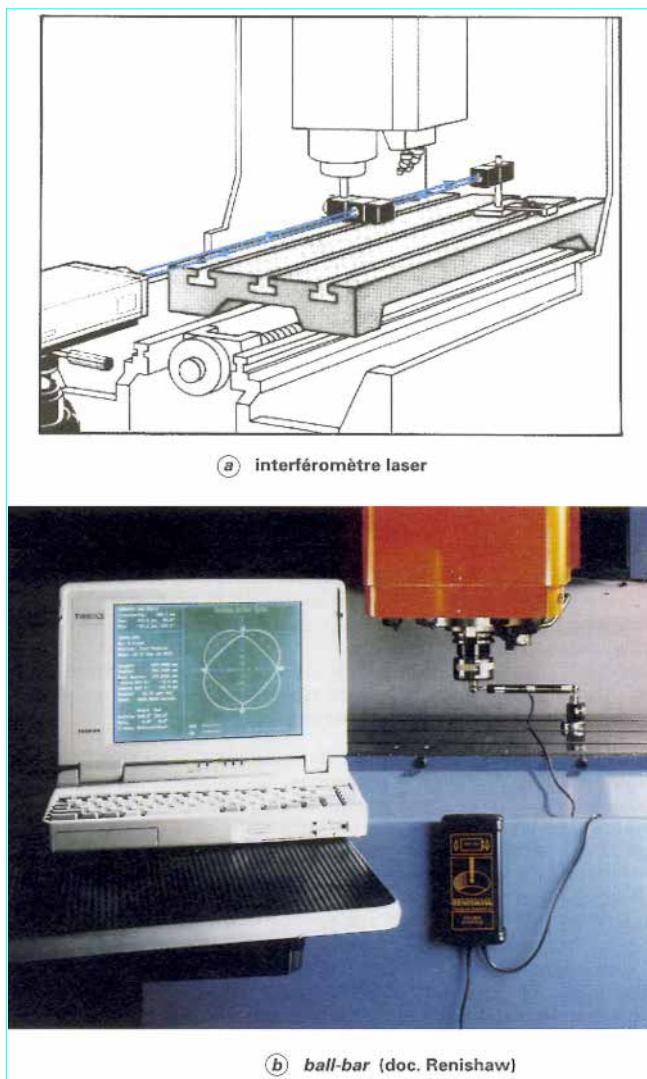


Figure 6 – Moyens de contrôle de mise en position

2.2 Configuration des MOCN

La CN pilote les mouvements et gère les outils de pratiquement tous les types de **machines-outils travaillant par enlèvement de métal** : perceuses, alésseuses, fraiseuses, centres d'usinage et de tournage, tours, rectifieuses, tailleuses d'engrenages, etc.

Dans le **domaine du formage**, la CN équipe fréquemment les poinçonneuses, cisailles, presses-plieuses et machines de découpe, quel qu'en soit le procédé (oxycoupage, plasma, laser ou jet d'eau).

On la trouve également sur les **machines d'électroérosion, de rivetage, de soudage et de mesure** ainsi que sur de nombreuses configurations de **machines à bois** : perceuses, détourneuses, corroyeuses, tenonneuses, mortaiseuses et moulurières.

Dans les usines de **fabrication électronique**, la CN est utilisée sur les machines de perçage des circuits imprimés et sur les machines d'enrobage des câbles.

La plupart de ces machines sont conçues spécifiquement pour un usage optimal de la CN ; d'autres, plus rares, ne disposent que de quelques possibilités CN. Quelquefois, des machines anciennes sont modernisées en faisant appel à la CN (opérations dites de *retro-fit*). D'autres, encore, se contentent d'une table numérisée à chariots croisés.

Depuis la commande deux axes d'une table de perceuse jusqu'à la gestion cinq axes simultanés de machines de très grandes dimensions utilisées par l'industrie aéronautique pour usiner les profils complexes d'ailes et de fuselage d'avions, la CN a un impact considérable sur toutes les industriels de fabrication mécanique.

La CN est aussi à l'origine de l'avènement du **centre d'usinage**, une nouvelle architecture de MO polyvalente développée dès 1958 par le constructeur américain Kearney & Trecker. Munie d'un changeur automatique d'outils et, le cas échéant, d'un changeur automatique de pièces, le centre d'usinage est capable d'effectuer des opérations d'usinage diverses (perçage, lamage, taraudage, alésage, fraisage, etc.) sur plusieurs faces d'une pièce sans démontage.

Le contrôle par la CN du positionnement angulaire de la broche d'un tour et de son interpolation avec les axes de déplacement de l'outil a également donné naissance à des machines complexes appelées **centres de tournage**. L'adjonction d'outils tournants (têtes de fraisage, notamment) dans les tourelles porte-outils a considérablement augmenté les possibilités de ces machines dont les fonctions respectives de tournage et de fraisage sont intégralement gérées par la CN.

2.3 Principe d'asservissement d'un organe mobile

La fonction principale d'une CN est de contrôler en permanence les déplacements des divers organes mobiles de la machine, en vitesse comme en position.

Chaque axe de déplacement est donc assujetti à un asservissement en boucle fermée, dont le principe consiste à mesurer continuellement la position réelle du mobile et à la comparer avec la grandeur d'entrée, ou position de consigne, que délivre la CN pour atteindre la nouvelle position programmée (figure 7). Dès que l'écart entre les deux mesures s'annule, le mobile s'arrête.

Le déplacement de la table ou de l'outil d'un point à un autre implique la connaissance :

- de l'axe (X, Y, Z, \dots) sur lequel le déplacement doit s'effectuer ;
- des coordonnées du point à atteindre ;
- du sens de déplacement (+ ou -) ;
- de la vitesse de déplacement de la table ou de l'outil.

Les CN modernes permettent de contrôler simultanément plusieurs axes linéaires ou rotatifs (en général de 2 à 5) et de les interpoler entre eux afin de suivre avec précision une trajectoire quelconque dans l'espace.

2.4 Entraînement d'un organe mobile suivant un axe

Les éléments nécessaires pour entraîner un mobile sur une MOCN sont le moteur, le variateur électronique de vitesse et le mécanisme d'entraînement.

La chaîne cinématique constituée par ces divers éléments se caractérise par les performances et les fonctionnalités suivantes :

- commande individuelle de chaque axe ;
- couples disponibles sur l'axe moteur compris entre 1 et 100 N · m ;
- possibilités de surcharges importantes pendant les périodes d'accélération et de freinage ;
- réponse à des demandes de déplacement très faible (< 1 µm) ;

- grande qualité d'accélération/décélération (temps de démarrage ≈ 10 à 50 ms) ;
- grande stabilité de vitesse ;
- dynamique élevée surtout lors d'avances faibles ;
- déplacements rapide de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres par minute.

2.4.1 Moteurs

Nota : le lecteur se reportera utilement aux articles spécialisés dans le traité Génie électrique.

Confrontés à la sophistication croissante des automatismes industriels, les constructeurs de machines sont particulièrement soucieux du niveau de performances et de la souplesse d'utilisation des organes moteurs.

■ On peut distinguer **trois grandes technologies de moteurs de commande d'axes :**

— les **moteurs pas à pas**, conçus de manière à tourner d'une valeur angulaire fixe donné (un pas) à chaque impulsion transmise par leur électronique de commande. Le contrôle du nombre d'impulsions permet la réalisation de déplacements très précis. D'un coût peu élevé et d'un entretien limité, ces moteurs peuvent fournir des couples importants à des vitesses moyennes. En contre-partie, ils ont tendance à chauffer rapidement et perdent leur capacité d'accélération à haute vitesse. Ils sont essentiellement destinés au travail en boucle ouverte ;

— faciles à mettre en œuvre et à contrôler, les **moteurs à courant continu** se caractérisent par un fort couple de démarrage et de bonnes capacités de vitesse et d'accélération. Bien qu'éprouvée, leur technologie n'en demeure pas moins ancienne, ce qui présente certains inconvénients comme, par exemple, la présence de balais qui impose des entretiens périodiques ou l'apparition fortuite de phénomènes de démagnétisation des aimants permanents dus au courant circulant dans le rotor ;

— les **moteurs synchrones autopilotés** (ou autocommutés) à courant alternatif sont aujourd'hui les plus fréquemment utilisés. Plus connus sous le nom de **moteurs sans balais (brushless)**, ils se composent d'un rotor à aimants permanents, d'un stator généralement triphasé et d'un dispositif interne de commutation de phases et se caractérisent par une grande robustesse, une très bonne dissipation thermique, des vitesses élevées (entre 4 000 et 10 000 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.

■ 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 être animés, à partir d'une vitesse nominale de 1 500 tr/min, de vitesses de rotation maximales pouvant atteindre 6 000 ou 12 000 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.

Des dispositifs de mesure par capteurs à haute résolution et le recours au principe de régulation avec contrôle vectoriel de flux garantissent un très bon comportement de la broche, tant en indexage (jusqu'au 1/10 000 de degré) qu'en usinage en axe C (interpolation de la rotation de la broche avec les déplacements linéaires des chariots).

Des solutions de **broches motorisées** (figure 8) consistant à intégrer le moteur directement dans l'axe de la broche contribuent à simplifier considérablement la chaîne cinématique des machines.

Dans les applications d'usinage réclamant des vitesses de rotation de broche très élevées (Usinage à Grande Vitesse), on fait de plus en plus souvent appel à des **electrobroches** entraînées par un moteur asynchrone à haute fréquence monté en bout de broche. Précis et rigides (montage sur roulements hybrides à billes de céramique), ces équipements autorisent des vitesses de l'ordre de 30 000 à 50 000 tr/min dans des gammes de puissance pouvant atteindre 25 kW.

2.4.2 Variateurs électroniques de vitesse

Pour que la vitesse de déplacement d'un mobile reste constante quelle que soit la variation de charge qui lui est appliquée, il est indispensable de fermer la boucle d'asservissement.

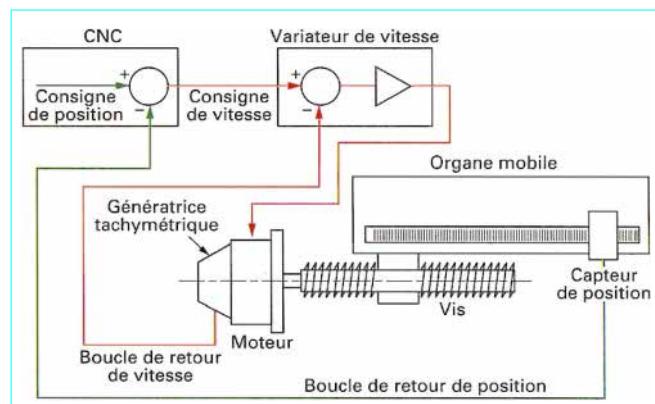


Figure 7 – Principe d'asservissement d'un organe mobile

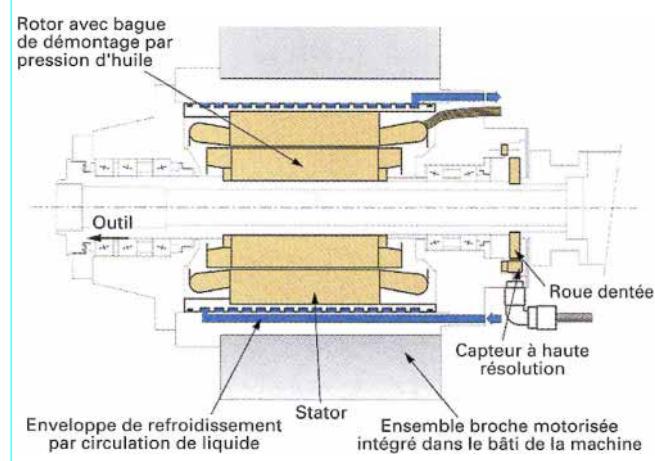


Figure 8 – Broche motorisée Motorspindle (doc. NUM)

Cette fonction est traitée en dehors de la CN par le variateur de vitesse et nécessite la présence de génératrices tachymétriques au niveau des moteurs d'axes (figure 7).

Les variateurs de vitesse les plus répandus se raccordent directement sur le réseau triphasé 380 V. 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. Dans la majorité des cas, les opérations de paramétrage et de personnalisation de ces équipements se font par PC, à l'aide d'un logiciel spécifiquement développé par le constructeur.

2.4.3 Mécanismes d'entraînement

La chaîne cinématique qui, à partir de l'arbre moteur, doit assurer le déplacement de l'organe mobile doit être la plus courte et la plus directe possible.

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.

Au niveau même de l'organe du mobile, le dispositif le plus communément utilisé est du type **vis-écrou à billes** (figure 9) : 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 minime et une absence de jeu lorsque la précharge est correctement choisie.

2.5 Mesure des déplacements

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.

2.5.1 Méthodes de mesure

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

— dans un **système à mesure directe**, le capteur de position est fixé directement sur l'organe mobile à positionner. Parce qu'il évite les erreurs de mesure dues au manque de précision éventuel de la vis à billes et du mécanisme d'entraînement, ce type de montage est le plus satisfaisant du point de vue de la précision ;

— dans un **système à mesure indirecte**, le capteur de position est monté en bout de vis-mère 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.

On distingue également la **mesure absolue**, lorsque les déplacements sont mesurés toujours à partir de la même origine (en général, un point fixe de la machine) et la **mesure incrémentale**, ou relative, lorsque le déplacement demandé s'effectue par rapport à la position précédemment atteinte. Cette solution nécessite de reprendre avec précision le zéro absolu à chaque mise sous tension de la CN. Une solution intermédiaire, dite *semi-absolue*, consiste à fournir un signal analogique qui se répète cycliquement à intervalles constants (entre 2 et 10 mm) sur toute la course de l'axe. La valeur réelle est obtenue en considérant la cote absolue et le nombre de pas déjà effectués.

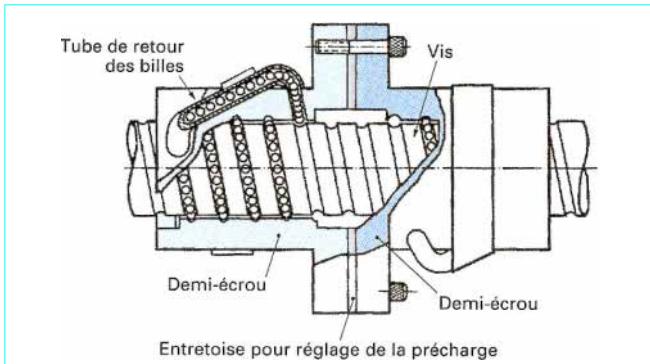


Figure 9 – Vis et écrou à recirculation de billes

2.5.2 Types de capteurs

La nature du signal mesurant l'écart entre la consigne de position et la position instantanée de l'organe mobile dépend de la nature du capteur de mesure utilisé.

Celui-ci peut être :

— **analogique**, lorsque le déplacement demandé entraîne une variation magnétique, électrique ou autre, qui est transformée en signal de sortie (capteurs inductifs, résolveurs, règle Inductosyn) ;

— **numérique**, lorsque le déplacement d'une règle ou d'un disque présentant des zones alternativement sombres et claires devant un lecteur optique produit des impulsions lumineuses qui sont transformées en signal de sortie (capteurs photoélectriques, règles et disques optiques ou codés).

2.6 La CN dans les unités de production automatisées

2.6.1 Classification

Les équipements d'usinage d'un atelier de production peuvent être classés en diverses configurations :

- machines individuelles autonomes ;
- cellules composées de deux ou plusieurs machines intégrées pour former une unité d'usinage ;
- systèmes de fabrication automatisés incluant, outre les unités d'usinage, des installations prévues pour assurer des opérations connexes (lavage, mesure, peinture, etc.).

■ Machines autonomes (ou stand-alone)

Les machines automatisées prévues pour fonctionner en mode autonome peuvent être affectées à des **fabrications en série ou de type flexible**.

Utilisées pour la fabrication en série, elles sont conçues et réglées pour réaliser une seule séquence d'usinage. Ce sont généralement des machines-transfert ou des tours multibroches dont la configuration figée ne justifie pas toujours la présence d'une CN, sinon de systèmes spécialisés, simples et peu coûteux.

Lorsqu'elles doivent, en revanche, réaliser des opérations d'usinage multiples sur des pièces de tailles et de natures différentes, ces machines demandent des niveaux de flexibilité plus élevés. Elles sont alors équipées de CN dont les performances sont le plus possible adaptées aux familles de produits pour lesquelles la machine a été conçue.

■ Cellules d'usinage automatisées

Une cellule d'usinage automatisée est un ensemble intégré composé de deux ou plusieurs MO, identiques ou non, et de dispositifs de chargement et de déchargement automatiques de pièces

(bande transporteuse, chariot de convoyage, robot manipulateur, robot portique, etc.). Un centre d'usinage palettisé ou un centre de tournage comportant un changeur automatique d'outils représentent, en eux-mêmes, une cellule d'usinage.

En général conçue pour fonctionner sans surveillance humaine aussi longtemps qu'elle est alimentée en pièces et en outils de coupe, une cellule d'usinage dispose d'équipements appropriés permettant de détecter toute anomalie de fonctionnement et d'arrêter la cellule si cette anomalie ne peut être corrigée automatiquement.

■ Systèmes de fabrication automatisés

Pour assurer la production de pièces diverses en petites et moyennes séries, un compromis doit être trouvé entre les objectifs contradictoires de flexibilité et de productivité.

La solution à ce compromis est le système de fabrication automatisé, plus connu sous le nom d'**atelier de fabrication flexible** (traduction de l'expression anglo-saxonne *Flexible Manufacturing System* ou FMS) qui permet de passer d'un type de fabrication à un autre dans un minimum de temps et avec un minimum de réorganisation (cf. article spécialisé dans ce traité).

Un atelier flexible est un système de production piloté par ordinateur qui se compose de plusieurs machines ou équipements reliés les uns aux autres par des dispositifs assurant le transport des pièces d'un point à l'autre du système.

Les procédés d'ordonnancement de la production, la gestion des programmes d'usinage, le contrôle et le magasinage des pièces, ainsi que les données nécessaires à l'élaboration de rapports et de données statistiques concernant son fonctionnement font également partie du système.

2.6.2 Gestion de l'environnement

■ Gestion des outils

Une machine automatisée n'est jamais véritablement productive si l'utilisateur n'accorde pas un soin tout particulier à la gestion de ses outils.

En règle générale, une MO de type centre d'usinage ou centre de tournage assure plusieurs opérations sur la même pièce avec plusieurs outils de formes et de dimensions variables. Il convient donc que tous ces outils soient conçus pour s'adapter dans des **attachments modulaires**, c'est-à-dire des porte-outils spécifiques qui vont contribuer à la bonne exploitation de la MOCN.

Les attaches modulaires se composent d'un cône de base spécifique adaptable à chaque machine et d'un embout modulaire qui accepte tous les types de montage. Leurs principaux avantages sont les suivants :

- assemblage et blocage des éléments simples et rapides ;
- possibilité d'utiliser les outils sur des machines différentes ;
- stock de porte-outils réduit grâce à l'universalité des modules ;
- réduction du nombre d'outillages spéciaux.

Pour que ces équipements puissent être facilement reconnus par la CN, un système de codage est apposé sur le corps du porte-outil (code à barres, anneaux codés) ou directement inséré dans l'outil ou le porte-outil sous la forme d'une puce électronique contenant toutes les informations le concernant. Programmées hors ligne, ces informations sont lues sur la machine par un capteur et prises en compte automatiquement par la CN.

Les opérations de prérglage d'outils sont largement utilisées lors des changements de production. Elles consistent à mesurer avec précision la longueur et le diamètre de l'outil et à en informer la CN qui en tiendra compte sous forme de correction d'outil au moment de l'usinage (§ 5.2.2).

On peut envisager deux méthodes de prérglage des outils :

- par mesure sur la machine en amenant l'outil au contact d'un palpeur fixé à un emplacement connu du bâti ;
- par mesure sur un banc de prérglage d'outil composé de dispositifs mécaniques ou photoélectriques spéciaux munis de jauge, vis micrométriques, projecteurs de profil ou microscopes.

■ Surveillance automatique de l'usinage

Les équipements de surveillance automatique de l'usinage ont deux fonctions essentielles :

- contrôler en permanence la conformité du mode opératoire ;
- permettre un fonctionnement quasi autonome de la machine pour augmenter son temps d'utilisation et, par conséquent, réduire les délais de fabrication des pièces.

Puisque la machine travaille sous surveillance réduite, il est nécessaire de détecter :

- les bris d'outils éventuels qui peuvent perturber gravement le déroulement du cycle d'usinage ;
- la limite d'usure à partir de laquelle un outil doit être systématiquement changé.

Éléments essentiels pour garantir la fiabilité de cette détection, les systèmes sont de natures diverses :

- palpeurs mécaniques de contrôle de présence ;
- paliers dynamométriques chargés de mesurer les efforts s'exerçant sur un axe tournant ;
- capteurs des efforts de poussée s'exerçant sur les paliers des vis à billes (mesure des déformations) ;
- capteurs d'émission acoustique ou de vibrations ;
- capteurs de mesures de surpuissance ou de surintensité électrique sur les moteurs.

Une procédure couramment utilisée, appelée **gestion d'usure d'outil** (ou *tool monitoring*), consiste à allouer à chaque outil un temps de coupe au moment de son chargement dans le magasin de la machine. Cette valeur est mémorisée dans la CN et décomptée chaque fois que l'outil travaille. Lorsque le système détecte que le temps de coupe défini par le bureau des méthodes est écoulé, un message apparaît sur l'écran de la CN signalant que l'outil doit être changé. Certains systèmes vont jusqu'à substituer automatiquement à l'outil usé un autre outil du magasin ayant le même numéro et les mêmes caractéristiques pour permettre la poursuite de l'usinage.

Des cycles de palpation peuvent également être prévus dans le programme d'usinage pour mesurer la pièce ou l'outil à intervalles réguliers. Toute déviation éventuelle par rapport aux valeurs programmées entraîne une correction automatique de la part de la CN. Une valeur de correction au-delà du seuil de tolérance déclenche une procédure de changement d'outil et le rebut de la pièce en cours d'usinage.

2.6.3 Liaisons DNC

Une liaison DNC (*Direct Numerical Control*) est un système de transmission destiné à piloter une ou plusieurs MOCN à partir d'un calculateur central qui a accès à tous les registres internes de la CN et de son automate associé. Ce calculateur peut être un simple micro-ordinateur PC si son disque dur dispose d'une mémoire suffisante pour stocker toutes les données nécessaires.

Le calculateur transmet à la CN :

- le programme d'usinage ;
- la liste des outils, leurs dimensions, leur durée de vie ;
- des messages à l'intention de l'opérateur.

En retour, la CN transmet au calculateur central :

- le programme d'usinage mis au point ;
- les durées de vie d'outils mises à jour ;
- les états machine ;
- le compte rendu d'exécution correcte ou incorrecte d'une pièce.

Les liaisons CN et calculateur se font au travers de lignes dédiées aux terminaux ; la CN est donc considérée par le calculateur central comme un terminal.

Les échanges se sont longtemps effectués au moyen de lignes série non différentielles RS 232C qui permettent des vitesses de transmission de 19 200 baud en point à point sur des distances maximales de 10 m. Des versions plus récentes (RS 232E ou F) autorisent des vitesses de 115 kbaud sur une distance approximative de 1 m. (cf. article [R 530] *Interfaces de communication. Mise en œuvre des mesures automatiques* dans le traité Mesures et contrôle).

Les vitesses de transmission des programmes devenant un argument de plus en plus critique, surtout lorsqu'il s'agit de véhiculer des programmes *lourds* de pièces complexes à partir de systèmes de CFAO évolués, des liaisons plus rapides, mais aussi plus coûteuses, sont également disponibles. Parmi celles-ci, on citera :

- la liaison différentielle RS 422, qui offre une meilleure protection à l'environnement. C'est une liaison point à point (1 voie émission séparée de la voie réception) qui permet des vitesses de transmission de 1 Mbaud sur de faibles distances, ou de 19 200 baud sur plusieurs kilomètres ;

- la liaison différentielle RS 485, d'un niveau de performances pratiquement identique à la précédente, mais conçue pour fonctionner en mode duplex (fil d'émission et de réception confondus), ce qui impose la présence d'un protocole ;

- les réseaux à grand débit (plus de 10 Mbaud) tels qu'Ethernet ou Token Ring ([§ 2.6.4](#)).

Dans tous les cas de figure, il s'agit de vitesses théoriques. Dans la pratique, les fonctions logicielles de reconnaissance et de vérification viennent pénaliser, parfois lourdement, les performances annoncées.

2.6.4 Réseaux de communication

L'intégration des MOCN dans des ensembles de production importants qui regroupent plusieurs cellules, ou même plusieurs unités d'usinage automatisées, nécessite la mise en œuvre de réseaux de communication à divers niveaux de l'entreprise :

- **niveau direction/études**, où sont regroupées les fonctions de gestion administrative, de calcul, de CAO et de GPAO. C'est le domaine des réseaux bureautiques à grande vitesse de plus en plus fréquemment fondés sur des architectures Ethernet, IBM Token Ring ou DECnet [[10](#)] ;

- **niveau atelier**, où doit être assuré l'échange régulier de données structurées et le séquencement de tâches entre les divers équipements d'automatismes impliqués dans la chaîne de fabrication (CN, PC industriels, automates programmables). Les réseaux d'atelier sont généralement des transfuges des réseaux bureautiques conçus pour supporter l'environnement perturbé d'un atelier ;

- **niveau cellule**, qui nécessite l'échange rapide et périodique de données du procédé et, éventuellement, le séquencement des tâches pour assurer le pilotage des machines et le suivi de production. Le niveau cellule intègre des réseaux locaux industriels (RLI) à faible volume de données mais à temps de réponse courts. Pour des raisons de coût et de lourdeur d'exploitation, une tendance semble se dégager pour développer des RLI davantage orientés automatismes, à partir de données en provenance du terrain ;

- **niveau terrain**, où doit être assurée la communication en temps réel entre les capteurs et les actionneurs intelligents : entrées-sorties décentralisées, entraînements à vitesse variable, afficheurs, régulateurs, etc.

Une architecture simplifiée de communication peut se présenter comme suit ([figure 10](#)) :

- un ou des réseaux de terrain adaptés au processus à piloter ;
- un réseau de cellule qui coordonne ces réseaux de terrain et assure en local un traitement de type supervision, gestion, suivi, maintenance, etc. ;
- un réseau d'atelier qui fédère les cellules et ouvre sur la gestion de production, la gestion de qualité et, éventuellement, sur la CAO, le calcul et la gestion.

Nota : le lecteur pourra se reporter utilement à l'article [R 7 574] Réseaux locaux industriels dans le traité Informatique industrielle.

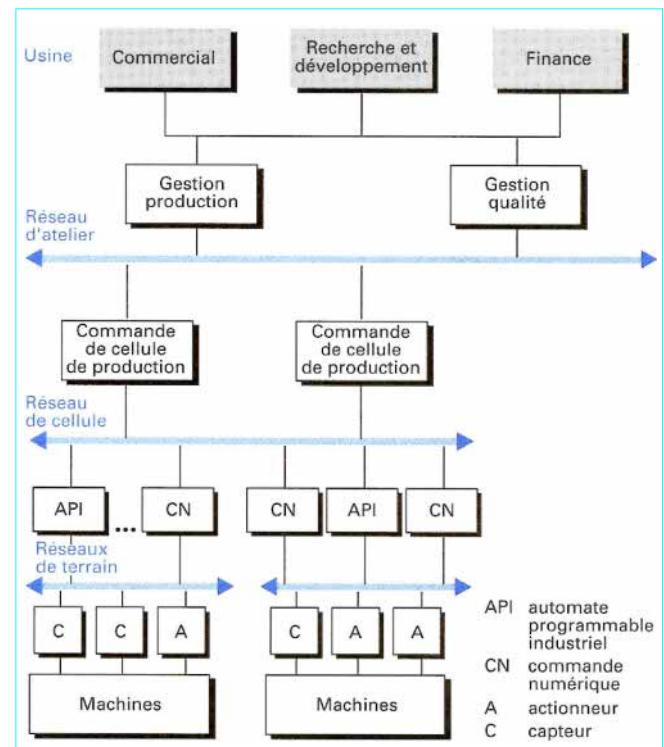


Figure 10 – Organisation de la communication dans une entreprise automatisée

3. Anatomie de la CN

3.1 Analyse fonctionnelle

3.1.1 Classification des CN

La complexité d'un système de CN varie en fonction du type de déplacement qui pourra être accompli sur la machine :

- **systèmes de commande point à point** (ou systèmes de commande de position) : ils sont essentiellement utilisés pour piloter des opérations d'usinage ne demandant qu'un simple positionnement outil/pièce (percage, soudure par point, poinçonnage, etc.). Aucun contrôle n'est effectué sur la trajectoire suivie entre le point de départ et le point d'arrivée. Seule importe la position de l'outil par rapport à la pièce en fin de déplacement ;

- **systèmes de commande paraxiale** : ils font parcourir à l'outil (ou à la pièce) une trajectoire constituée de segments parallèles aux axes de translation de la machine. La vitesse de déplacement étant programmable, l'outil peut réaliser des usinages simples tels que du fraisage en cycles carrés et du tourage en chariotage, en plongée ou en tronçonnage ;

- **systèmes de contournage** : aujourd'hui généralisés sur la quasi-totalité des MOCN, ils font parcourir à l'outil (ou à la pièce) une trajectoire définie très précisément. Le niveau de précision étant fonction de la bonne coordination des mouvements, tous les axes de la machine sont strictement dépendants les uns des autres. La CN compare à tout instant les valeurs de consigne de chaque axe

en mouvement avec les valeurs instantanées des coordonnées et des vitesses, afin d'imprimer aux organes mobiles une succession de déplacements élémentaires de très petite amplitude dont la répétition va engendrer des trajectoires linéaires ou circulaires (figure 11). Ce procédé nécessite de fournir à la CN une quantité importante d'informations en temps réel, ce qui présente le double inconvénient de limiter la vitesse d'exécution à la vitesse de transmission des données et d'augmenter le volume du support d'informations. C'est pourquoi les CN de contourage disposent de moyens de calcul spécialisés appelés **interpolateurs** qui, à partir de données de points caractéristiques, élaborent par calcul les points intermédiaires et les vitesses d'avance résultantes (§ 4.1.4).

3.1.2 Fonctions d'une CN

La figure 12 présente le diagramme fonctionnel d'une CN.

■ Entrées du système

La CN reçoit dans son unité centrale :

- le programme d'usinage de la pièce sous forme codée (§ 4). Le support du programme peut être une bande perforée, une cassette, une disquette, le clavier de la CN ou une liaison directe avec un ordinateur ;

- les paramètres d'usinage qui complètent le programme pièce par des informations connues seulement de l'opérateur. Ce sont notamment les dimensions des outils (corrections de longueur et de rayon), la modulation éventuelle des vitesses d'avance et des vitesses de rotation de broche et l'ajustement des conditions de coupe. Tous ces paramètres sont introduits en temps réel sur le clavier alphanumérique de la CN par l'opérateur de la machine ;

- des signaux électriques de mesure de vitesse et de position fournis par des capteurs implantés sur les axes et la broche de la machine ;

- des signaux logiques d'état des équipements périphériques (commande, sécurité, etc.).

■ Préparation des données

Une fois les données introduites, le travail de la CN consiste à :

- analyser le programme d'usinage (reconnaissance des informations codées, diagnostic des erreurs de syntaxe éventuelles, traduction en valeurs numériques des informations codées) ;

- prendre en compte les paramètres d'usinage afin de modifier les données numériques programmées qui viennent d'être analysées. À titre d'exemple, une trajectoire programmée est décalée en tenant compte des valeurs de correction affectées à l'outil sélectionné ;

- mettre en file d'attente les blocs d'informations prétraités et organiser leur stockage *dynamique* dans une mémoire-tampon afin d'assurer la continuité du mouvement entre deux phases d'usinage successives.

■ Traitement des données

Les informations contenues dans le dernier étage de stockage (bloc exécutable) sont destinées au traitement et au contrôle des axes, d'une part, et au traitement des fonctions logiques spécifiques à la machine (broche, outils, etc.), d'autre part.

Les *fonctions de traitement et de contrôle des axes* sont assurées respectivement par les interpolateurs (§ 3.1.1) et les dispositifs d'asservissement de position (§ 2.3).

Les cumuls dans des registres respectifs des déplacements élémentaires élaborés par les interpolateurs constituent les consignes de position instantanées appliquées à chacun des axes. L'asservissement de position de chaque axe est réalisé par la comparaison de la consigne instantanée à la mesure de position réelle. Le résultat de cette comparaison, connu sous le nom *d'erreur de poursuite*, influe directement sur le signal de commande du moteur d' entraînement.

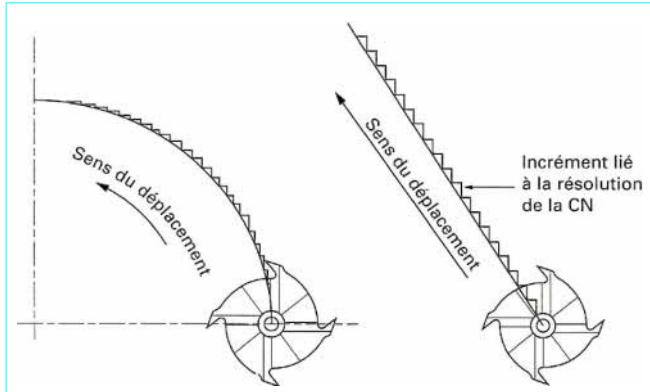


Figure 11 – Principe d'interpolations linéaire et circulaire

Le *traitement des fonctions logiques* concerne des fonctions annexes de la machine telles que :

- le changement d'outil automatique et l'indexation de la tourelle ;
- le pilotage du magasin d'outils ;
- la commande de l'arrosage ;
- la gestion des gammes de vitesses de broche ;
- la mise en rotation et l'arrêt de la broche ;
- la commande des dispositifs de chargement et de décharge ment des pièces ;
- la surveillance des conditions de sécurité de la machine (avec possibilité d'émission d'un signal d'alarme).

Ces fonctions, propres à chaque type de machine, sont traitées en logique séquentielle et confiées à un automate programmable, ou processeur machine, généralement intégré dans le bac électro nique (rack) de la CN (§ 3.2).

■ Sorties du système

Le résultat du traitement des données apparaît sous la forme de signaux de sortie transmis de la CN vers l'extérieur :

- signaux analogiques (ou numériques) de commande des moteurs d' entraînement ;
- signaux logiques de commande des éléments périphériques ;
- données numériques ou logiques relatives au fonctionnement du système CN (cotes, visualisation alphanumérique du programme, voyants lumineux, etc.) transmises au pupitre de l'opérateur.

3.2 Architecture de l'équipement

L'architecture d'une CN est illustrée par la figure 13. On y retrouve l'organisation classique d'un calculateur multiprocesseur.

Les modules principaux d'une CN représentés physiquement sous forme de cartes électroniques sont les suivants.

■ L'unité centrale de traitement ou processeur CN [Central Processing Unit, CPU]

à microprocesseur 32 bits est composée de l'unité de commande UC et de l'unité arithmétique et logique UAL.

L'UC cherche, décode et exécute les instructions du programme stocké en mémoire. Elle engendre et gère les signaux, commande la circulation des instructions du programme et des données de l'UAL.

L'UAL effectue les opérations sur les données qui la traversent (additions, soustractions, ET, OU, NON logiques, opérations de décalage, etc.).

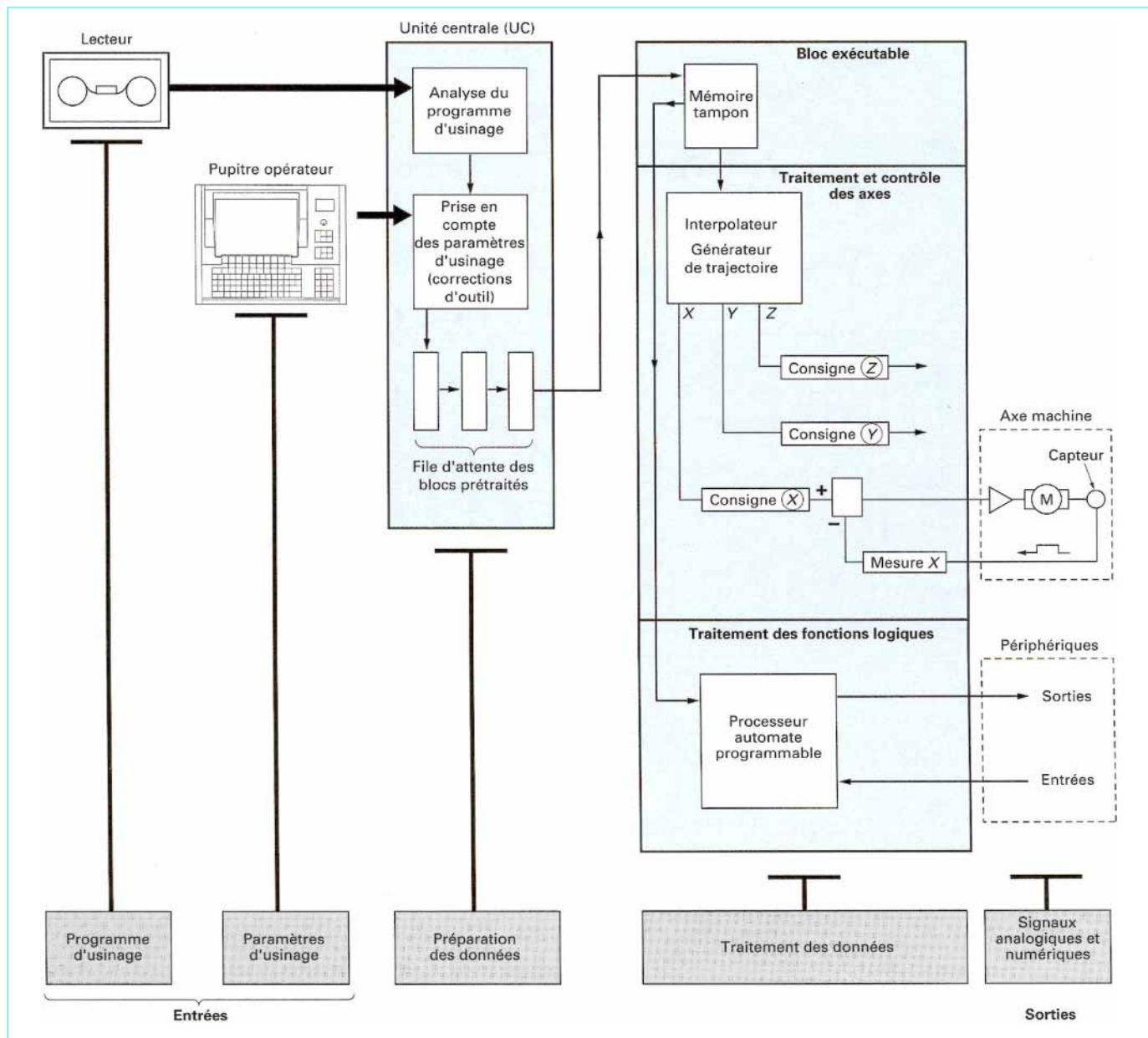


Figure 12 – Diagramme fonctionnel d'une CN

■ L'unité mémoire stocke :

- le logiciel du système sur des mémoires mortes (non volatiles) de type ROM. Les programmes ne peuvent être ni effacés, ni modifiés par l'utilisateur ;
- les programmes pièce, les variables et les corrections d'outils dans des mémoires vives (volatiles) de type RAM qui peuvent être effacées et reprogrammées à volonté.

■ **L'automate programmable (API), ou processeur machine**, assure l'interface entre la CN et la machine. Il gère la logique de la machine par programme, ce qui permet de conserver un matériel de base standard et de réaliser un programme pour chaque application.

Son rôle sur la machine concerne essentiellement les procédures de mise en route et d'arrêt d'organes mécaniques ou électriques, les changements d'outils, la gestion des palettes et, d'une façon générale, toutes les informations relatives à la machine et à son

environnement. Il est pourvu, à cet effet, de cartes entrées/sorties qui assurent la communication avec le monde extérieur. Les claviers, capteurs et lecteurs sont des dispositifs d'entrée, tandis que les imprimantes et les afficheurs se classent dans les dispositifs de sortie.

En présence d'un environnement de machine complexe, il peut s'avérer nécessaire d'ajouter des cartes entrées/sorties supplémentaires. En fonction de la configuration de la machine, les modules d'extension peuvent être déportés ou non par rapport à la CN.

La complexité du langage de programmation est généralement subordonnée à l'importance en volume du programme à écrire. Les principaux langages utilisés sont la programmation booléenne, la programmation en schémas à relais, le langage ladder, proche du précédent, le grafset et le langage C++ (cf. article [H 2 510] *Langages à objets* dans le traité Informatique).

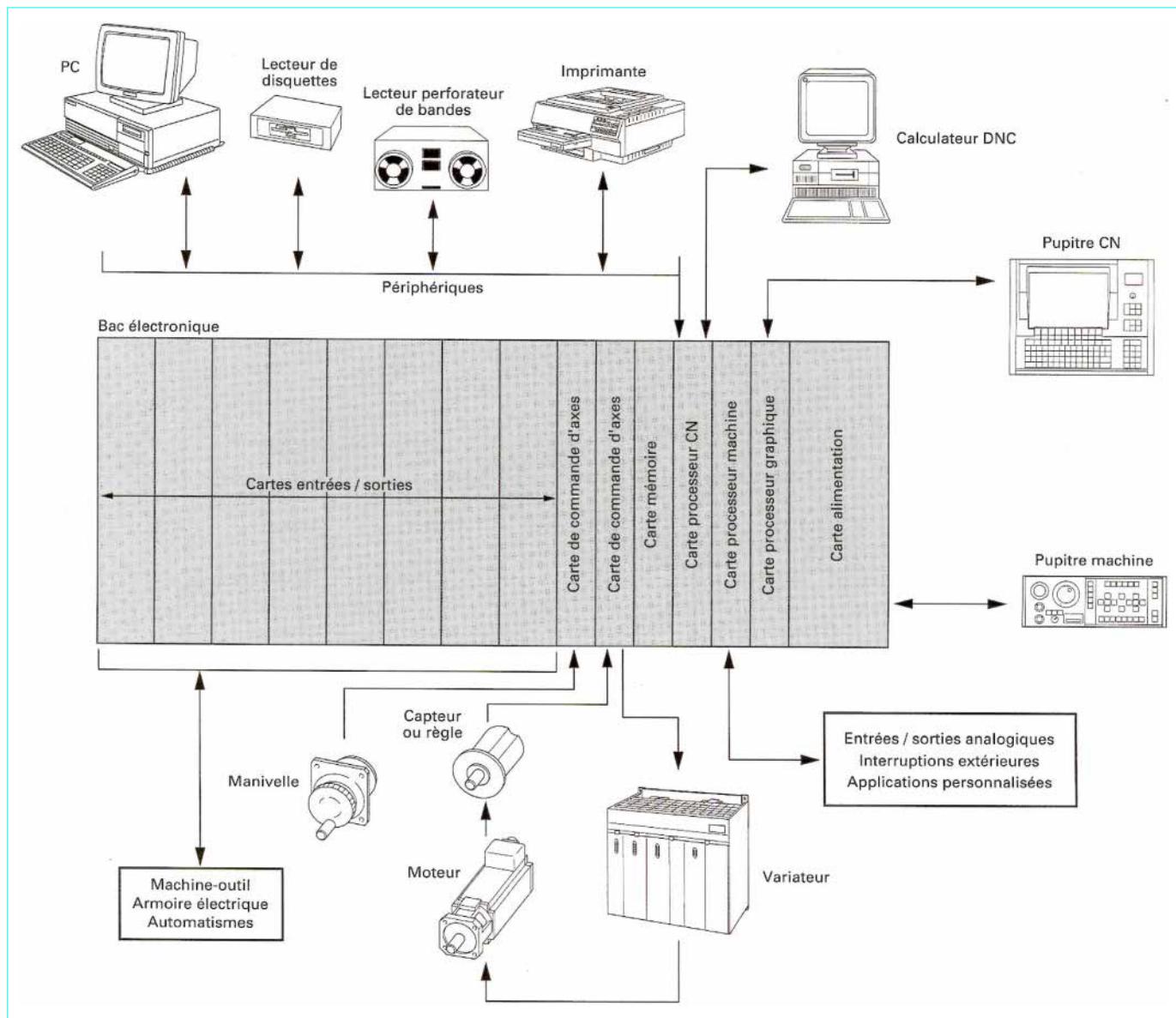


Figure 13 – Architecture matérielle d'une CN

■ Le **pupitre opérateur** permet le dialogue entre l'homme et la machine et la mise au point des programmes pièce à l'aide du système clavier-écran. C'est aussi le moyen de moduler certains paramètres tels que la vitesse d'avance ou la vitesse de broche (§ 3.3.2).

■ Les **unités de commande d'axes** sont chargées de piloter les axes de la machine, en boucle fermée, sous le contrôle de l'unité centrale.

■ Dans certains cas, une **unité communication** assure la liaison directe DNC de la CN avec un ordinateur extérieur en vue d'effectuer des opérations de chargement et de déchargement des programmes pièce.

Un ou plusieurs bus d'échange gèrent la communication entre tous ces modules, ainsi que l'échange et le traitement des informations entre les organes d'entrées, les mémoires et les organes de sorties de la CN.

Les échanges sont effectués de façon cyclique, au rythme d'une horloge qui cadence le déroulement des opérations et synchronise le fonctionnement du système. La cadence de l'horloge est généralement celle du microprocesseur utilisé par le constructeur de la CN.

3.3 Réalisation technologique

Après avoir longtemps été fabriquées en logique câblée, les CN sont aujourd'hui réalisées autour d'une architecture à base de microprocesseurs. Leur évolution actuelle s'apparente d'ailleurs de plus en plus à celle de l'informatique.

Les structures classiques de CN sont, dans leur grande majorité, de type modulaire extensible. La miniaturisation des automatismes comme des composants électroniques a permis de concevoir des ensembles d'une grande compacité, capables de s'intégrer dans des éléments de machine de taille réduite ou d'être incorporés dans un pendentif.

Une CN est généralement composée d'un bac électronique et d'un pupitre opérateur connectables par liaison série ou par fibre optique.

3.3.1 Bac électronique

Le bac électronique contient les sous-ensembles électroniques sous forme de cartes enfichables (figure 14). La miniaturisation et les techniques récentes de fabrication CMS (composants à montage de surface) sont également à l'origine de systèmes monocartes réussissant, sur une seule platine, toutes les fonctions de base de la CN. Ces cartes, ou modules, représentées sur le schéma d'organisation générale (figure 13) se raccordent, au même titre que l'alimentation générale, sur le bus d'interconnexion, ou bus système, placé à la partie arrière du bac.

3.3.2 Pupitre opérateur

Contrairement au bac électronique qui est la plupart du temps incorporé dans l'armoire électrique de la machine, le pupitre opérateur est facilement accessible, car il fait office d'élément de dialogue homme-machine. Son ergonomie constitue, de ce fait, un facteur déterminant d'acceptation auprès des utilisateurs de MOCN.

Un pupitre opérateur est un terminal à partir duquel s'effectue l'exploitation de la CN. Conçu pour être intégré à la machine, encastré en armoire ou installé en pendentif, il regroupe essentiellement un clavier alphanumérique, un écran de visualisation et un certain nombre de touches de fonction d'aide à l'opérateur (figure 15).

Le pupitre opérateur est généralement accompagné d'un pupitre orienté machine (figure 13) sur lequel figurent tous les éléments de commande nécessaires à la conduite de la MOCN (boutons-poussoirs, potentiomètres de modulation des vitesses d'avance et de broche, commutateurs, manipulateurs de commande manuelle des axes, manivelle électronique, voyants d'états, clés de verrouillage, etc.)

Le **clavier alphanumérique** ne comporte la plupart du temps que les caractères correspondant aux lettres-adresses contenues dans les programmes d'usinage. Toutefois, le clavier de certaines CN est le reflet exact de celui que l'on trouve habituellement sur les matériels informatiques de type PC. Le clavier autorise l'intervention de l'opérateur dans les cas suivants :

- introduction manuelle du programme pièce ;
- introduction et modification des correcteurs d'outils ;
- localisation de la pièce dans le système de coordonnées de la machine ;
- localisation du point d'origine programme ;
- introduction des décalages d'origine ;
- choix du mode de conduite de la machine (manuelle, semi-automatique ou automatique).

Le **écran de visualisation**, de taille variable selon les besoins de l'utilisateur, est du type à tube cathodique (CRT), noir et blanc ou couleur, ou à cristaux liquides (écrans LCD). Cette dernière technologie, plus récente et encore relativement coûteuse, présente l'avantage d'un encombrement réduit (écran plat), ce qui simplifie d'autant son montage sur la machine.

Les principales informations d'affichage sur écran sont présentées sous forme alphanumérique ou graphique. Elles concernent :

- le programme courant ;
- la position du mobile ;
- les décalages ;
- les jauge et correcteurs d'outils ;
- l'état des variables et des paramètres ;

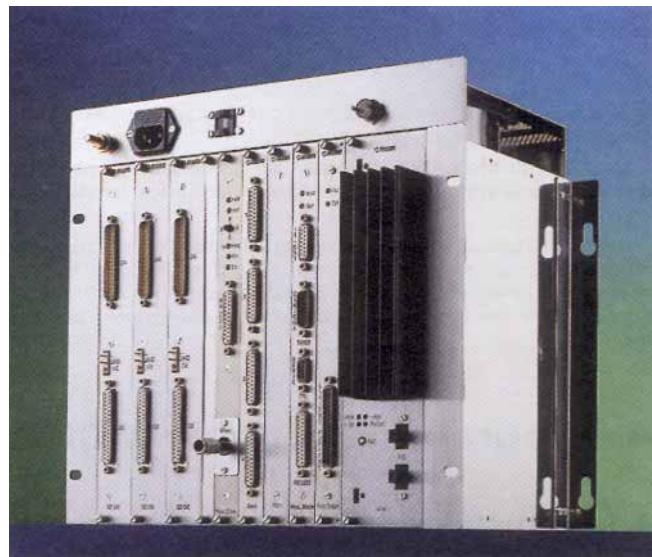


Figure 14 – Exemple de bac électronique CN (doc. NUM)

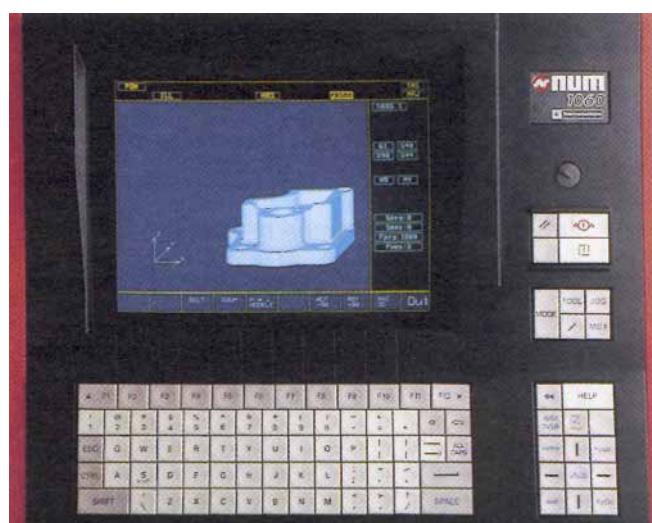


Figure 15 – Pupitre opérateur (doc. NUM)

- les entrées/sorties CN ;
- les messages de diagnostic ;
- la valeur de l'erreur de poursuite ;
- les menus, croquis et zones d'accès pour la programmation conversationnelle ;
- la représentation graphique de la pièce en deux ou en trois dimensions ;
- la simulation statique ou dynamique de l'usinage programmé avec visualisation des trajectoires d'outils.

Un dispositif interne à la CN permet, en cas de besoin, une recopie d'écran sur une imprimante ou un traceur de courbes (fonction *hard copy*).

Il est important de souligner que les techniques de fenêtrage sont de plus en plus courantes sur les écrans des CN. Elles facilitent notamment l'insertion de menus supplémentaires et l'introduction interactive de données dans le cadre d'un programme en cours d'exécution.

4. Programmation des MOCN

4.1 Instructions programmées et leurs supports

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* (§ 4.3) ou *avec l'assistance d'un ordinateur* utilisant un langage de programmation évolué (§ 4.4). À titre indicatif, la figure 16 classe différentes méthodes de programmation en fonction des compétences du programmeur et de la complexité des machines à piloter.

4.1.1 Nature des instructions programmées

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

Elles regroupent :

- 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 (§ 4.1.4), le choix du mode de cotation, absolue ou relative (§ 5.1.2), le choix du cycle d'usinage (§ 4.3.2), 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.

4.1.2 Codification des instructions

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.

Ce 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 17). 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 (-).

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.).

À titre d'exemple, les lettres-adresses usuelles retenues par NUM sont indiquées sur la figure 17 :

- les mots *numéro de bloc* (adresse *N* suivie d'un nombre de 1 à 5 chiffres) figurent obligatoirement au début de chaque bloc. Un numéro de bloc précédé du signe/permert de sauter le bloc correspondant si l'opérateur le désire ;

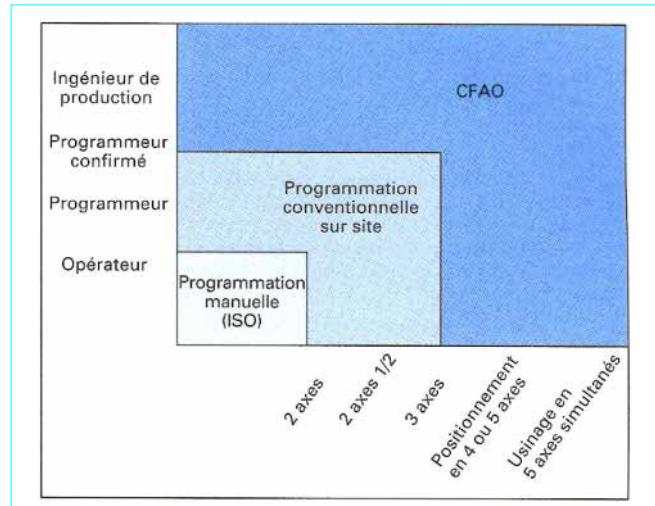


Figure 16 – Méthodes comparées de programmation

- les mots *fonction préparatoire* (adresse *G* suivie d'un nombre de 1 à 3 chiffres) 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. Les fonctions *G* peuvent être modales, c'est-à-dire automaintenues tant qu'elles ne sont pas révoquées par une fonction contradictoire, ou non modales lorsqu'elles ne sont actives que dans le bloc où elles sont programmées. Un bloc d'information peut contenir plusieurs fonctions préparatoires *G* si elles ne sont pas contradictoires ;

- les mots de *dimensions* ou d'ordre 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 appellés par les 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 mots *fonctions auxiliaires* (adresse *M* suivie d'un nombre de 1 à 3 chiffres) servent essentiellement à la programmation des fonctions de commutation de la machine. Les fonctions auxiliaires peuvent être modales ou non modales, ou encore des fonctions *avant* ou *après* selon qu'elles sont exécutées avant ou après le déplacement programmé dans le bloc.

4.1.3 Supports d'information

Les informations codées du programme d'usinage doivent être transcris, sous forme de données binaires, sur un support physique qui servira à leur introduction dans la CN et à leur archivage (figure 18).

La **bande perforée** représente le mode de changement des programmes le plus ancien. Elle est constituée d'un support en papier ou en matière plastique sur lequel les informations du programme sont codées en binaire. Un lecteur photoélectrique transmet alors ces informations à la CN en vue de leur mémorisation. Le manque de fiabilité des lecteurs et la mauvaise tenue des bandes (y compris des meilleures) à l'usure et au déchirement ont longtemps été à l'origine

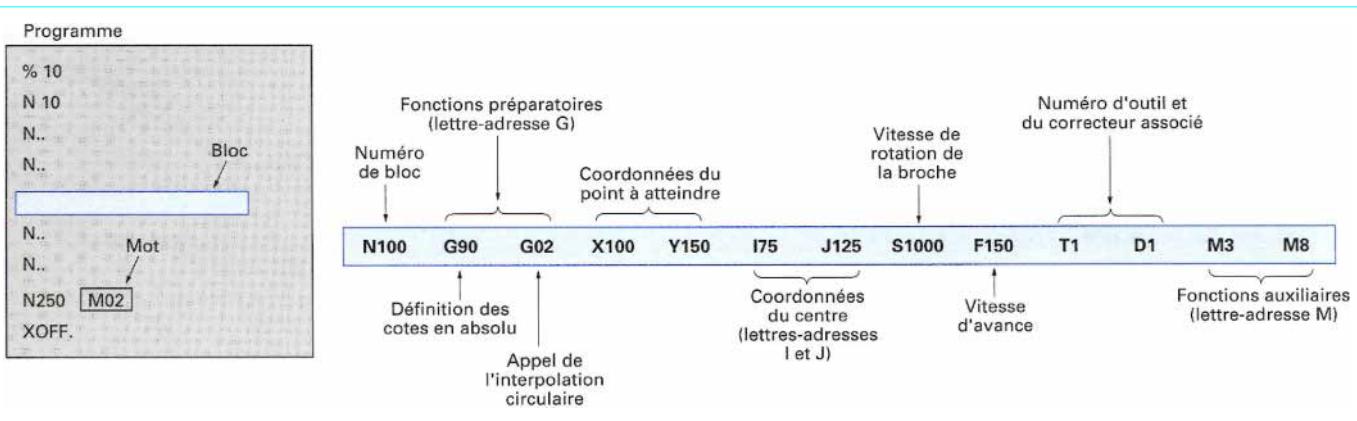


Figure 17 – Structure d'un programme d'usinage avec l'organisation d'un bloc

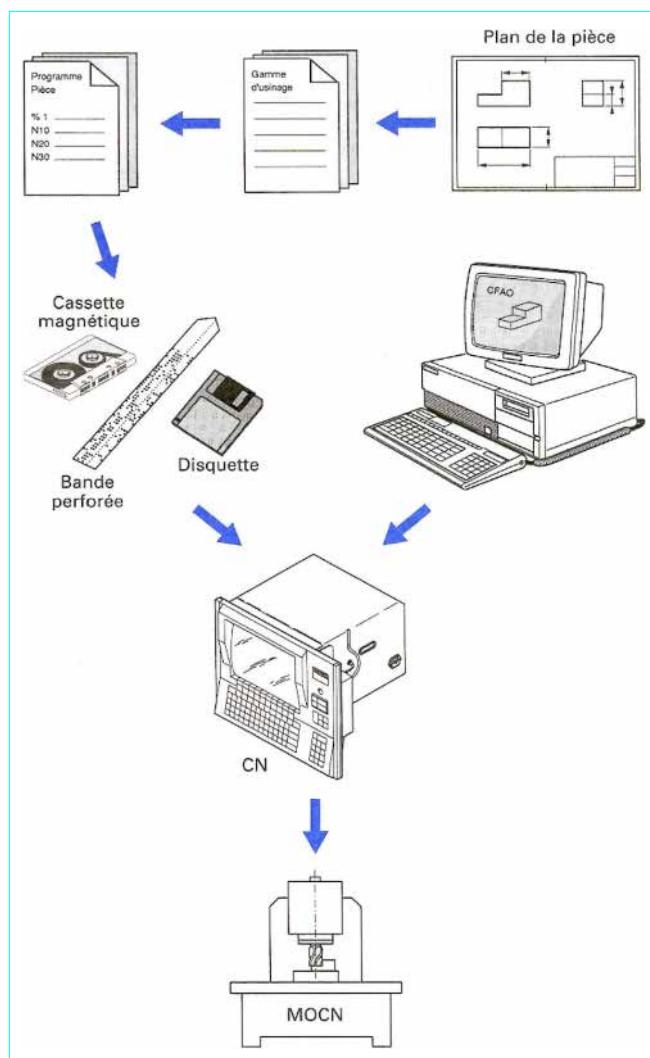


Figure 18 – Élaboration des programmes d'usinage

gine de défaillances à répétition. Dès l'arrivée des CN à calculateur, on n'effectuait déjà plus qu'une seule lecture du ruban de manière à stocker ses informations dans la mémoire RAM de la CN. Celle-ci pouvant alors poursuivre l'usinage en toute autonomie.

Actuellement, la bande perforée tend à disparaître au profit d'autres procédés d'introduction de données comme les lecteurs magnétiques pour cassettes ou disquettes, plus souples, plus faciles à lire et dotés d'une plus grande densité d'enregistrement.

La **cassette magnétique** est sensiblement identique à celle utilisée sur un magnétophone audio du commerce. Elle est constituée d'une bande en matière plastique recouverte d'un oxyde magnétique. L'enregistrement des données s'opère en magnétisant des particules de métal sous une forme codée, ces particules générant des impulsions lorsque la bande défile sous la tête de lecture.

De plus en plus répandue, la **disquette** se présente sous la forme d'un disque flexible sur lequel peuvent être enregistrées des informations magnétiques sur une ou deux faces. Facilement transportable et de faible dimension (3,5 pouces pour la plupart), elle dispose d'une capacité de mémoire élevée équivalant à une longueur de ruban perforé de l'ordre de 500 à 3 000 m.

Bien entendu, les cassettes et les disquettes peuvent être également utilisées pour les opérations de déchargement et d'archivage des programmes d'usinage validés.

En plus des supports physiques que sont la bande perforée, la cassette magnétique ou la disquette, l'**information peut aussi être introduite manuellement** au pupitre de la MOCN (§ 4.3). L'opérateur utilise alors le clavier du pupitre pour charger dans la CN, caractère par caractère, les données du programme d'usinage.

L'information peut enfin provenir d'un *note-book*, d'un micro-ordinateur de type PC ou même d'un calculateur central par une **liaison directe de type DNC** (§ 2.6.3).

4.1.4 Nature des déplacements

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

- **le 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 ;

- **l'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** (figure 19a) ;

— **l'interpolation circulaire** (*G02*, *G03* ou *G23*), 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 par exemple (figure 19b).

Parmi les autres modes de déplacement, on peut citer :

— **l'interpolation hélicoïdale**, qui combine un mouvement circulaire dans un plan avec un mouvement de translation perpendiculaire à ce plan (figure 19c) ;

— **l'interpolation parabolique** dans le plan, où chaque segment parabolique est géométriquement défini par un groupe de 3 points, le dernier point d'un segment devant être le premier du segment suivant (figure 19d) ;

— **l'interpolation polynomiale**, qui permet la définition de trajectoires à partir de polynômes et qui est utilisée pour le lissage des courbes de type *spline*.

4.2 Systèmes de référence

Les systèmes d'axes d'une MOCN répondent à des normes NF Z 68-020 et ISO 841 qui précisent leur désignation et leur sens de déplacement.

Conformément à ces normes, les axes définissant les mouvements de translation principaux sont désignés par *X*, *Y* et *Z*. Afin de ne pas confondre *X*, *Y* et *Z*, de même que leur sens (+) ou (-), il est simple d'utiliser la règle des trois doigts de la main droite, l'axe du majeur étant parallèle à celui de la broche de travail.

Les axes additionnels définissant les mouvements secondaires parallèles aux axes principaux sont désignés par *U*, *V*, *W* et les axes rotatifs par *A*, *B* et *C*.

L'orientation positive d'un axe rotatif correspond à la rotation d'une vis avec pas à droite avançant dans le sens positif de l'axe associé.

Un exemple de définition des axes sur une typologie de machine classique est représenté à la figure 20.

4.3 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 calcule les 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 requiert une profonde connaissance du langage ISO, des mathématiques (en particulier la géométrie et la trigonométrie) et des techniques d'usinage (limitations machine, outils, matières, etc.).

Pour un opérateur qualifié, la programmation manuelle peut être un moyen efficace d'effectuer des opérations simples. Mais lorsque les pièces deviennent compliquées et qu'elles nécessitent un grand nombre de mouvements, cette méthode devient vite fastidieuse avec des risques d'erreur importants.

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.

4.3.1 Aides à la programmation manuelle

■ Programmation géométrique de profil (PGP)

Le logiciel PGP permet de programmer des profils à l'aide d'éléments géométriques simples (segments de droite et arcs de cercle), en laissant le soin à la CN de calculer les points de raccordement

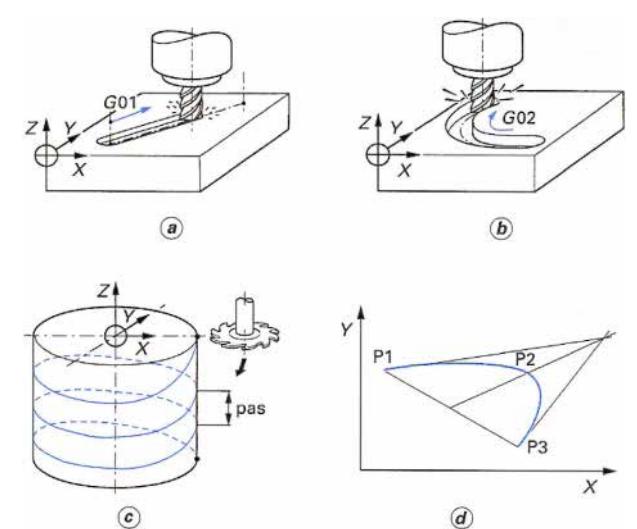


Figure 19 – Exemples d'interpolations linéaire, circulaire, hélicoïdale et parabolique

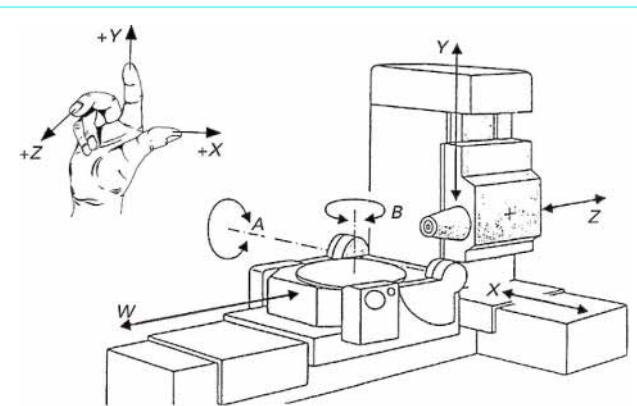


Figure 20 – Axes de déplacement d'un centre d'usinage à broche horizontale

entre ces éléments. Dans ce but, le langage machine est enrichi d'informations spécifiques qui précisent les positions relatives entre les éléments consécutifs (ES pour élément sécant, ET pour élément tangent, EA pour l'angle par rapport à un axe de référence). Des signes (+) ou (-) sont utilisés pour lever les indéterminations possibles (figure 21).

■ Module de définition graphique des contours (PROFIL)

Le logiciel PROFIL s'utilise exclusivement dans la phase de définition des contours géométriques de tournage et de fraisage en 2D. Il guide l'opérateur en permanence par une visualisation instantanée et dynamique des profils en cours de création et lui propose une aide à la décision dans le cas de solutions multiples. L'utilisateur peut ainsi se concentrer uniquement sur le dessin de sa pièce sans se préoccuper ni de la codification ISO (codes *G* et *M*), ni de la méthode à mettre en œuvre pour réaliser son usinage (figure 22).

■ Programmation conversationnelle

Le but de la programmation conversationnelle est de permettre à un opérateur de créer un programme pièce directement au pied de sa machine, sans avoir recours au langage machine codé en ISO.

Dans ce mode, l'élaboration de la géométrie de la pièce et la génération des trajectoires d'outils font essentiellement appel à des fonctions graphiques et à des menus déroulants.

Dans un contexte de programmation conversationnelle, l'opérateur est assisté dans sa démarche par une succession de pages d'écran dites interactives, en ce sens que chaque entrée de données effectuée au moyen de touches logicielles sur le clavier du pupitre implique une réponse de la CN et vice versa.

Ces pages d'écran peuvent être :

- des pages informatives apportant une explication, une précision ou une mise en garde ;
- des pages de menus proposant un ensemble d'options parmi lesquelles l'opérateur devra faire un choix ;
- des pages d'introduction de paramètres délimitées par des zones dans lesquelles l'opérateur fournit toutes les valeurs et les indications nécessaires pour effectuer le travail demandé ;
- des pages de contrôle qui permettent à l'opérateur de visualiser et de simuler le résultat de sa programmation.

Toutes ces pages font largement appel aux possibilités graphiques étendues des CN pour faire apparaître des zones de saisie, des croquis ou des images animées d'outils en cours de travail.

À titre d'exemple, le logiciel de programmation interactive PROCAM de NUM apporte une assistance graphique permanente aux différentes étapes de la programmation, de la mise au point et de l'usinage (figure 23).

Actuellement, la quasi-totalité des CN sont conçues de manière à ce que la programmation conversationnelle s'effectue **en temps masqué**. L'opérateur a donc toute liberté de créer et de simuler un nouveau programme sur l'écran de sa CN, sans interrompre le déroulement de l'usinage en cours.

Il convient enfin de souligner que la CN convertit en langage ISO toutes les informations qui ont été programmées en mode conversationnel. Le programme correspondant, même s'il est transparent pour l'utilisateur, est donc récupérable à tout instant en vue d'une modification rapide ou du stockage sur une mémoire périphérique.

4.3.2 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.

À 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 de G81 à G89, les cycles fixes d'usinage sont propres à chaque type de machine :

- cycles d'ébauche, de dressage, de perçage, d'usinage de gorges, d'usinage avec outil tournant, de filetage et de palpation sur les machines de tournage ;
- cycles de perçage (exemple donné en figure 26), de taraudage, d'alésage, de surfaçage, de rainurage, de contournage, d'usinage de poches, de filetage au grain et de palpation sur les machines de fraisage ;
- cycles de plongée, de balayage, d'épaulement, de profilage et de diamantage des meules sur les machines de rectification.

4.4 Programmation automatique (ou assistée)

Lorsque la définition de l'usinage devient trop complexe ou lorsque le volume de programmation est tel qu'il exclut la programmation manuelle, on fait appel à un langage de programmation spé-

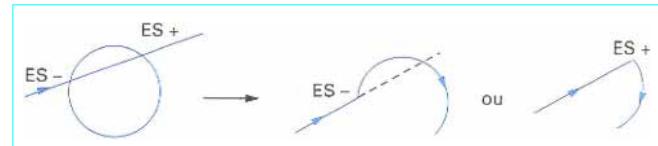


Figure 21 – Définition d'éléments sécants en PGP : intersection d'un cercle par une droite

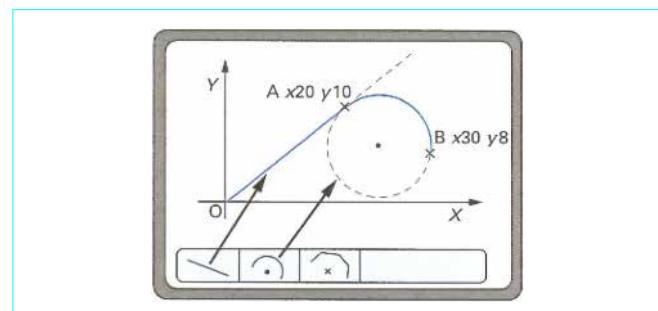


Figure 22 – Module de définition géométrique des contours PROFIL

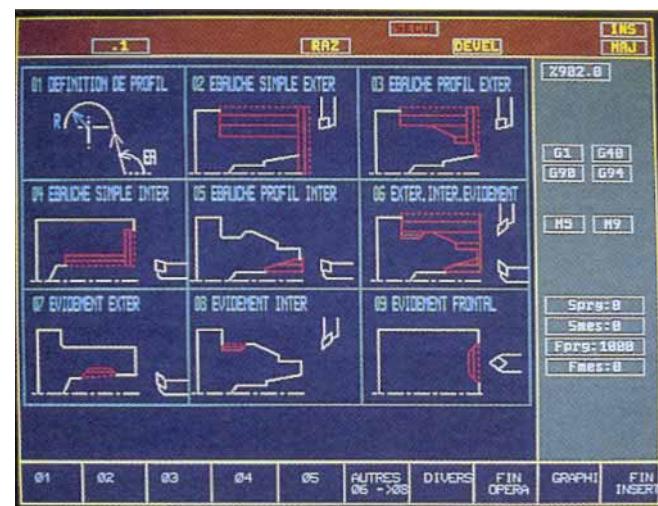


Figure 23 – Programmation conversationnelle PROCAM (doc. NUM) page d'appel des sous-programmes

cialisé généré à partir d'un système informatique extérieur à la machine. Ce langage comporte généralement deux phases de traitement des programmes.

— La première phase, appelée **programme processeur**, permet de calculer les coordonnées de tous les points définissant la forme de la pièce puis, en tenant compte de certaines données technologiques d'usinage (vitesse, avance, profondeur de passe en fonction des matières usinées et des outils utilisés, état de surface exigé, etc.), de décrire les diverses trajectoires suivies par l'outil pour parvenir à la pièce finie. Le traitement par calculateur de cette phase conduit à un fichier image des positions successives des outils ou CLFILE (Cutter Location File), indépendant de la machine et de la CN.

— Une seconde phase, dite **programme post-processeur**, personnalise ces données en langage ISO en tenant compte des caractéristiques de la machine (courses, limitations) et de celles de la CN utilisée (format, fonctions particulières, etc.). Ce post-processeur

permet de compenser les différences d'écriture qui existent entre des matériels de provenance diverse, un programme écrit pour une machine donnée étant rarement opérationnel sur une autre machine sans quelques aménagements préalables.

Le langage de programmation assistée le plus universel est le **langage APT** (*Automatically Programmed Tools*) du Massachusetts Institute of Technology. Très souple, ce langage autorise l'écriture de programmes d'usinage de géométries tridimensionnelles complexes, y compris sur les machines conçues pour travailler en cinq axes simultanés. L'utilisation d'APT réclame cependant des systèmes informatiques très puissants, ce qui explique l'apparition de nombreux langages dérivés plus simples (IFAPT, MINIAPI, EXAPT, etc.) exploitables directement sur des micro-ordinateurs.

Les systèmes de **FAO** (fabrication assistée par ordinateur) suivent un processus similaire mais ils assurent, en plus, la reprise automatique des données de définition de profils de contournage ou de surfaces évolutives générées par des logiciels de CAO. La communication entre les différents logiciels applicatifs fait l'objet de standards d'échange [9].

4.5 Programmation des formes complexes

La plupart des formes que l'on rencontre actuellement sur des pièces mécaniques peuvent être usinées dans un plan. Les machines concernées doivent disposer d'un minimum de fonctions de base pour permettre le travail en **2D** ou en **2D1/2**. Parmi ces fonctions, on citera le contournage (mode dans lequel l'outil reste positionné à une profondeur constante pendant qu'il décrit, dans le plan, une série de droites et de courbes), le perçage et ses opérations connexes, et l'usinage des poches.

Cependant, lorsque les courbes et les surfaces deviennent beaucoup plus complexes, comme c'est très souvent le cas dans les industries de fabrication des moules, de l'automobile et de l'aéronautique, il est indispensable de pouvoir déplacer l'outil suivant **3 axes** simultanément, voire même en **4 axes** avec des configurations de machines à plateau rotatif ou à tête pivotante, ou en **5 axes** avec une tête pivotante sur 2 axes (tête twist), un plateau rotatif et inclinable, ou une combinaison des deux. Si la technologie actuelle des machines et des CN permet d'envisager des trajectoires d'outils quelconques, pour les formes planes comme pour les surfaces gauches non mathématisables, la définition de ces formes avec un degré de précision satisfaisant fait appel à des méthodes de programmation pour lesquelles l'ordinateur joue un rôle fondamental.

4.5.1 Définition des surfaces complexes

La représentation géométrique des surfaces complexes fait appel à la description de courbes spéciales appelées courbes à pôles [2].

Les méthodes de représentation les plus courantes sont, à l'heure actuelle :

- les **courbes de Bézier**, qui sont définies par des polynômes. Une surface de Bézier se compose d'un ensemble de carreaux formant un maillage. Chaque carreau est lui-même constitué d'une suite de points appelés *pôles* ;

- les **courbes B-spline**, qui sont définies par des ensembles de points formant des carreaux de surface dans un réseau.

Ces deux types de courbes ne permettent cependant pas la description exacte de certaines configurations de courbes usuelles comme les coniques (arcs de cercles, ellipses, paraboles, etc.), d'où l'apparition d'un autre type de courbes dites *rationnelles* parce que la représentation des coniques est engendrée par un quotient de polynômes et non par une équation paramétrique polynomiale intégrale.

Les courbes rationnelles les plus courantes sont les **courbes de Bézier rationnelles** et les **NURBS** (*Non-Uniform Rational B-Spline*) qui sont les plus utilisées actuellement en CFAO, car elles regroupent les caractéristiques des *B-spline* et des Bézier rationnelles.

4.5.2 Aides à la programmation des formes complexes

■ NUMAFORM

Développé par NUM, NUMAFORM est un logiciel de description et d'usinage de formes tridimensionnelles concaves ou convexes (exemple donné sur la figure 24). Son implantation directe dans la CN permet une vérification rapide du programme et une prise en compte en temps réel des dimensions d'outils, qu'ils soient de forme sphérique (fraise-boule) ou torique.

NUMAFORM se compose de trois sous-programmes d'usinage qui permettent, après avoir défini les variables caractéristiques de la courbe, de réaliser :

- l'usinage de surfaces de révolution d'axe quelconque ;
- l'usinage de formes définies par l'association de surfaces élémentaires (plan incliné, cône, disque, cylindre, sphère, tore, etc.) ;
- l'usinage de surfaces gauches obtenues par lissage de courbes dont les extrémités sont situées sur deux courbes guides.

■ Fonction pôles-Unisurf

À partir des pôles de la surface gauche à usiner générés par la CFAO, cette fonction pôles-Unisurf :

- assure le traitement des cycles d'usinage par balayage en 3D ;
- prend en compte la correction d'outil dans l'espace ;
- permet de travailler sur un volume de programme réduit par rapport à celui que délivre habituellement la CFAO.

■ Spline

Les courbes *spline* sont des courbes à allure continue qui relient une série de points fixes spécifiés. L'interpolation *spline* est une méthode mathématique de lissage de ces courbes conçue pour assurer la continuité de la tangence et la constance de l'accélération en chacun des points spécifiés sur les trajectoires programmées.

■ Changement de référentiel

La fonction changement de référentiel consiste à effectuer des transformations de coordonnées par utilisation d'une matrice carrée. Cette fonction permet notamment d'usiner une pièce dans un plan incliné en la programmant dans un plan du trièdre de base.

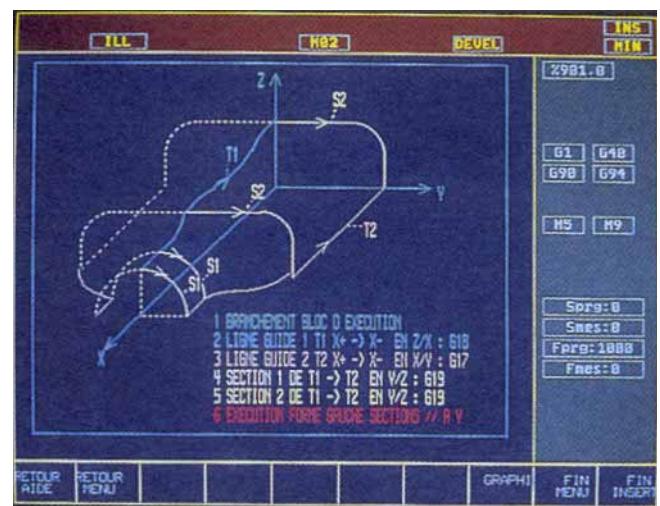


Figure 24 – Vue sur écran du logiciel d'aide à la programmation des formes complexes NUMAFORM (doc. NUM)

■ Fonction RTCP

La fonction RTCP (*Rotation around Tool Center Point*) commande l'orientation continue d'un outil hémisphérique par rapport à la pièce en le faisant pivoter autour de son centre. Dans la pratique, la CN compense en permanence les références des axes cartésiens X, Y et Z en fonction des axes rotatifs appliqués à l'outil. Cette méthode, très répandue en usinage cinq axes, évite la coupe au centre de l'outil de manière à assurer les meilleures conditions de coupe possibles (figure 25), y compris lors de l'usinage de parois verticales ou de faces en débouille.

4.6 Autres modes de programmation

4.6.1 Programmation polaire

La programmation polaire facilite la définition de trajectoires ou de positionnements lorsque la cotation de la pièce comporte essentiellement des valeurs angulaires.

4.6.2 Programmation paramétrée

La programmation paramétrée permet d'affecter des variables *L* aux adresses à la place des valeurs numériques (figure 26). Elle est principalement utilisée :

- pour réaliser des opérations arithmétiques, trigonométriques ou logiques ;
- pour effectuer des incrémentations ou des décrémentations ;
- pour assurer des sauts conditionnels après comparaison à une expression.

Cette méthode procure une grande souplesse de programmation, notamment pour la création de sous-programmes comportant des opérations répétitives ou pour l'usinage de familles de pièces, de même forme mais de dimensions différentes. Elle offre également à l'utilisateur une aide précieuse pour le traitement des cycles d'usinage (surfâge, poches...), de palpage et de changement d'outil.

4.6.3 Programmation structurée

Pour faciliter l'écriture et améliorer la lisibilité des programmes complexes, le système offre la possibilité de programmer des sauts et des boucles sous une forme structurée.

La programmation structurée comprend quatre jeux d'instructions principaux qui permettent à la fois d'isoler les tâches, de les hiérarchiser et de proposer plusieurs possibilités pour les procédures de tests :

- conditions d'exécution d'instructions : *if... then... else... end...* ;
- boucles *répéter jusqu'à : repeat... until* ;
- boucles *répéter tant que : while... do... end* ;
- boucles avec variable de contrôle : *for... to... by... do... end*.

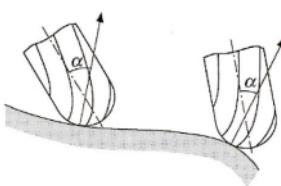


Figure 25 – Usinage sur fraiseuse en mode RTCP

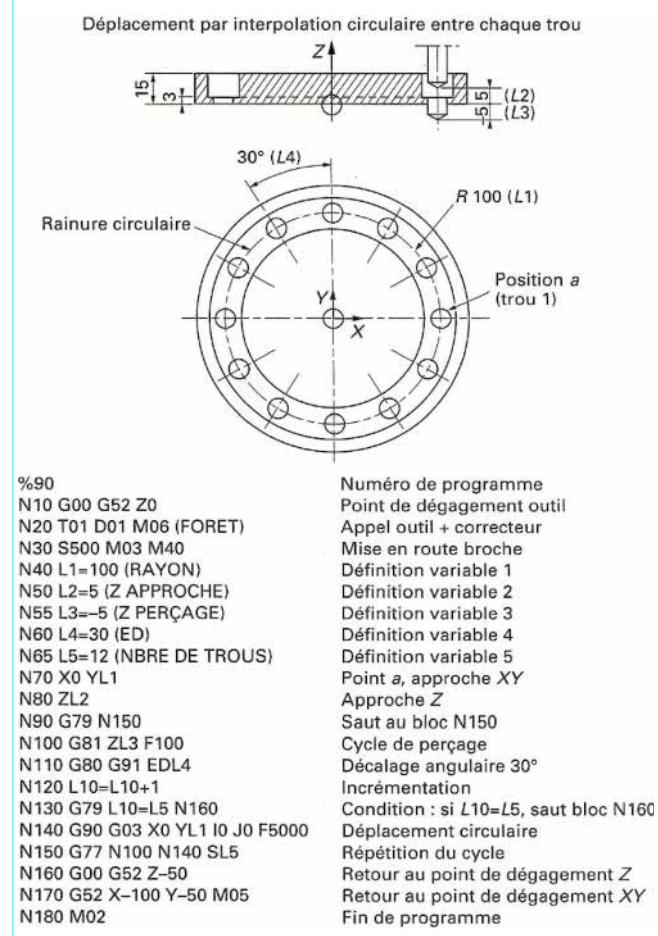


Figure 26 – Exemple de programmation paramétrée : perçage en cycle de 12 trous décalés angulairement dans le plan XY (G17)

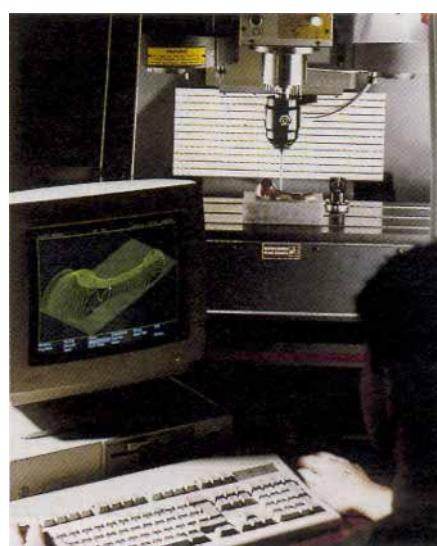


Figure 27 – Logiciel de digitalisation DIGINUM (doc. Renishaw)

4.6.4 Digitalisation

La majorité des techniques de programmation connues ont pour principe de définir des instructions d'usinage codées en langage CN à partir des données figurant sur le plan coté d'une pièce.

La digitalisation consiste, quant à elle, à parcourir et à analyser la surface d'un modèle existant avec un palpeur monté dans la broche de travail de la machine (figure 27). Les données géométriques recueillies sont transmises sous forme analogique à un ordinateur qui les convertit automatiquement en programme d'usinage exploitable par la CN.

L'opérateur de la machine peut ensuite enrichir ce programme par des données technologiques et, au besoin, y apporter des transformations géométriques telles qu'un facteur d'échelle ou une fonction miroir.

5. Dialogue homme-machine

L'ergonomie d'une CN constitue l'un des facteurs dominants de son acceptation dans les ateliers. C'est pourquoi toutes les CN modernes disposent de fonctions matérielles et logicielles conviviales qui permettent à l'opérateur de communiquer simplement et efficacement avec sa machine. Ces fonctions, qui composent ce que l'on appelle l'IHM (interface homme-machine) ou MMI (*man-machine interface*), sont regroupées sur le pupitre opérateur à partir duquel s'effectue l'exploitation de la CN (§ 3.3.2).

5.1 Décalages d'origine

5.1.1 Définition des origines

La CN traite tous les déplacements demandés dans le programme d'usinage à partir d'un point fixe qui définit le référentiel de la machine. Ce point appelé **origine mesure** (Om) est déterminé par le constructeur sur chacun des axes. C'est le point de coordonnées absolues (0, 0, 0).

L'initialisation des axes est une opération préliminaire à l'exécution de tout déplacement programmé. Elle doit être systématiquement effectuée par l'opérateur à l'aide d'une **procédure d'origine machine** (POM) obtenue par accostage du mobile sur une butée mécanique. Il est également possible d'effectuer une prise d'origine automatique en lançant l'exécution d'un programme écrit à cet effet.

L'**origine pièce** (Op) est un point de la pièce qui permet de la situer facilement dans le référentiel de la machine, soit à l'aide d'un montage approprié, soit à l'aide de cales et de comparateurs.

L'**origine programme** (OP) est le point de la pièce choisi par l'opérateur pour établir sa cotation. Elle est indépendante du système de mesure de la machine.

En fonction de ces diverses opérations, nécessaires pour conserver une homogénéité du travail, surtout s'il est confié à plusieurs personnes, il est nécessaire d'établir une correspondance entre les différents repères précédemment définis.

Il convient donc, en premier lieu, de situer l'origine pièce (Op) par rapport à l'origine mesure (Om). C'est l'**objet du mode PREF** (Point de Référence) (figure 28) dont les valeurs sont introduites par le clavier de la CN, puis mémorisées pour chacun des axes concernés. Il faut ensuite préciser la différence entre l'origine pièce (Op) et l'origine programme (OP), ces valeurs étant également introduites au clavier de la CN en **mode DEC1** (décalage). Lorsque les origines pièce et programme sont confondues, les valeurs de DEC1 sont nulles.

5.1.2 Mode de programmation

Le programmeur peut choisir entre deux modes de programmation (figure 29) :

- **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.

5.2 Correction d'outil

Le programme d'usinage est écrit en faisant abstraction des dimensions des outils (longueur et diamètre pour un outil de fraiseage, longueur et rayon pour un outil de tournage, par exemple). Toutefois, la trajectoire réelle des organes mobiles de la MOCN doit impérativement en tenir compte pour respecter la précision du profil fini. C'est pourquoi la CN se charge de transformer en permanence la trajectoire programmée en une trajectoire parallèle ou translatée d'une valeur correspondant aux dimensions de l'outil.

On distingue deux sortes de corrections.

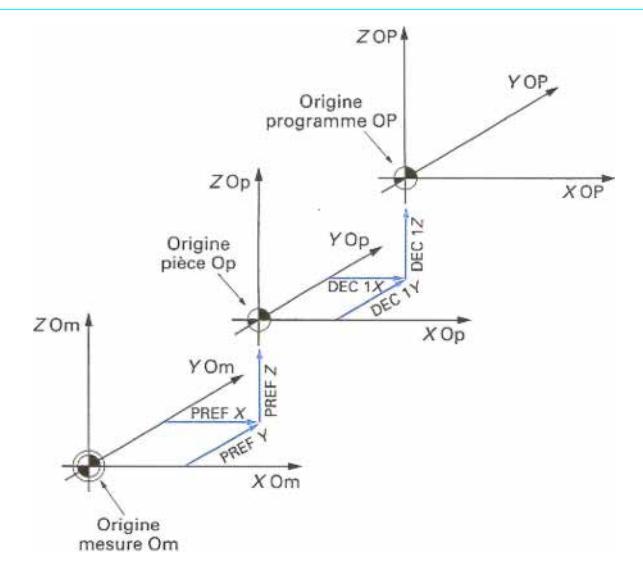


Figure 28 – Décalages d'origine

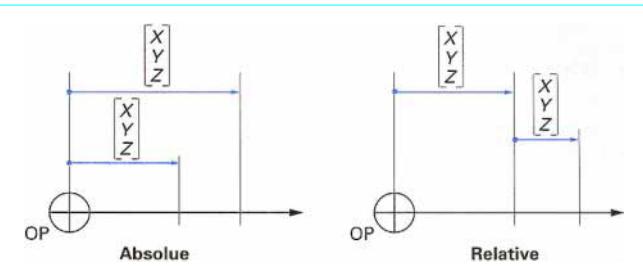


Figure 29 – Programmation absolue/relative

5.2.1 Dimensions d'outils

Les dimensions (ou jauge) d'outils sont introduites et mémorisées dans une table de dimensions d'outils de la CN. Elles sont généralement regroupées par triplet (rayon et longueur d'outil, rayon de coupe) pour former un correcteur qui sera ultérieurement associé à un outil donné en fonction des instructions du programme.

L'introduction des jauge d'outils peut s'effectuer au clavier de la CN ou à partir d'un équipement périphérique (lecteur de disquette, par exemple).

Une fonction préparatoire particulière (G41 ou G42) indique le sens d'application de la correction d'outil selon que celui-ci travaille à gauche ou à droite du profil.

5.2.2 Corrections dynamiques d'outils

L'opérateur a la possibilité à tout moment (y compris en cours d'usinage) d'introduire des corrections dynamiques d'outils lorsqu'il constate sur une pièce un écart entre les cotes programmées et les cotes réellement obtenues. Ces corrections, positives ou négatives, ont pour objet de compenser de légères variations de dimensions de l'outil ou de la pièce (usure, dilatation, etc.). Applicables sur les longueurs ou sur les diamètres, elles modifient dans la CN les valeurs initialement introduites dans les tables de dimensions d'outil (figure 30).

5.3 Interventions de l'opérateur pendant l'usinage

Bien qu'elle fonctionne normalement de façon automatique, la CN laisse à l'opérateur la possibilité d'intervenir sur le déroulement et sur les paramètres de l'usinage.

Ces interventions peuvent être :

- spontanées, notamment lorsque l'opérateur doit faire face à des incidents d'usinage ;
- programmées, lorsqu'une action est attendue avant la poursuite du programme.

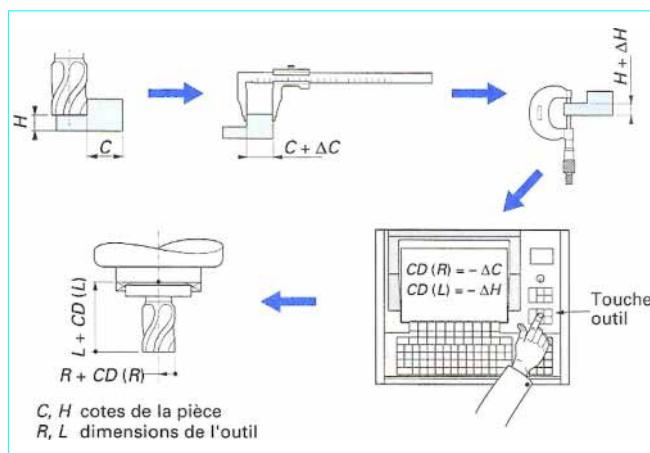


Figure 30 – Corrections dynamiques (CD) des outils

5.3.1 Interventions spontanées

Les interventions spontanées résultent d'une décision de l'opérateur. Centralisées sur des touches du pupitre CN ou du pupitre machine, elles concernent essentiellement :

- la suspension de l'usinage, qui a pour but d'interrompre les déplacements en cours sur tous les axes en réponse à un incident (bris d'outil, par exemple) ;
- le rappel des axes, qui est le complément de la suspension d'usinage. Il est utilisé pour ramener le mobile à la position qu'il occupait lors de la suspension d'usinage, après un dégagement manuel des axes ;
- la reprise de séquence (fonction RNS), qui permet de lancer l'exécution d'un programme à partir d'un bloc déterminé ;
- l'introduction manuelle des données (IMD), utilisée pour interrompre le déroulement d'un programme afin d'exécuter une instruction complémentaire non prévue ;
- la modulation des vitesses des avances et de la broche par potentiomètres ;
- le dégagement d'urgence, qui met en œuvre un sous-programme de dégagement prévu dans le programme en cours d'exécution ;
- l'entrée des correcteurs dynamiques d'outils ;
- l'arrêt d'urgence.

5.3.2 Interventions programmées

Prévues à l'intérieur du programme, elles demandent une action de l'opérateur :

- arrêt d'usinage systématique (M00) ou optionnel (M01) permettant à l'opérateur de réaliser une intervention prévue (mesure, par exemple) et de relancer l'exécution par la touche de départ cycle ;
- forçage d'une interruption (fonction M12) ;
- attente de compte rendu, lorsque certaines opérations demandent des interventions manuelles (changement d'outil, par exemple).

5.4 Diagnostic et maintenance

Les CN disposent généralement de tests résidents implantés dans leur mémoire pour leur permettre d'effectuer leur autodiagnostic.

Dès la mise sous tension, le système procède à une série de vérifications qui font apparaître les éléments defectueux qui lui sont propres (unité centrale, mémoire), qui relèvent du programme d'usinage (erreurs de syntaxes), fonctions inconnues), ou qui sont imputables à la machine compte tenu de la programmation prévue par le constructeur au niveau de l'automate (valeurs de réglage des relais thermiques, prise d'origine non effectuée, etc.).

En cours de cycle, le système exerce une surveillance permanente du déroulement du programme et du bon fonctionnement des éléments du calculateur, de l'automate, des asservissements et de la mesure des axes, etc.

Les anomalies constatées sont visualisées sur l'écran de la CN sous forme de messages d'erreur en clair ou, plus généralement, de numéros d'erreurs dont la liste détaillée figure dans les manuels techniques livrés par le fabricant de la CN.

6. Mise en œuvre des MOCN

La mise en œuvre de la MOCN dans l'entreprise nécessite de respecter certaines règles de façon à préparer, dans des conditions optimales, l'intégration de cette technologie.

Cette phase de la mise en œuvre passe par trois grandes étapes :

- le choix du matériel ;
- la préparation préalable de l'entreprise et de son environnement ;
- une analyse de rentabilité.

6.1 Critères de choix du matériel

Le choix doit porter sur trois éléments constitutifs, à savoir la machine, le système de CN et l'environnement.

6.1.1 Choix de la machine

Le type de machine est sélectionné en fonction des données suivantes :

- morphologie des pièces à usiner ;
- dimensions et poids des pièces à usiner ;
- précisions d'usinage demandées ;
- quantités de pièces à usiner par lancement ;
- nature des matériaux usinés par l'entreprise ;
- diversité et complexité des usinages ;
- encombrement au sol, compte tenu de l'espace disponible dans l'atelier.

On peut déterminer les fabrications représentatives et vitales pour l'activité d'une entreprise en utilisant une représentation graphique classique appelée **méthode ABC** (figure 31), également connue sous le nom de **méthode Pareto**.

Fondées sur des considérations d'ordre statistique, ces diagrammes montrent que sur l'ensemble des pièces fabriquées dans une entreprise, 20 % des références engendrent environ 80 % de la valeur ajoutée. En étudiant les références situées dans la zone A du diagramme ABC, on peut sélectionner les pièces qui correspondent aux caractéristiques de base de la nouvelle machine envisagée et, ainsi, améliorer de façon substantielle la productivité. Au besoin, on élargira ce groupe aux pièces contenues dans les zones B, puis C.

On peut également définir le type de machine le mieux adapté en se référant aux classifications existantes (tableau 1).

6.1.2 Choix du système de CN

Le choix de la CN et de ses options matérielles et logicielles est intimement lié à son niveau de performances (et surtout à son adéquation à celui de la machine), à son ergonomie, à son prix et à la qualité des prestations offertes par son fournisseur.

Avant de prendre une décision définitive dans le choix d'une nouvelle MOCN, il est vivement recommandé à l'utilisateur final de la machine de se renseigner directement auprès du fabricant de la CN sur l'ensemble des possibilités logicielles que peut offrir l'équipement.

6.1.3 Environnement

Les critères de choix technologique du matériel ne doivent pas occulter les investissements annexes nécessaires au bon fonctionnement de la MOCN. Ils concernent notamment :

- le matériel de programmation ;
- les outils et les outillages (§ 2.1.2 et 2.6.2) ;
- l'implantation ou la réorganisation du magasin d'outillage et du service contrôle-métrieologie ;

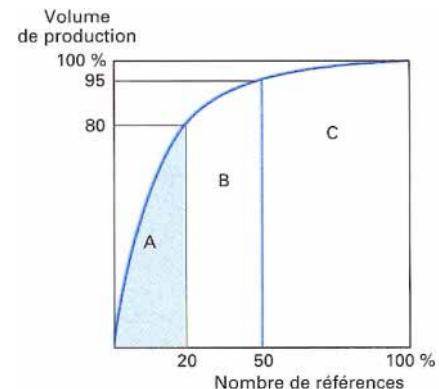


Figure 31 – Courbe ABC

Tableau 1 – Typologies des machines en fonction de la morphologie des pièces à fabriquer (doc. Sympa)

Type de pièces	Machine-outil
Pièces de révolution de type arbres	Tour avec contrepointe
Pièces de révolution de type rondelles	Tour frontal avec avance barre
Pièces de révolution de type flasques	Tour frontal avec tourelle révolver
Pièces de révolution de type flasques avec éléments fraisés	Tour frontal avec tourelle motorisée pour outils tournants
Pièces de révolution mixte de type arbre avec parties creuses et rainures	Tour à contrepointe avec tourelle motorisée et mandrin à changement rapide de mors
Pièces plates de fraisage (plaques)	Fraiseuse à axe vertical
Pièces plates de fraisage comportant des parties circulaires (alésages)	Fraiseuse à axe vertical avec possibilité d'interpolation circulaire
Pièces de type carter avec 4 faces comportant des alésages, perçages, etc.	Centre d'usinage horizontal 4 axes avec plateau à 360 000 positions et magasin d'outils
Pièces plates comportant de nombreux alésages perçages, taraudages, etc.	Centre d'usinage 3 axes avec magasin d'outils

- la maintenance générale de la machine ;
- l'aménagement des locaux de production (optimisation de flux).

6.2 Préparation de l'entreprise

L'utilisation optimale de la MOCN exige un aménagement profond des structures de l'entreprise.

Sur le diagramme de la figure 32, on pourra estimer les délais potentiels d'introduction de la CN dans l'entreprise.

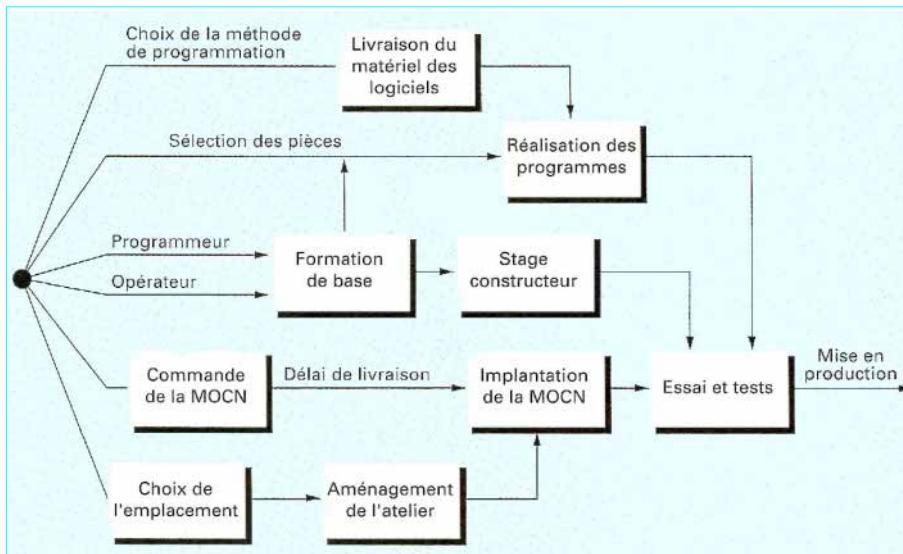


Figure 32 – Diagramme temporel d'introduction de la CN dans l'entreprise [2]

6.2.1 Moyens humains

L'aspect humain est primordial pour obtenir une large adhésion de l'entreprise à l'arrivée d'une MOCN. On veillera en particulier à expliquer clairement ce qu'est et ce que peut apporter réellement la CN avant de choisir et de former, à divers niveaux, le personnel concerné par l'utilisation du matériel (maîtrise, opérateur, programmeur, personnel de maintenance, etc.).

Dans la majorité des cas, il faut également prévoir un travail en plusieurs équipes.

6.2.2 Conséquences sur les services de l'entreprise

— Organisation des ateliers (§ 6.1.3).

— **Gestion de production** : le service lancement-ordonnancement assure le pilotage de l'unité de production avec le maximum de fluidité, tout en vérifiant que la production réelle de la machine est conforme aux prévisions.

— **Bureau d'études** : il doit connaître les possibilités et les limites de la MOCN et en tenir compte dans la conception des futures pièces. Des modifications de produits existants peuvent être envisagées.

— **Bureau des méthodes** : chargé de la préparation des programmes d'usinage, il s'efforce de standardiser les outils et les outillages et de recourir aux multiples possibilités de la programmation pour alléger au maximum le volume des programmes (programmations paramétrée et structurée, cycles d'usinage, etc.). Une recherche permanente d'optimisation des programmes est également à l'origine de gains substantiels sur les temps d'usinage.

— **Services commerciaux** : de nouvelles recherches quantitatives et qualitatives peuvent être envisagées dans le domaine de la sous-traitance, de même que l'étude de nouveaux produits adaptés à de la CN.

6.3 Étude de rentabilité

L'ouvrage de C. Marty, C. Cassagnes et P. Marin [2] consacre un long chapitre à une analyse détaillée du choix et de la rentabilité d'un investissement productif.

À l'aide de calculs comparatifs entre diverses solutions techniques et en appliquant les méthodes comptables les plus récentes, ce document apporte de précieuses indications aux entreprises qui envisagent de remplacer une de leurs machines-outils et qui s'interrogent pour accroître leur capacité de production.

7. Évolutions de la CN

Ces dernières années, l'évolution technologique de la CN a été principalement guidée par les besoins du marché en matière de productivité. Les systèmes conçus pour tenir compte de ces aspirations sont plus rapides, plus précis et multifonctionnels.

Actuellement, bien que la notion de productivité reste une priorité dans la conception des CN, les principaux fabricants apportent de plus en plus d'attention à leur ergonomie, c'est-à-dire à leur convivialité vis-à-vis de l'opérateur et à leur capacité à gérer leur environnement. Programmation simplifiée, communication améliorée avec les services en amont dans l'entreprise, prise en compte des bases de données technologiques et possibilités graphiques élargies sont autant d'avancées technologiques qui contribuent à désacraliser la CN au sein des ateliers.

7.1 État de l'art

■ **L'usinage à grande vitesse** : longtemps réservées au travail des métaux légers, les techniques d'UGV se tournent actuellement vers les métaux durs, en particulier les aciers traités que l'on rencontre en permanence dans les industries de fabrication des moules et des outillages (cf. article spécialisé dans ce traité).

Les fonctionnalités demandées aux CN appelées à traiter ce type d'applications sont les suivantes :

— recherche d'erreur de poursuite nulle par modulation anticipée des vitesses en fonction des changements de trajectoire et gestion progressive des accélérations ;

— mise en œuvre d'une fonction dite *anti-pitch* ayant pour objet de corriger les défauts perceptibles à chaque changement de quadrant d'un cercle, au moment précis où le moteur d'axe correspondant inverse son sens de rotation ;

— augmentation de la puissance de calcul, au besoin par adjonction de processeurs supplémentaires ;

— mise en œuvre d'une fonction dite *look-ahead* qui consiste à analyser le programme pièce par anticipation (en général plusieurs dizaines de blocs à l'avance) de manière à prévoir les accidents de parcours et à réduire la vitesse d'avance sur les points critiques de la trajectoire.

■ **Les asservissements numériques** : de récentes avancées effectuées dans les techniques de traitement de signal conduisent les asservissements analogiques classiques à disparaître au profit d'asservissements entièrement numériques. Dans cette nouvelle

architecture, les boucles de vitesse et de position sont traitées directement dans la CN, le variateur étant, de ce fait, réduit au rôle d'amplificateur de courant chargé d'alimenter en puissance le moteur d'axe (figure 33).

Par rapport aux solutions analogiques, les asservissements numériques apportent des avantages très significatifs, à la fois aux utilisateurs et aux constructeurs de MOCN :

- élévation des performances, en rapidité comme en précision ;
- raccordement simplifié et plus fiable par un bus de terrain à haut débit sur fibre optique ;
- outils de réglage et de diagnostic ergonomiques et faciles à mettre en œuvre, l'optimisation des paramètres étant assurée par un logiciel d'intégration sur PC incluant au besoin une fonction oscilloscope.

■ **Les fonctions PC intégrées** : de plus en plus, la CN intègre les convivialités du monde PC en conservant toutes ses performances intrinsèques dans le domaine du suivi de trajectoire en temps réel. Elle peut ainsi recevoir sur son propre écran les logiciels métier développés sur PC (optimisation des conditions de coupe, diagnostics intégrés dans des langages autres que les langages automate, images vidéo de l'usinage en cours, etc.). Les plus récents développements sur ce sujet insistent sur l'ouverture croissante de la CN aux réseaux du monde PC (présence d'un port) pour cartes PCMCIA au format des cartes de crédit.

■ **La gestion multigroupe d'axes** : l'amélioration de la productivité impose d'effectuer le plus grand nombre d'opérations sur une même machine. Avec une structure multigroupe, les CN ont la faculté, en plus de gérer l'usinage proprement dit, de prendre en charge toutes les fonctionnalités liées à l'environnement de la machine : portiques d'alimentation de pièces, changeurs d'outils, dispositifs de reprise de pièces, palpeurs de mesure, etc. Ce mode de gestion est particulièrement intéressant pour assurer le pilotage des machines spéciales comportant plusieurs postes de travail. À titre d'exemple, la CN NUM 1060 pilote un total de 32 axes répartis en 8 groupes indépendants, chaque groupe pouvant comporter de 1 à 9 axes.

■ **Les commandes numériques par apprentissage** : les CN dites *par apprentissage* permettent à un opérateur non spécialisé en programmation CN de réaliser une pièce unitaire ou prototype, en s'aidant de manivelles et de touches symboliques de fonctions d'aide disposées sur le pupitre de la CN ou de la machine (figure 34). Toutes les opérations effectuées sont mémorisées et reproduites automatiquement pour assurer l'usinage des pièces suivantes ou des séries futures. Des systèmes plus puissants complètent le mode opératoire précédemment décrit par la prise en compte des données technologiques relatives aux outils employés et à la matière à usiner, de manière à élaborer directement à l'écran une gamme d'usinage optimisée de la pièce.

7.2 Prochaines étapes technologiques

■ **Machines hexapodes** : la conception de ces *drôles de machines* s'apparente à celle des simulateurs de vol. Il s'agit, en fait, de structures spatiales mobiles constituées de six poutres mécaniques croisées, animées par vis à billes et servomoteurs. La plate-forme supérieure porte la broche et déplace l'outil de coupe au-dessus de la pièce fixée sur un socle inférieur (figure 35). La CN chargée de piloter ces machines intègre tous les algorithmes nécessaires au déplacement des six axes virtuels alignés mathématiquement par rapport à la pièce. Les langages de programmation et les programmes d'usinage restent donc identiques à ceux employés sur les MOCN classiques.

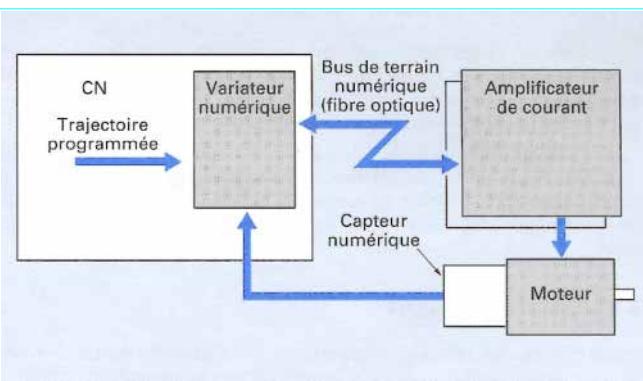


Figure 33 – Asservissements numériques pour le pilotage des axes de machines



Figure 34 – Commande par apprentissage NUM CNCplus
(doc. NUM / Keller)

■ **Moteurs linéaires** : compte tenu des performances croissantes des asservissements de machines, les vis à billes arrivent à leurs limites physiques, tant pour leurs capacités d'accélération que pour leur tenue géométrique (flexion, flambage). C'est pourquoi certains constructeurs entreprennent d'intégrer des moteurs linéaires pour commander leurs mécaniques de machines (figure 36).

Cette nouvelle solution d' entraînement, qui consiste schématiquement à ouvrir un moteur circulaire pour le mettre à plat, présente les avantages suivants :

- très grandes vitesses de déplacement (plusieurs centaines de mètres par minute) ;
- dynamique élevée (accélérations voisines de 10 g) ;
- grande raideur statique et dynamique ;
- construction simplifiée.

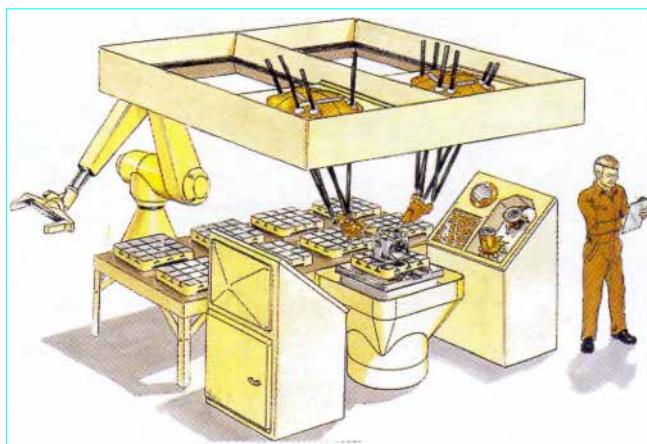


Figure 35 – Machine hexapode

■ **Architectures ouvertes** : en permettant aux constructeurs de machines d'accéder au cœur de leurs systèmes, les fabricants de CN se rapprochent des préoccupations du terrain.

Les avantages de cette démarche intéressent :

- les constructeurs de MOCN, qui peuvent dorénavant personnaliser la CN à leur guise en y intégrant leurs propres fonctionnalités (bibliothèques d'applications et d'utilitaires, langages évolués) tout en protégeant leur savoir-faire ;

- les utilisateurs, qui, en plus de bénéficier de tous les outils offerts par le constructeur, ont la possibilité d'intégrer leurs propres applications.

À titre d'exemple, le projet OSACA (*Open System Architecture for Control and Automation systems*), qui réunit onze participants européens (fabricants de CN, constructeurs de machines et universités), a pour mission de créer une harmonisation entre les divers composants pour permettre à une application logicielle donnée de fonctionner sur des plates-formes matérielles différentes.

■ **Interface homme-machine personnalisable** : de nouveaux outils logiciels fonctionnant sous environnement Windows assurent une personnalisation de l'ergonomie des CN en fonction des besoins de chaque métier (tournage, fraisage, rectification, etc.) et de chaque

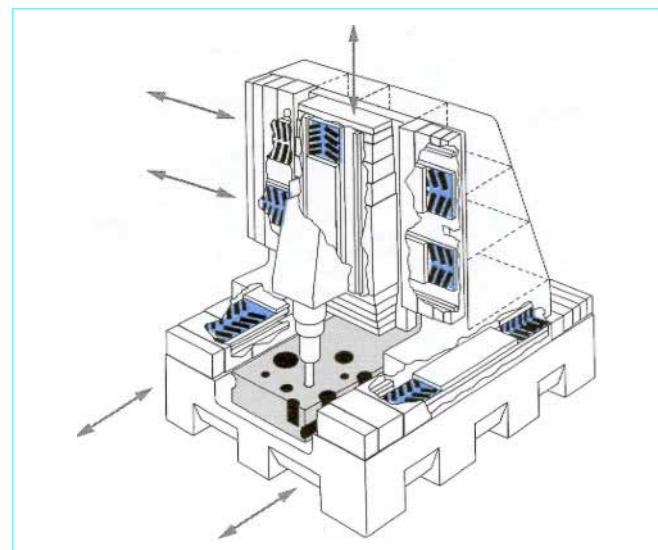


Figure 36 – Machine-outil équipée de moteurs linéaires

opérateur. Celui-ci peut ainsi visualiser ce qu'il veut et de la manière qui lui convient le mieux, compte tenu de son niveau de connaissances et du contexte d'utilisation dans lequel il se trouve.

L'IHM personnalisable se montre en outre particulièrement intéressante pour les métiers de l'usinage encore peu couverts par la CN et pour lesquels le nombre de programmes applicatifs est limité.

■ **Logique floue** : des éléments de logique floue commencent à faire leur apparition dans les CN. L'une des toutes premières applications consiste à optimiser les paramètres de réglage des asservissements numériques à l'aide d'algorithmes prédictifs qui tiennent compte des caractéristiques statiques et dynamiques de l'axe.

■ **Machines agiles** : la notion d'agilité consiste à mesurer la capacité d'un fabricant à réagir rapidement à toute demande de modification brutale et imprévisible d'un client, et de faire en sorte d'en tirer un bénéfice.

Un équipement de production *flexible* n'est pas nécessairement agile, mais la flexibilité constitue néanmoins l'un des éléments clés de l'agilité.

Commande numérique des machines-outils

par **Gilles PROD'HOMME**

*Journaliste spécialisé dans le domaine de la production automatisée
Responsable des Relations Extérieures de la société NUM SA*

Bibliographie

Références

- [1] ATTIYATE (Y.H.). – *NC Lexicon*, Compulex, Zurich (1989).
- [2] MARTY (C.), CASSAGNES (C.) et MARIN (P.). – *La pratique de la commande numérique des machines-outils*. Tec Doc Lavoisier (1993).
- [3] REINTJES (J.). – *Numerical Control, Meeting a New Technology*. Oxford University Press (1991).
- [4] *Initiation à la commande numérique* (document ACIERA) (1985).
- [5] KIEF (H.B.). – *NC/CNC Handbuch*.
- [6] GONZALEZ (P.). – *La commande numérique par calculateur*. Éd. Casteilla (1993).
- [7] MAGNIN (R.) et URSO (J.-P.). – *Mémotech Commande Numérique. Programmation*. Éd. Casteilla (1991).

- [8] CORNAND (A.), KOLB (F.), LACOMBE (J.) et RAK (I.). – *Usinage et commande numérique 1 et 2*. Éd. Fournier (1987).
- [9] GALLAIS (E.). – *Les métiers et la CAO*. Éd. Hermès (1994).
- [10] LEPAGE (F.). – *Les réseaux locaux industriels*. Éd. Hermès (1991).
- [11] WECK (M.). – *Werkzeugmaschinen, Band 3, Automatisierung und Steuerungstechnik*. VDI-Verlag GmbH (1980).
- [12] CYSSAU (J.D.). – *Dictionnaire des abréviations usitées en CN*. Sofetec (1994).
- [13] SOURISSE (C.). – *Les automatismes industriels*. Ed. Hermès (1988).

Revues spécialisées

États-Unis

- Modern Machine Shop (m.)
- CNC & Software Guide (an.) (voir Modern Machine Shop)
- American Machinist (m.)

Allemagne

- NC Fertigung (m.)

France

- Machines Production (bim.)

Grande-Bretagne

- Machinery and Production Engineering (bim.)

Japon

- Metalworking Engineering and Marketing (bim.)

Normalisation

E 60-097	12.88	Machines-outils. Code de réception des machines-outils. Détermination de la précision et de la répétabilité de positionnement des machines-outils à commande numérique.	NF ISO 2 806	10.94	Systèmes d'automatisation industrielle. Commande numérique des machines. Vocabulaire (indice de classement Z 68-005).
E 60-098	12.88	Machines-outils. Code d'essais des machines-outils à commande numérique. Dispositions générales pour le contrôle des erreurs. Partie 1 : répétabilité et réversibilité, sans mesure des déplacements en valeur absolue.	NF Z 68-020	12.68	Nomenclature des axes et des mouvements pour la commande numérique des machines (ISO 841).
E 60-099	12.88	Machines-outils. Dispositions générales pour le contrôle des erreurs. Partie 2 : réversibilité, répétabilité et précision.	NF ISO 6983-1	10.88	Commande numérique des machines. Format de programme et définition des mots adresses. Partie 1 : format de données pour les équipements de commande en position, de déplacement linéaire et de contournage (indice de classement Z 68-035).
E 60-102	1.76	Conditions d'essais des tours parallèles à commande numérique. Contrôle de la précision.	Z 68-036	10.88	Commande numérique des machines. Format de programme et définition des mots adresses. Partie 2 : codage et mise à jour des fonctions préparatoires G et des fonctions auxiliaires universelles M.
E 60-171	4.86	Machines-outils. Épreuves pratiques de réception. Pièces d'essais.	Z 68-037	10.88	Commande numérique des machines. Format de programme et définition des mots adresses. Partie 3 : codage des fonctions auxiliaires M (classe 1 à 9).

Principaux fabricants

Allen-Bradley Co. (États-Unis)

Robert Bosch GmbH (Allemagne)

Fagor Automation S. Coop. Lida (Espagne)

Fanuc Ltd (Japon)

Fidia S.p.a. (Italie)

Grundig Numeric GmbH (Allemagne)

Heidenhain GmbH, Dr.-Johannes (Allemagne)

Mitsubishi Electric Corp. (Japon)

Num SA (France)

Selca Spa (Italie)

Siemens Aktiengesellschaft

Bereich Automatisierungstechnik (Allemagne)

Yaskawa Electric Corp. (Japon)

Statistiques mondiales

Principaux pays producteurs de MOCN en 1994
(machines-outils par enlèvement de métal)

Japon	29 000
Allemagne	16 000
États-Unis	11 000
Italie	7 000
Suisse	6 700
Taiwan	4 000
Chine	3 600
Royaume-Uni	2 600
Corée du Sud	2 400
France	1 600
Russie	1 000
Espagne	500

En valeur, les MOCN représentent environ 70 % du total de machines-outils fabriquées. Le pourcentage moyen du parc de MOCN installées est légèrement supérieur à 20 %.