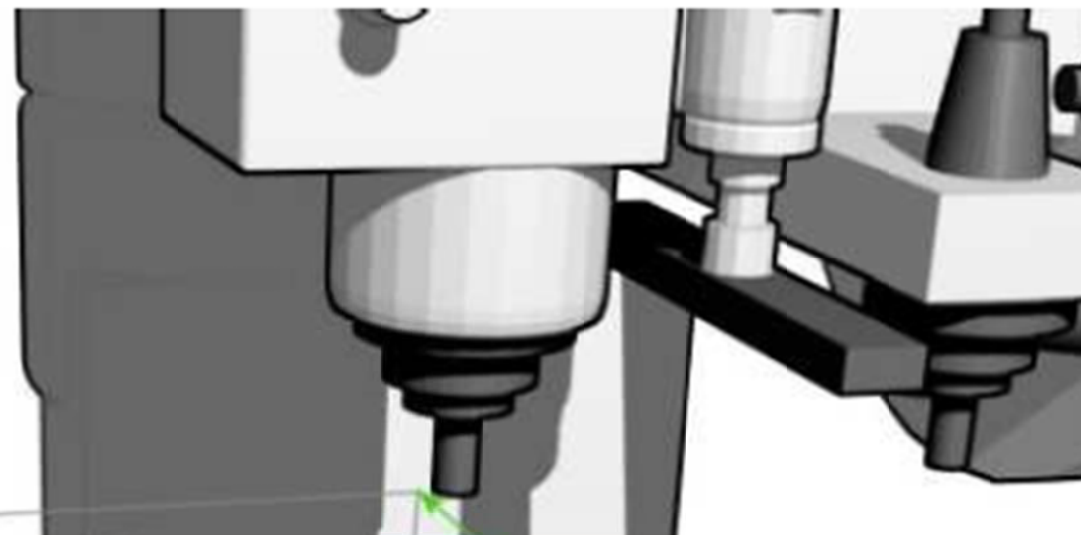
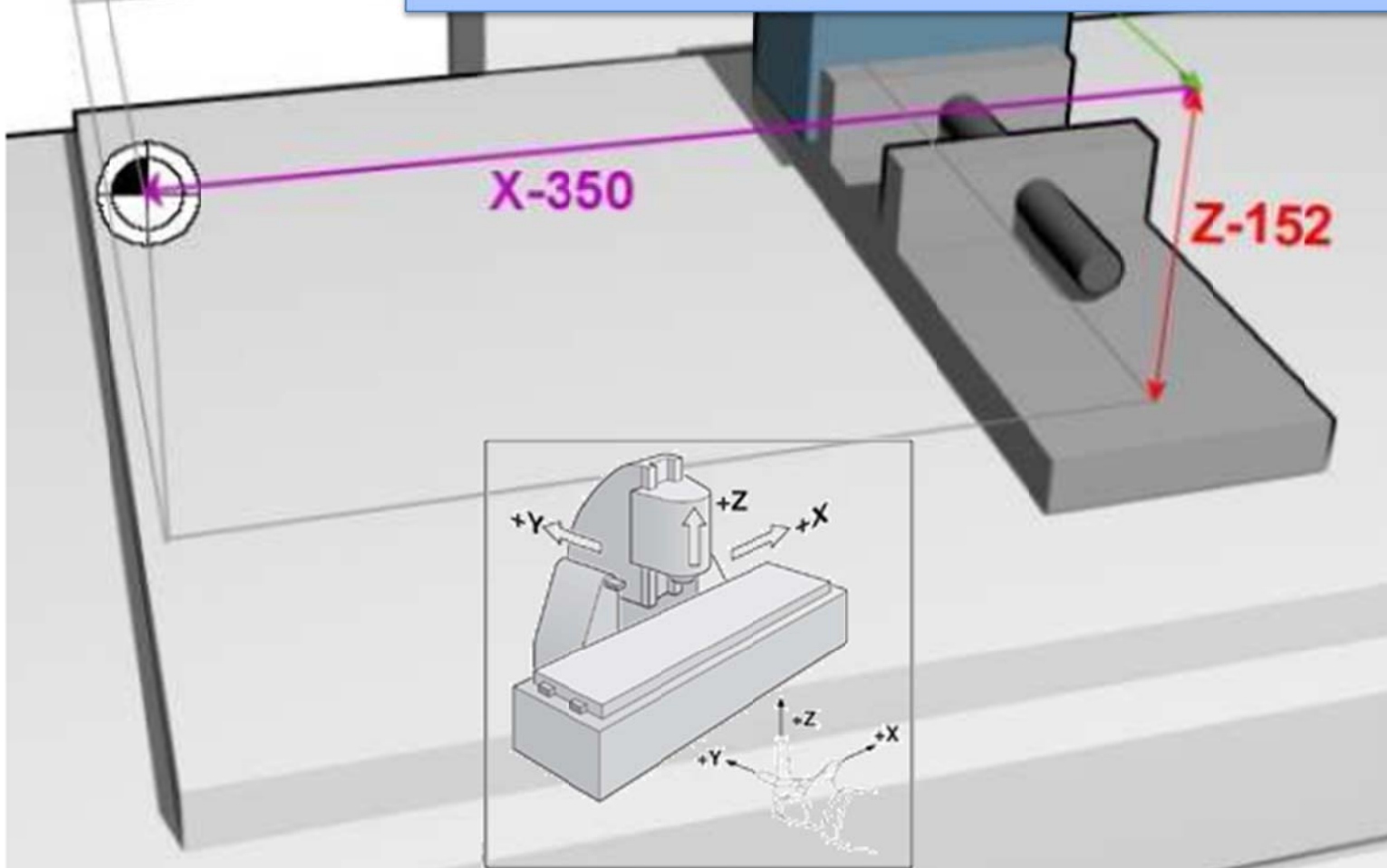




University of M'sila
Faculty of Technology
Department of Mechanical engineering



Usinage Sous Commande Numérique MOCN et Programmation



Préface

Ce document apporte les connaissances fondamentales sur la Commande numérique " 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) ou un centre d'usinage (CU). 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.

Le passage du stade conventionnel de production à celui de la commande numérique nécessite, de la part des exploitants, une transformation mentale et intellectuelle qui ne saurait se faire sans l'acquisition préalable et la maîtrise, entre autres, du dessin technique, langage technique universel des fonctions économiques productives.

Par, le présent document, on a essayé de donner les notions de base sur les différentes architectures des MOCN permettant d'obtenir de pièces finies ou Semi finies par coupe de métal sous commande numérique. Il s'agit d'un support de cours avec des illustrations claires détaillant les différents modes d'usinages ainsi que les modes de programmation en "**G Code**". Ce cours est destiné aux étudiants de master de spécialité fabrication mécanique et Productique en Génie Mécanique. Le contenu de ce polycopié est largement inspiré des documents et sources citées dans les références bibliographiques. Dans cette matière, les étudiants auront tout d'abord des définitions générales sur MOCN, par la suite des détails sur la programmation sous processeur ou poste processeur, les conséquences d'un mauvais choix des conditions d'usinage et de programmation lors de l'usinage d'une pièce mécanique. Ce polycopié n'a pas d'autre but que d'aider nos étudiants de LMD à acquérir le maximum d'informations afin d'assimiler le phénomène de la production sous commande numérique.

Sommaire

I. Machines-outils à commande numérique (MOCN)

I.1.	Introduction.....	1
I.2.	Généralités et définitions.....	1
I.3.	Justification de la CN.....	1
I.3.1.	Automaticité.....	1
I.3.2.	Flexibilité.....	1
I.3.3.	Sécurité.....	2
I.3.4.	Nécessités économiques et techniques.....	3
I.4.	Domaine d'utilisation et coût.....	3
I.5.	Avantages et inconvénients liés aux MOCN.....	4
I.5.1.	Avantages CN.....	4
I.5.2.	Inconvénients CN.....	4
I.6.	Morphologie des MOCN.....	4
I.6.1.	Mouvements d'avance.....	4
I.6.2.	Approvisionnement en outils.....	4
I.6.3.	Approvisionnement en pièces.....	5
I.6.4.	Évacuation des copeaux.....	6
I.6.5.	Arrosage et soufflage.....	6
I.6.6.	Guidages.....	6
I.6.7.	Précision et contrôle.....	6
I.7.	Configuration des MOCN.....	7
I.8.	Principe d'asservissement d'un organe mobile.....	8
I.8.1.	Les axes normalisés.....	8
I.8.2.	Les axes principaux linéaires.....	9
I.8.3.	Les axes circulaires primaires.....	9
I.8.4.	Les axes additionnels.....	9
I.9.	Entraînement d'un organe mobile suivant un axe.....	9
I.9.1.	Moteurs.....	9
I.9.2.	Variateurs électroniques de vitesse.....	10
I.9.3.	Mécanismes d'entraînement.....	11
I.10.	Mesure des déplacements.....	11
I.10.1.	Méthodes de mesure.....	11
I.10.2.	Types de capteurs.....	12
I.11.	La CN dans les unités de production automatisées.....	12
I.11.1.	Classification.....	12
I.11.2.	Gestion de l'environnement.....	13
I.11.3.	Liaisons DNC.....	13
I.11.4.	Réseaux de communication.....	14
I.12.	Anatomie de la CN.....	15
I.12.1.	Analyse fonctionnelle.....	15
I.12.2.	Architecture de l'équipement.....	17
I.13.	Mise en œuvre de la MOCN.....	17
I.13.1.	La boucle machine (ou cellule élémentaire d'usinage).....	17
I.13.2.	Les origines.....	19
II. Programmation des Machines-Outils à Commande Numérique sous processeur		
II.1.	Introduction.....	22
II.2.	Création d'un programme CN.....	22
II.2.1.	Préparer le dessin de la pièce.....	23
II.2.2.	Définir le déroulement des opérations d'usinage.....	23
II.2.3.	Définir la gamme de fabrication.....	23
II.2.4.	Traduire les opérations dans le langage de programmation.....	23
II.2.5.	Regrouper toutes les opérations en un programme.....	23
II.3.	Structure d'un programme.....	23
II.3.1.	Principales adresses.....	24
II.3.2.	Structure d'un programme.....	24
II.3.3.	Structure d'une opération.....	25
II.4.	Les fonctions préparatoires "G".....	26
II.4.1.	Classification des fonctions préparatoires "G".....	26
II.4.2.	Choix du mode de programmation.....	26
II.4.3.	Programmation des déplacements.....	28

II. 4. 4.	Programmation des vitesses.....	33
II. 4. 5.	Retour aux origines (G28).....	35
II. 5.	Les fonctions auxiliaires "M".....	36
II. 5.1.	Commandes de broche.....	36
II. 5.2.	Appel de l'outil.....	37
II.6.	Programmation manuelle.....	44
II.6. 1.	Aides à la programmation manuelle.....	44
II.6. 2.	Cycles d'usinage.....	46
II.7.	Programmation automatique (ou assistée).....	47
II.8.	Programmation des formes complexes.....	48
II.8. 1.	Définition des surfaces complexes.....	48
II.8. 2.	Aides à la programmation des formes complexes.....	48
II.9.	Autres modes de programmation.....	49
II.9. 1.	Programmation polaire.....	49
II.9. 2.	Programmation paramétrée.....	50
II.9. 3.	Programmation structurée.....	50
II.9. 4.	Digitalisation.....	50
II.10.	Exemples de programmation.....	51
II.10.1.	Exemple de tournage.....	51
II.10.2.	Exemple de fraisage.....	52

III. Programmation sous post processeur (FAO)

III.1.	Présentation de CATIA.....	54
III.2.	Démarrage de CATIA.....	54
III.3.	Commandes de base.....	56
III.3.1.	Interface graphique.....	56
III.3.2.	Interface opérateur.....	56
III.4.	Configuration des options et des répertoires.....	57
III.4.1.	Copie des dossiers CN.....	57
III.4.2.	Modifier les options CATIA.....	57
III.5.	Création du programme avec le module de fabrication NC.....	59
III.5.1.	Cas de tournage.....	59
III.5.2.	Cas de fraisage.....	69
III.6.	Création du programme: (après création des cycles).....	78
III.6.1.	Dans le module CN.....	78
III.6.2.	Récupération des fichiers.....	80
III. 7.	Annexes.....	82
III.7.1.	Opérations axiales.....	82
III.7.2.	changement outil.....	82

I. Machines-outils à commande numérique (MOCN)

I.1. Introduction

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 aléseuses 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.

Ce chapitre 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.

I.2. Généralités et définitions

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.

I.3. Justification de la CN

I.3. 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 par 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 fort taux d'automatisation (figure I.1).

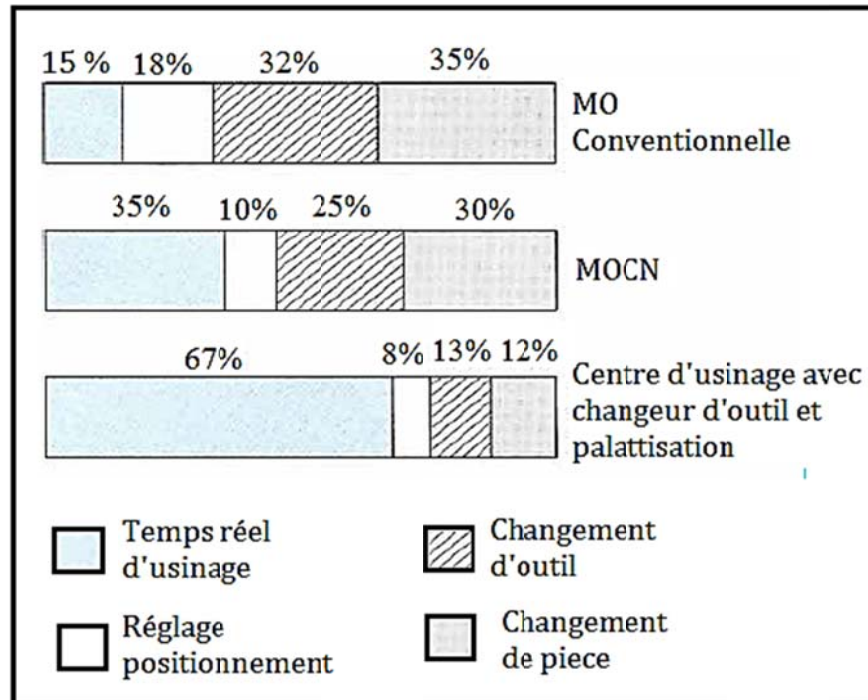


Figure I.1. Productivité comparée de diverses machines

I.3. 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 aisé du programme d'usinage des pièces ;
- réduction des encours 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.

I. 3. 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.

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.

I.3. 4. Nécessités économiques et techniques

Symbole 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.

I. 4. 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 :

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

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.

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 cames, 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 I.2 , 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.

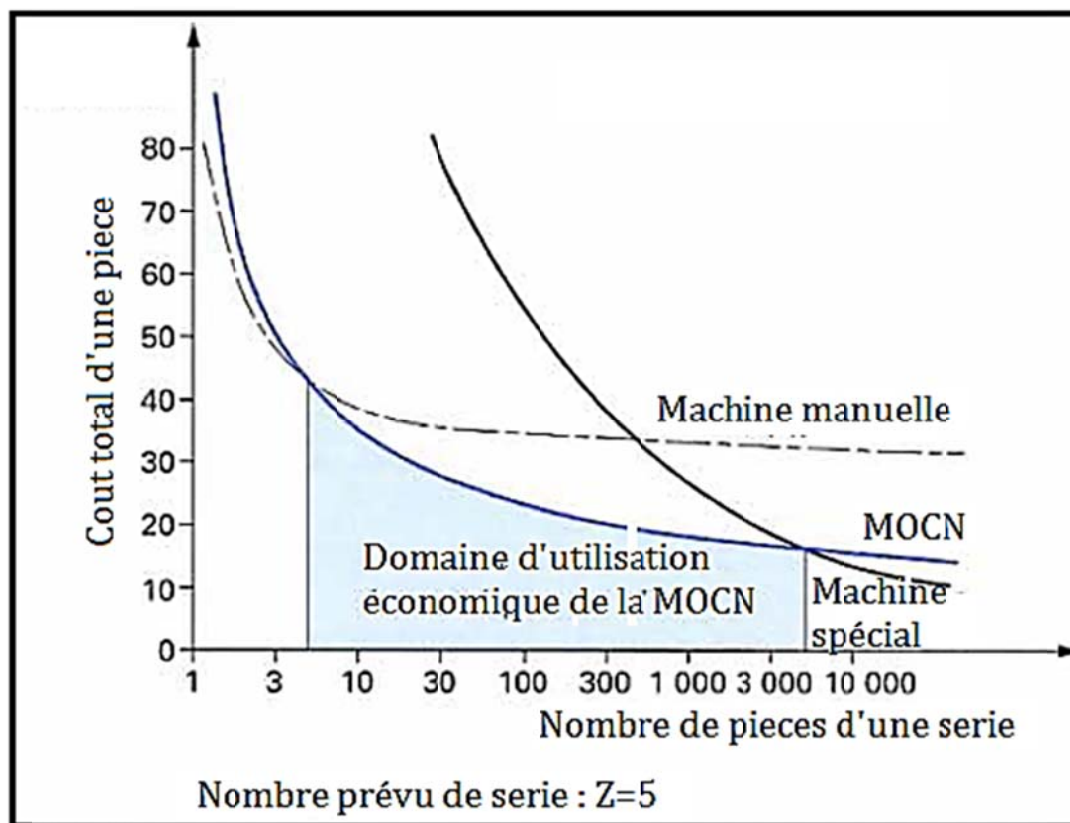


Figure I.2. Domaine d'utilisation des MOCN.

Les **MOCN** sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électro-érosion, Jet d'eau).

Les principaux procédés de fabrication sont concernés :

- Perçage, taraudage;
- Tournage, alésage;
- Fraisage;
- Rectification;
- Oxycoupage, soudure en continu, par points;
- Poinçonnage, cisailage.

I. 5. Avantages et inconvénients liés aux MOCN

I. 5.1. Avantages CN

- Permet la réalisation d'usinages impossibles sur les machines conventionnelles :
 - * Surfaces complexes ;
 - * Très grand nombre d'opérations ;
- Favorise les très petites séries et les pièces unitaires ; Prototypes :
 - * Pièces en cours de conception ou modifiées fréquemment ;
 - * Production à la demande ou juste à temps (réduction de la taille des lots) ;
- Précision :
 - * Machines de meilleure qualité en général ;
 - * Moins de montage, démontage de la pièce ;
- Fidélité de reproduction :
 - * Répétabilité (pas d'opérateur humain dans la chaîne de pilotage).

I. 5.2. Inconvénients CN

- Pour bénéficier de la majorité des avantages précédents, il faut que tout le parc machine de l'entreprise soit des **MOCN** ;
 - * Investissement initial plus important.
 - * Rentabilité pas immédiate.
- Amortissement impose souvent un travail en 2 ou 3 équipes ;
- Programmation et électronique demandant de la qualification ;
- Fausse fragilité de l'électronique ;
- Équipement annexe: ordinateur, logiciel, banc de réglage des outils, changeur d'outils ;
- Changement dans les méthodes de préparation et de fabrication ;
- Réticence du personnel au changement.

I. 6. Morphologie des MOCN

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

I. 6.1. 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**.

I. 6. 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 peut 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. I.3).

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 rechargement du magasin.

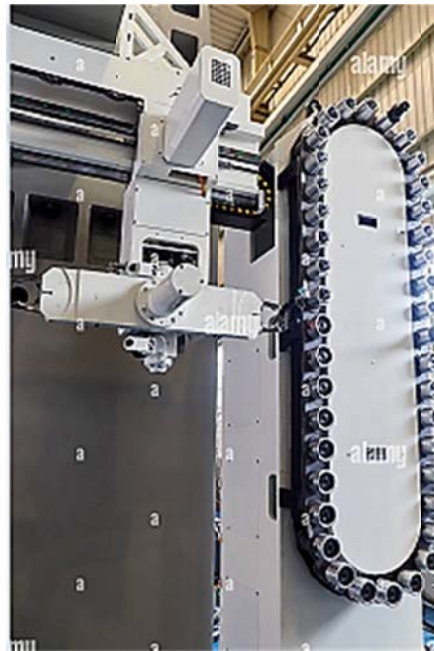


Figure I.3. Changement automatique d'outil sur centre d'usinage.

I. 6. 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. Il existe diverses configurations de palettiseurs, la plus simple étant constituée d'une **table circulaire ou linéaire** (figure I.4) 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.

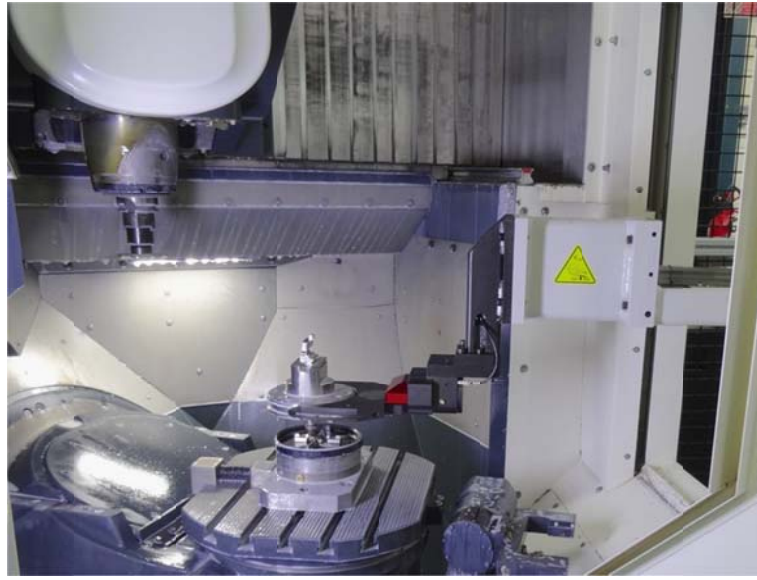


Figure I.4. Approvisionnement de pièces par palettisation.

I. 6. 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.

I. 6. 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 bars 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 bars.

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

I. 6. 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.

I. 6. 7. Précision et contrôle

Les MOCN sont contrôlées suivant des normes internationales 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; I.5 a). Compte tenu de la longueur d'onde de son rayon lumineux (laser hélium-néon), ce système offre, par sa résolution de $0,16 \mu\text{m}$, 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. I.5 b). Un *ball-bar* est constitué d'une tige télescopique contenant un capteur qui mesure ses variations de longueur avec une précision de $1 \mu\text{m}$. La tige est terminée à ses deux extrémités par une boule sphérique de haute qualité, chaque boule étant placée sur un support dégageant 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.



(a) Interferomètre laser



(b) Ball-bar

Figure I.5. Moyens de contrôle de mise en position

I. 7. 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, aléseuses, 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-plieres 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, détouneuses, 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. Muni 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.

I. 8. 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 assujéti 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. I.6). 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,...) 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.

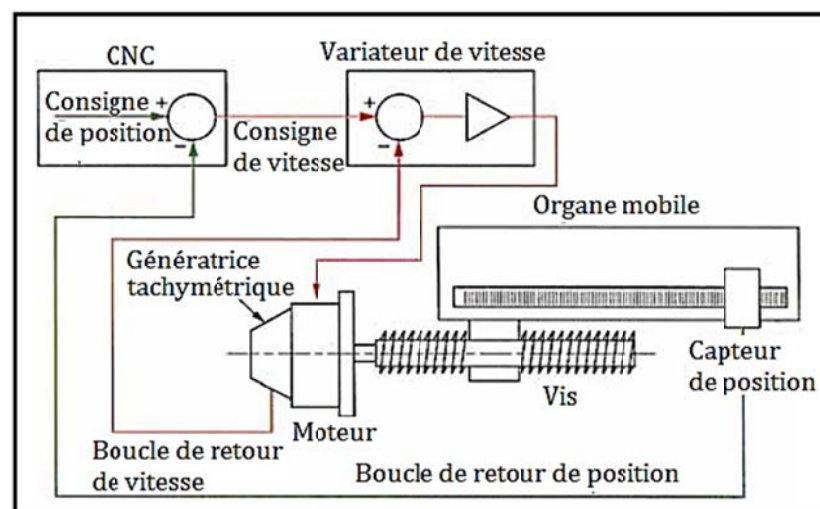


Figure I.6. Principe d'asservissement d'un organe mobile.

I. 8. 1. Les axes normalisés

I. 8. 1. 1. Axe

Un degré de liberté d'un organe de machine est appelé **AXE** si l'actionneur du mouvement est asservi en vitesse et position, et s'il peut être synchronisé avec un autre degré de liberté pour obtenir un déplacement qui n'est pas parallèle à une direction principale du système de coordonnées.

Il permet d'obtenir une position, par une instruction numérique, à la résolution du moyen de mesure près. Un axe est constitué de la façon suivante :

- un chariot mobile sur glissières.
- un système de transmission vis-écrou (vis à billes).
- un moteur et un réducteur.
- un dispositif de mesure de vitesse.
- un dispositif de mesure de position.

Chaque axe de déplacement est donc assujéti 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. Dès que l'écart entre les deux mesures s'annule, le mobile s'arrête.

I. 8. 1. 2. Demi-axe

Un degré de liberté d'un organe de machine est appelé DEMI-AXE si l'actionneur du mouvement est asservi en vitesse et position, sans pouvoir être synchronisé avec un autre degré de liberté.

I. 8. 1. 3. Axe séquentiel

Un degré de liberté d'un organe de machine est appelé AXE SEQUENTIEL si l'actionneur du mouvement n'est pas asservi en vitesse et position. Le nombre de positions obtenues de façon automatique est très limité.

Exemples: déplacement d'une contre-pointe, plateau tournant indexé à quatre positions, broche indexée tous les 15 degrés,...

I. 8. 2. Les axes principaux linéaires

Ils sont au nombre de trois ayant pour symbolisation :

- X Y Z quand l'outil se déplace.
- X' Y' Z' quand la pièce se déplace.

❖ Propriétés

Axes	Particularités
Z ou Z'	Dans la majeure partie des cas, l'axe Z ou Z' est l'axe de la broche. Le sens positif de ces axes correspond à un accroissement des distances relatives porte pièce-outil.
X ou X'	Il est perpendiculaire à l'axe Z ou Z' et correspond à l'axe ayant le plus grand déplacement. Sur une fraiseuse : C'est généralement un axe // à la glissière longitudinale.
Y ou Y'	L'axe Y ou Y' forme avec l'axe (X et Z) ou (X' et Z') un trièdre de sens direct.

I. 8. 3. Les axes circulaires primaires

A, B, C, désignent les axes circulaires, ils tournent respectivement autour des axes X, Y, Z. Le sens positif secondaire en positionnant la main droite tel que le pouce placé dans le sens positif du mouvement, les doigts repliés donnent le sens positif.

I. 8. 4. Les axes additionnels

Si en plus des mouvements de translation rectiligne primaire X, Y et Z il existe des mouvements de translation secondaires parallèles à ceux-ci, ils seront désignés respectivement par U, V, W. Si des mouvements tertiaires existent, ils seront désignés par P, Q, R. Si en plus des mouvements de rotation primaires A, B et C il existe des mouvements de rotation secondaires parallèles à A, B, C ils seront désignés respectivement par D et E.

I. 9. 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 ($< 1 \mu\text{m}$) ;
- 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.

I. 9. 1. Moteurs

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 donnée (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 contrepartie, 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 oeuvre 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'à 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. I.7) 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 *électrobroches* 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.

I. 9. 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.

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 I.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.

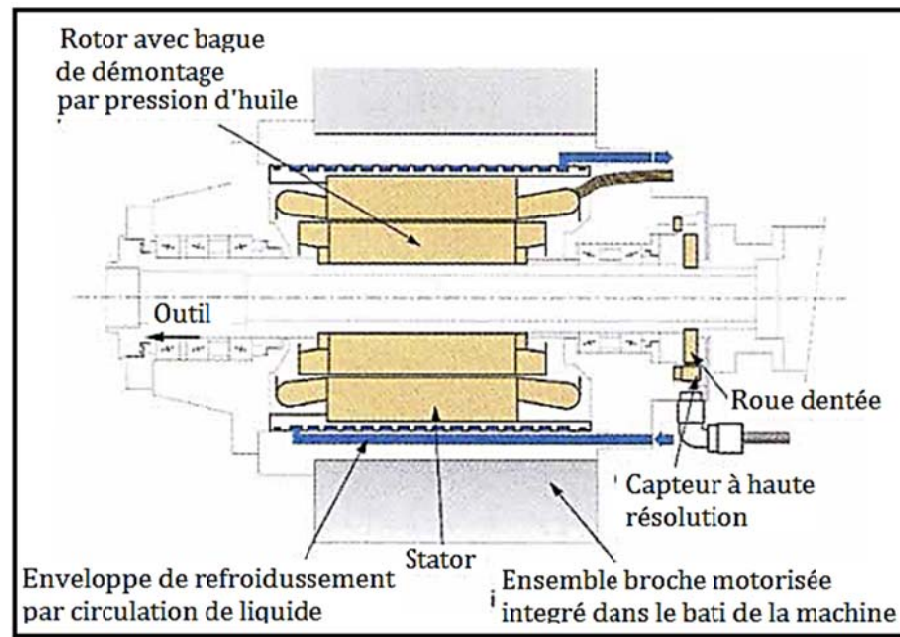


Figure I.7. Broche motorisée Motorspindle

I. 9. 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 I.8) : 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.

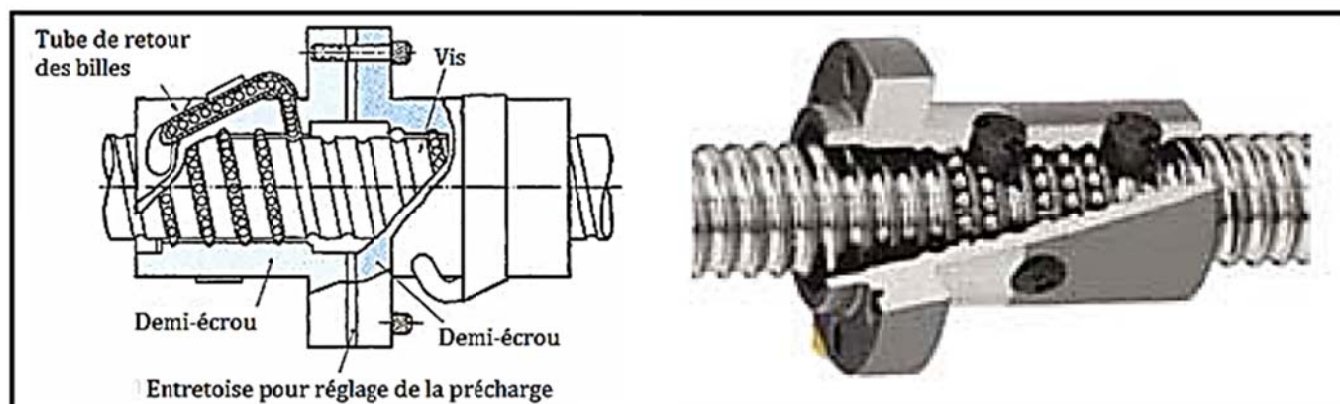


Figure I.8. Vis et écrou à recirculation de billes.

I. 10. 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.

I. 10. 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.

I. 10. 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).

I. 11. La CN dans les unités de production automatisées

I. 11. 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.

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.

I. 11. 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 **attachelements modulaires**, c'est-à-dire des porte-outils spécifiques qui vont contribuer à la bonne exploitation de la MOCN.

Les attachelements 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 préréglage 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.

On peut envisager deux méthodes de préréglage 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 préréglage d'outil composé de dispositifs mécaniques ou photoélectriques spéciaux munis de jauges, 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.

I. 11. 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 ordinateur central qui a accès à tous les registres internes de la CN et de son automate associé. Ce ordinateur peut être un simple microordinateur PC si son disque dur dispose d'une mémoire suffisante pour stocker toutes les données nécessaires.

Le ordinateur 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 ordinateur 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 ordinateur se font au travers de lignes dédiées aux terminaux ; la CN est donc considérée par le ordinateur 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.

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) .

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.

I. 11. 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 oeuvre 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 grand débit de plus en plus fréquemment fondés sur des architectures Ethernet, IBM Token Ring ou DECnet ;
- **niveau atelier**, où doit être assuré l'échange régulier de données structurées et le séquençage 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 séquençage 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 I.9) :

- 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.

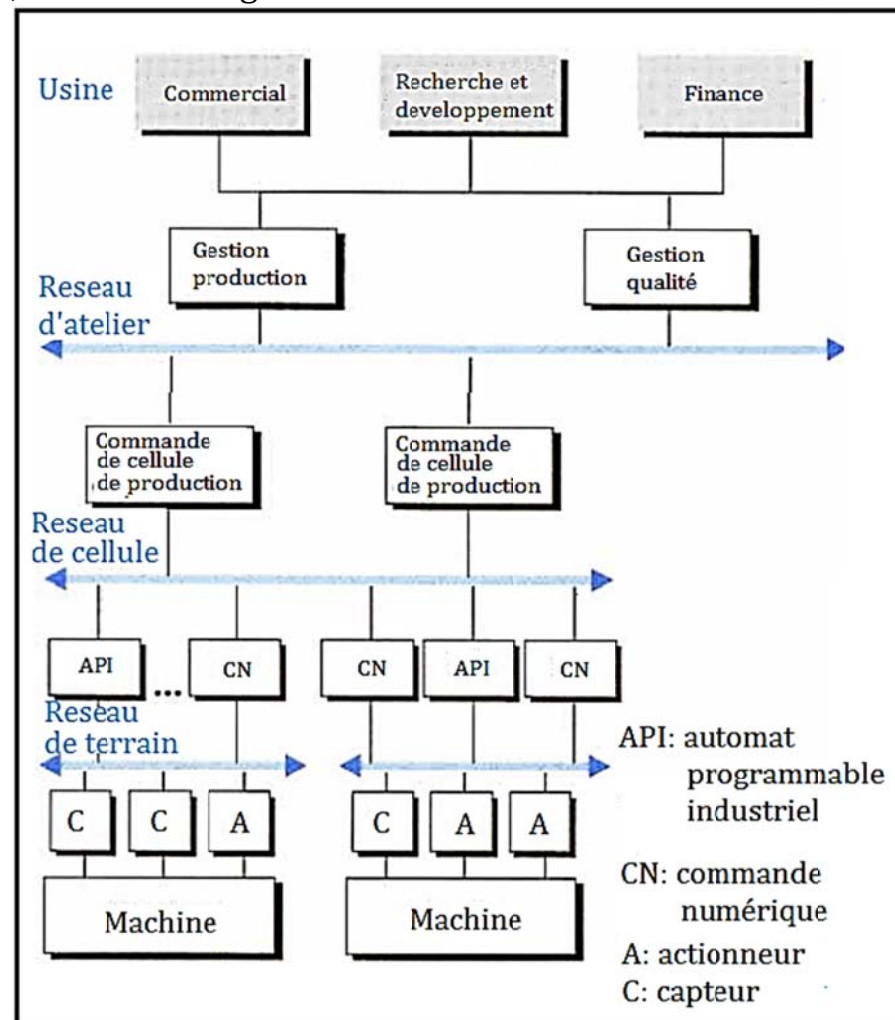


Figure I.9. Organisation de la communication dans une entreprise automatisée.

I. 12. Anatomie de la CN

I. 12. 1. Analyse fonctionnelle

I. 12. 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 (perçage, 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 tournage 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 I.10). 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 contournage 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.

I. 12. 1. 2. Fonctions d'une CN

La figure I.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. 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 et les dispositifs d'asservissement de position.

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.

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 déchargement 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 électronique (rack) de la CN.

❖ 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.

I. 12. 2. Architecture de l'équipement

L'architecture d'une CN est illustrée par la figure I.10. On y retrouve l'organisation classique d'un ordinateur 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.).

- ❖ **L'unité mémoire stockée**

- 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++.

- ❖ 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.
- ❖ 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.

I. 13. Mise en œuvre de la MOCN

I. 13. 1. La boucle machine (ou cellule élémentaire d'usinage)

La mise en œuvre d'une production en usinage fait intervenir une machine-outil, des outillages (porte-pièce, outils, porte-outil) et une pièce. Pour décrire cet ensemble, nous retiendrons l'appellation (boucle machine).

La boucle machine désigne non seulement un ensemble d'éléments, mais également les liaisons mécaniques entre ces éléments. Ce concept est extrêmement important, puisqu'il sert de base à l'étude de l'usinage, à la mise en oeuvre rationnelle de la production, au réglage, à la gestion des matériels et des informations associées, à la mise en oeuvre des palpeurs...

On considère que la boucle machine comporte :

- Trois éléments principaux : la machine, la pièce, l'outil ;
- Deux éléments interfaces : le porte-pièce, le porte-outil.

Ce concept sera le point de départ de la modélisation du fonctionnement d'une MOCN.

Chacun des éléments de la boucle est repéré par une origine. L'usinage de la pièce consiste en un déplacement du point générateur de l'outil (Pt g) sur la pièce. Le mouvement relatif outil-pièce est piloté par le DCN.

Pour réaliser ce pilotage, la partie commande utilise comme référence l'origine mesure. Chaque déplacement relatif outil-pièce doit alors être défini en fonction des déplacements possibles des axes de la machine.

Les éléments de la boucle machine ont des dimensions à mesurer. Leur empilage génère un décalage de l'origine mesure par rapport au point générateur d'une part et à l'origine programme d'autre part. Le calcul des distances du point générateur et de l'origine programme à l'origine mesure se fait par une chaîne vectorielle, figure I.11.

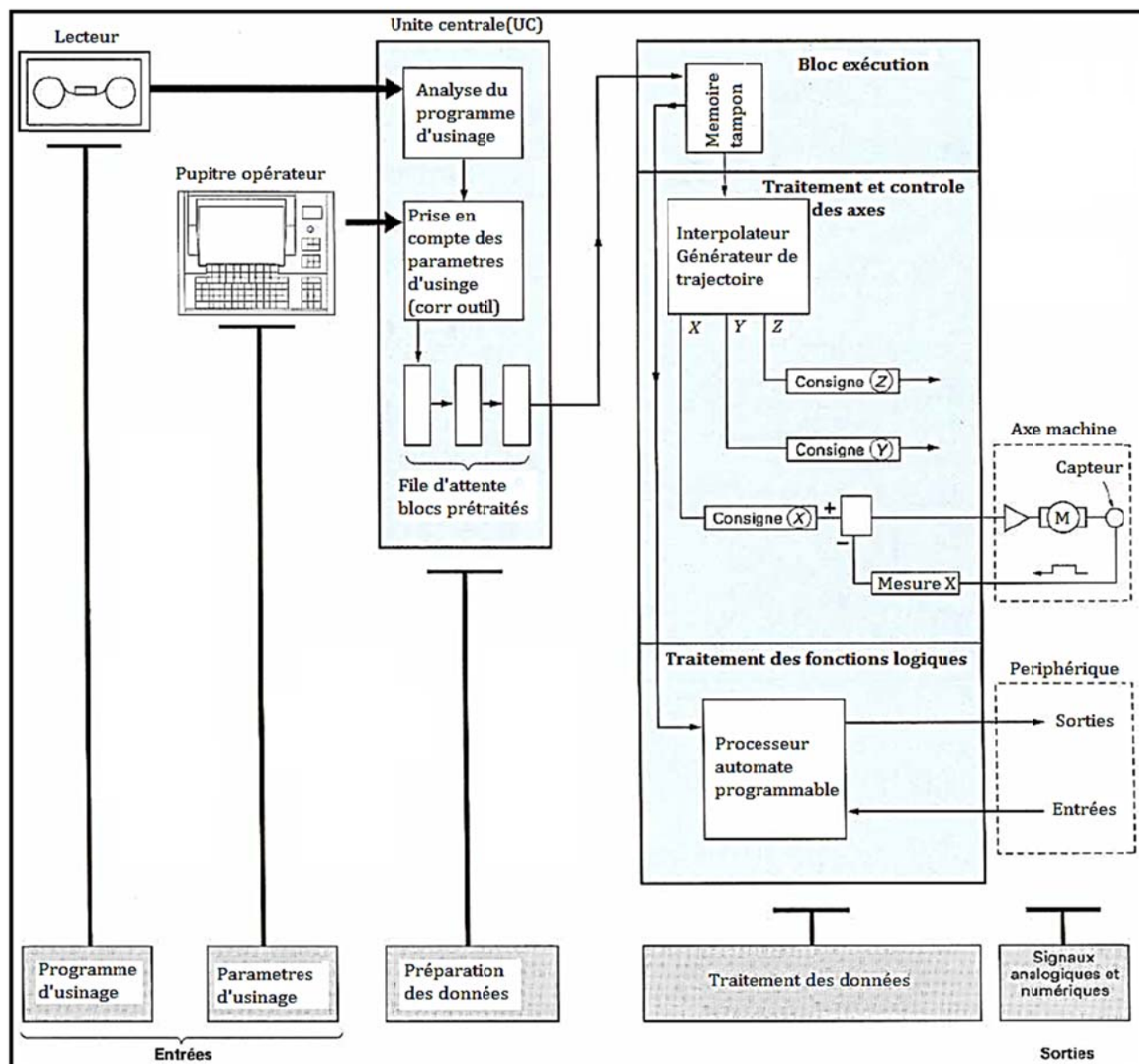


Figure I.10. Diagramme fonctionnel d'une CN.

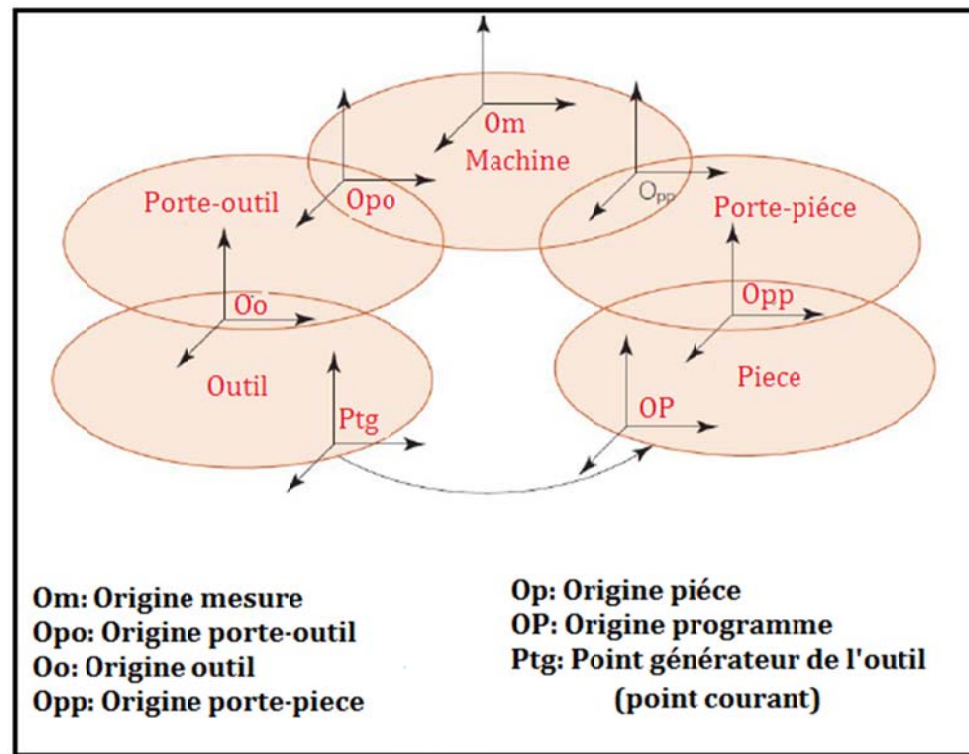


Figure I.11. Morphologie de la MOCN.

Le DCN assure ensuite le contrôle de la position et de la vitesse des organes mobiles de la machine à partir du programme d'usinage. Les programmes d'usinage sont réalisés à partir d'une origine appelée origine programme (**OP**) positionnée par le programmeur.

Le programme commande les déplacements relatifs entre le brut et les outils afin de réaliser l'usinage de la pièce finale. Ces déplacements sont réalisés dans un repère orthonormé normalisé $(O; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ basé sur la structure de la machine décrit dans le paragraphe précédent.

L'origine machine (**OM**) est la butée physique positionnée sur chaque axe du référentiel machine. D'où la nécessité d'effectuer la prise d'origine machine (**POM**) à chaque démarrage machine. Le mobile (table, tourelle ou broche) est déplacé suivant chaque axe, en butée. Pour chacun des axes, il existe une distance entre la butée physique et l'origine mesure. La position de l'origine machine est donc transparente pour le programmeur et l'opérateur.

L'opérateur réglage, responsable d'une fabrication sur une MOCN doit être capable, à chaque stade de la fabrication, d'identifier sur la machine et le contrat de phase :

- Les éléments générateurs de l'outil.
- Les combinaisons de mouvements nécessaires.
- Les surfaces associées réalisables à l'outil.
- Le mode de génération.
- De différencier les types de travaux.
- De choisir son mode de génération.

De plus, il doit être capable

- D'énumérer et de hiérarchiser les causes possibles de perturbation de la qualité géométrique des surfaces usinées.
- D'indiquer les conditions possibles de minimisation de ces causes.

I. 13. 2. Les origines

Le système traite toujours les cotes repérées par rapport à une origine mesure quel que soit le mode de programmation choisi.



I. 13. 2. 1. Origine Machine (OM)

L'origine machine coïncide avec la position du point piloté (point courant ou point référence R) au moment où tous les axes de la machine ont en butée d'initialisation. L'origine machine n'a aucune influence sur le réglage ou la programmation de la machine, en effet elle dépend essentiellement de la technologie de mesure adoptée (mesure incrémental ou mesure absolue).

I. 13. 2. 2. Origine Mesure (Om)



C'est un point préférentiel défini sur chaque axe qui a l'origine absolue de la mesure. Les coordonnées de ce point peuvent être introduites voire modifiées par paramètres machines spécifiques.

I. 13. 2. 3. Origine pièce (Op)



Indépendante du système de mesure, cette origine est définie par un point de la pièce sur lequel on est capable de se positionner. Elle est déterminée par rapport à l'origine mesure par le paramètre PREF.

I. 13. 2. 4. Origine programme (OP)



Indépendante du système de mesure, c'est l'origine du trièdre de référence qui a servi à établir le programme. Elle est définie par rapport à l'origine pièce par le décalage DEC1 (ou DEC3 cas particulier: usiner sur centre d'usinage).

I. 13. 2. 5. Point courant ou Point piloté (R)

C'est un point de référence outil et appartient à la machine. Ce point est défini comme l'intersection de l'axe de l'alésage de logement de l'outil, avec la face de la tourelle dans le cas d'un tour ou, avec le plan de jauge de logement outil dans la broche de centre d'usinage. Dans des cas particuliers le plan de jauge est confondu avec la face de la broche.

On peut lire à chaque instant la position de ce point par rapport à l'origine programme (OP) ou par rapport à l'origine mesure (OM).

I. 13. 2. 6. Cas d'un tour à commande numérique

❖ l'origine mesure Om



C'est la référence des déplacements de la tourelle porte-outils. Elle correspond au "**zéro des règles après initialisation**" (prise des POM).

❖ l'origine porte-pièce Opp

C'est l'origine du "**référentiel de mise en position**" du "**porte-pièce**" (mandrin, pince, montage...) sur la machine.

C'est "**l'intersection**" de l'axe de la broche et de la face avant de la broche (surface d'appui du mandrin).

❖ l'origine pièce Op



C'est l'origine du "**référentiel de mise en position**" de la "**pièce**" sur son porte-pièce (mandrin, montage,...). Elle est déterminée par la mise en position de la pièce (voir les normales de repérage sur le contrat de phase).

❖ l'origine programme OP



C'est l'origine du "**système d'axe**" associé à la pièce qui permettra d'écrire facilement le programme. Elle est donc déterminée par la cotation de la pièce (dessin de définition). Origine programme **OP** et origine pièce **Op** peuvent être confondues.

❖ les points courants Pct et Pco

C'est le point piloté par la machine.

- Lorsque les corrections d'outils sont nuls, le point courant est situé à l'intersection de la face avant de la tourelle et de l'axe de l'alvéole du porte-outil en position travail. C'est alors le "**point courant tourelle**" **pct**.
- Lorsque l'outil est monté sur la tourelle et les paramètres outils sont pris en compte (X, Y, R et C), le point courant est alors situé au point générateur de l'outil. C'est alors le "**point courant outil**" **pco**.

❖ les prises de référence $\overline{\text{PREF}}$

Pour chaque axe c'est le "**vecteur**" qui représente la "**distance**" de l'origine porte-pièce **Opp** par rapport à l'origine mesure **Om**. Pour une CN et un porte-pièce donné, les **PREF** sont définis une fois pour toutes.

$$\overline{\text{PREF}} = \overline{\text{OmOpp}}$$

❖ **Les décalages $\overline{DEC1}$**

Pour chaque axe c'est le "vecteur" qui représente la "distance" de l'origine programme **OP** par rapport à l'origine porte-pièce **Opp**.

$$\overline{DEC1} = \overline{OppOP} \quad \text{Selon l'axe X} \quad \overline{DEC1} = \vec{0}$$

I. 13. 2. 7. Cas d'un centre d'usinage CU à commande numérique

les origines, les axes, les points courants, les PREF et les DEC sont définis comme suit :

❖ **l'origine mesure O_m**



C'est la référence des déplacements des organes mobiles de la machine (table et broche). Elle correspond au "zéro des règles après initialisation" (prise des POM).

❖ **l'origine porte-pièce Opp**



C'est l'origine du "référentiel de mise en position" du "porte-pièce" (étau, montage d'usinage, ...) sur la machine.

Pour le MVC850 il s'agit de "l'intersection" de la surface de la table avec le plan médian de la rainure centrale et son extrémité gauche.

❖ **l'origine pièce Op**



C'est l'origine du "référentiel de mise en position" de la "pièce" sur son porte-pièce (étau, montage d'usinage...). Elle est déterminée par la mise en position de la pièce (voir les normales de repérage sur le contrat de phase).

❖ **l'origine programme OP**



C'est l'origine du "système d'axe" associé à la pièce qui permettra d'écrire facilement le programme. Elle est donc déterminée par la cotation de la pièce (dessin de définition).

Origine programme **OP** et origine pièce **Op** peuvent être confondues.

❖ **les points courants PCb et Pco**

C'est le point piloté par la machine.

- Lorsque les corrections d'outils sont nulles, le point courant est situé à l'intersection du plan de la base de la broche et de son axe. C'est alors le "point courant broche" **pcb**.
- Lorsque l'outil est en broche et les paramètres outils sont pris en compte (L et R pour une fraise, L pour un foret), le point courant est alors situé à l'extrémité de l'outil. C'est alors le "Point courant outil" **pco**.

❖ **les prises de référence \overline{PREF}**

Pour chaque axe c'est le "vecteur" qui représente la "distance" de l'origine porte-pièce **Opp** par rapport à l'origine mesure **Om**. Pour une CN et un porte-pièce donné, les **PREF** sont définis une fois pour toutes.

$$\overline{PREF} = \overline{OmOpp}$$

❖ **Les décalages $\overline{DEC1}$**

Pour chaque axe c'est le "vecteur" qui représente la "distance" de l'origine programme **OP** par rapport à l'origine porte-pièce **Opp**.

$$\overline{DEC1} = \overline{OppOP}$$