

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

المسيلة : 2023/04/12

رقم : 07 /..GM / 2023

مستخلص اللجنة العلمية لقسم الهندسة الميكانيكية
بخصوص تقييم مطبوعة جامعية

بناء على التقارير الإيجابية الواردة من السادة أعضاء لجنة دراسة وتقييم مطبوعة جامعية , والآتية
أسماءهم :

- | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| جامعة محمد بوضياف - المسيلة | أستاذ محاضر أ | • الأستاذ الهادي عبد المالك |
| جامعة محمد بوضياف - المسيلة | أستاذ محاضر أ | • الأستاذ بوديلمي عيسى |
| جامعة زيان عاشور - الجلفة | أستاذ محاضر أ | • الأستاذ موساوي مصطفى |

صادق أعضاء اللجنة العلمية على قبول المطبوعة المنجزة من طرف الأستاذ : ذبيح علي

أستاذ محاضر - أ - قسم الهندسة الميكانيكية , كلية التكنولوجيا , جامعة محمد بوضياف بالمسيلة.

Usinage sous commande numérique -
MOCN et Programmation:

تحت عنوان

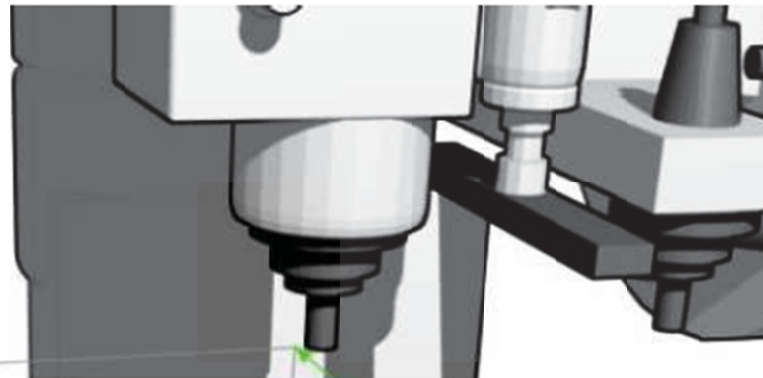
وفق البرنامج المقترح لطلبة السنة الأولى ماستر بناءات .

رئيس اللجنة العلمية للقسم

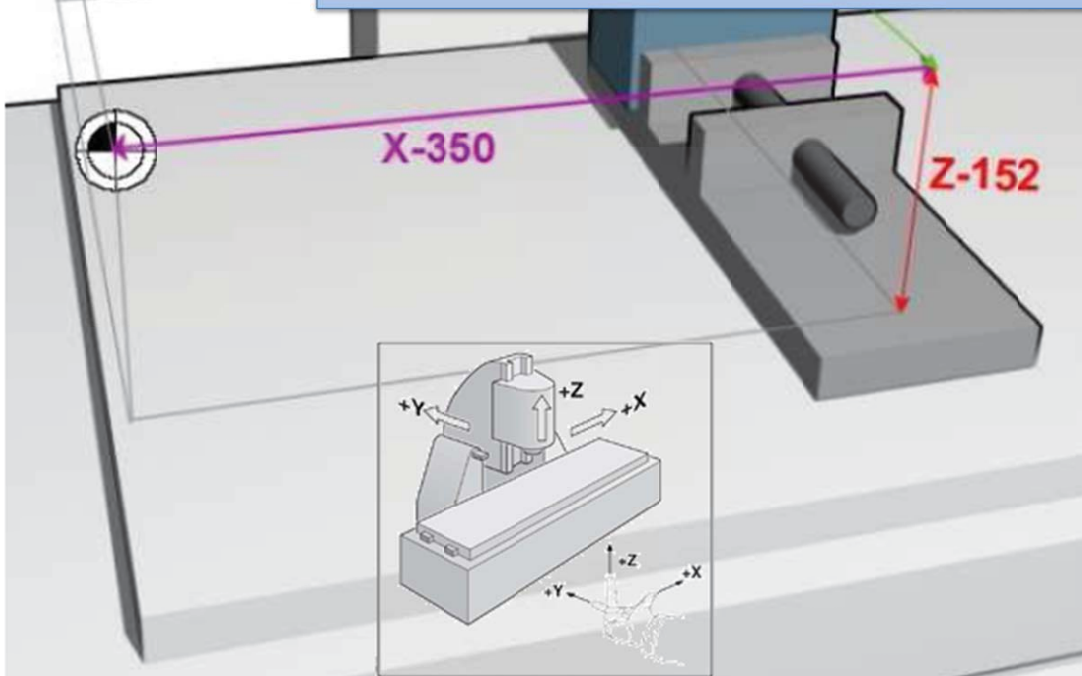




University of M'sila
Faculty of Technology
Department of Mechanical engineering



Usinage Sous Commande Numérique MOCN et Programmation



Préface

Cet 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

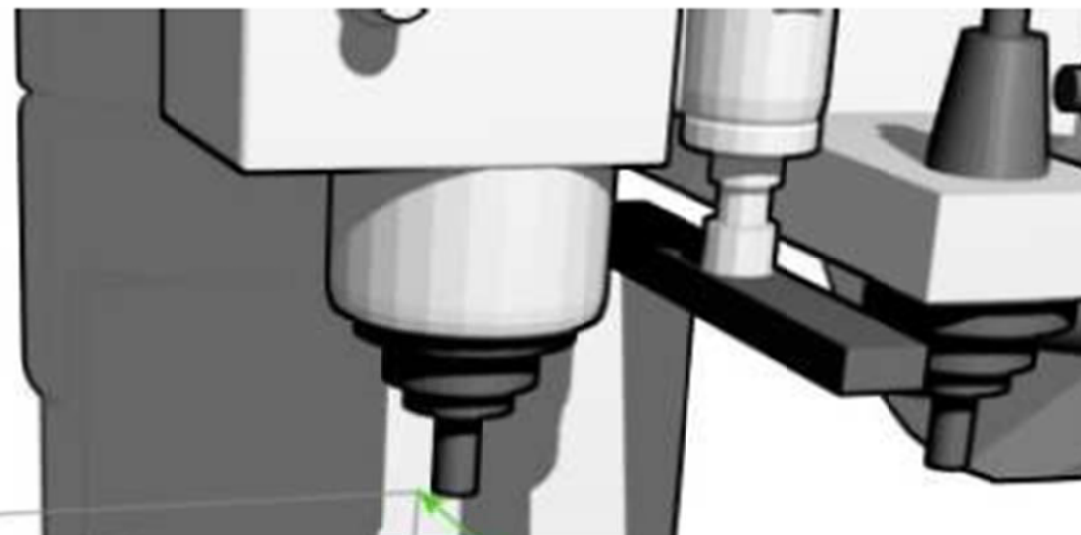
II. 4. 4.	Programmation des vitesses.....	33
II. 4. 5.	Retour aux origines (G28).....	35
II. 5.	Les fonctions auxiliaires "M".....	36
II. 5.1.	Commandes de broche.....	36
II. 5.2.	Appel de l'outil.....	37
II.6.	Programmation manuelle.....	44
II.6. 1.	Aides à la programmation manuelle.....	44
II.6. 2.	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)

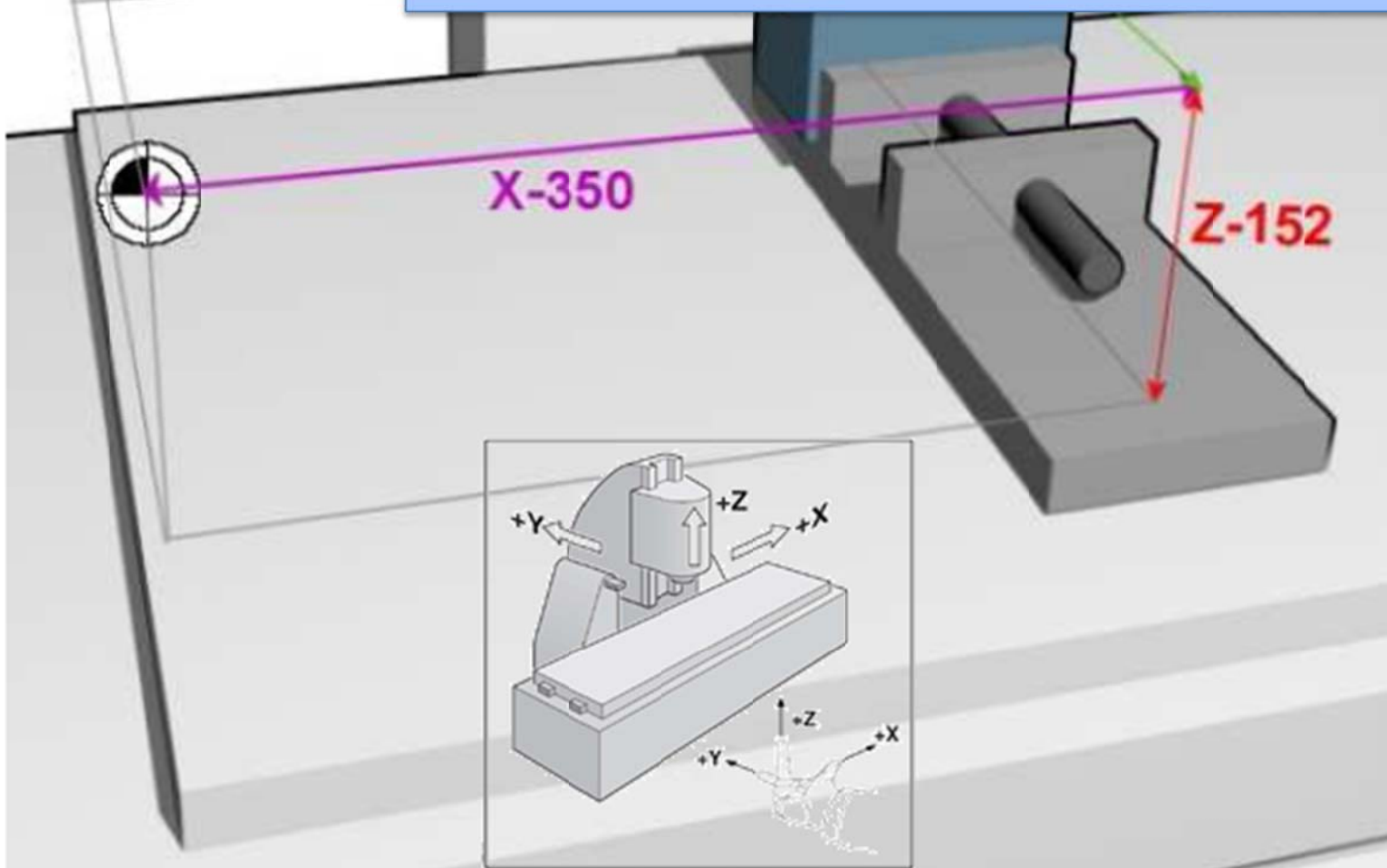
III.1.	Présentation de CATIA.....	54
III.2.	Démarrage de CATIA	54
III.3.	Commandes de base	56
III.3.1.	Interface graphique	56
III.3.2.	Interface opérateur.....	56
III.4.	Configuration des options et des répertoires.....	57
III.4.1.	Copie des dossiers CN.....	57
III.4.2.	Modifier les options CATIA.....	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.	Annexe.....	82
III.7.1.	Opérations axiales.....	82
III.7.2.	changement outil.....	82



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



Usinage Sous Commande Numérique MOCN et Programmation



Préface

Cet 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.	Annexe.....	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 ordinateur (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).

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.

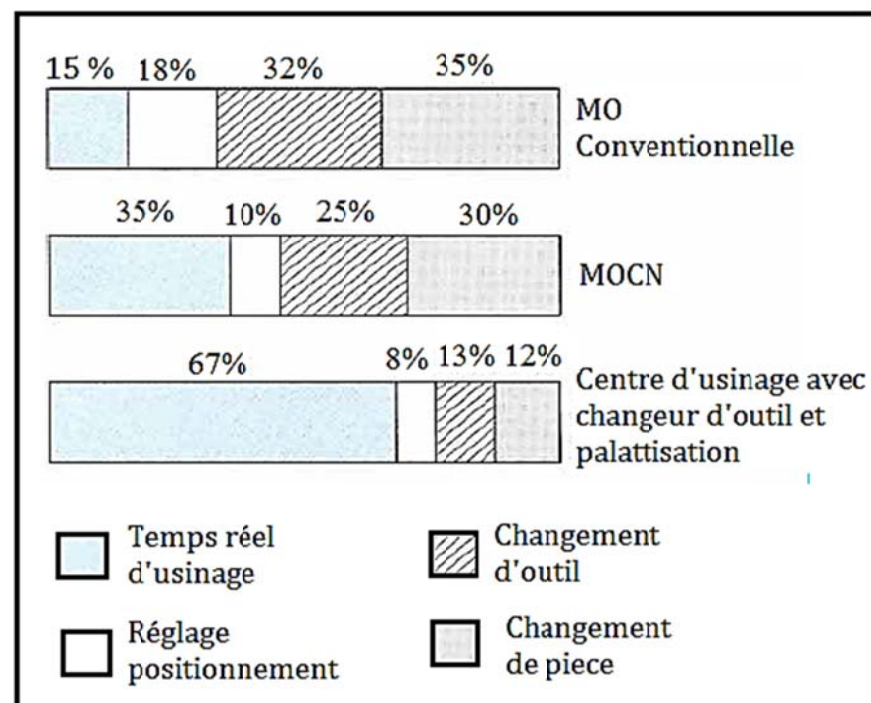


Figure I.1. Productivité comparée de diverses machines en fonction de leur degré d'automatisation.

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.

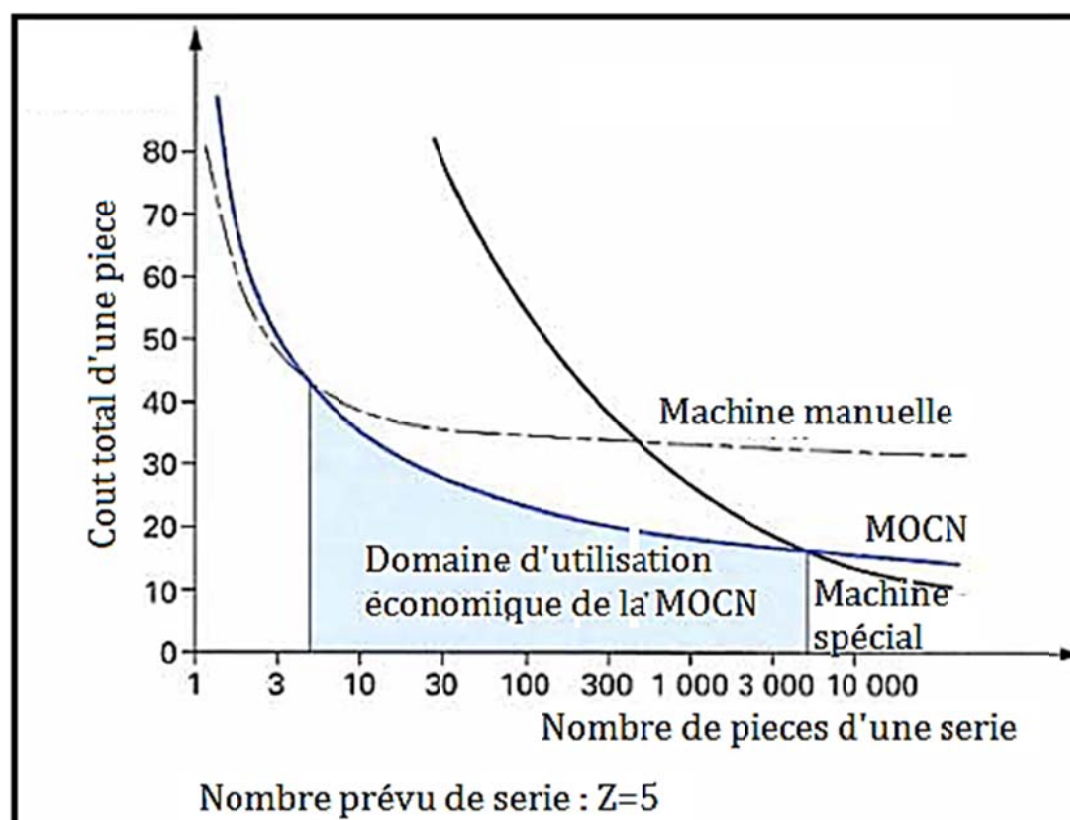


Figure I.2. Domaine d'utilisation des MOCN.

Les **MOCN** sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elle est aussi associée à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Electroérosion, 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 remplacé 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.

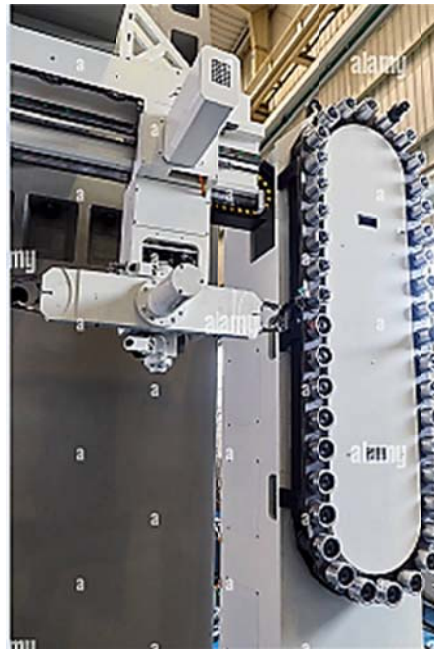


Figure I.3. Changement automatique d'outil sur centre d'usinage.

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.

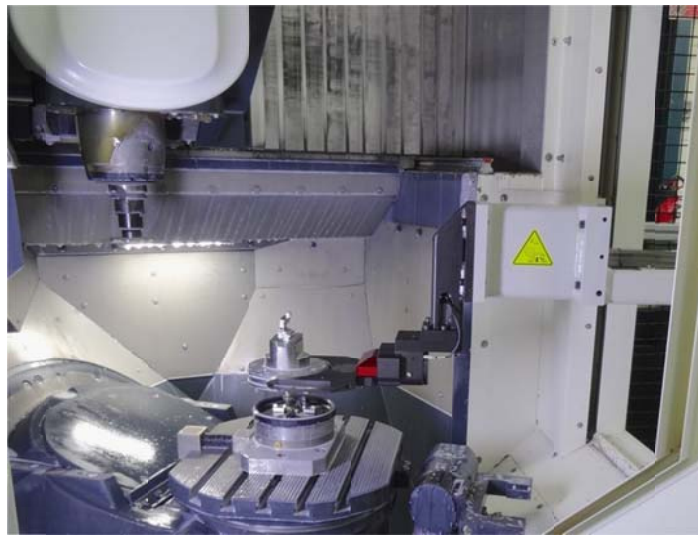


Figure I.4. Approvisionnement de pièces par palettisation.

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 industries 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 divers (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, \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.

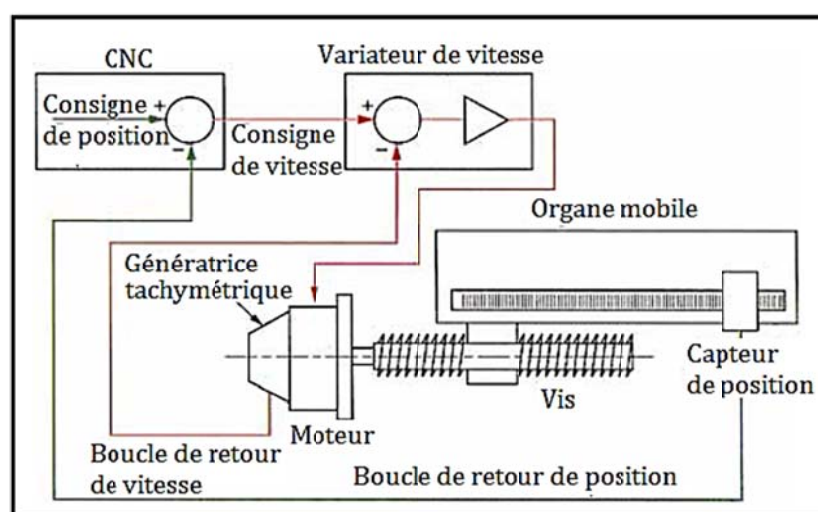


Figure I.6. Principe d'asservissement d'un organe mobile.

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	Particularities
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 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 rapides 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 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 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.

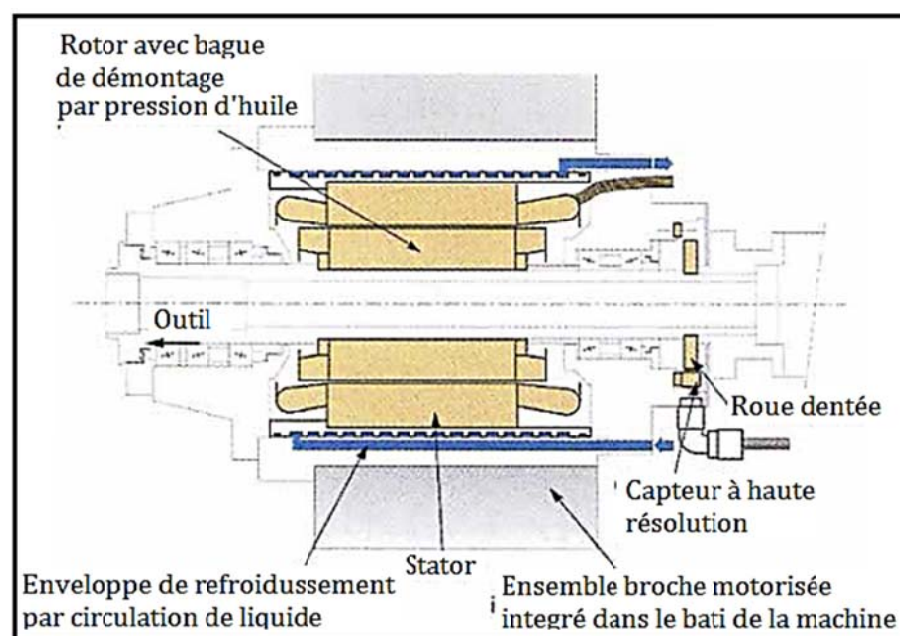


Figure I.7. Broche motorisée Motorspindle

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.

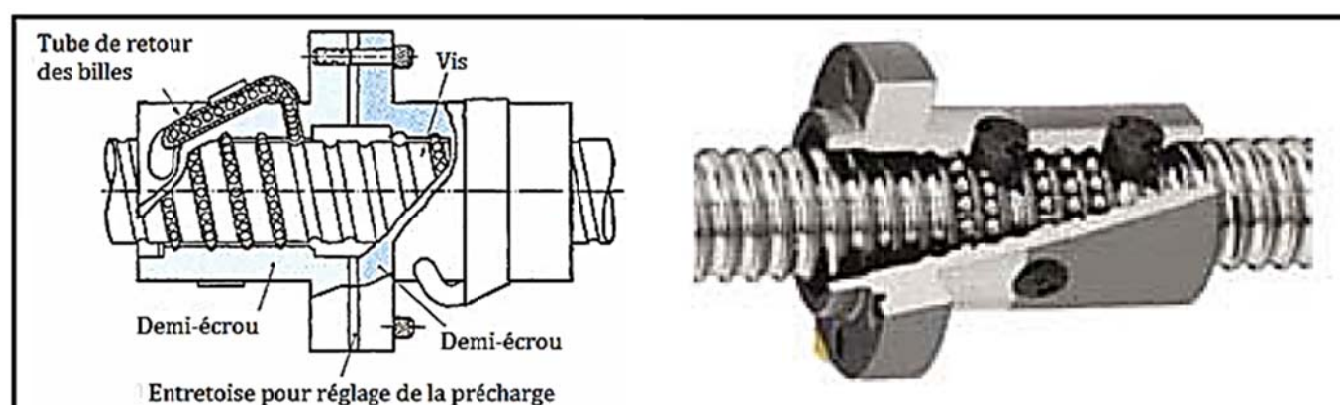


Figure I.8. Vis et écrou à recirculation de billes.

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.

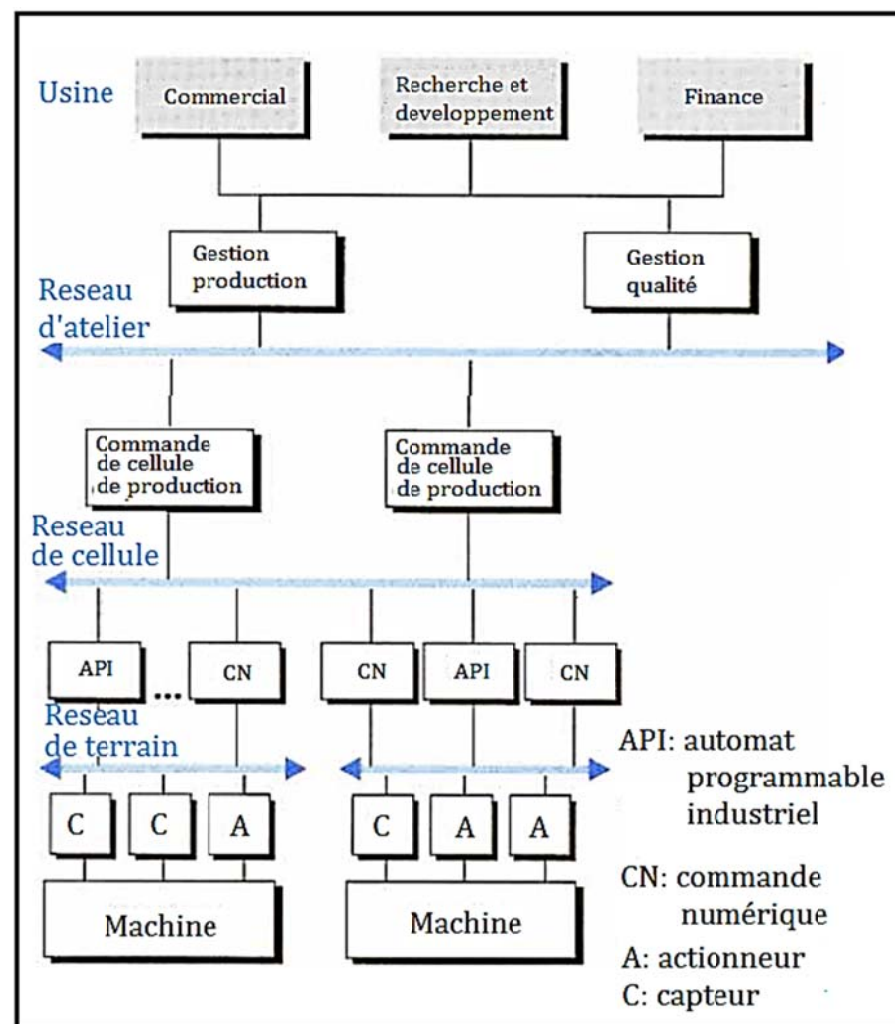


Figure I.9. Organisation de la communication dans une entreprise automatisée.

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 XI.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 XI.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 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 œuvre

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.

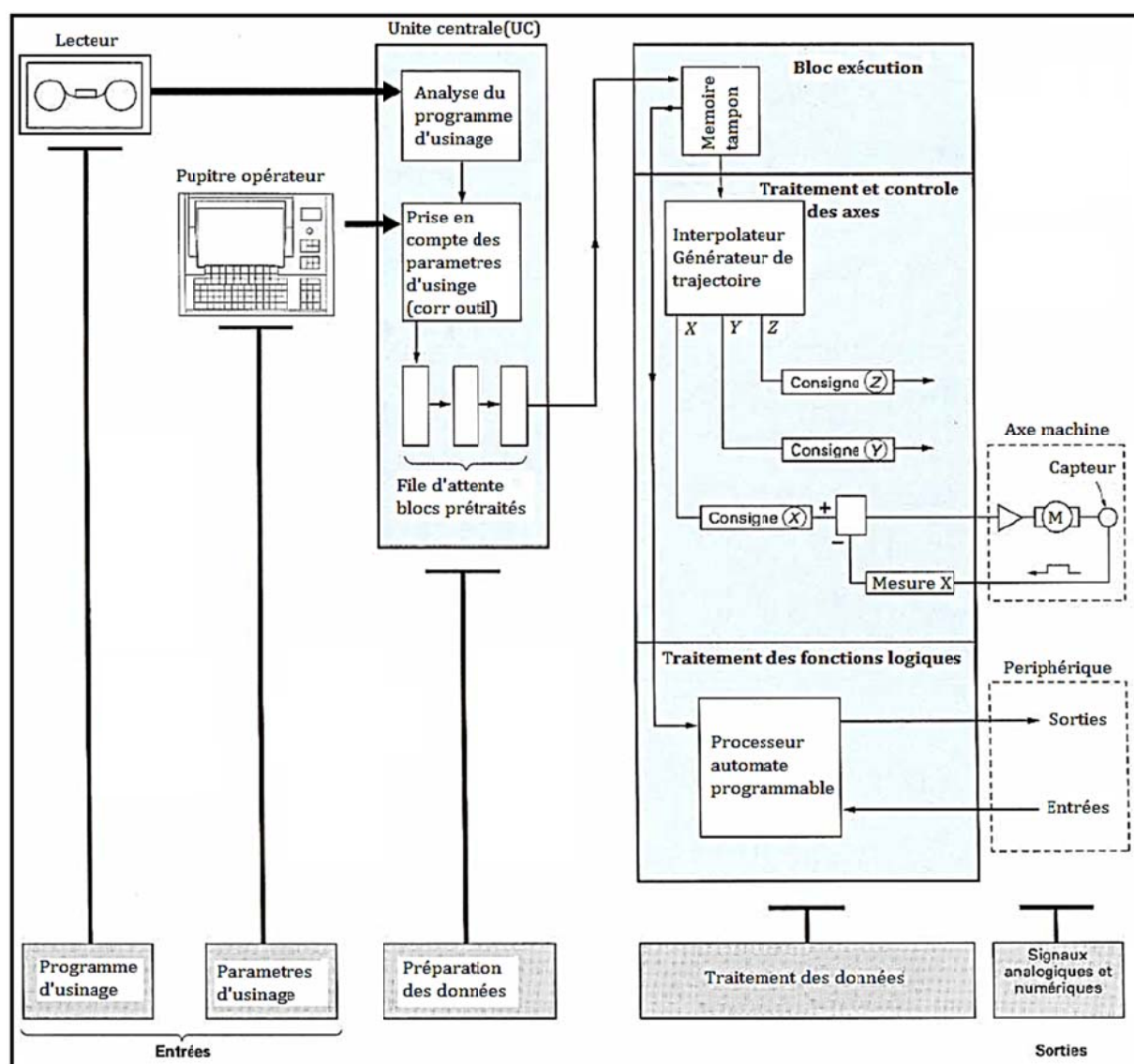


Figure I.10. Diagramme fonctionnel d'une CN.

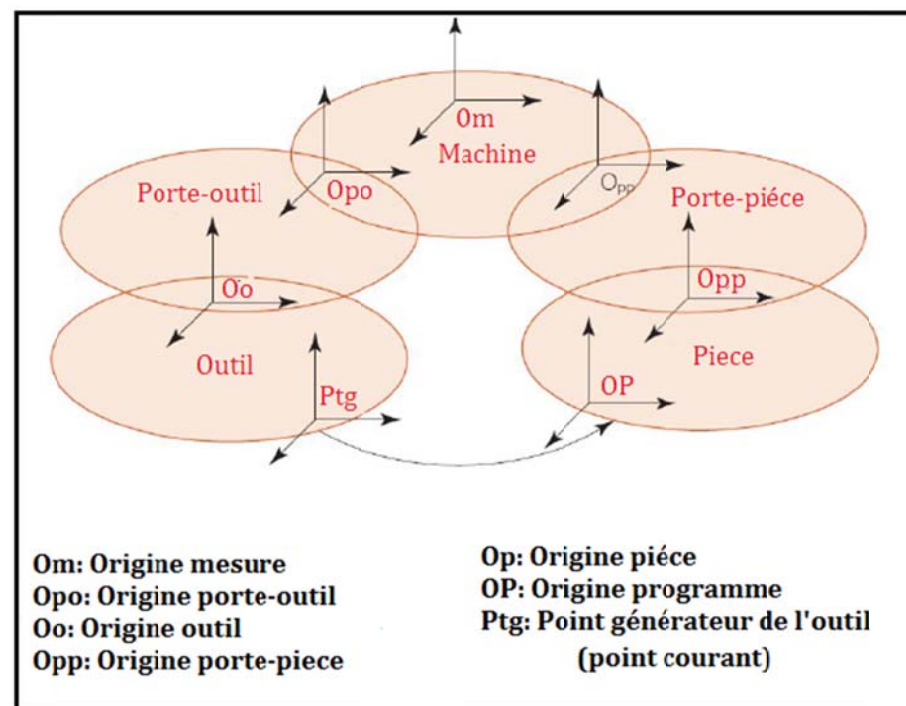


Figure I.11. Morphologie de la MOCN.

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 est 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.

$$\overrightarrow{PREF} = \overrightarrow{OmOpp}$$

❖ **Les décalages $\overrightarrow{DEC1}$**

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

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

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 Om**



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 \overrightarrow{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.

$$\overrightarrow{PREF} = \overrightarrow{OmOpp}$$

❖ **Les décalages $\overrightarrow{DEC1}$**

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

$$\overrightarrow{DEC1} = \overrightarrow{OppOP}$$

II. Programmation des Machines-Outils à Commande Numérique

II. 1. Introduction

La programmation consiste à décrire les opérations d'usinage dans un langage codé (appelé code G) assimilable par le calculateur de la machine. C'est le langage de programmation des MOCN. Ce langage est normalisé (norme ISO 1056) où certains codes utilisés ont les mêmes fonctionnalités pour différents contrôleurs de machines-outils (NUM, FANUC, SIEMENS,...).

Les autres codes peuvent avoir une interprétation différente d'un contrôleur à un autre. Le langage de programmation des MOCN possède les caractéristiques suivantes :

- La chronologie des actions,
- L'appel des outils,
- La sélection des vitesses de coupe et d'avance,
- La formulation des trajectoires,
- La définition des coordonnées de fin de trajectoire,
- Les mises en ou hors fonction d'organes de la machine.

La programmation est le travail de préparation qui consiste à transposer la gamme d'usinage de la pièce en un ensemble ordonné d'instructions comprises et exécutées par la CN en vue de réaliser son usinage. Ce travail peut être effectué manuellement ou avec l'assistance d'un ordinateur utilisant un langage de programmation évolué. À titre indicatif, la figure ... classe différentes méthodes de programmation en fonction des compétences du programmeur et de la complexité des machines à piloter, (Figure II.1).

La création d'un programme est soumise à des règles de structure, syntaxe ou format.

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

- Les données géométriques, qui 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.
- Les instructions indiquant le mode d'interpolation, le choix du mode de cotation, absolue ou relative, le choix du cycle d'usinage, le choix de l'outil, etc. ;
- Les données technologiques qui précisent 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.

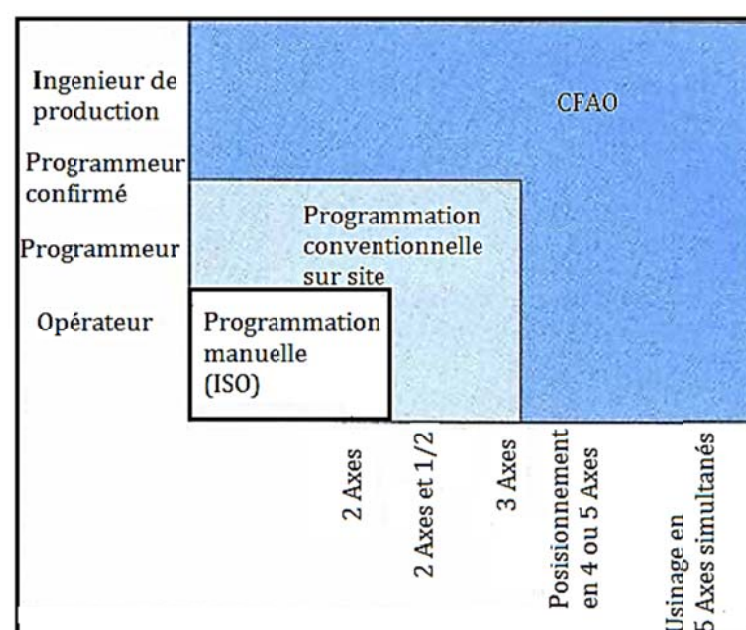


Figure II.1. Méthodes comparées de programmation.

II. 2. Création d'un programme CN

Avant toute programmation proprement dite, il est important de planifier et de préparer méticuleusement les opérations d'usinage. Plus votre préparation aura été précise quant à la structure de votre programme CN, plus la programmation proprement dite sera simple et rapide et moins vous aurez d'erreurs dans le programme terminé.

II. 2. 1. Préparer le dessin de la pièce

- Définir l'origine de la pièce
- Indiquer le système de coordonnées
- Eventuellement calculer les coordonnées manquantes.

II. 2. 2. Définir le déroulement des opérations d'usinage

- Quels sont les outils à mettre en œuvre, à quel moment et pour le traitement de quel contour ?
- Dans quel ordre les différents éléments de la pièce devront-ils être usinés ?
- Quels sont les éléments qui se répètent et qui devraient figurer dans un sous-programme ?
- Est-ce que d'autres programmes pièce ou sous-programmes contiennent des contours susceptibles d'être utilisés pour la pièce actuelle ?

II. 2. 3. Définir la gamme de fabrication

Définir pas à pas toutes les phases d'opération de la machine, par exemple :

- Déplacements à vitesse rapide pour le positionnement;
- Changement d'outil;
- Définition du plan d'usinage;
- Dégagement pour les mesures;
- Mise en marche / arrêt de la broche, de l'arrosage;
- Appel des données d'outil;
- Approche de l'outil;
- Correction de trajectoire;
- Accostage du contour;
- Retrait de l'outil.

II. 2. 4. Traduire les opérations dans le langage de programmation

- Transcrire chaque opération sous la forme d'un bloc CN (ou de blocs CN).

II. 2. 5. Regrouper toutes les opérations en un programme

Le regroupement des opérations doit obéir aux règles de programmation.

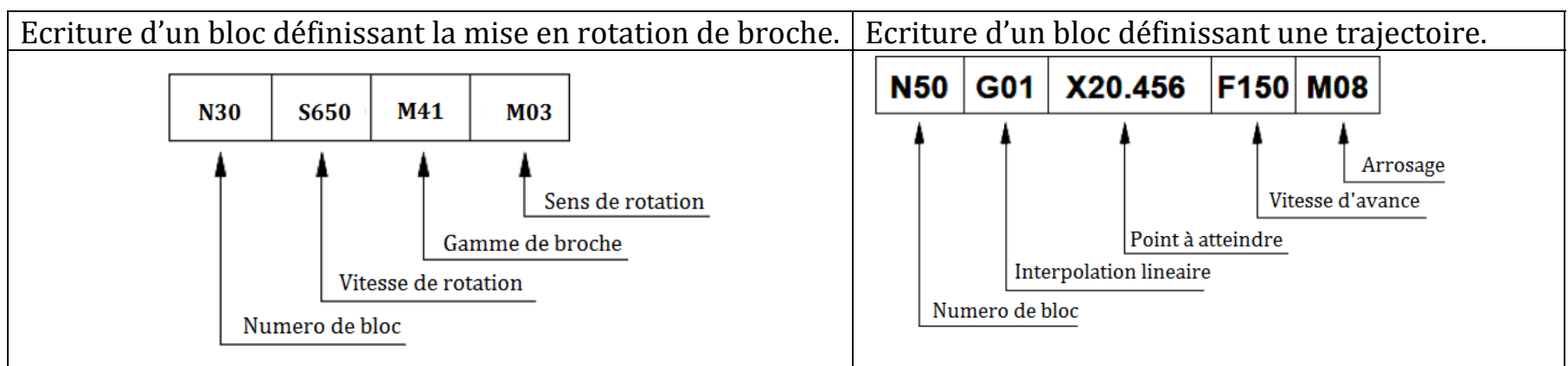
II. 3. Structure d'un programme

La programmation s'effectue suivant le code **ISO**. Un programme est constitué de lignes appelées "**blocs**". Un bloc correspond aux instructions relatives à une séquence d'usinage.

Chaque bloc est constitué d'un groupe de **mots**. Un mot est un ensemble de caractères composé d'une **adresse** suivie de chiffre constituant une information.

- **Bloc** : groupe de *mots* correspondant aux instructions relatives à une séquence d'usinage. La numérotation des blocs s'effectue de 5 en 5 ou de 10 en 10 pour permettre une insertion éventuelle de blocs.

- **Exemples de blocs** :



- **Mot** : ensemble de caractères comportant une *adresse suivie de chiffres* constituant une information.
- **Exemple de mot** : X 10.850.
- **Adresse** : lettre débutant un mot d'un langage machine, qui précise la fonction générale commandée.

II. 3. 1. Principale adresses

N... : numéro de ligne : repérage chronologique en début de ligne.

G... : fonctions préparatoires définissant la forme et les conditions de déplacement.

M... : fonctions auxiliaires donnant les changements d'état de la machine.

X..., Y..., Z... : axes principaux désignant les coordonnées des points d'arrivée.

I..., J..., K... : paramètres définissant les trajectoires circulaires (rayons).

R... : paramètres définissant les trajectoires circulaires.

F... : précise l'avance ou la vitesse d'avance.

S... : précise la vitesse de coupe ou la vitesse de rotation de la broche.

T... : symbole du numéro d'outil.

II. 3. 2. Structure d'un programme

Un programme est la transaction, dans un langage compréhensible par le directeur de commande numérique d'une machine. Des opérations d'usinage à effectuer sur une pièce.

Les différentes manières de programmer sont :

- La programmation manuelle,
- La programmation assistée : soit conventionnelle par le DNC, soit avec un logiciel de FAO.

Les documents suivants sont nécessaires :

- Le dessin de définition,
- Le contrat de phase avec l'isostatisme et les paramètres de coupe,
- Le dossier de la machine.

Pour réaliser les différentes opérations nécessaires à l'usinage d'une pièce, un programme CN peut être écrit de différentes manières.

Selon la nature de la pièce à usiner et sa complexité, les différentes structures de programme CN peuvent être proposées :

- Un programme principal,
- Un programme principal contenant des appels de séquences internes,
- Un programme principal et des sous programmes.

Pour l'usinage d'une pièce simple ne nécessite pas de cycles d'ébauche, un programme CN peut être structuré de la manière suivante :

Structure	Exemple
<pre> graph TD A([Numéro du programme]) --> B[Initialisation] B --> C[Position de dégagement] C --> D[Opération 1] D --> E[Position de dégagement] E -.-> F[Opération N] F --> G[Position de dégagement] G --> H([Fin de programme]) </pre>	O4723 (Tour SMI) (Ph 10) N28 G40 G80 (Opération : centrage) N30 T0505 M06 (Foret à centrer) N40 G00 X0 Z52 N45 G95 G97 S2500 F0.05 M03 M08 N50 G01 Z40 N60 G00 Z52 N70 G00 G00 X100 Z100 M09 (Opération : finition profil) N240 T0303 M06 (Outil de finition) N250 G92 S4000 N260 G00 X4 Z52 F0.05 M8 N270 G01 G42 X5 Z46 N280 G96 S250 N290 G01 X15.961 Z46 N300 X24 Z31 N310 Z26 N320 X26 N330 G03 X34 Z22 I26 K22 N340 G01 Z18 N370 G40 G00 X100 Z100 M05 M09 N710 M02

II. 3. 3. Structure d'une opération

Structure	Exemple
<pre> graph TD A([Opération précédente]) --> B[Appel de l'outil] B --> C[Approcher l'outil en rapide] C --> D[Adapter les conditions de coupe] D --> E[Réaliser l'opération d'usinage] E --> F[Dégager l'outil en rapide] F --> G([Opération suivante]) </pre>	(Opération : centrage) N30 T0505 M06 (Foret à centrer) N40 G00 X0 Z100 N45 G97 G95 S2500 F0.05 M03 M08 N50 G01 Z40 N60 G00 Z100

II. 4. Les fonctions préparatoires "G"

II. 4. 1. Classification des fonctions préparatoires "G"

On distingue deux types des fonctions "G": Les fonctions "G" modales et les fonctions "G" non modales.

II. 4.1.1. Fonctions "G" modales

Une fonction est dite "modale" lorsqu'elle reste active (mémorisée) après le bloc où elle est écrite jusqu'à sa révocation.

Ces fonctions appartenant à une famille de fonctions G se révoquant mutuellement.

Certaines familles de fonctions G comportent une fonction initialisée à la mise sous tension du système. La validité de ces fonctions est maintenue jusqu'à ce qu'une fonction de même famille révoque leur validité.

❖ Exemple :

N.. G00 X... Y... Interpolation linéaire à vitesse rapide.

N.. G01 Z... L'interpolation linéaire à vitesse d'usinage, révoque G00.

II. 4.1.2. Fonctions "G" non modales

Fonctions uniquement valide dans le bloc ou elles sont programmées (révoquée en fin de bloc).

II. 4. 2. Choix du mode de programmation

Il existe deux types de commandes de déplacements de l'outil : les commandes absolues et les commandes incrémentielles (relatives).

G90 : Programmation absolue par rapport à l'origine programme. La valeur programmée sur un axe est repérée par rapport à l'origine programme (OP).

G91 : Programmation relative par rapport au point de départ du bloc. La valeur programmée sur un axe est repérée par rapport à la dernière position programmée.

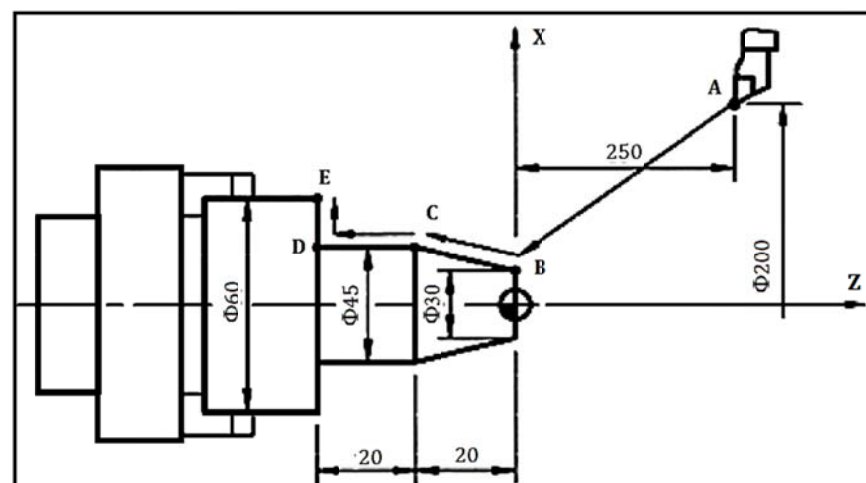
Pour assurer l'usinage d'une pièce sur machine-outil commandée numériquement, le programmeur peut recevoir le dessin de produit fini coté suivant deux modes.

❖ **Propriétés des fonctions** : Les fonctions G90 et G91 sont modales. La fonction G90 est initialisée à la mise sous tension.

❖ **Révocation** : Les fonctions G90 et G91 se révoquent mutuellement.

II. 4. 2. 1. Exemple de tournage :

Veillez indiquer l'itinéraire de mouvement de l'outil ci-dessous par des méthodes de positionnement absolu et positionnement relatif.



❖ Programme de positionnement absolu

G54 X200 Z250

G00 X30 Z0

G01 X45 Z-20 F0.2

Z-40

X60

Réglage du système de coordonnées.

Déplacez l'outil du point A au point B.

Coupe d'outil du point B au point C.

Coupe d'outil du point C au point D.

Coupe d'outil du point D au point E.

❖ Programme de positionnement incrémentiel ou relatif

G54 X200 Z250	Réglage du système de coordonnées.
G00 U-170 W-250	Coupe d'outil du point A au point B.
G01 U15 W-20 F0.2	Coupe d'outil du point B au point C.
W-20 U15	Coupe d'outil du point C au point D.
U15	Coupe d'outil du point D au point E.

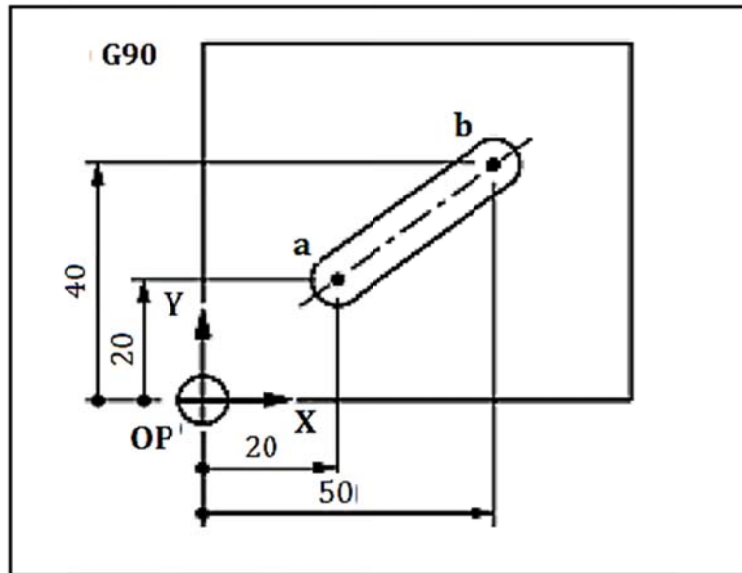
II. 4. 2. 2. Exemples de fraisage

1- Usinages en programmation absolue (G90)

```

00020
...
N30 S600 M03
N40 G00 X20 Y20 Z2
N50 G01 Z-1.5 F50
N60 X50 Y40 F120
N..
    
```

Point a, approche
Plongée sur Z
Point b

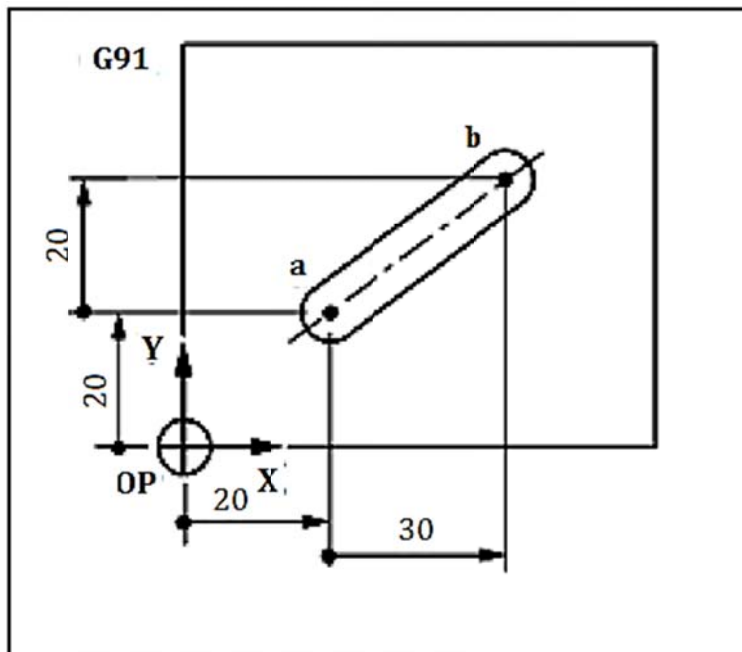


2- Usinages en programmation relative (G91)

```

00025
...
N30 S600 M40 M03
N40 G00 X20 Y20 Z2
N50 G91 G01 Z-3.5 F50
N60 X30 Y20 F120
N70 ...
    
```

Point a, approche
Plongée sur Z
Point b

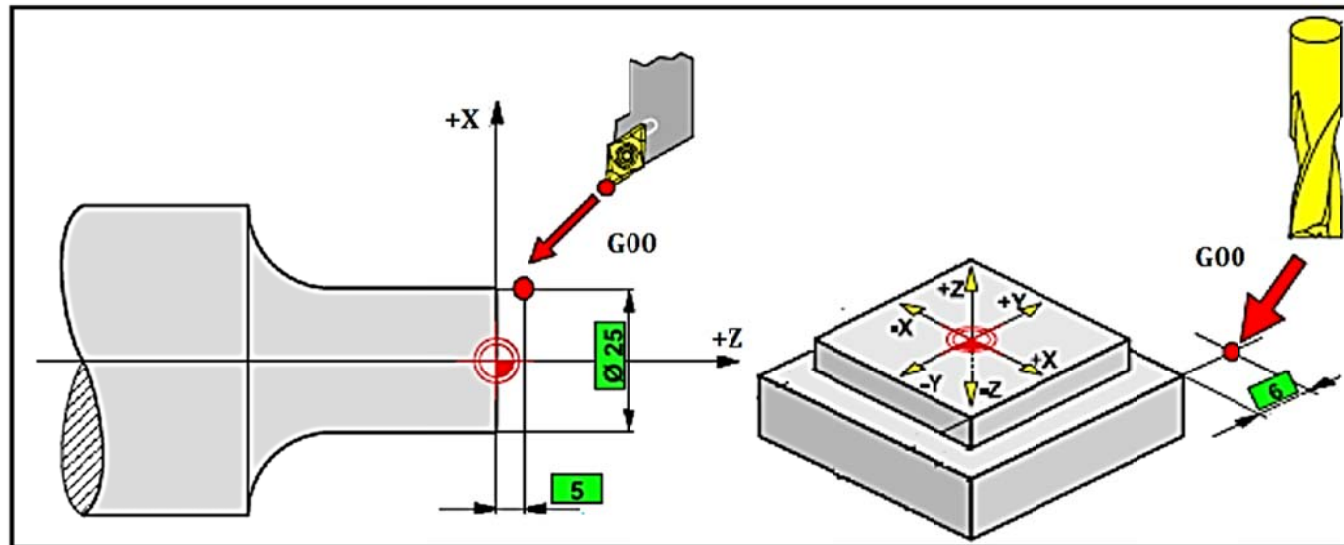


II. 4. 3. Programmation des déplacements

II. 4. 3. 1. Interpolation linéaire à vitesse rapide G00

G00 : Interpolation linéaire à vitesse rapide. Le point programmé est atteint en effectuant une trajectoire linéaire à vitesse rapide. La trajectoire est la résultante de tous les déplacements d'axes programmés dans le bloc.

- ❖ **Propriété de la fonction** : La fonction G00 est modale.
- ❖ **Révocation** : La fonction G00 est révoquée par l'une des fonctions G01, G02 ou G03.

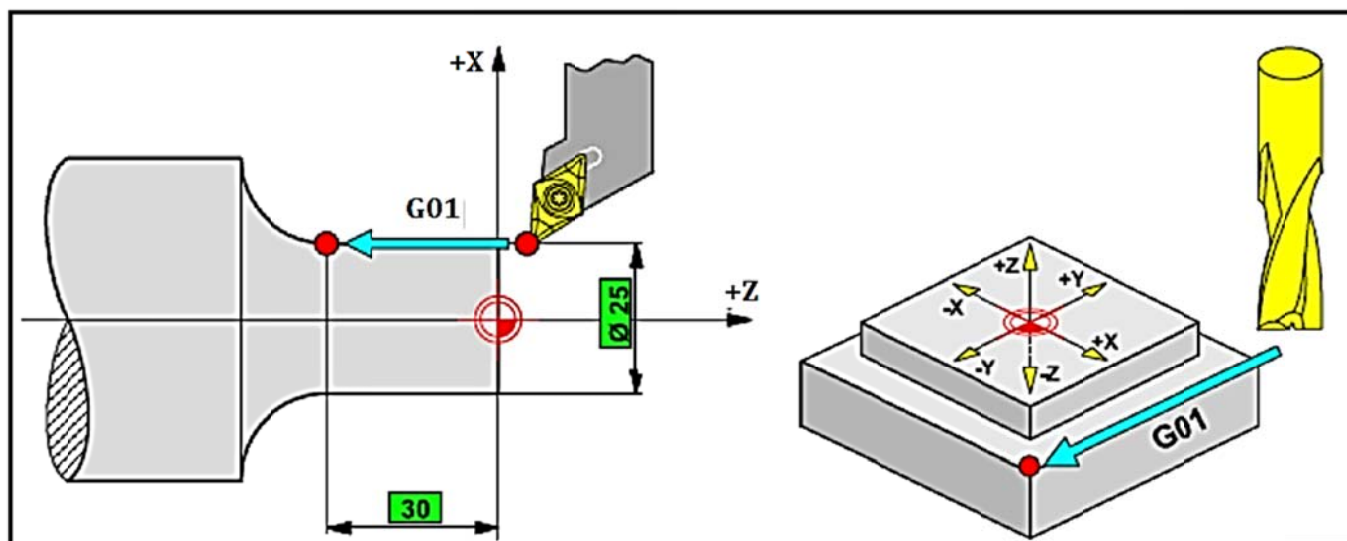


II. 4. 3. 2. Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée G01

Le point programmé est atteint en effectuant une trajectoire linéaire à vitesse d'avance programmée.

La trajectoire est la résultante de tous les déplacements des axes programmés dans le bloc.

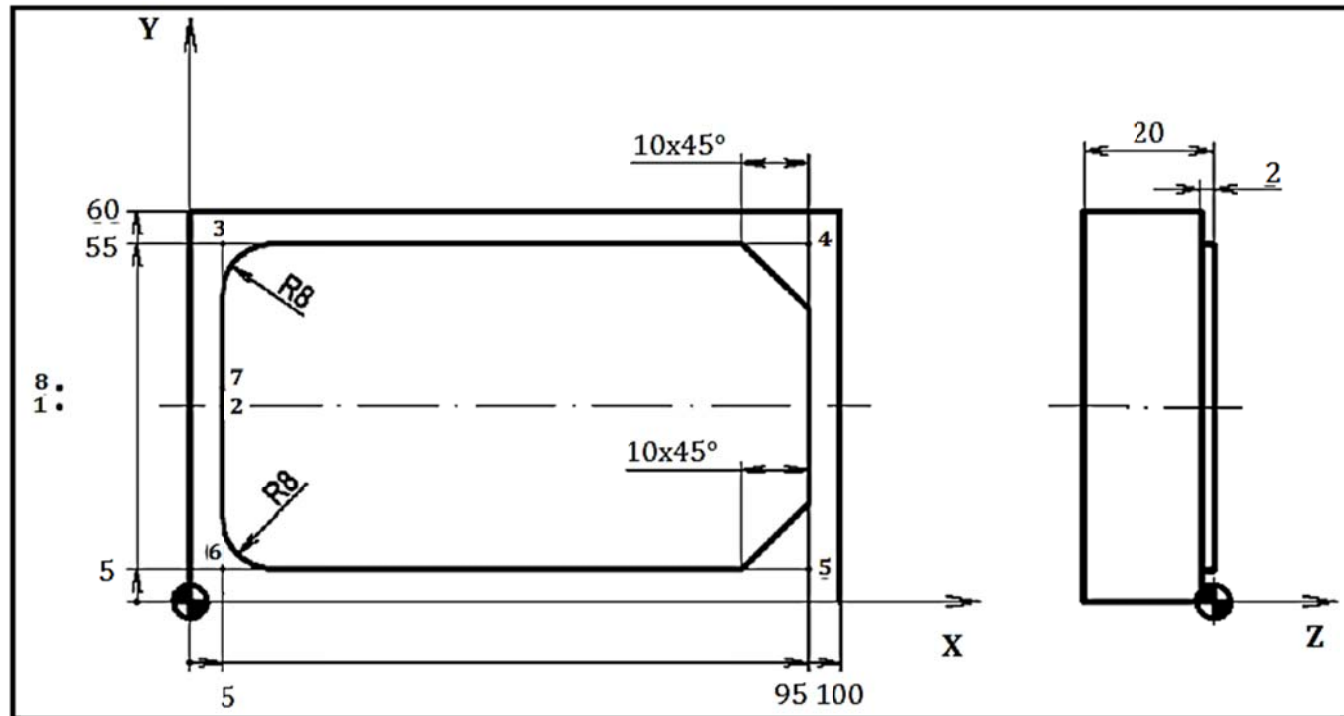
- ❖ **Propriétés de la fonction** : La fonction G01 est modale et initialisée à la mise sous tension.
- ❖ **Révocation** : La fonction G01 est révoquée par l'une des fonctions G00, G02 ou G03.



II. 4. 3. 3. Fonction pour le chanfrein et pour l'angle de l'arc

Cette fonction est utilisée pour simplifier le codage du programme pour une section à angle droit de la pièce de travail ayant un chanfrein de 45° ou des angles d'arcs tangentiels dans le plan X-Y. La commande pour le chanfrein et pour l'angle de l'arc nécessite la commande de déplacement G01 avec une valeur de déplacement supérieure à l'angle du chanfrein ou à la valeur du rayon en amont.

❖ Application

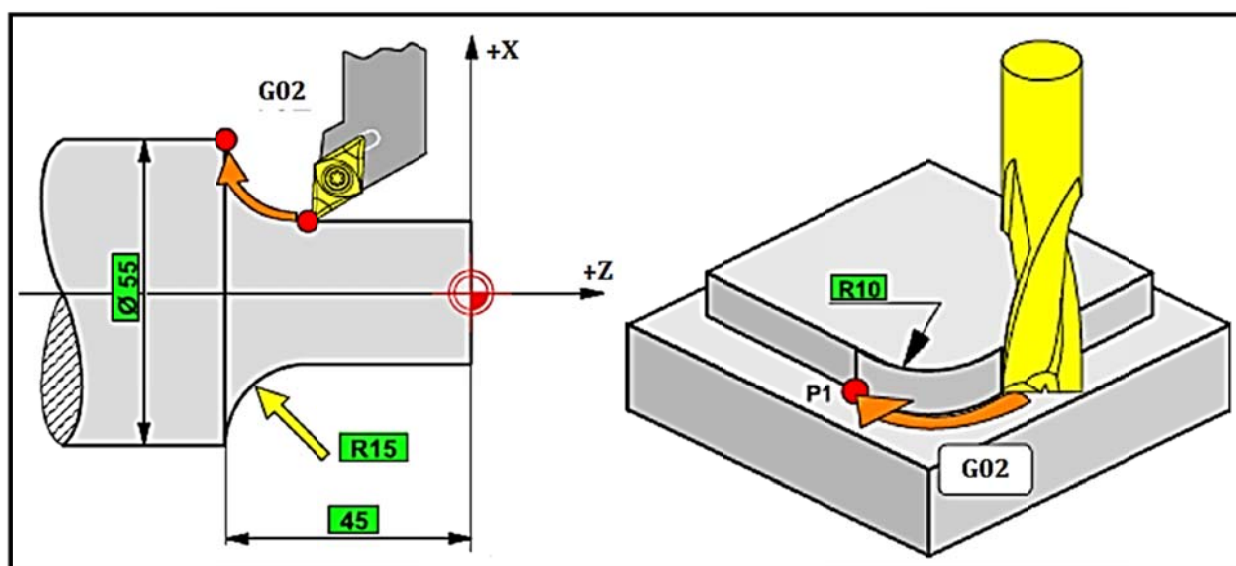


```

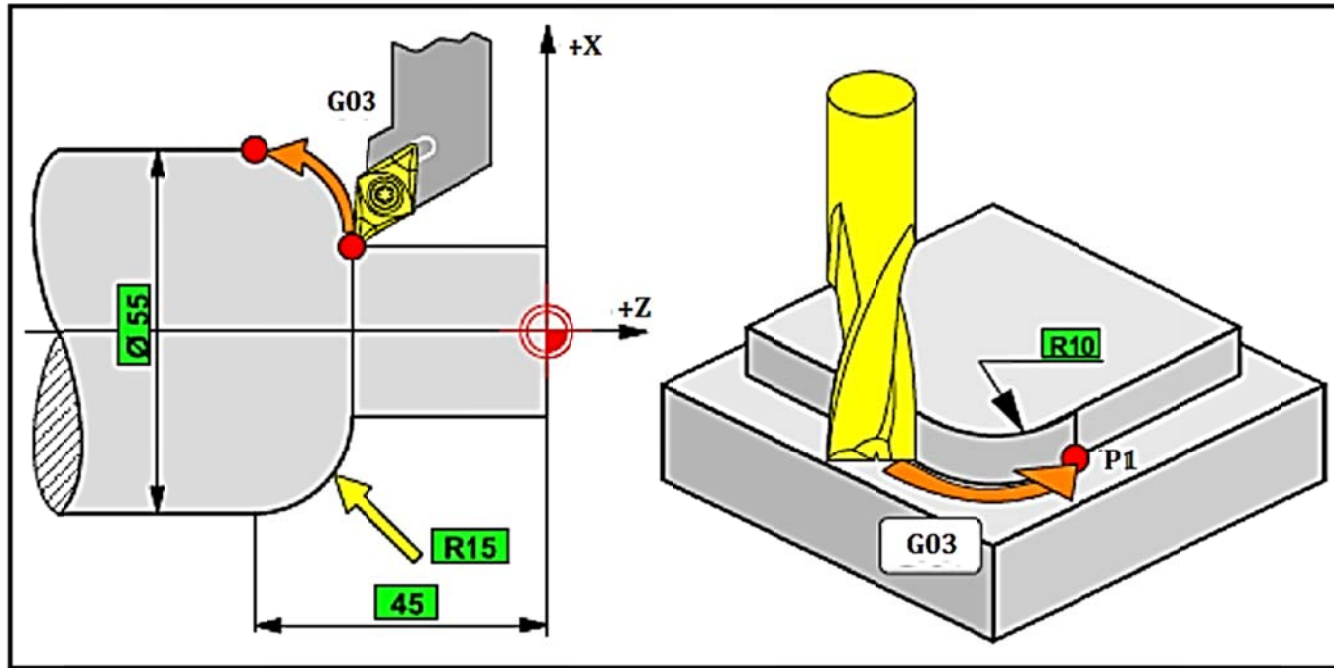
.....
N20 G00 X-22 Y30
Z1
N25 G01 Z-2          (Point 1)
N30 G41
N35 G01 X5           (Point 2)
N40 G01 Y55 R8      (Point 3)
N45 G01 X95 C10     (Point 4)
N50 G01 Y5 C10      (Point 5)
N55 G01 X5 R8       (Point 6)
N60 G01 Y32         (Point 7)
N65 G01 X-22 G40    (Point 8)
N70 G00 Z50
.....
    
```

II. 4. 3. 4. Interpolation circulaire

G02 : Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique à vitesse d'avance programmée.

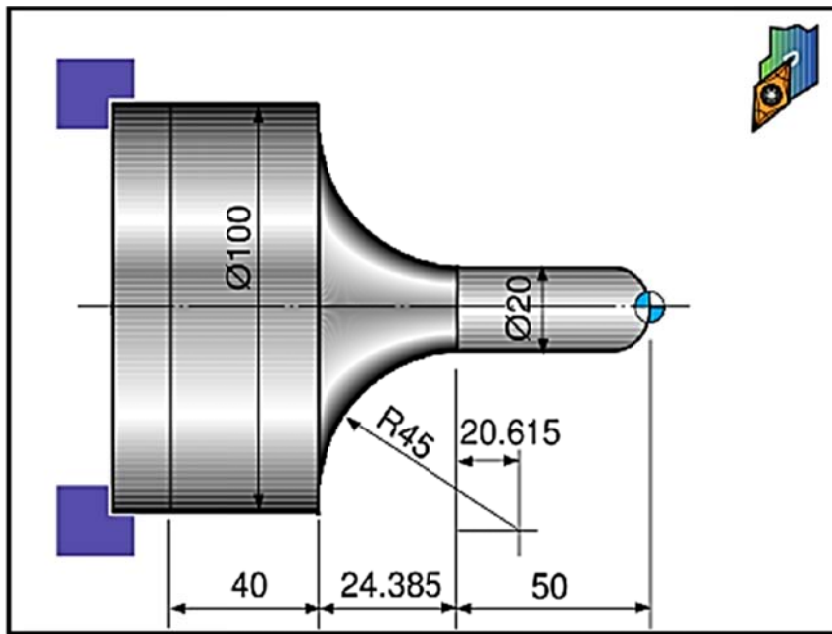


G03 : Interpolation circulaire sens trigonométrique à vitesse d'avance programmée.



La position du point programmé est atteinte en décrivant une trajectoire circulaire.

❖ Application



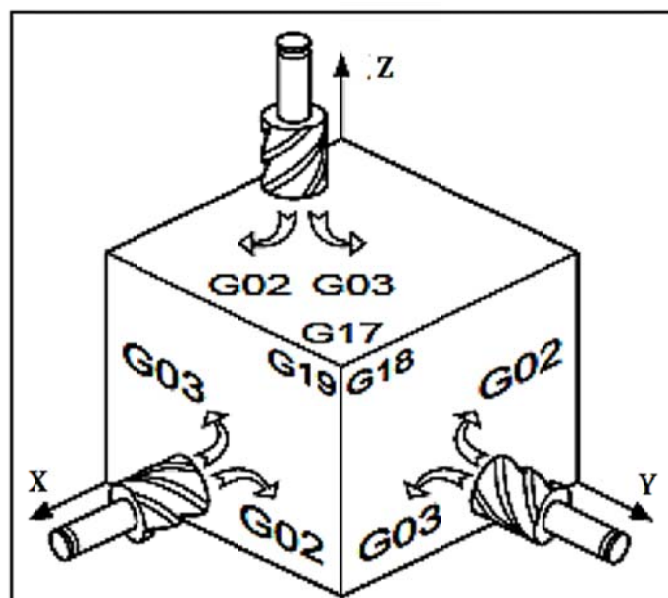
```

....
N20 T0303
G96 S200 M03
G00 X0 Z3 M08
G42 G01 Z0 F0.2
G03 X20 Z-10 R10
G01 Z-50
G02 X100 Z-74.385 I40 K20.615 : ou (G02 X100.0 Z-
74.385
R45)
G01 Z-125
G40 U2 W1
G00 X200 Z200 M09
M30
    
```

II. 4. 3. 5. Choix du plan d'interpolation

Deux axes linéaires pilotés dépendant du choix du plan d'interpolation (Fraisage uniquement) :

- axes X (ou U) et Y (ou V) en G17,
- axes Z (ou W) et X (ou U) en G18,
- axes Y (ou V) et Z (ou W) en G19.



- **Syntaxe (Plan XY) :** N... [G17] G02/G03 X...Y...I...J... / R... [F...]
G17 Choix du plan XY.
X...Y... Point à atteindre :
I...J... Position du centre de l'interpolation dans le plan XY(I suivant X, J suivant Y).
R... Rayon du cercle à interpoler.
F... Vitesse d'avance.

Syntaxes en fonction du plan choisi G17/G18/G19 (Fraisage uniquement) :

Plan principal d'interpolation	Fonction	Interpolation	Syntaxe
XY	G17	G02/G03	X...Y...I...J... ou R...
ZX	G18	G02/G03	X...Y...I...J... ou R...
YZ	G19	G02/G03	X...Y...I...J... ou R...

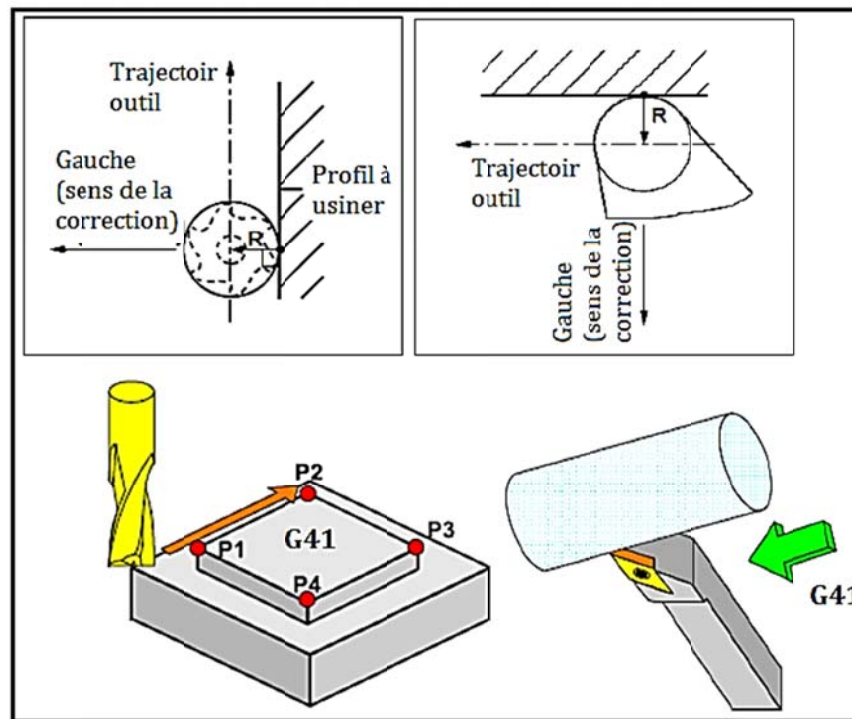
- ❖ **Propriétés des fonctions :** Les fonctions G02 et G03 sont modales.
- ❖ **Révocation :** La fonction G02 est révoquée par les fonctions G00, G01 ou G03.
 La fonction G03 est révoquée par les fonctions G00, G01 ou G02.

XII. 4. 3. 6. Positionnement de l'outil par rapport à la pièce

Comme l'outil à un rayon, le centre de la trajectoire de cet outil est décalé de la valeur de son rayon par rapport au profil de la pièce. Si les rayons des outils sont mémorisés dans la CNC, l'outil utilisé peut être décalé par rapport la pièce de la valeur de son rayon. Cette fonction est appelée fonction compensation de rayon de l'outil.

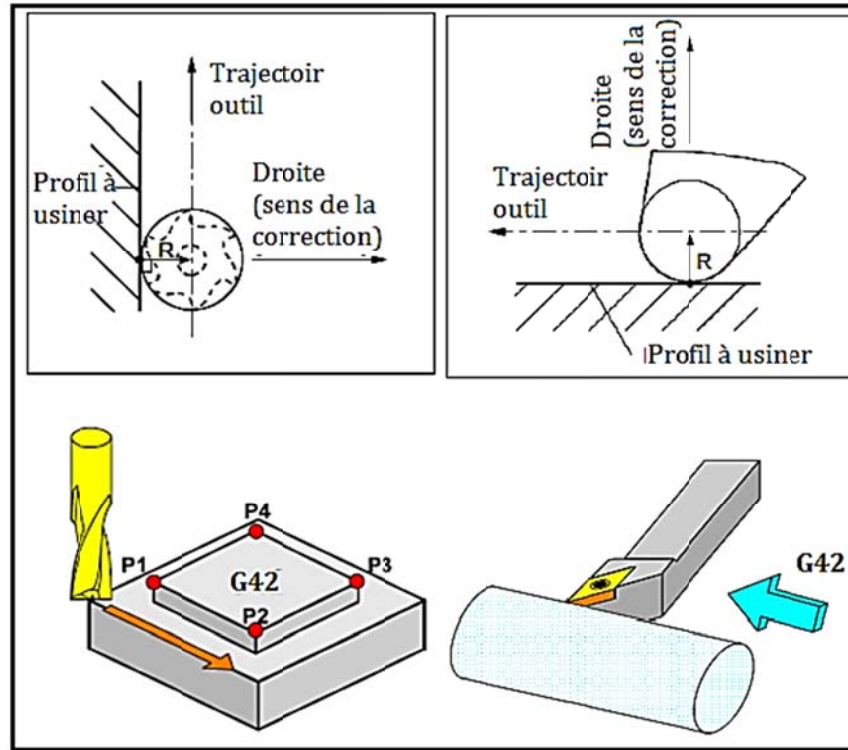
❖ **Correction de rayon à gauche du profil à usiner G41**

Les trajectoires outil programmées sont corrigées (décalées à gauche) d'une valeur égale au rayon d'outil (R) déclaré par le correcteur D.



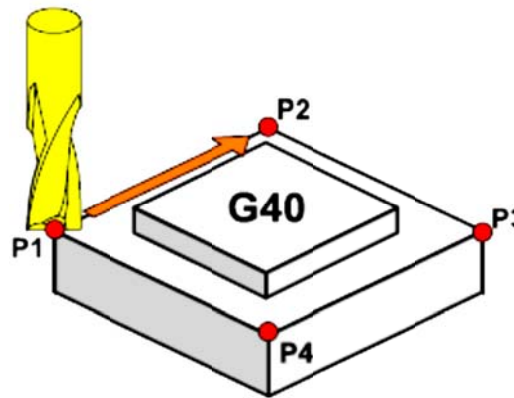
❖ **Correction de rayon à droite du profil à usiner G42.**

Les trajectoires outil programmées sont corrigées (décalées à droite) d'une valeur égale au rayon d'outil (R).



❖ **Annulation de correction de rayon G40.**

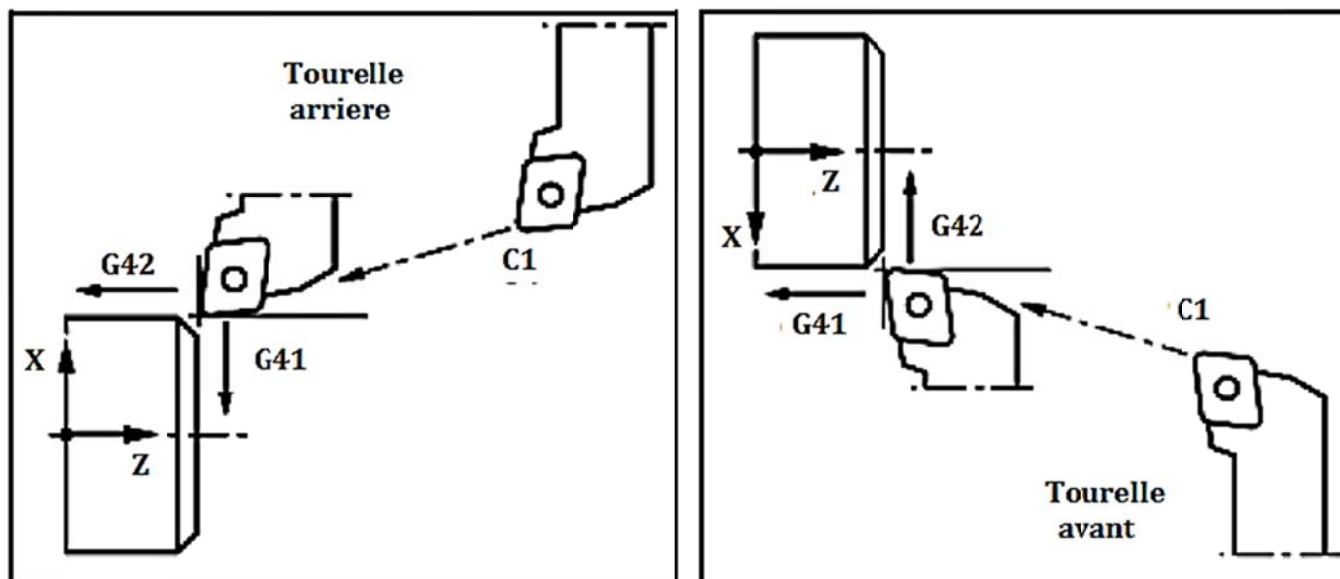
Pilotage du centre de l'outil : les trajectoires programmées sont appliquées au centre de l'outil.



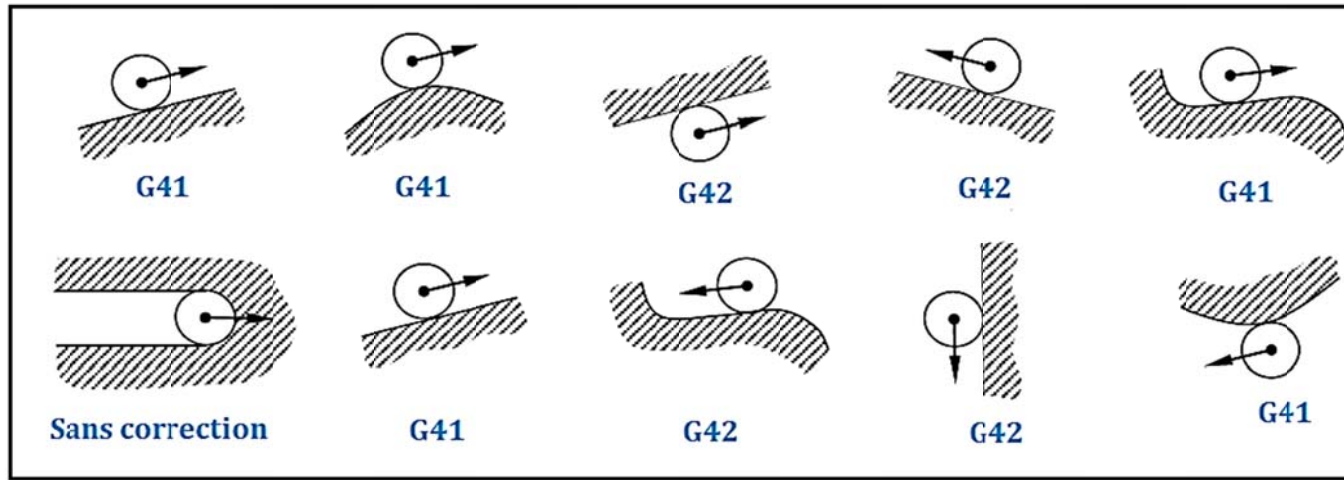
❖ **Propriétés des fonctions :** Les fonctions G40, G41 et G42 sont modales. La fonction G40 est initialisée à la mise sous tension.

❖ **Révocation :** Les fonctions G41 et G42 se révoquent mutuellement. La fonction G40 révoque les fonctions G41 et G42.

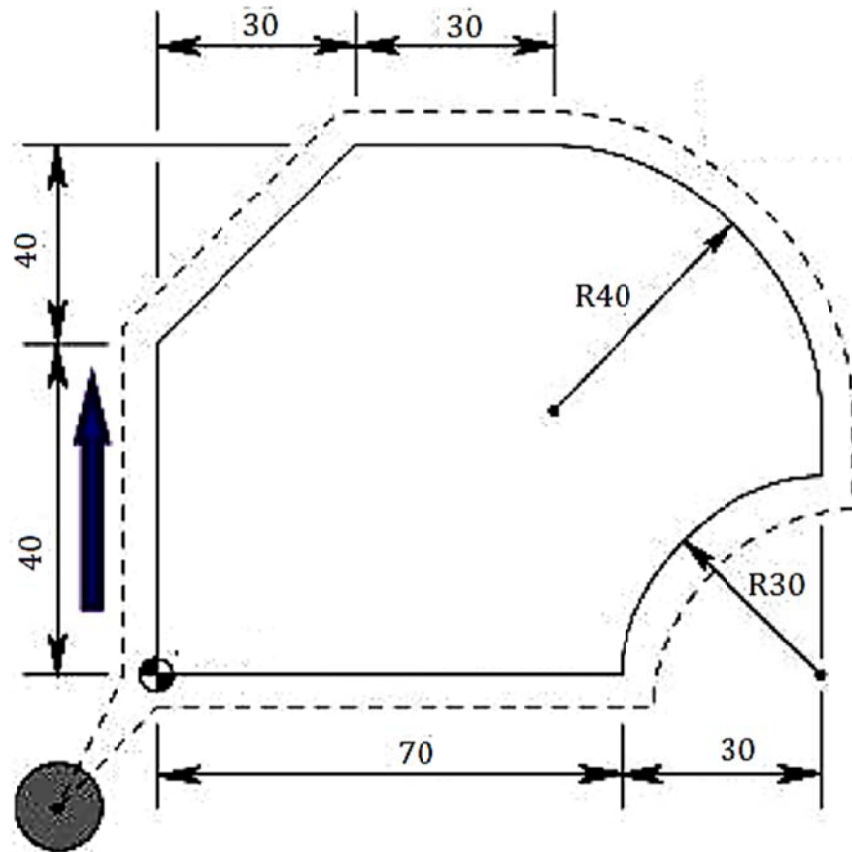
❖ **Exemple en tournage :** Correction de rayon suivant la position de la tourelle.



❖ **Exemples en fraisage :** correction de rayon en fraisage



❖ Application:



```

O0010
.....
N10 G00 X-15 Y-15
N20 G41 G01 X0 Y0 F100
N30 Y40
N40 X30 Y80
N50 X60
N60 G02 X100 Y40 R40
N70 G01 Y30
N80 G03 X70 Y0 R30
N90 G01 X0
N100 X-15 Y-15
N110 G40
.....
    
```

II. 4. 4. Programmation des vitesses

La programmation des vitesses peut être faite en deux modes

- Vitesses de coupe en mode linéaire ou rotatif (G96 et 97)
- Vitesses d'avance en mode linéaire ou rotatif (G94 et G95)

II. 4. 4. 1. Mouvement de coupe

- **Syntaxe :**
N..G97 S... [M03/M04]
N.. G96 [X.] S... [M03/M04]
G97 : Vitesse de broche exprimée en tr/mn.
G96 : Vitesse de coupe constante exprimée en m/mn.
S : Argument obligatoire lié à la fonction et définissant la vitesse programmée.

❖ **Propriétés :**

La fonction G97 est une fonction modale initialisée à la mise sous tension.
La fonction G96 est une fonction modale.

❖ **Révocation :**

La fonction G97 est révoquée par G96 S... .
La fonction G96 est révoquée par G97 S... .

❖ **Exemple :**

N...
N100 G97 S900 M04 (Rotation de broche à 900 tr/mn).
N110 ... X50 Z70 (Positionnement du nez de l'outil sur diamètre 50).
N120 G96 S200 (Initialisation de la V.C.C sur X=50).
N... G97 S900 (Annulation de V.C.C).

❖ **Remarque :**

Concernant l'usinage en tournage avec vitesse de coupe constante et pendant une opération de dressage, le diamètre tend vers zéro. Alors il faut penser à limiter la vitesse de rotation maximale avec la fonction **G92**.

- **Syntaxe :** N... G92 S...;

-

❖ **Propriétés :**

La fonction G92 est modale.

❖ **Révocation :**

La limite de la vitesse est annulée par :

- 1- La fonction d'annulation G92 S0.
- 2- La fonction G92 S... affectée d'une vitesse limite différente.
- 3- La fonction de fin de programme M02.
- 4- Une remise à l'état initial (RAZ).

XII. 4. 4. 2. Mouvement d'avance

Le mouvement de l'outil à une vitesse spécifiée pour l'usinage d'une pièce est appelé avance. Les vitesses d'avance peuvent être spécifiées à l'aide de chiffres réels. Par exemple pour déplacer l'outil à une avance de 150 mm/mn il faut programmer ce qui suit: F150.0.

La fonction qui permet de définir l'avance est appelée fonction avance.

- **Syntaxe :**

N.. G95 F.. G01/G02/G03 X..Z..
N.. G94 F.. G01/G02/G03 X..Y../X..Z..

❖ **Propriétés :**

La fonction G94 est une fonction modale initialisée à la mise sous tension.
La fonction G95 est une fonction modale.

❖ **Révocation :**

Les fonctions G94 et G95 se révoquent mutuellement.

❖ **Exemple 1 : (fraisage)**

N...
N50 G00 X..Y..
N60 G94 F200 (Vitesse d'avance en mm/min).
N70 G01 X..Y..
N..

❖ Exemple 2 : (tournage)

```
N..
N50 G00 X..Z..
N60 G95 F0.3 (Vitesse d'avance en mm/tr)
N70 G01 X..Z..
N..
```

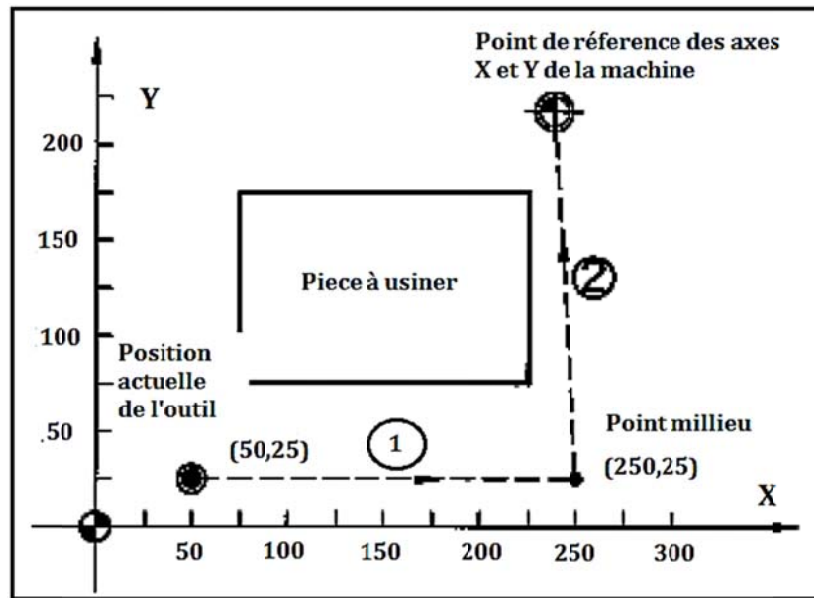
II. 4. 5. Retour aux origines (G28)

La commande G28 retourne rapidement l'outil de sa position actuelle vers le point d'origine machine, en passant par un point intermédiaire. X, Y et Z sont les valeurs des coordonnées du point intermédiaire qui servent de mécanisme de sécurité pour empêcher les outils de percuter n'importe quelle pièce, accessoire et appareillage sur son retour à sa position d'origine.

- **Syntaxe :**
G90 G28 X... Y... Z... ; (mode de coordonnées absolues)
G91 G28 X... Y... Z... ; (mode de coordonnées relatives)

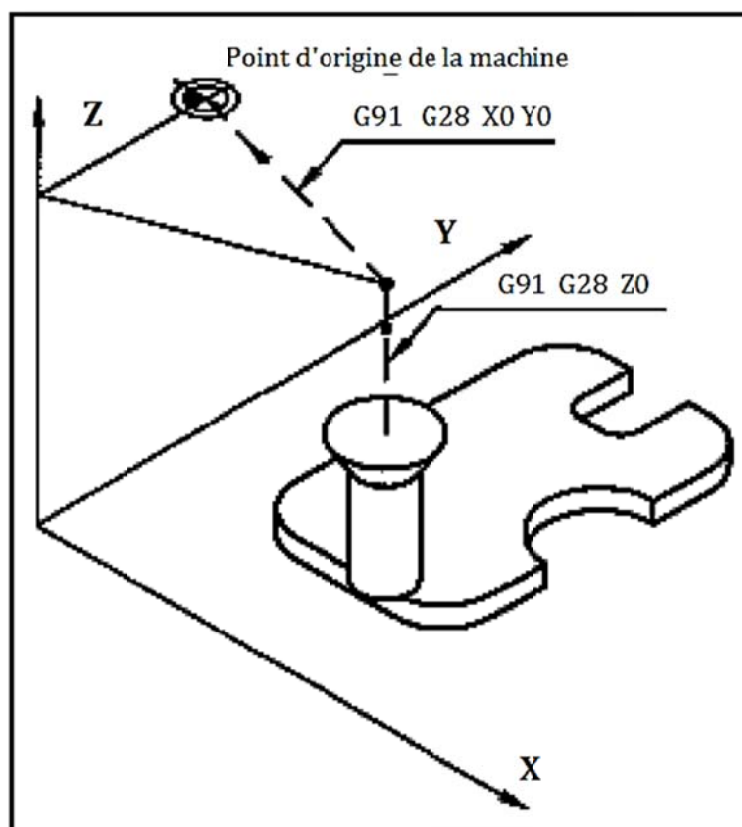
❖ Exemple 1 :

La position actuelle de l'outil est à (50, 25). Retour au point d'origine de la machine par un point intermédiaire (250, 25) pour éviter tout impact sur la pièce.



❖ Exemple 2 :

- G91 G28 Z0 ;Retour sur l'axe Z au point d'origine de la machine
- G91 G28 X0 Y0 ;Retour sur l'axe X et sur l'axe Y au point d'origine de la machine.



Les principales fonctions préparatoires et auxiliaires (tournage) sont classées dans le tableau suivant :

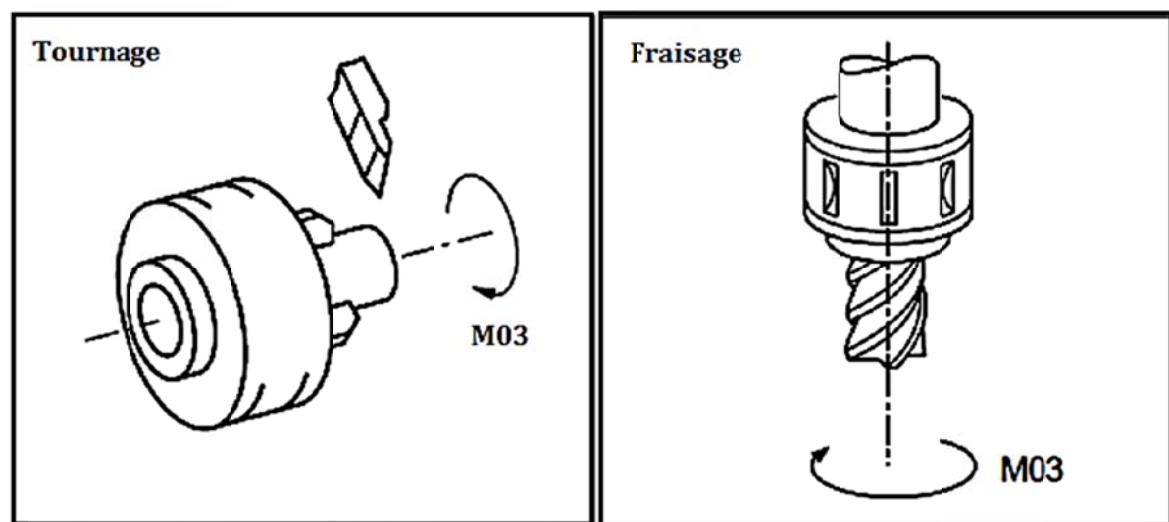
tournage : Tableau des fonctions préparatoires G usuelles en tournage		
Type	Groupe	Signification
G00	01	Déplacement rapide
G01		Interpolation linéaire
G02		Interpolation circulaire (sens horaire)
G03		Interpolation circulaire (sens anti-horaire)
G04	00	Temporisation et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation – suivi de l'argument F ou X en secondes)
G10		Entrée de données programmable
G11		Annulation du mode entrée de données programmable
G17	16	Sélection du plan X-Y
G18		Sélection du plan X-Z (par défaut)
G19		Sélection du plan Y-Z
G20	06	Programmation en pouces
G21		Programmation en mm
G28	00	Retour à la position d'origine
G30		Retour au 2ème, 3ème, 4ème point de référence
G50	00	Limitation de la vitesse maximum de broche
G52		Décalage de l'origine pièce programmable
G53		Programmation par rapport à l'origine machine
G65	00	Appel de macro client
G66	12	Appel modal de macro client
G67		Annulation de l'appel modal de macro client
G70	00	Cycle de finition d'un profil
G71		Cycle d'ébauche axial
G72		Cycle d'ébauche radial
G73		Cycle d'ébauche par copiage
G76		Cycle de filetage
G80		Annulation de cycle de perçage
G83	00	Cycle de perçage déburrage frontal
G84		Cycle de taraudage frontal
G87		Cycle de perçage latéral
G88		Cycle de taraudage latéral
G92	01	Cycle de filetage simple
G94	02	Vitesse d'avance (mm/min)
G95		Vitesse en mm par tour (mm/tr)
G96		Vitesse de coupe constante (vitesse de surface constante)
G97		Vitesse de rotation en tours par minute

II. 5. Les fonctions auxiliaires "M"

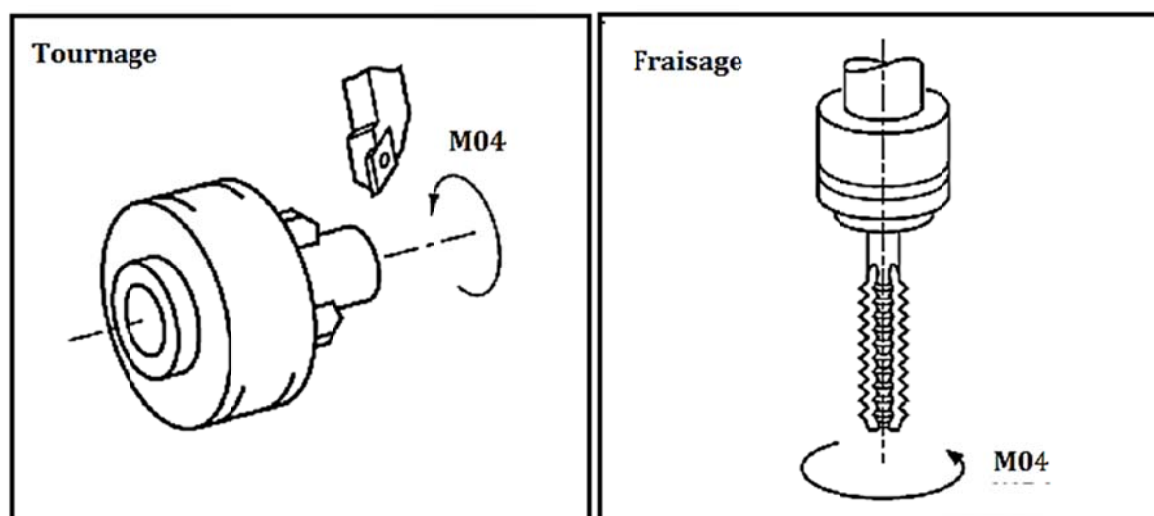
II. 5.1. Commandes de broche

Commande du sens de rotation M03- M04

- ❖ **M03** : Rotation de broche dans le sens anti-trigonométrique. La commande permet la mise en rotation de la broche à la vitesse programmée.



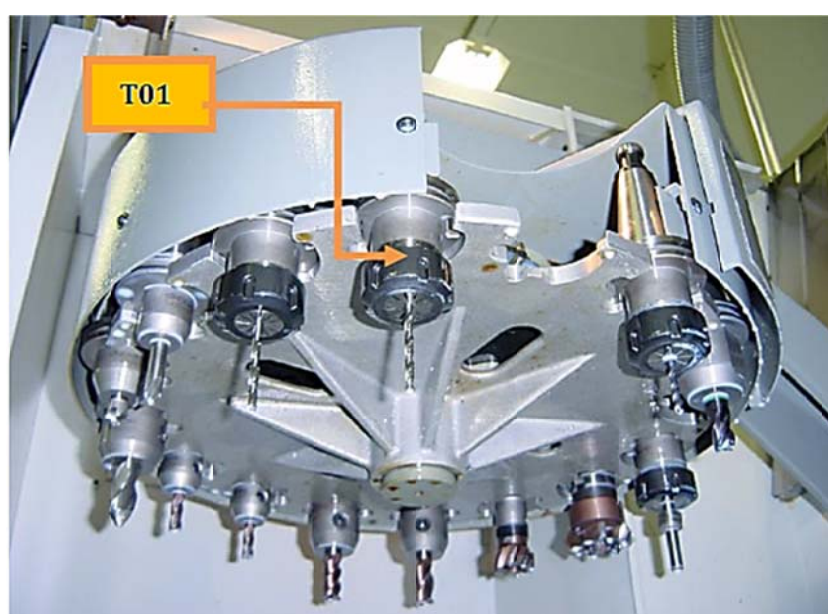
- ❖ **M04** : Rotation de broche dans le sens trigonométrique. La commande permet la mise en rotation de la broche à la vitesse programmée.



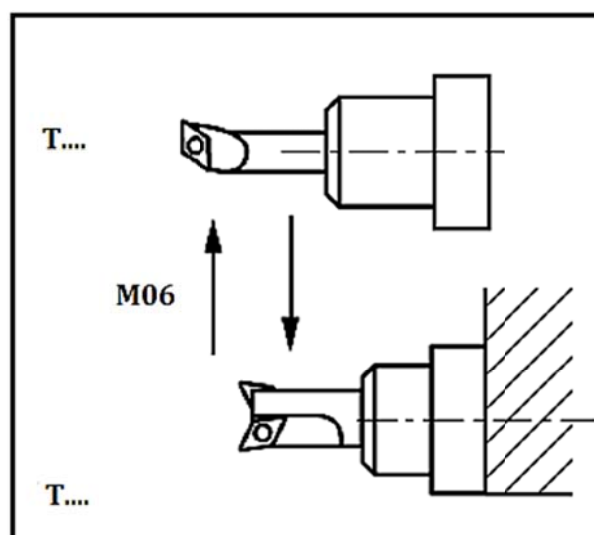
- ❖ **M05** : Arrêt de broche. La commande arrête la rotation de la broche.
 - **Syntaxe** : N..M03/M04/M05
- ❖ **Propriétés des fonctions** : Les fonctions M03 et M04 sont des fonctions modales «avant» décodées. La fonction M05 est une fonction modale «après» décodée initialisée à la mise sous tension.
- ❖ **Révocation** : Les fonctions M03, M04 et M05 se révoquent mutuellement. Les fonctions M00, M19 et M01 (validé) révoquent les états M03 ou M04.

XII. 5.2. Appel de l'outil

Lorsque des perçages, des taraudages, des alésages, des fraisages et autres opérations d'usinage doivent être effectuées, il est nécessaire de sélectionner un outil adéquat. Lorsqu'un numéro est attribué à chaque outil et que le numéro est spécifié dans le programme, l'outil correspondant est sélectionné.



- ❖ **M06** : Appel ou changement d'outil. La fonction permet l'appel d'un outil et le positionnement de celui-ci à son poste d'usinage.



- **Syntaxe** : N.. T.. M06 : T.. La fonction «T» affectée d'un numéro sélectionne l'outil.

- ❖ Propriété de la fonction : La fonction M06 est une fonction non modale «après».
- ❖ Tableau des codes "M" usuels

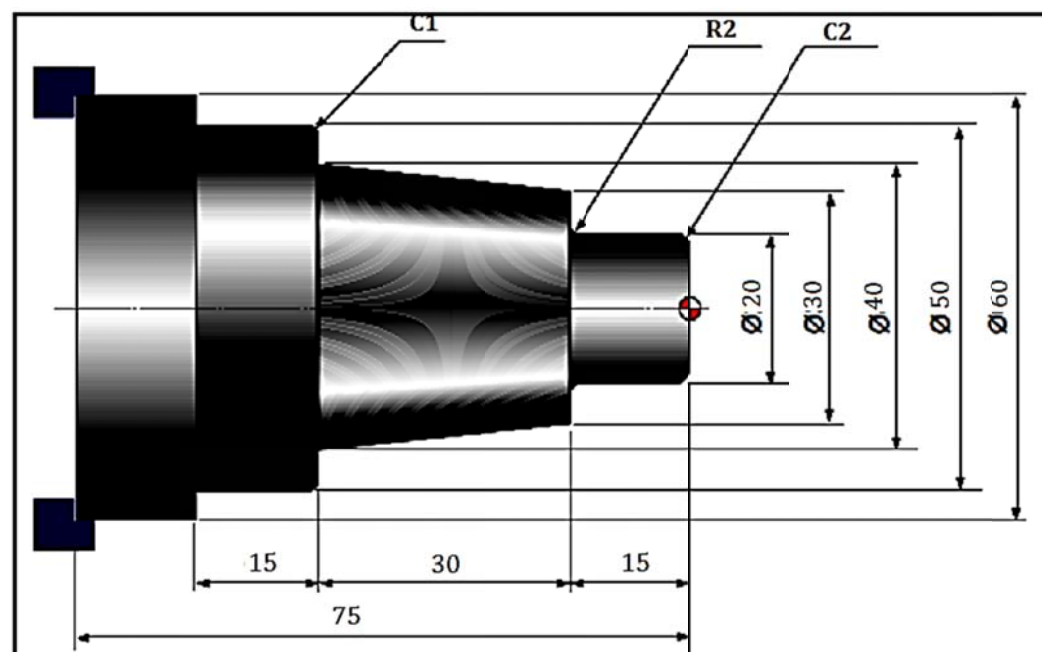
Tournage. Tableau des codes M usuels		
Type	Signification	Fonction
M00	Arrêt programmé	Après
M01	Arrêt optionnel	Après
M02	Fin de programme (identique à M30)	Après
M03	Rotation broche sens horaire	Après
M04	Rotation broche sens trigonométrique (ou anti-horaire)	Après
M05	Arrêt rotation broche	Après
M06	Changement outil	Après
M07	Marche second arrosage	Après
M08	Marche arrosage principal	Après
M09	Arrêt arrosage	Après
M19	Orientation broche	Après
M30	Fin de programme (identique à M02)	Après
M98	Appel de sous-programme	--
M99	Retour de sous-programme	Après

❖ Application

Ecrivez le programme CN (FANUC) pour l'usinage **en finition** de la pièce suivante.

L'outil utilisé : Outil à charioter dresser finition : T0101 ;

Les conditions de coupe : $V_c = 150 \text{ m/min}$; $f = 0.1 \text{ mm/tr}$.



❖ Tableau des fonctions préparatoires G usuelles en fraisage:

FRAISAGE. Tableau des fonctions préparatoires G usuelles		
Type	Groupe	Signification
G00	01	Déplacement rapide
G01		Interpolation linéaire
G02		Interpolation circulaire (sens horaire)
G03		Interpolation circulaire (sens anti-horaire)
G04	00	Temporisation et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation - suivi de l'argument F ou X en secondes)
G09		Arrêt précis
G10		Entrée de données programmable
G11		Annulation du mode entrée de données programmable
G15	17	Annulation de la programmation en coordonnées polaires
G16		Programmation en coordonnées polaires (optionnel)
G17	02	Sélection du plan X-Y (par défaut)
G18		Sélection du plan X-Z
G19		Sélection du plan Y-Z
G20	06	Programmation en pouces
G21		Programmation en mm
G28		Retour à la position d'origine

G30	00	Retour au 2ème, 3ème, 4ème point de référence
G50	11	Annulation de la mise à l'échelle
G51		Mise à l'échelle
G50-1	22	Annulation de l'image miroir programmable
G50-2		Image miroir programmable
G52	00	Décalage de l'origine pièce programmable
G53		Programmation par rapport aux zéro machines
G65		Appel de macro client
G66	12	Appel modal de macro client
G67		Annulation de l'appel modal de macro client
G68	16	Rotation du système de coordonnées
G69		Annulation de rotation du système de coordonnées
G73	09	Cycle de perçage brise-copeaux
G74		Cycle de taraudage à gauche
G76		Cycle d'alésage au grain
G80		Annulation de cycle
G81		Cycle de perçage simple
G82		Cycle de perçage lamage (avec temporisation)
G83		Cycle de perçage déburrage
G84		Cycle de taraudage à droite
G90	03	Déplacements en coordonnées absolues
G91		Déplacements en coordonnées relatives
G94	05	Avances en millimètres/minute
G95		Avances en millimètres/tour
G96	13	Vitesse de coupe constante en mètres/minute
G97		Vitesse de rotation constante en tours/minute
G98	10	Retour au plan Z (lors de cycle)
G99		Retour au plan R (lors de cycle)

❖ Commande de coordonnées polaires (G15, G16)

Les coordonnées du centre de machine CNC peuvent être définies par des coordonnées cartésiennes ou par un système de coordonnées polaires (G16). Ce dernier donne les valeurs de coordonnées en unité de rayon et en angle. Vous pouvez utiliser la commande G15 pour annuler l'effet de G16. Le sens plus de l'angle est le sens antihoraire du sens plus (+) du premier axe du plan sélectionné, et le sens moins (-) est le sens horaire. L'angle et le rayon peuvent être programmés dans les deux modes, absolu et relatif (G90, G91).

- **Syntaxe :**

G17 G16 X..Y..;

G18 G16 Z..X..;

G19 G16 Y..Z..;

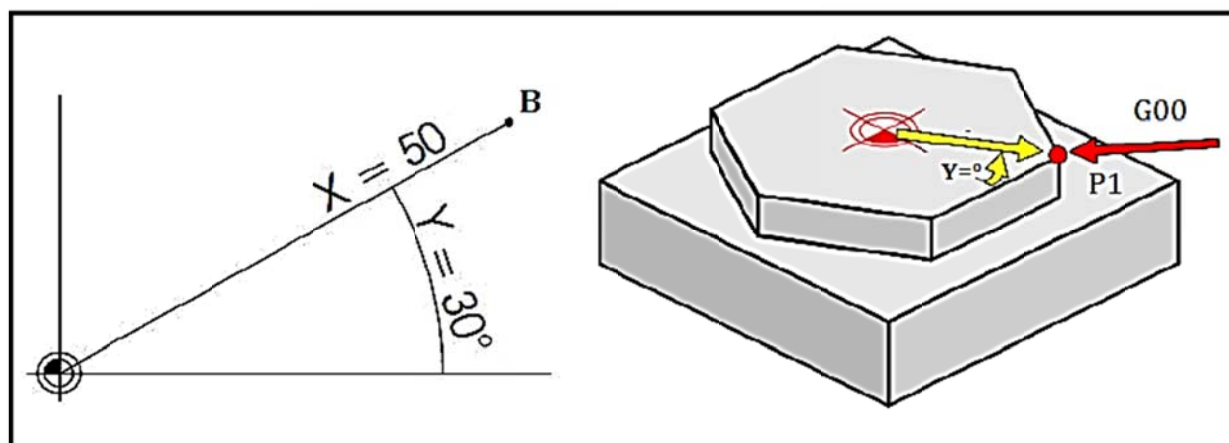
.....

G15;

G16 : activation du mode de coordonnées polaires

G15 : Annulation du mode de coordonnées polaires.

- **Exemple :**



N75 G16

N80 G17G01 X50 Y30 (Point B)

N85 G15.

❖ Mise à l'échelle (G50, G51)

La commande G51 est conçue pour augmenter ou pour réduire la trajectoire du programme d'usinage, en référence au point P donné par le programme. Cela permet au même programme de gérer des produits de taille différente.

• Syntaxe :

G51 X... Y... Z... P.... ;

G50 ;

G51 ; Fonction de mise à l'échelle.

G50 ; Annuler la fonction de mise à l'échelle.

X... : Coordonnées de l'axe X du centre de la mise à l'échelle.

Y...: Coordonnées de l'axe Y du centre de la mise à l'échelle.

Z...: Coordonnées de l'axe Z du centre de la mise à l'échelle.

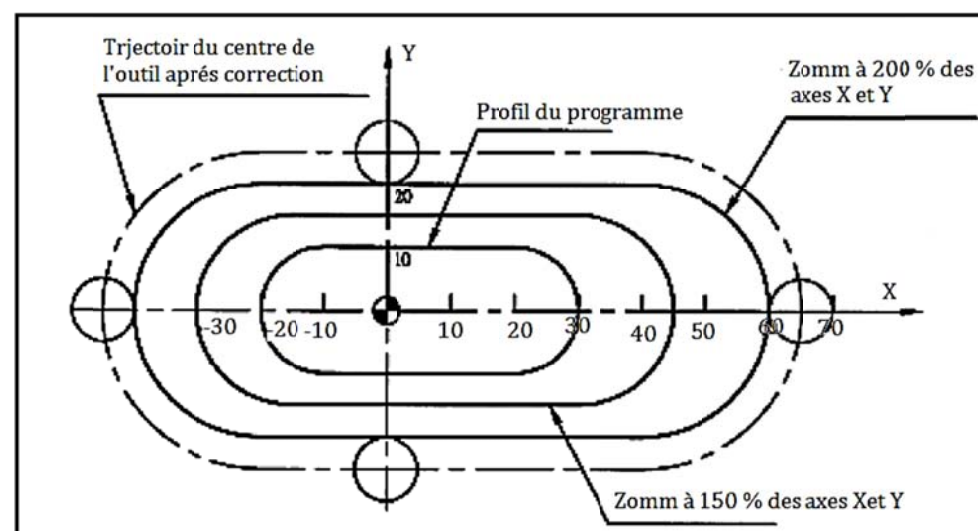
P...: Proportion de mise à l'échelle avec une fourchette de 0,111 ~ 999,999 avec saisie minimale d'unité de 0,001.

P1200 indique qu'il faut augmenter de 120 %. P800 qu'il faut réduire de 80 %.

Dans le cas où les coordonnées (X... Y... Z...) sont contournées, le centre de la mise à l'échelle est au point de commande du G51.

• Exemple :

Codifier un programme avec la commande de mise à l'échelle pour augmenter l'échelle d'une pièce d'usinage avec les axes X, Y à 200%, comme le montre la figure ci-dessous.



O6124

G40 G49 G80 G17 G21

N1 T01 M06

G91 G30 Z0

G90 G54 G00 X0 Y-40

G43 Z-3 H01

S900 M03

G00 Z-8 M08

Avec une Fraise à queue Ø10.

G51 X0 Y0 P2000

G90 G01 G42 X0 Y-10 F150

Mise à l'échelle simultanée de l'axe X et l'axe Y à 200%

Exécuter le programme d'augmentation de fraisage, insérez

La compensation du rayon vers la droite pour l'outil G42.

G91 X20

G03 Y20 R10

G01 X-30

G03 Y-20 R10

G01 X10

G50

G40 X0 Y0

Fin du programme d'usinage de mise à l'échelle.

Révoquer la fonction de mise à l'échelle.

Révoquer la compensation de rayon, et remettre à zéro l'outil au point d'origine.

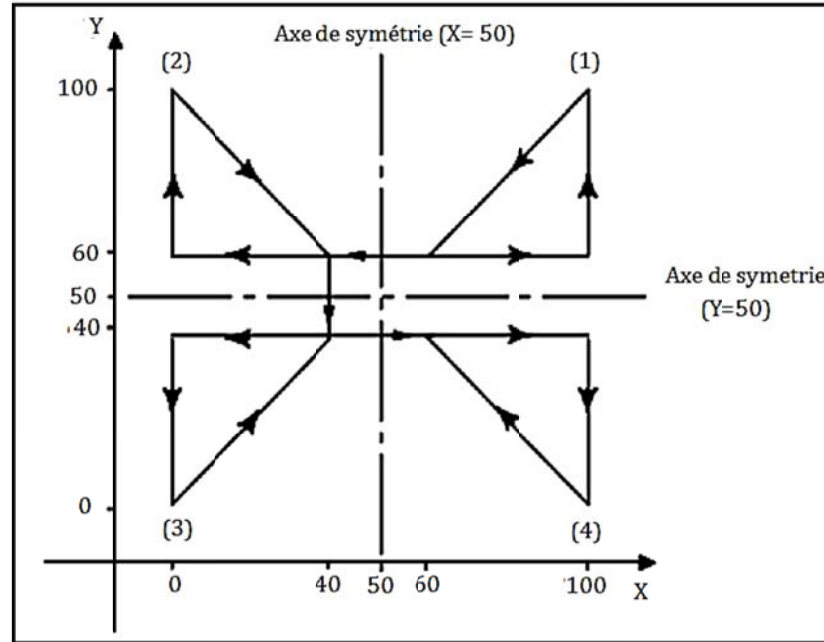
G91 G28 Z0 M05

G49

M30.

❖ Image miroir programmable (G50.1, G51.1)

La commande de coupe en miroir est conçue pour usiner les pièces à géométrie symétrique. Il permet d'éditer un programme initial et le refléter avec la commande de coupe en miroir, pour usiner une pièce à l'envers, ou avec la gauche et la droite inversées, afin d'économiser les efforts de programmation.



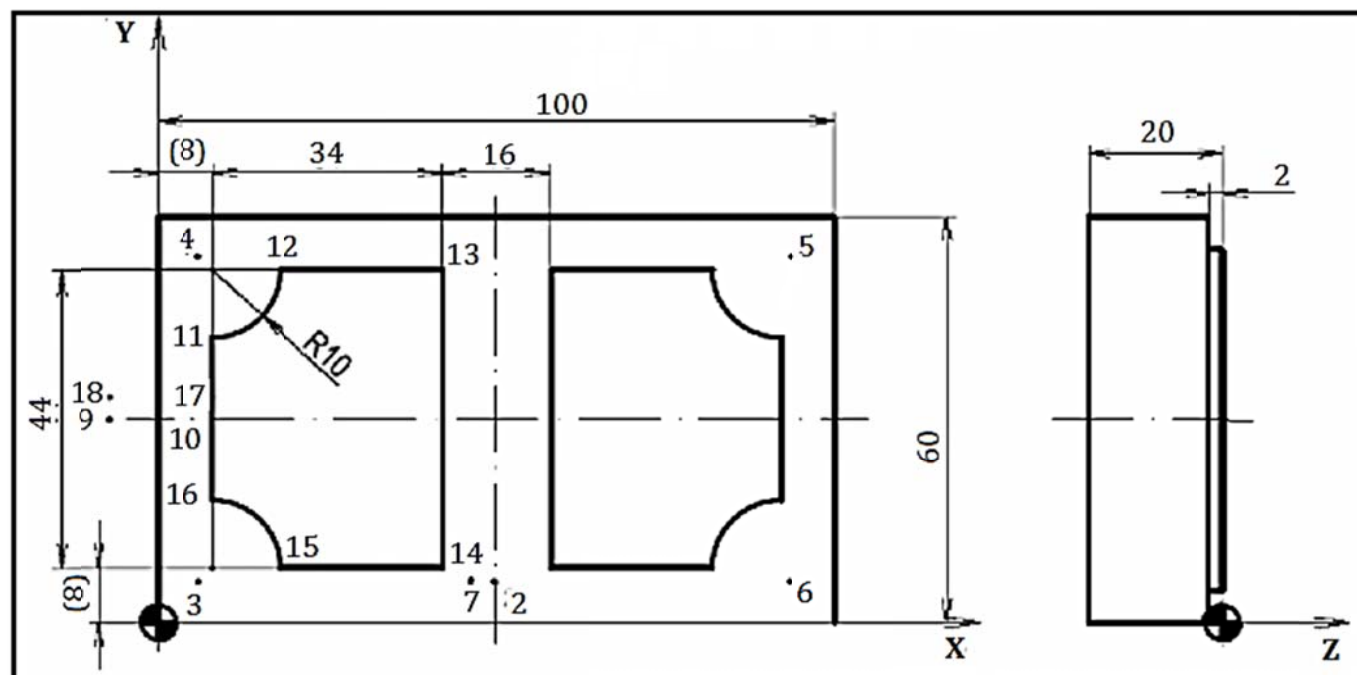
• Demarche

- (1) Image d'origine des commandes programmées,
- (2) Image symétrique par rapport à une ligne parallèle à l'axe Y et coupant l'axe X à 50,
- (3) Image symétrique par rapport au point (50,50),
- (4) Image symétrique par rapport à une ligne parallèle à l'axe X et coupant l'axe Y à 50.

L'utilisation d'une image miroir avec un des axes dans un plan déterminé change les commandes ci-dessous comme suit :

Commande	Explication
Commandes circulaires	Les commandes G02 et G03 sont inversées. G02 devient G03 et G03 devient G02.
Commandes de compensation	Les commandes G41 et G42 sont inversées. G41 devient G42 et G42 devient G41.
Rotation des coordonnées	Le sens de rotation est inversé. SH devient SAH et SAH devient SH.

• Exemple :



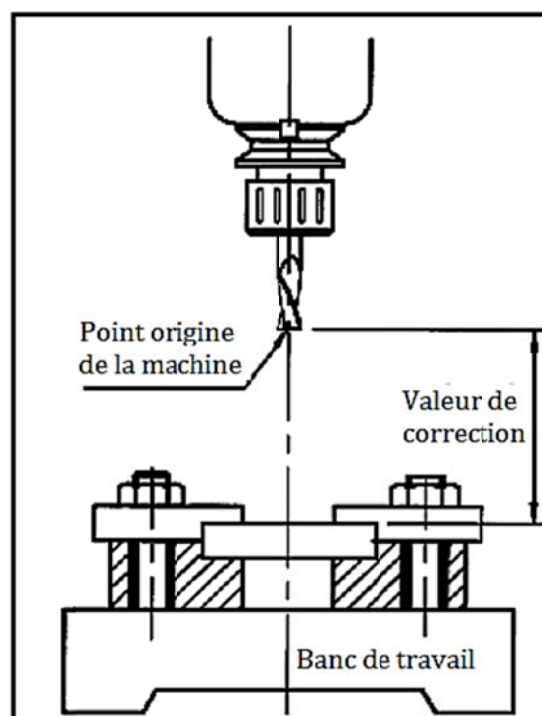
O0006	N80 M03 S2500	G01 X8 G41 H12 F200
N5 T01 M06	N85 G00 X-6 Y0 Z0	G01 Y42 F400
N15 M03 S1800	N90 G00 Z-2	G03 X18 Y52 R10
N20 G00 X50 Y-22 Z2	N95 G01 X8 G41 H12 F200	G01 X42
N25 G00 Z-2	N100 G01 Y42 F400	G01 Y8
N30 G01 Y6 G41 F200	N105 G03 X18 Y52 R10	G01 X18
N35 G01 X6 C10 F400	N110 G01 X42	G03 X8 Y18 R10
N40 G01 Y54 C10	N115 G01 Y8	G01 Y32
N45 G01 X94 C10	N120 G01 X18	G01 X-6 G40
N50 G01 Y6 C10	N125 G03 X8 Y18 R10	G50.1
N55 G01 X48	N130 G01 Y32	M30
N60 G01 Y-22 G40	N135 G01 X-6 G40	
N65 G00 Z50	G51.1 X50 Y0 Z0 I-1000	
N70 T02 M06	G00 X-6 Y0 Z0	
	G00 Z-2	

- **Corrections d'outils**

Tableau des corrections d'outil	
Type	Signification
G40	Annulation de la compensation de rayon d'outil
G41	Compensation de rayon d'outil à gauche
G42	Compensation de rayon d'outil à droite
G43	Compensation de la longueur d'outil dans le sens + (fraisage uniquement)
G44	Compensation de la longueur d'outil dans le sens - (fraisage uniquement)
G49	Annulation de la longueur d'outil (fraisage uniquement)

- ❖ **Correction de la longueur de l'outil**

La fonction correction de longueur d'outil traite la différence de longueur d'outil, en compensant la longueur, après changement de l'outil au point origine de la machine. C'est pratiquement une correction automatique d'outil sur l'axe Z pour un usinage en profondeur rapide et facile de l'axe Z, cela en résolvant le problème de la différence de longueur d'outil et en simplifiant le programme d'usinage comme la montre la figure ci-dessous.



- **Syntaxe :**

G43 G00/G01 Z... H...; (corriger la longueur d'outil dans un sens positif)

G44 G00/G01 Z... H... ; (corriger la longueur d'outil dans un sens négatif)

G49 ; (Annuler la correction de longueur d'outil)

Z... est la valeur des coordonnées de l'outil sur l'axe Z

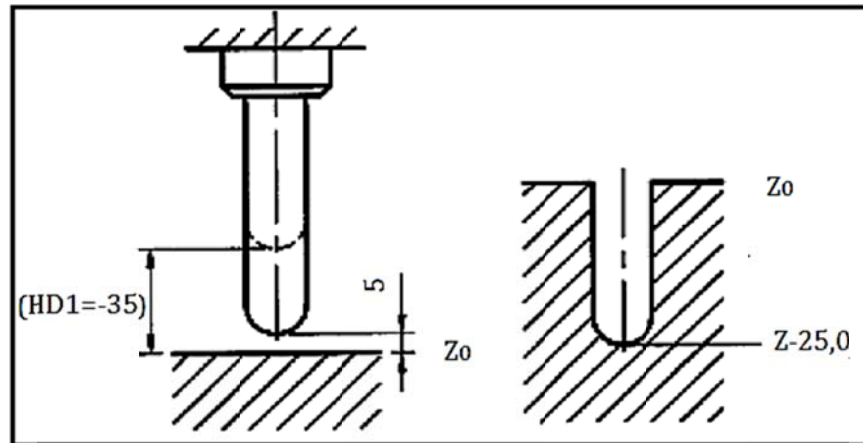
H... est le numéro de registre (00 ~ 99) où est sauvegardée la valeur de correction. En exécutant la correction de longueur d'outil, une commande G00 ou G01 est nécessaire pour le mouvement sur l'axe Z de l'outil. G00 (positionnement rapide) est le meilleur choix dans la plupart des cas.

- **Exemple :**

Le programme, décrit ci-dessous, donne une illustration de l'utilisation de la commande de correction de longueur G43. Voir le déplacement de l'outil sur l'axe Z, comme montré à la figure suivante, avec une valeur de correction donnée H01 = 35,0.

Position de l'axe Z

```
N01 X0 Y0 Z0 ; 35,00
N02 G90 G00 X50. Y40. ; 35,00
N03 G43 Z5. H01 ; (H01= -35.) 5,00
N04 G01 Z-25. F100 ; 25,00
N05 G00 G49 Z0 ; 35,00
```



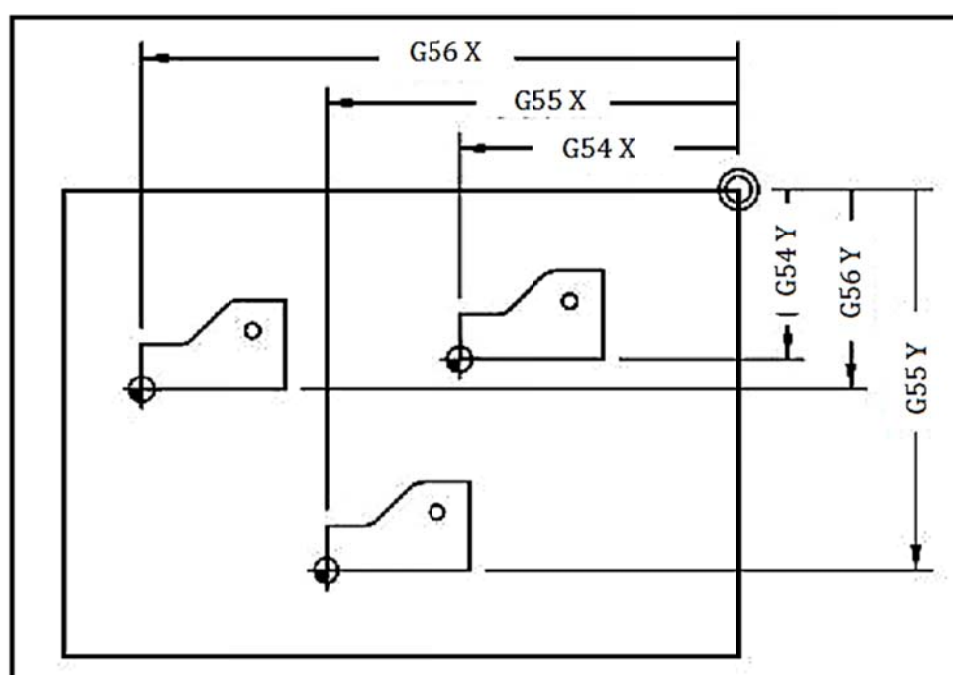
• Les systèmes de coordonnées

Tableau des Origines pièces	
Type	Signification
G52	Décalage du système de coordonnées programmable
G53	Sélection temporaire du système de coordonnées machine (fonction non modale)
EXT	Système de coordonnées servant à décaler TOUTES les origines ci-dessous
G54	Sélection du système de coordonnées numéro 1
G55	Sélection du système de coordonnées numéro 2
G56	Sélection du système de coordonnées numéro 3
G57	Sélection du système de coordonnées numéro 4
G58	Sélection du système de coordonnées numéro 5
G59	Sélection du système de coordonnées numéro 6

❖ Les systèmes de coordonnées

Il existe six systèmes de coordonnées pièces prédéfinis. Les systèmes de coordonnées sont prédéfinis par l'utilisateur, et peuvent être appelés dans le programme à tout moment. Chaque origine pièce représente un décalage de l'origine machine A la mise sous tension de la machine, le système de coordonnées pièce G54 est actif.

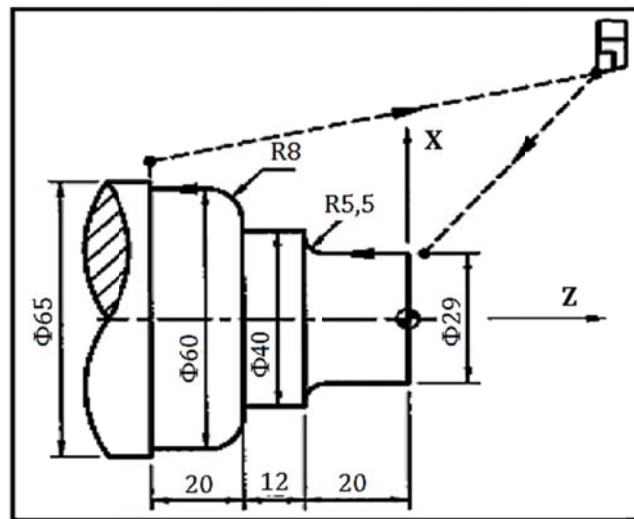
Un système de coordonnées (relatif), propre à chaque pièce et décalé du système de coordonnées machine (absolu). Le système de coordonnées permet dans le cas de pièces multiples mais semblables, de créer en décalant ses origines, le système de coordonnées de chaque pièce, le programme restant le même. Un cas typique d'utilisation de cette fonctionnalité, pour usiner trois îlots identiques sur la même pièce, est illustré sur la figure ci-dessous.



❖ **Exercice :**

Ecrire le programme d'usinage de la pièce ci-dessous afin que l'outil effectue la découpe le long du contour fini.

- Outil T0101
- $V_c = 180\text{m/min}$; $f = 0,15\text{ mm/tr}$. La vitesse limite de rotation de la broche est 2500 tr/min .

❖ **Programme**

O 0450	Numéro de programme
N10 G90 G92 S2500	Programmation absolue, limitation de la vitesse de rotation à 2500tr/min .
N20 G96 S180 G95 F0.15 M03	Régler la vitesse de découpe à 180m/min et de l'avance à $0,15\text{mm/tr}$, mise de la broche en rotation dans le sens horaire.
N30 T0101	Sélection de l'outil 01.
N40 G00 X29 Z2	Interpolation rapide, déplacer l'outil vers le point de départ du tournage (point d'approche).
N50 G01 Z-14,5	Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée jusqu'au point de coordonnées (X29, Z-14,5).
N60 G02 X40 Z-20 R5,5	Interpolation circulaire dans le sens horaire jusqu'au point de coordonnées (X40, Z-20).
N70 G01 Z-32	Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée jusqu'au point de coordonnées (X40, Z-32).
N80 X44	
N90 G03 X60 Z-40 R8	Interpolation circulaire dans le sens horaire jusqu'au point de Coordonnées (X60, Z-40).
N100 G01 Z-52	
N110 X67	
N120 G28 U0 W0 M05	Retour automatique au point de référence et arrêt broche.
N130 M30	Fin programme.

II.6. 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.

II.6. 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 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 II.2).

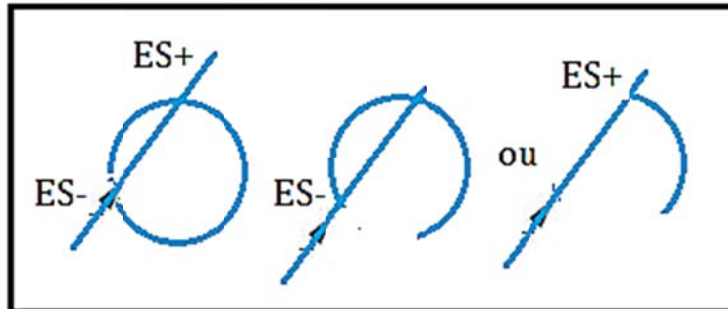


Figure II.2. Définition d'éléments sécants en PGP : intersection d'un cercle par une droite.

❖ 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 II.3).

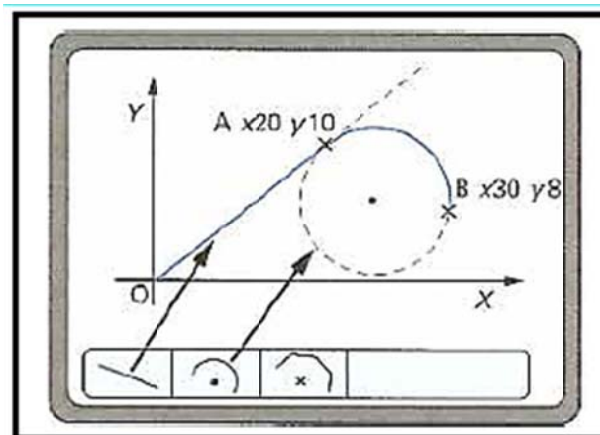


Figure II.3. Module de définition géométrique des contours PROFIL.

❖ 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 II.4).

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.

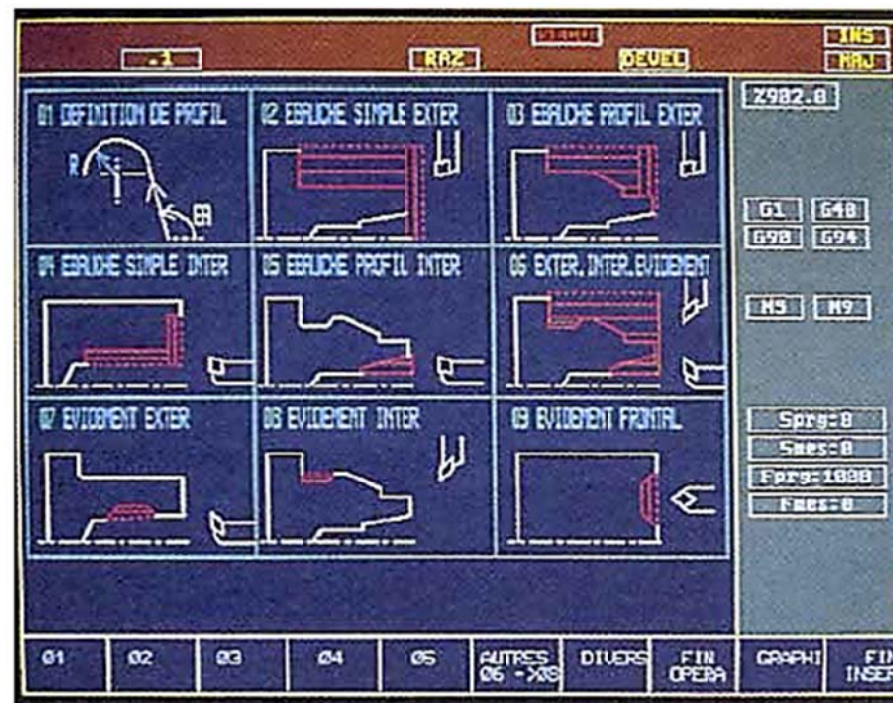


Figure II.4.Programmation conversationnelle PROCAM (doc. NUM) page d'appel des sous-programmes.

II.6. 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 palpé sur les machines de tournage ;
- cycles de perçage (exemple donné en figure II.5), de taraudage, d'alésage, de surfacage, de rainurage, de contournage, d'usinage de poches, de filetage au grain et de palpé sur les machines de fraisage ;
- cycles de plongée, de balayage, d'épaulement, de profilage et de diamantage des meules sur les machines de rectification.

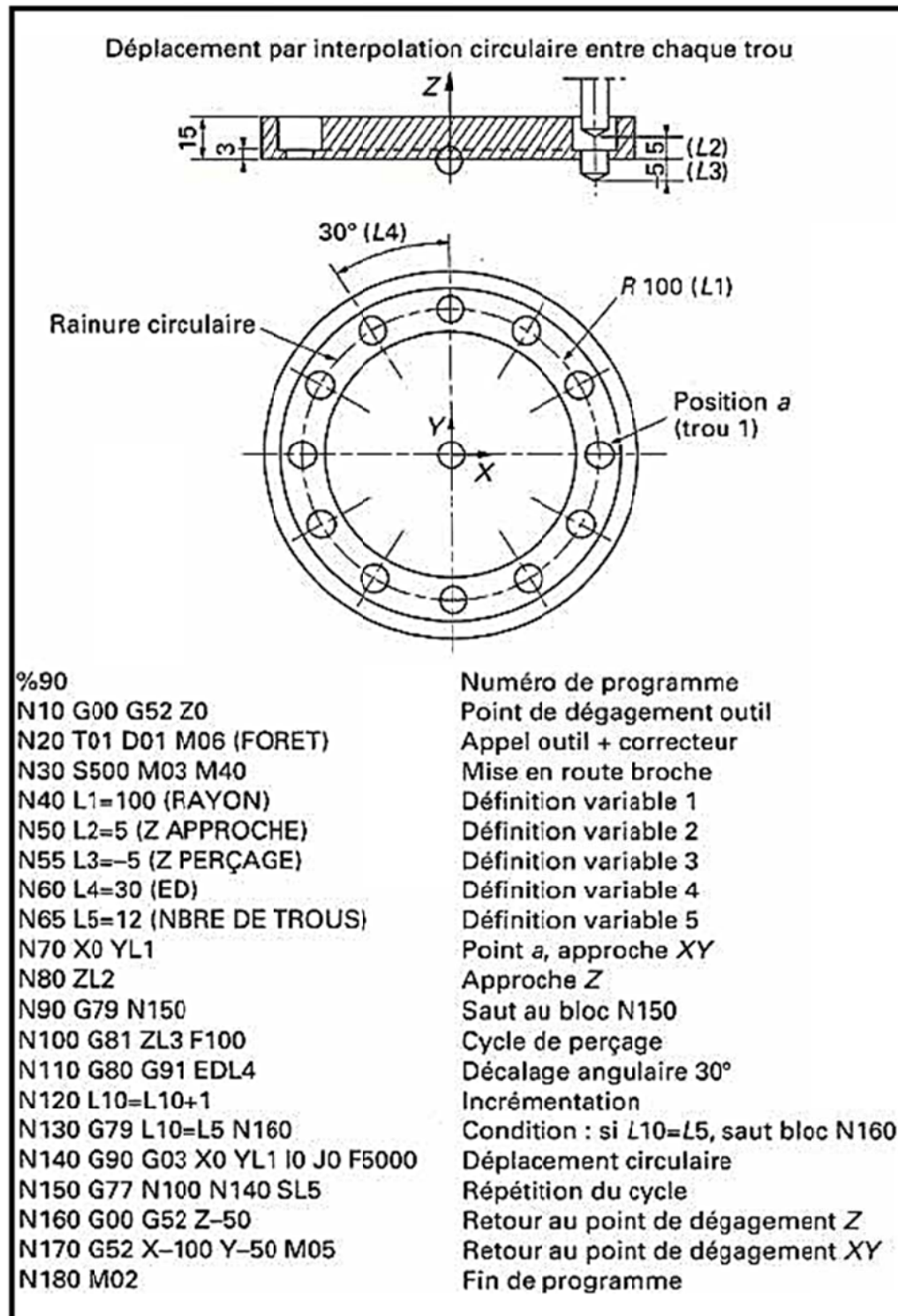


Figure II.5.Exemple de programmation paramétrée : perçage en cycle de 12 trous décalés angulairement dans le plan XY (G17).

II.7. 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 spécialisé 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, MINIAPT, 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 générés par des logiciels de CAO. La communication entre les différents logiciels applicatifs fait l'objet de standards d'échange.

II.8. 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 quasiment 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.

II.8. 1. Définition des surfaces complexes

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

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.

II.8. 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 II.6). 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.

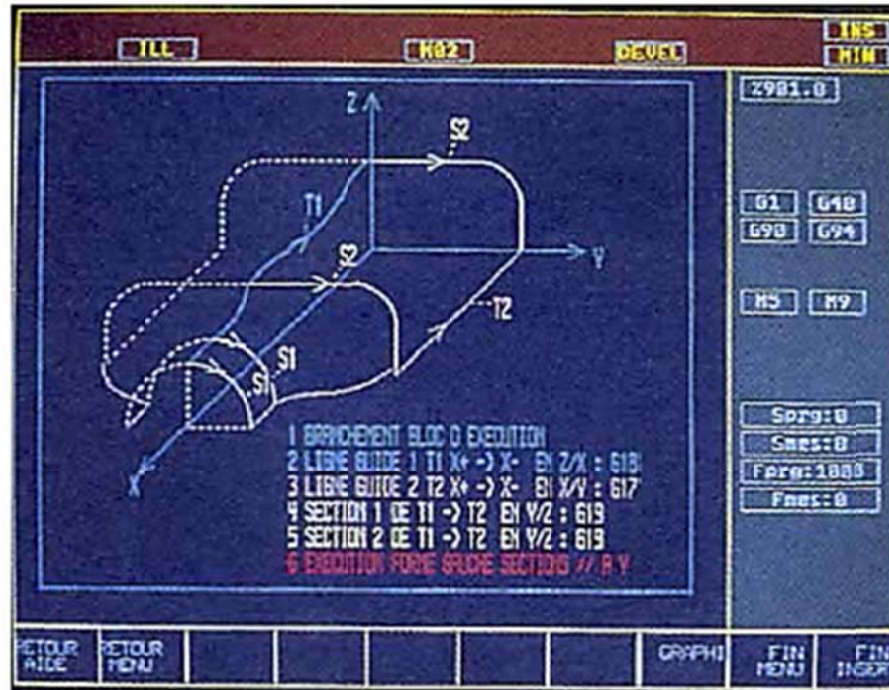


Figure II.6. Vue sur écran du logiciel d'aide à la programmation des formes complexes NUMAFORM.

❖ 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.

❖ 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 II.7), y compris lors de l'usinage de parois verticales ou de faces en dépouille.

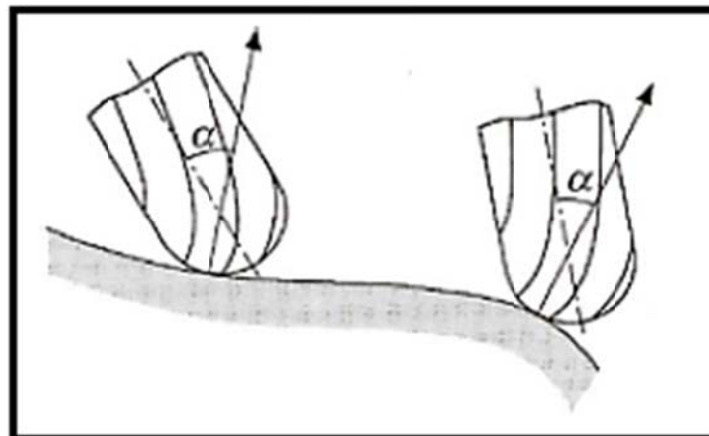


Figure II.7. Usinage sur fraiseuse en mode RTCP.

II.9. Autres modes de programmation

II.9. 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.

II.9. 2 Programmation paramétrée

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

- pour réaliser des opérations arithmétiques, trigonométriques ou logiques ;
- pour effectuer des incréments ou des décréments ;
- 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 (surfaçage, poches...), de palpation et de changement d'outil.

II.9. 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*.

II.9. 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. II.8). 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.

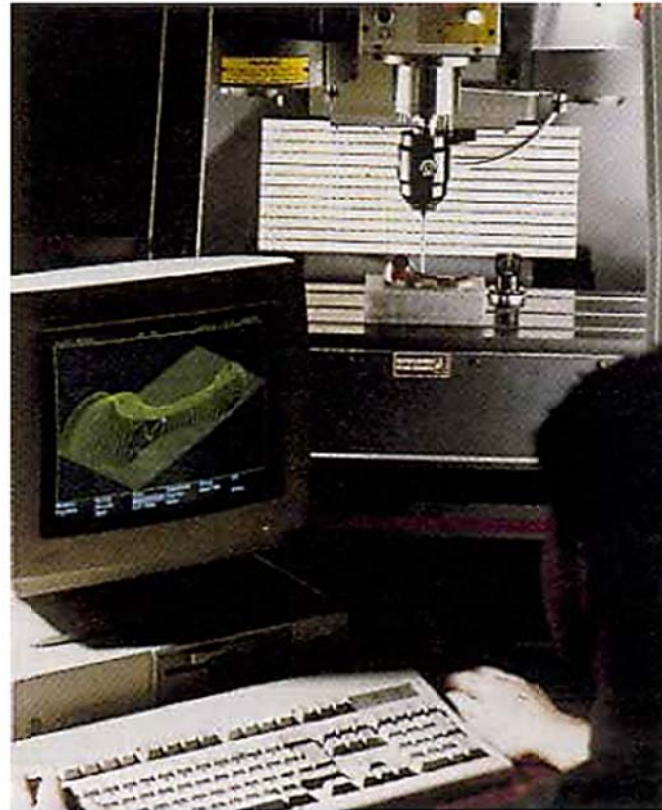
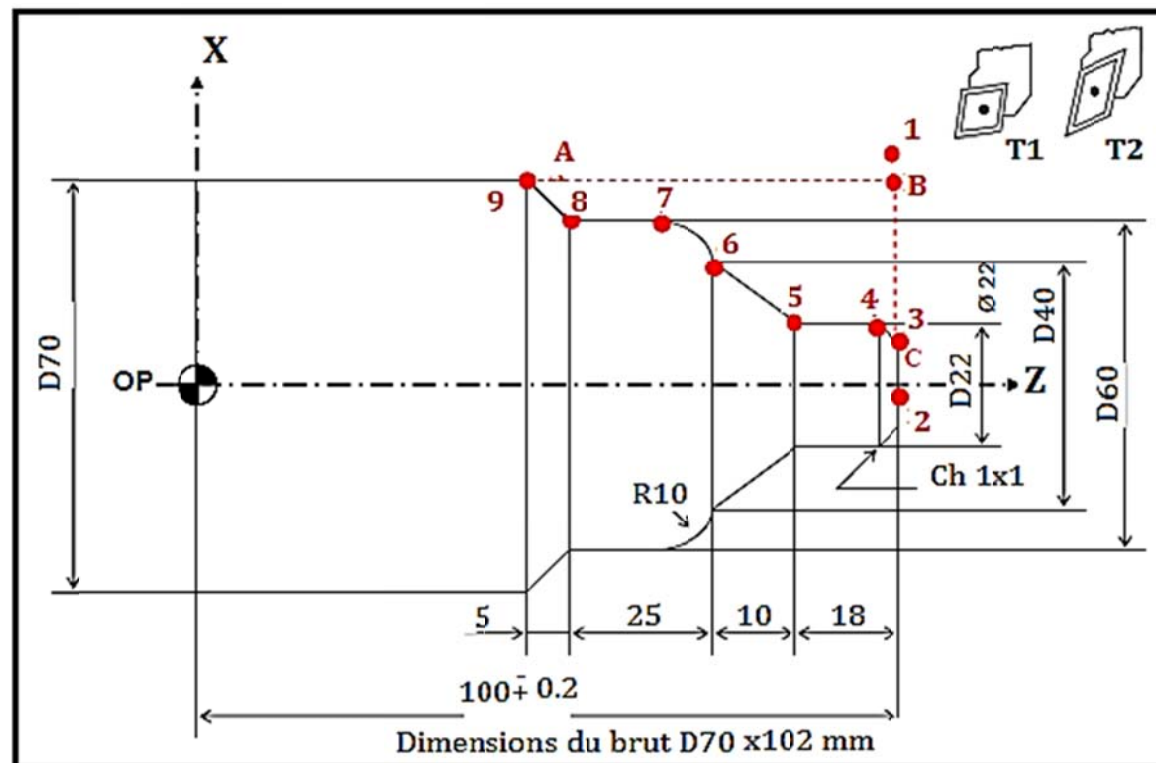


Figure II.8. Logiciel de digitalisation DIGINUM.

II.10. Exemples de programmation

II.10.1. Exemple de tournage



❖ Paramètres d'usage

Opérations	Vc	Avance	
Dressage	120 m/min	0.2 mm/tr	
Contournage Ebauche	120 m/min	0.2 mm/tr	Passe : 1mm
Contournage Finition	160 m/min	0.1 mm/tr	

❖ Désignation des points de programmation

Point	X	Z	Point	X	Z
Dressage 1	71	100	Profil 7	60	62
Dressage 2	-2	100	Profil 8	60	47
Profil 3	20	100	Profil 9	70	42
Profil 4	22	99	Brut A	70	42
Profil 5	22	82	Brut B	70	100
Profil 6	40	72	Brut C	20	100

Programme

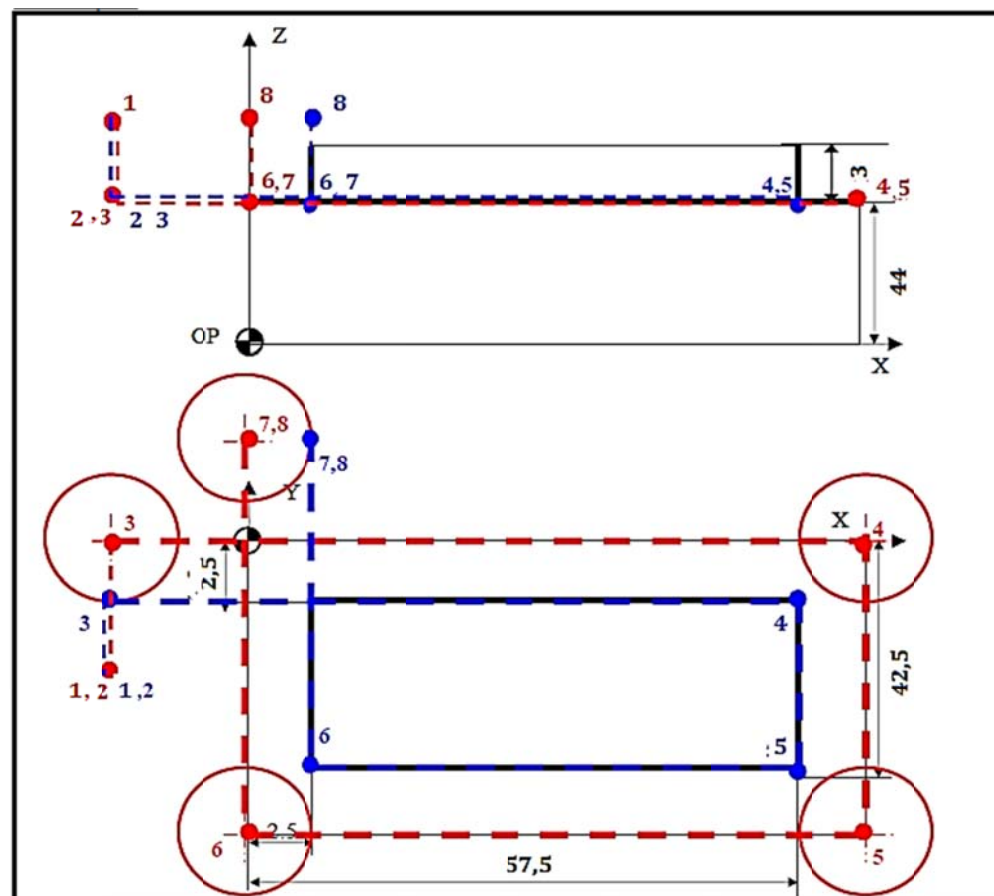
```

%500
N10 G40 G80 G95
N20 G0 G52 X0 Z0           (initialisation)
(DRESSAGE)
N30 T1 D1 M6
N40 G97 S1000 M41 M3 M8
N50 G92 S3000
N60 G0 X72 Z100           (Approche)
N70 G96 S120 G95 F0.2
N80 G1 X71 Z100           (pt1)
N90 G1 X-2                 (pt2)
N100 G0 Z102              (dégagement)
N110 G79 N190
N120 G1 X20 Z100          (pt3)
N130 X22 Z99              (pt4)
N140 Z82                  (pt5)
N150 X40 Z72              (pt6)
N160 G2 X60 Z62 R10       (pt7)
N170 Z47                  (pt8)
N180 X70 Z42              (pt9)
(CONTOURNAGE EBAUCHE)
N190 G96 S120 G95 F0.2
N200 G0 X71 Z101          (Approche)
N210 G64 N180 N120 I0.2 K0.1 P1 (ébauche paraxiale)
N220 X70 Z42
N230 Z100
N240 X20
N250 G80 G0 G52 X0 Z0
(CONTOURNAGE FINITION)
N260 T2 D2 M6
N270 G0 X21 Z103
N280 G96 S160 G95 F0.1
N290 G1 G42 X20 Z102      (Approche)
N300 G77 N120 N180
N310 G1 X72 Z42           (dégagement en usinage)
N320 G40 G0 G52 X0 Z0 M5 M9
N330 M2.
    
```

Profil fini

II.10.2. Exemple de fraisage

" Centre fraise"



❖ Programmation centre fraise

Points	X	Y	Z
1	-10	-10	50
2	-10	-10	44
3	-10	0	44
4	60	0	44
5	60	-45	44
6	0	-45	44
7	0	10	44
8	0	10	50

Programme en "G" Code

%2002	(Nom du programme)
N10 G0 G52 X0 Y0 Z0	(Retour à l'origine mesure en vitesse rapide)
N20 M6 T1 D1	(Appel de l'outil n°1 et du correcteur 1 fraise de 5)
N30 X-10 Y-10 Z50	(Déplacement a u point P1)
N40 M3 M41 S1591 M8	(Rotation broche + arrosage)
N50 Z44	(Déplacement au point P2)
N60 G1 Y0 F239	(Déplacement en vitesse travail au point P3)
N70 X60	(Déplacement en vitesse travail au point P4)
N80 Y-45	(Déplacement en vitesse travail au point P5)
N90 X0	(Déplacement en vitesse travail au point P6)
N100 Y10	(Déplacement en vitesse travail au point P7)
N110 G0 Z50 M5 M9	(Déplacement en vitesse rapide au point 8 + arrêt broche et arrêt arrosage)
N120 G52 X0 Y0 Z0	(Retour à l'origine mesure en rapide)
N130 M2	(Fin de programme)

❖ Programmation avec correction de rayon G41

Points	X	Y	Z
1	-10	-10	50
2	-10	-10	44
3	-10	-2,5	44
4	57,5	-2,5	44
5	57,5	-42,5	44
6	2,5	-42,5	44
7	2,5	10	44
8	2,5	10	50

❖ Programme en "G" Code

%2002	(Nom du programme)
N10 G0 G52 X0 Y0 Z0	(Retour à l'origine mesure en vitesse rapide)
N20 M6 T1 D1	(Appel de l'outil n°1 et du correcteur 1 fraise 5)
N30 X-10 Y-10 Z50	(Déplacement a u point P1)
N40 M3 M41 S1591 M8	(Rotation broche + arrosage)
N50 Z44	(Déplacement au point P2)
N60 G1 G41 Y-2.5 F239	(Déplacement en vitesse travail au point P3 avec correction de rayon)
N70 X57.5	(Déplacement en vitesse travail au point P4)
N80 Y-42.5	(Déplacement en vitesse travail au point P5)
N90 X2.5	(Déplacement en vitesse travail au point P6)
N100 Y10	(Déplacement en vitesse travail au point P7)
N110 G0 G40 Z50 M5 M9	(Déplacement en vitesse rapide au point 8 + arrêt broche et arrêt arrosage)
N120 G52 X0 Y0Z0	(Retour à l'origine mesure en rapide)
N130 M2	(Fin de programme).

Fabrication assistée par ordinateur exemples d'usinage

Remarques:

- Ces exemples ne substituent pas les formations et l'utilisation de la documentation Catia
- Le seul objectif recherché est de montrer les quelques fonctions à connaître pour réaliser la plus part des formes simples, employées dans les bureaux d'études.

III.1. Présentation de CATIA

CATIA V5 est un logiciel de CAO 3D volumique et surfacique de nouvelle génération. Il fait appel à des opérations élémentaires paramétriques pour générer les différents objets géométriques, contrairement aux logiciels de la génération précédente qui fonctionnaient strictement à partir d'opérations booléennes (CATIA V4, EUCLID 3).

CATIA V5 est organisé en modules fonctionnels nommés "Ateliers" permettant chacun de créer ou de modifier un type d'objet bien précis.

L'architecture simplifiée de CATIA est résumée par le tableau ci-dessous, Figure III.1. :


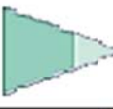
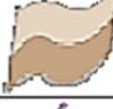
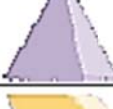

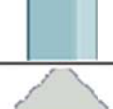
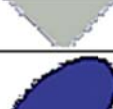

Logos	Nom de l'atelier
	Infrastructure
	Mechanical
	Shape design and styling
	Analysis
	Equipement and systeme engineering
	Plant
	NC Manufacturing
	Product synthesis

Figure III.1. L'architecture simplifiée de CATIA.

III.2. Démarrage de CATIA

Après avoir lancé CATIA, une fenêtre vierge s'ouvre. Pour ouvrir un atelier, cliquer sur: Démarrer et choisir l'atelier voulu dans le sous-menu, Figure III.2.

On peut également ouvrir un fichier (nouveau ou existant) à partir du sous-menu Fichier.

- ❖ CATIA ouvre alors automatiquement l'atelier correspondant au type de fichier.
 - Design. Exemple : un fichier CATPart lance l'atelier Part, Figure III.3.

Sous CATIA, on peut ouvrir plusieurs fichiers (documents) de types différents simultanément. Lorsque l'on passe d'un document à un autre, l'atelier correspondant est activé automatiquement.

Exemple : on peut ouvrir un document **CATPART** et un **CATPRODUCT** dans une même session. Lorsque l'on passe d'un document à l'autre, on active respectivement les ateliers **PART DESIGN** et **ASSEMBLY DESIGN**.

Chaque atelier possède des fonctionnalités qui lui sont propres, utilisables à partir des barres d'outils qui apparaissent dans les zones de menu.

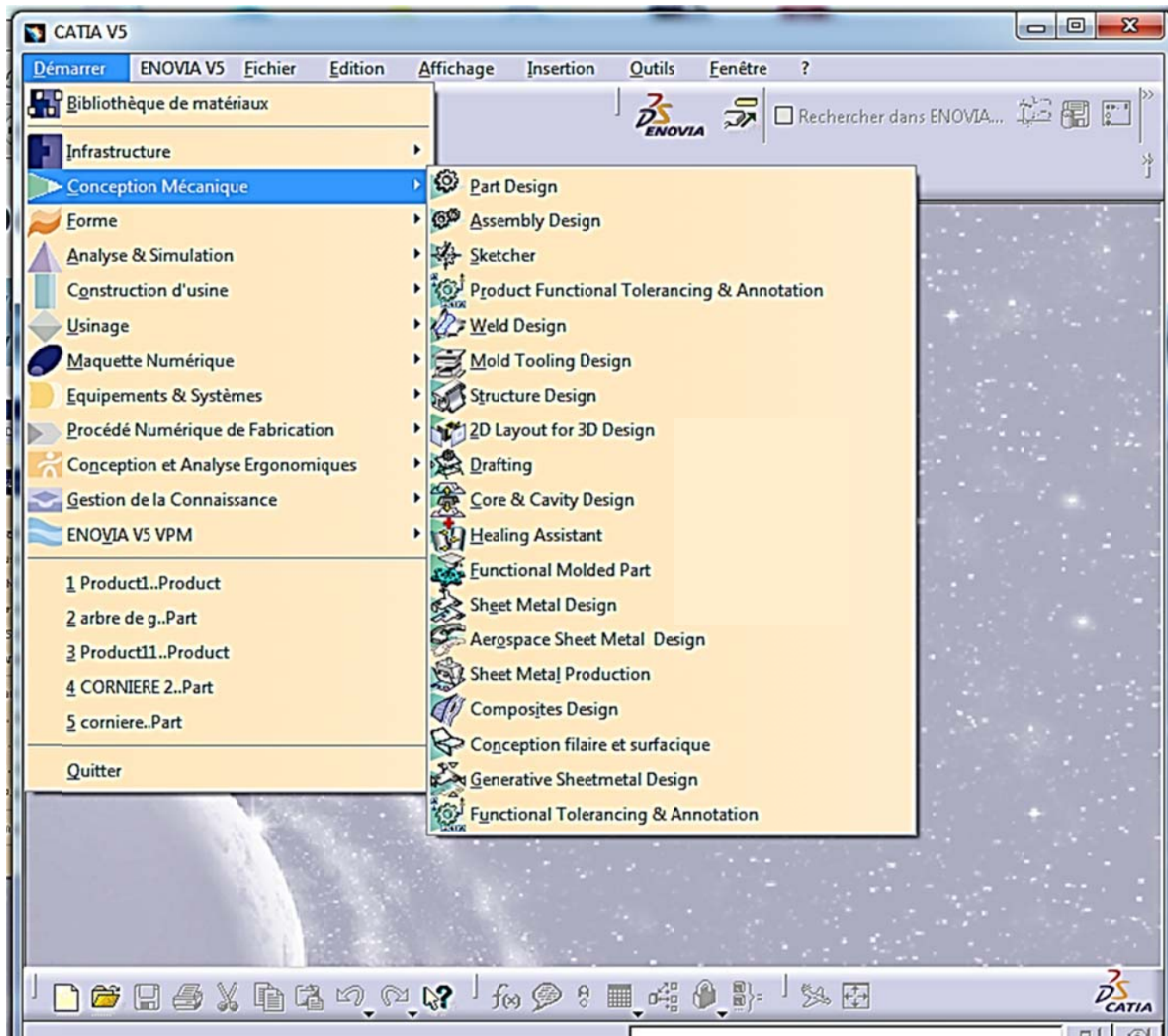


Figure III.2. Interface CATIA.

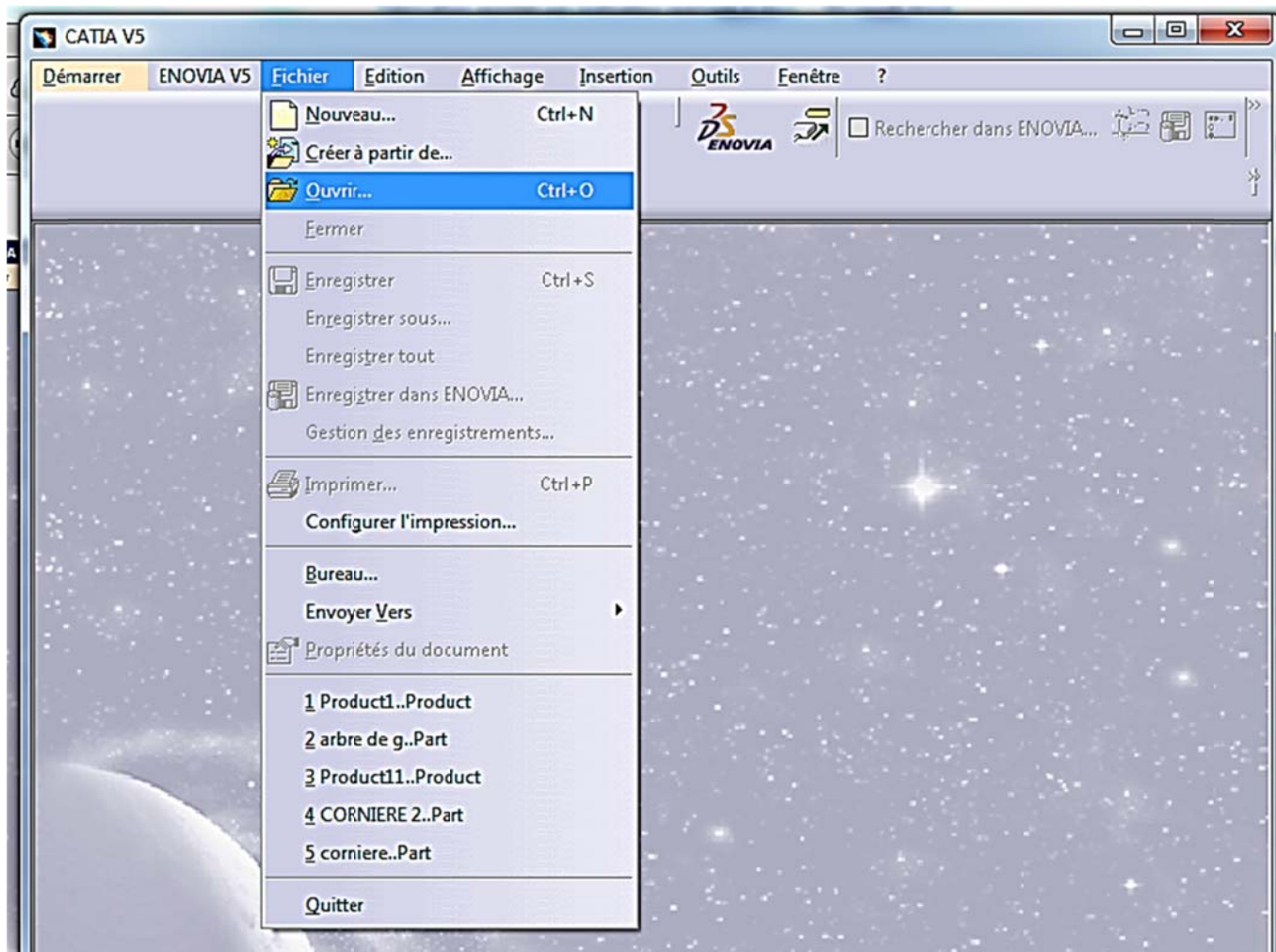


Figure III.3. Relancement d'un fichier CATIA existant.

III.3. Commandes de base

III.3.1. Interface graphique

L'interface CATIA a l'aspect suivant, Figure III.4 :

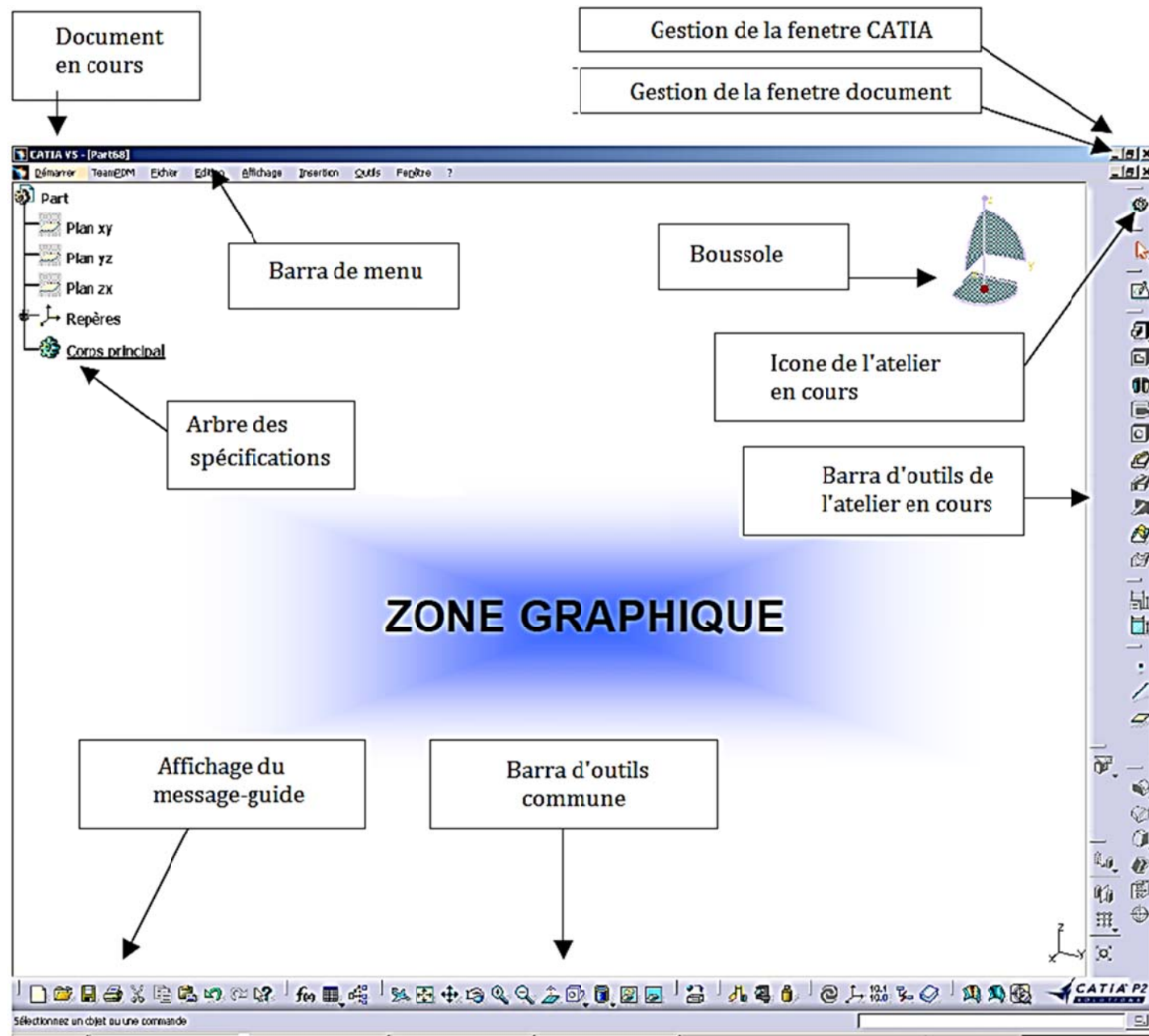


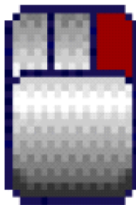


Figure III.4. Répartition des zones de travail sur CATIA.

III.3.2. Interface opérateur

L'utilisation de la souris diffère selon le type d'opération que vous devez effectuer.

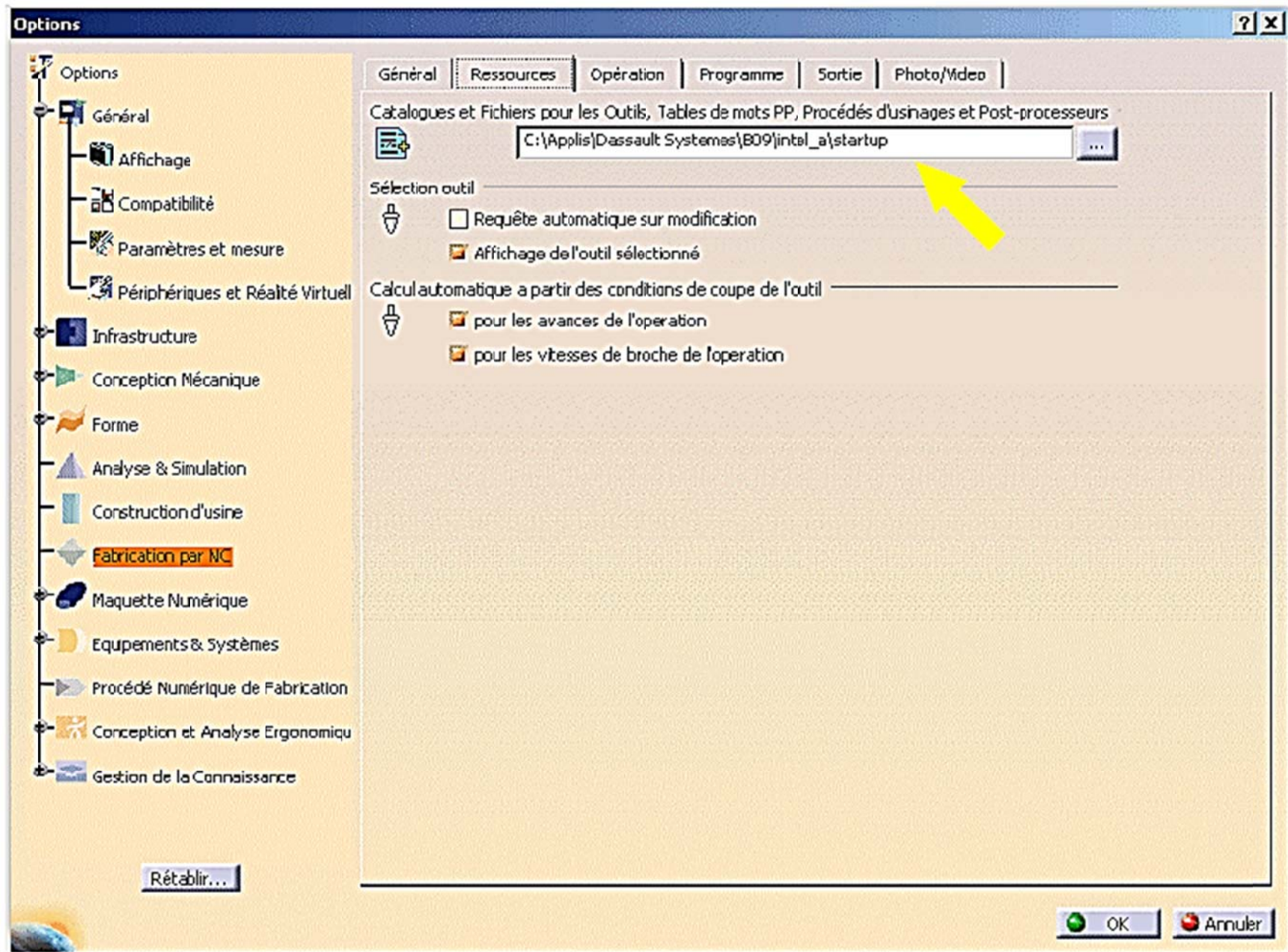
Bouton de la souris	Opération
	Sélectionner (un menu, une commande, une géométrie dans une zone graphique, etc.) . Cliquez (sur une icône, un bouton dans une boîte de dialogue, un onglet, un emplacement sélectionné dans la fenêtre du document etc.) et Double-cliquez. Cliquez en maintenant la touche Maj enfoncée. Cliquez en maintenant la touche Ctrl enfoncée Cocher (une case) Faire glisser la souris Faire glisser (une icône sur un objet, un objet sur un autre)
	Faire glisser la souris Déplacer
	Cliquez à l'aide du bouton droit de la souris (pour sélectionner un menu contextuel)

III.4. Configuration des options et des répertoires

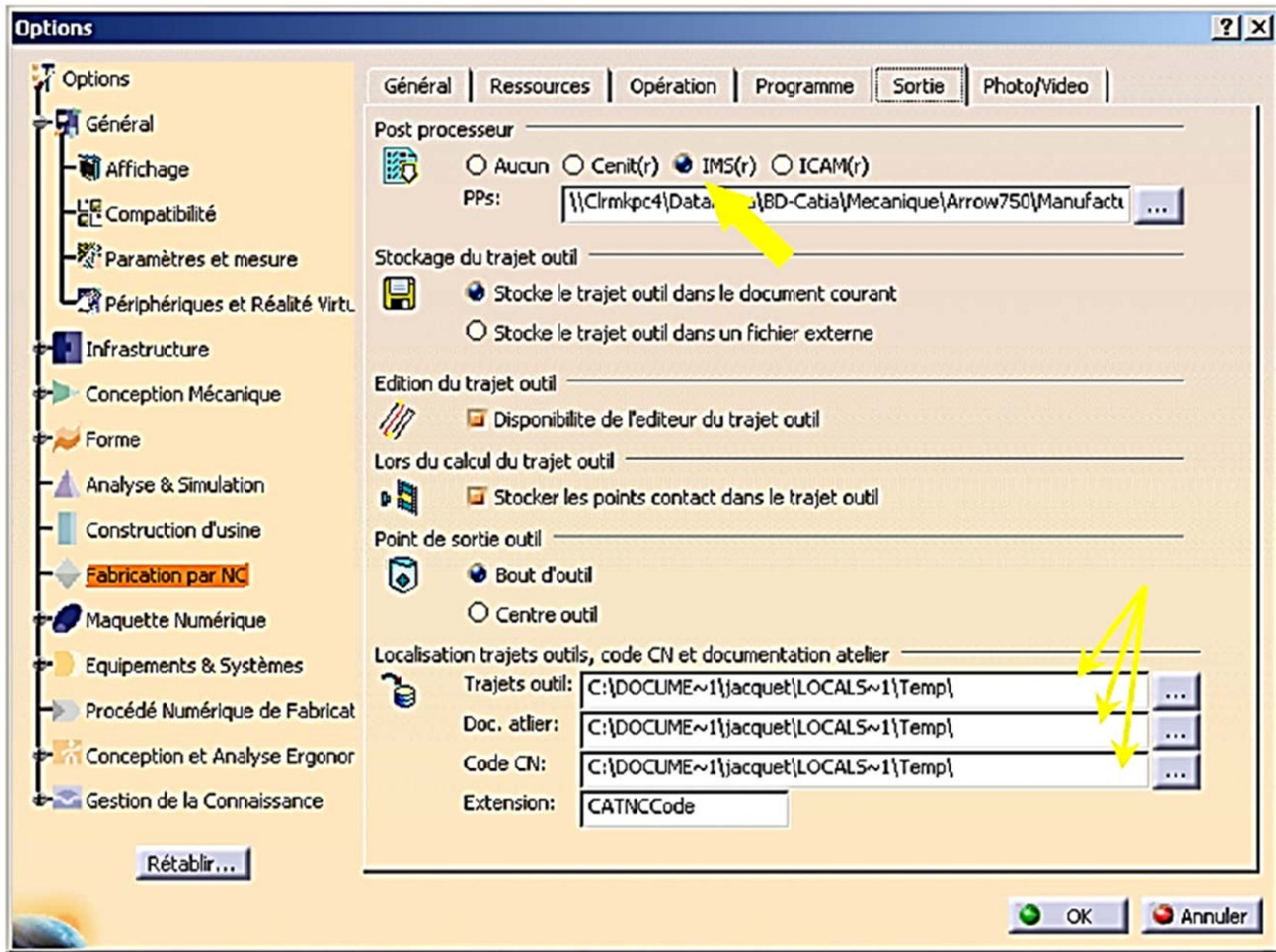
III.4.1. Copie des dossiers CN (dans le cas où le dossier de commande numérique se trouve en bibliothèque).

III.4.2. Modifier les options CATIA

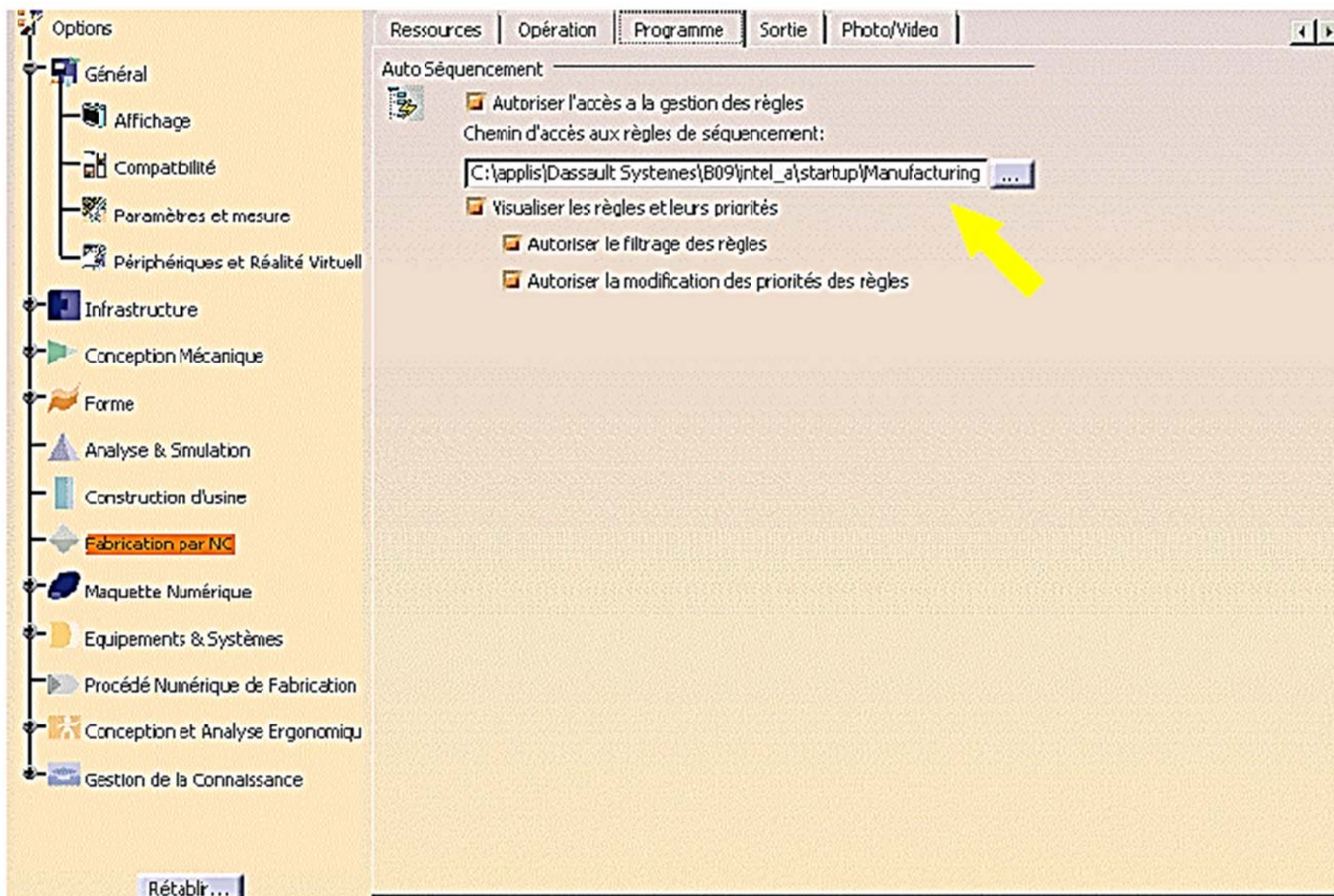
- Ouvrir le menu Outils/Options la fenêtre option s'ouvre.
- Dans la partie gauche de la fenêtre clic sur Fabrication par NC.
- Ouvrir l'onglet Ressources.

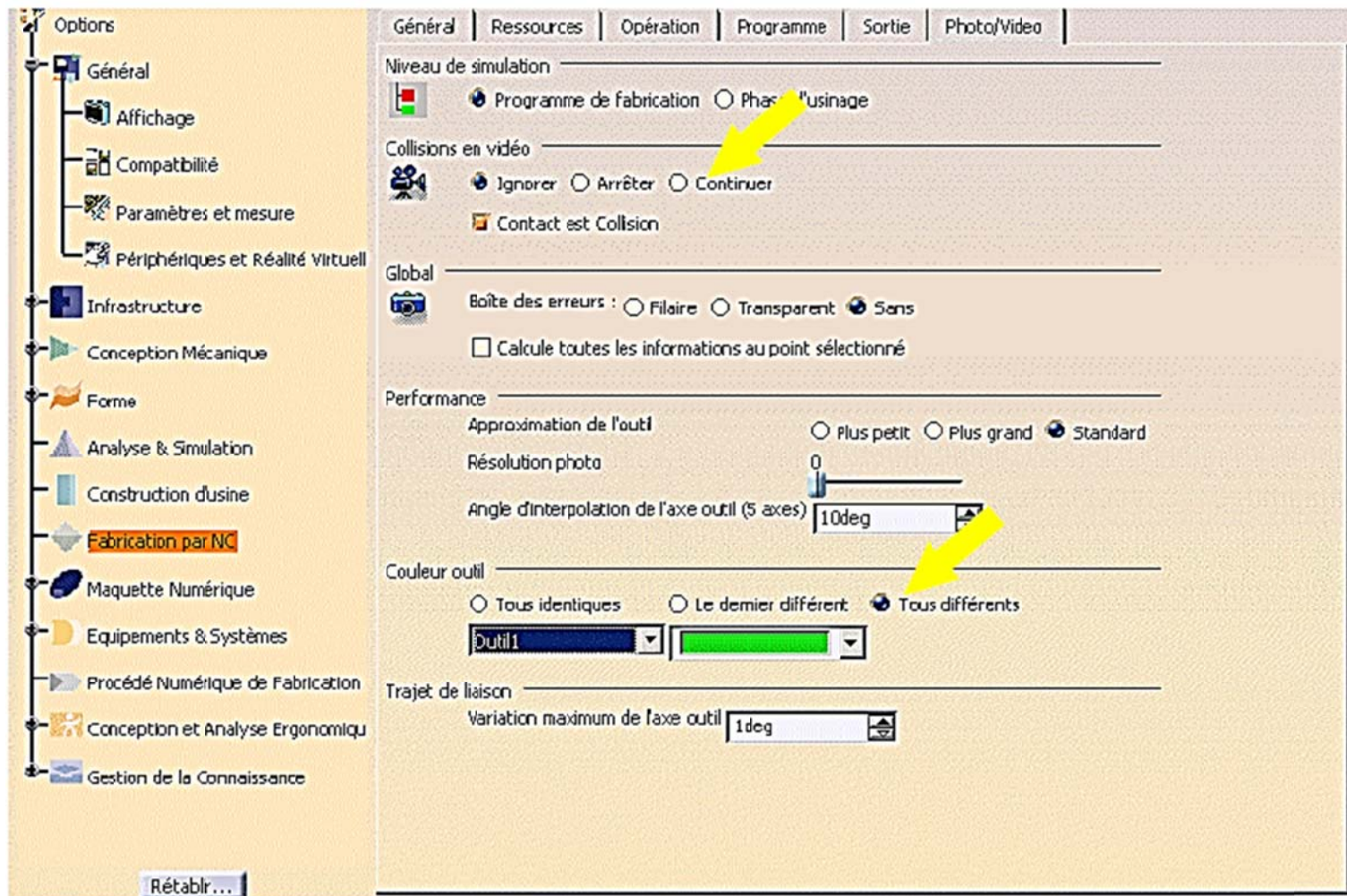


- Modifier l'adresse indiquée par celle du dossier où se trouve, la copie du dossier.
- Ouvrir l'onglet Sortie et cocher la case IMS(r)



- Modifier l'adresse PPs en donnant l'adresse du dossier
- Pour une utilisation prochaine : Ouvrir l'onglet Programme et modifier le chemin d'accès au fichier des règles de séquençement AllSequencingRules.CATProduct.

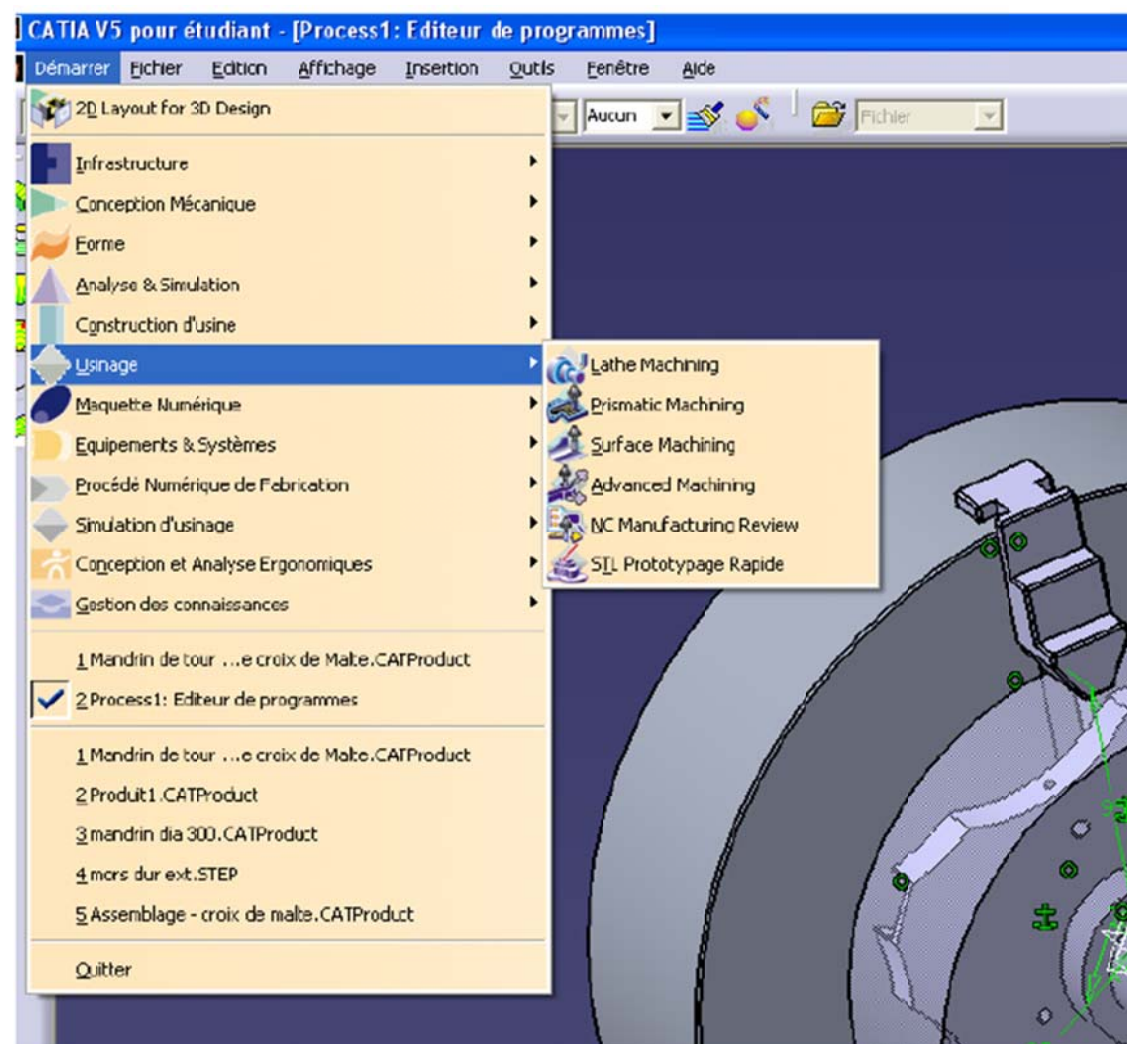




III.5. Creation du programme avec le module de fabrication NC.

III.5.1. Cas de tournage

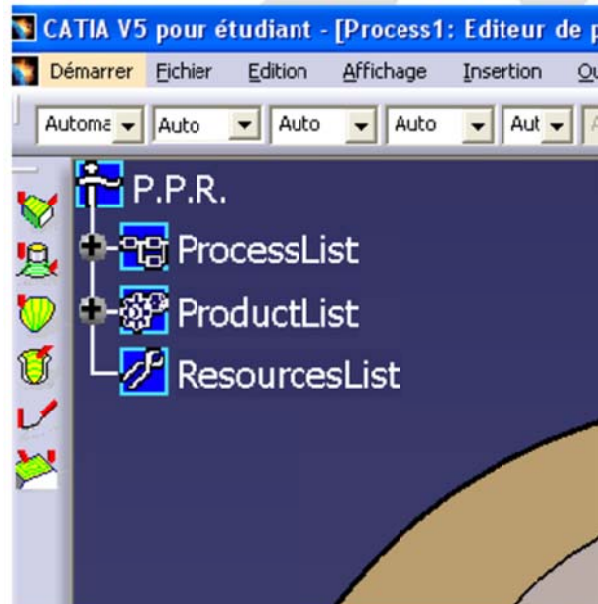
- ❖ **Ouvrir l'atelier Part Design** il faut d'abord ouvrir le module Part design pour rappeler la pièce de démonstrations
- ❖ Vous pouvez aussi très simplement double cliquer sur l'icône du fichier. Nota : le fichier fourni comporte une particularité, la pièce est composée d'un corps principal et d'un brute. Ce brut permettra par la suite de réaliser des simulations graphiques pour les cycles d'usinage.
- ❖ **ouvrir l'atelier lathe Machining**
Lorsque vous avez réalisé et sauvegardé un assemblage, vous pouvez commencer votre usinage. Pour cela, sélectionnez dans l'atelier Usinage, le mode d'Usinage approprié.





L'icône de l'atelier a évolué et l'arbre des spécifications est composé de 3 sous-ensembles :

- ❖ ProcessList : paramétrage du parcours d'outils
- ❖ ProductList : assemblage d'objets
- ❖ RessourcesList : machines et outils utilisés



Avant de commencer toute opération, vous devez paramétrer votre environnement de travail: machine, pièce brute, pièce finie, etc.

Pour cela, double cliquez sur Phase d'usinage. Une fenêtre de paramétrage s'ouvre. Laissez glisser votre souris sur les différentes icônes afin de visualiser les fonctions des boutons.



III.5.1.1. Paramétrage machine

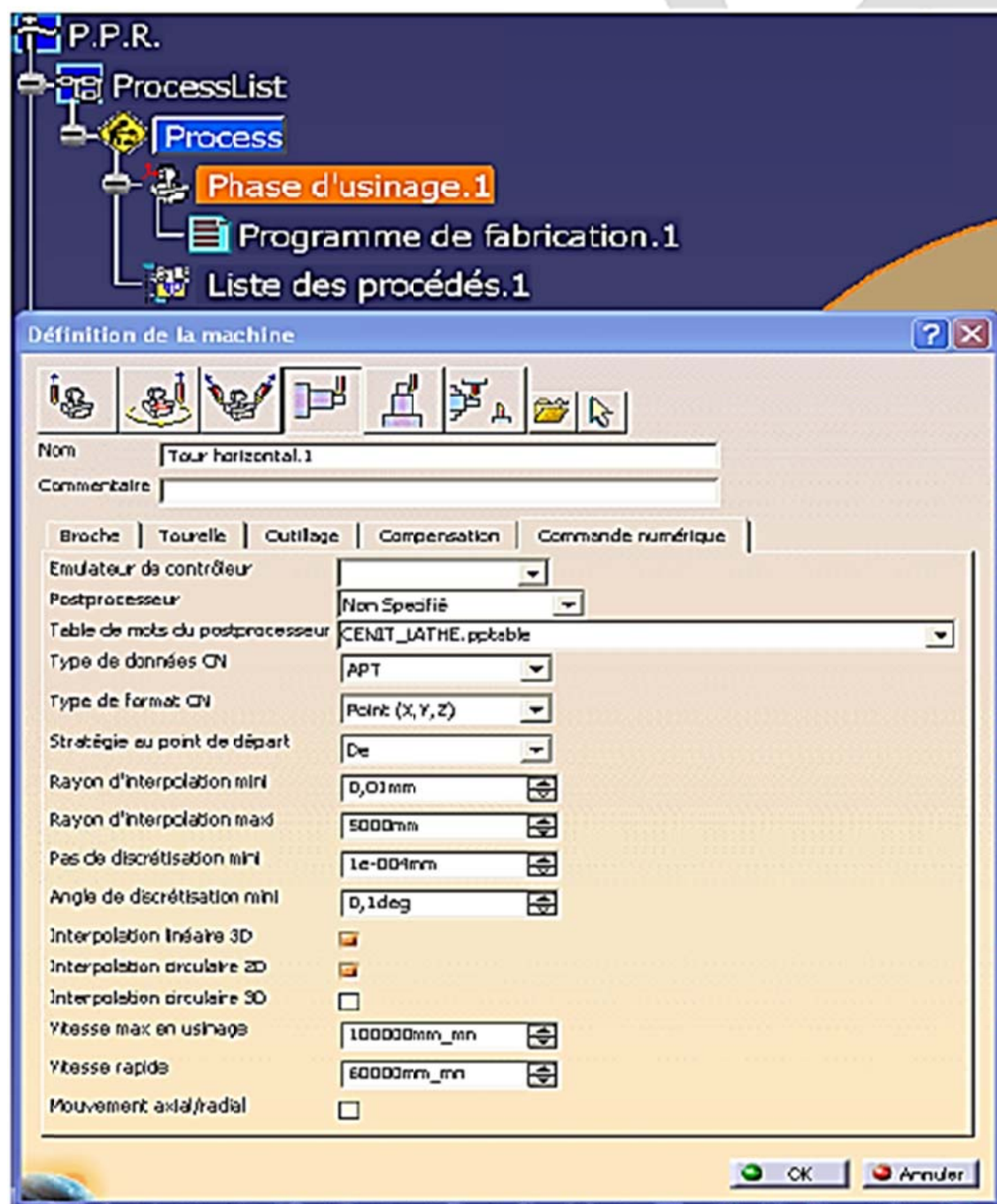
Paramétrez la machine comme suite

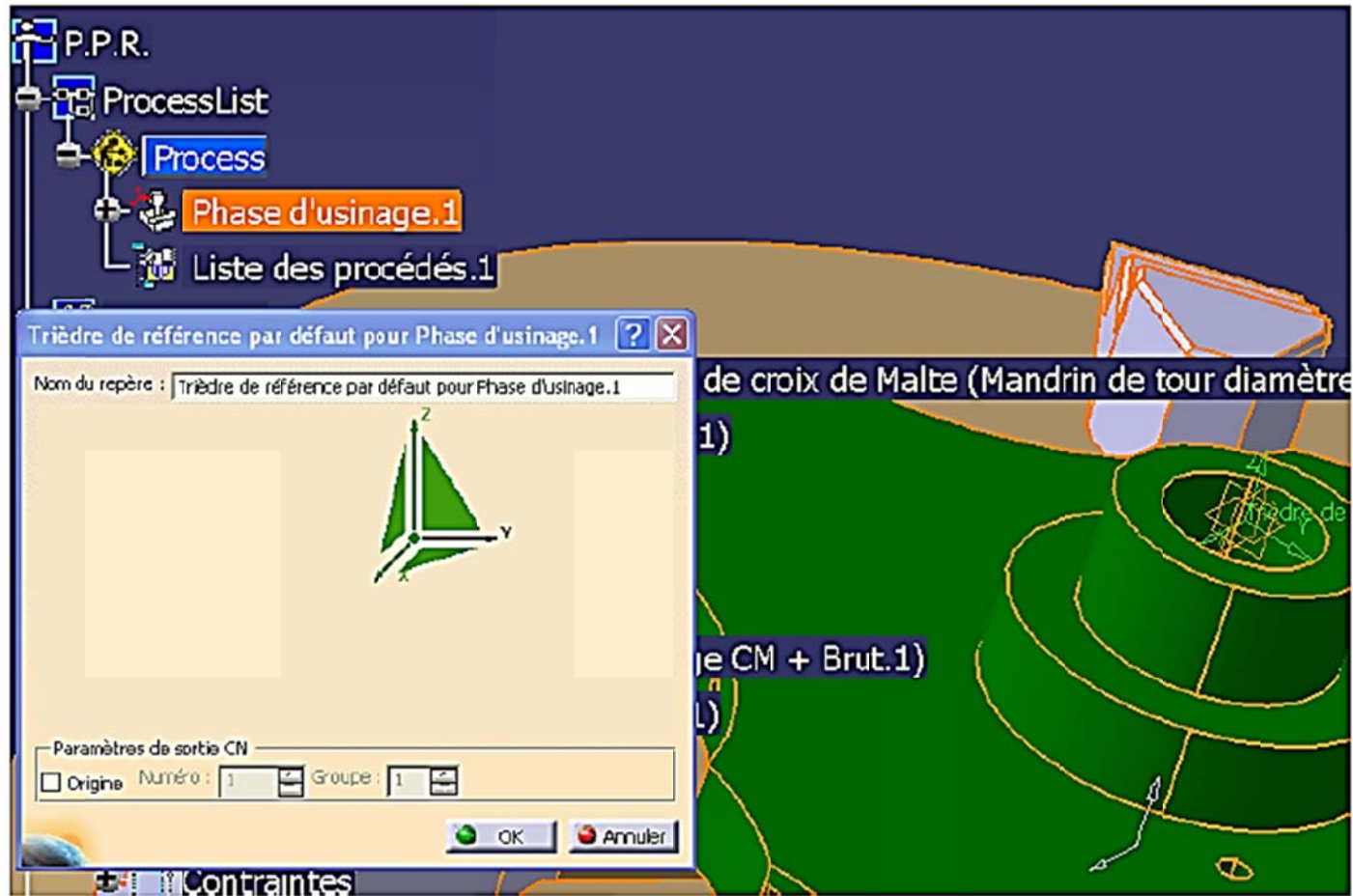
- ❖ Le Postprocesseur
- ❖ La Table de mots du postprocesseur
- ❖ Le Type de données CN

III.5.1.2. Paramétrage repère

Paramétrez le trièdre d'usinage de référence

- ❖ Cliquez le centre du trièdre et placez-le à l'endroit désiré.
- ❖ Le centre du trièdre sera l'origine programme
- ❖ Veillez à respecter le sens des axes x,y et z. Vous pouvez changer les orientations en cliquant sur l'axe du trièdre présent dans la fenêtre de paramétrage.





III.5.1.3. Rappel du produit utilisé

Cliquez l'icône et double cliquez le produit modélisé pour définir les fichiers utilisés lors de la simulation d'usinage:

- 1- pièce modélisée
- 2- pièce brute
- 3- environnement de travail (utilisez la touche Ctrl pour sélectionner plusieurs éléments)
- 4- Sélectionnez le plan de sécurité

The screenshot shows the 'Phase d'usinage' dialog box with the following fields: 'Nom : Phase d'usinage.1', 'Commentaires : Aucune Description', 'Aucune sélection', and 'Trièdre de référence par défaut pour Phase d'usinage'. Below these are tabs for 'Géométrie', 'Position', 'Simulation', and 'Option'. The 'Géométrie' tab is active, showing a list of items: 'Mandrin de tour diamètre 300 et brut de croix de Malte/Asse...', 'Mandrin de tour diamètre 300 et brut de croix de Malte/Asse...', '4 Plans sélectionnés (uniquement pour simulation) : 1- (M...', '1 plan de sécurité sélectionné', 'Aucune sélection', 'Aucune sélection', and 'Aucune sélection'. Annotations with arrows point to these items, corresponding to the list in the previous block. A warning box at the bottom states: 'Validez le paramétrage par OK. Attention, si vous fermez la fenêtre sans validé votre paramétrage, vos données ne seront pas prises en compte.'

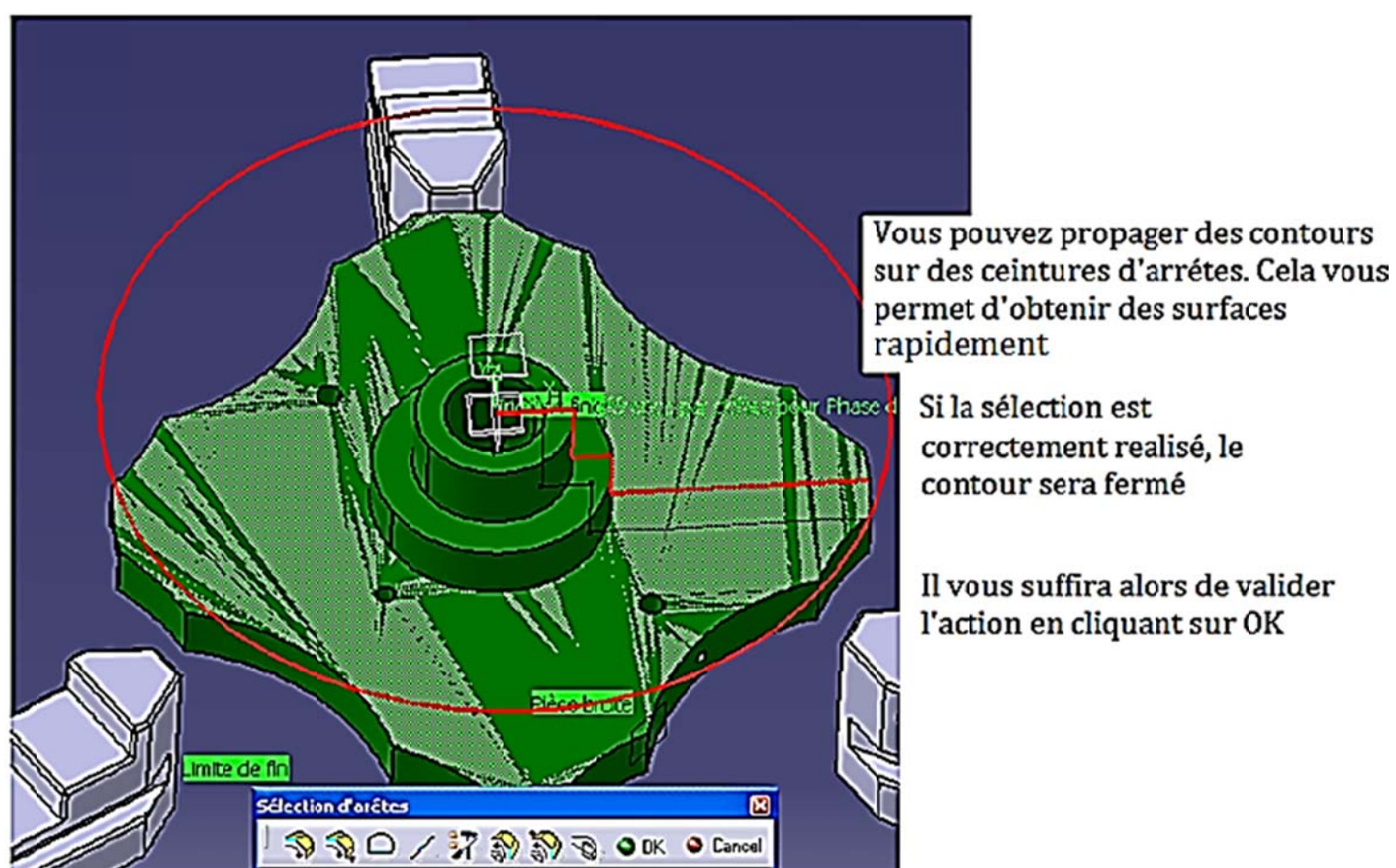
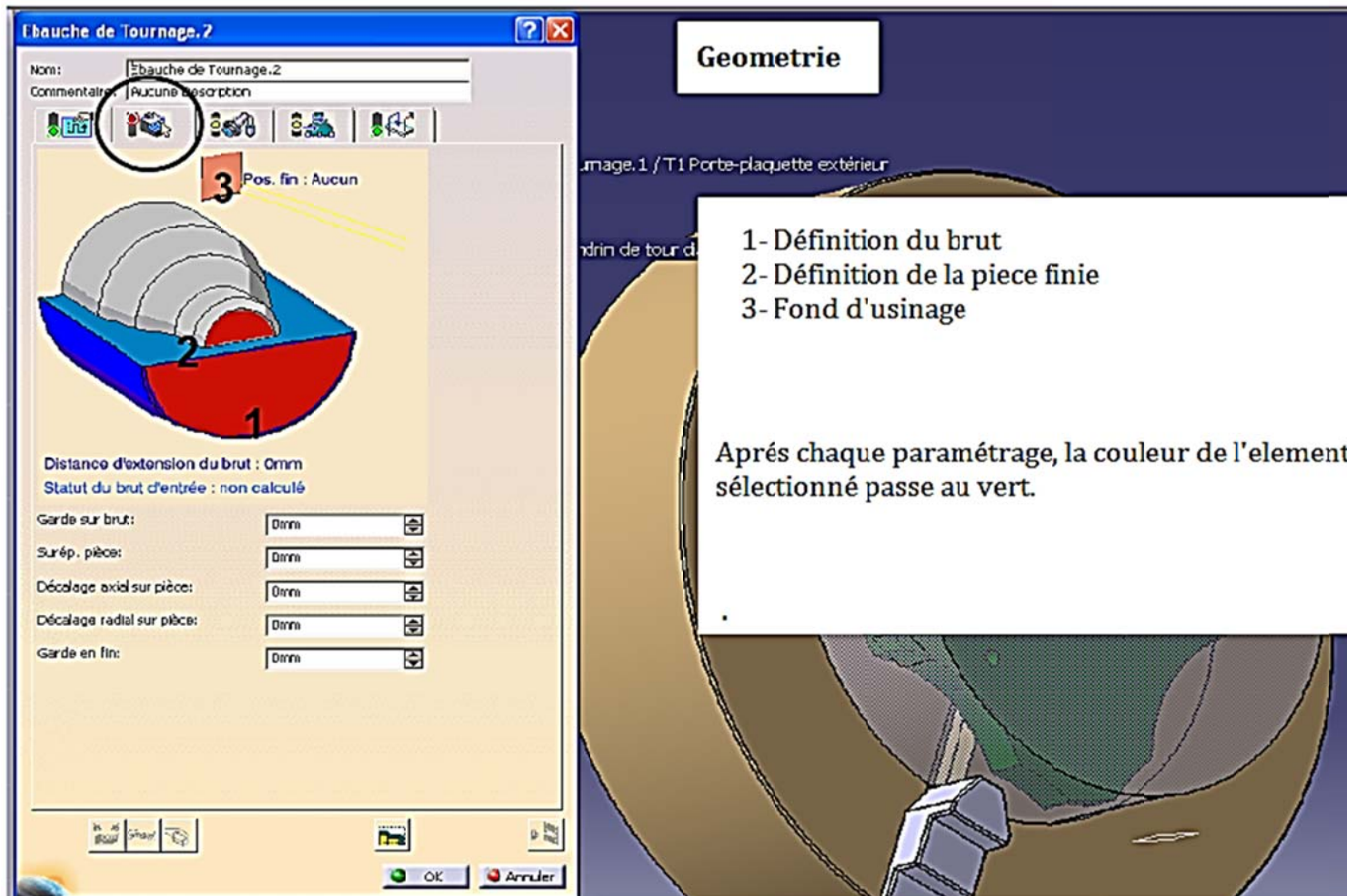
Validez le paramétrage par OK. Attention, si vous fermez la fenêtre sans avoir validé votre paramétrage, vos données ne seront pas prises en compte.

III.5.1.4. Operations d'usinage

- ❖ Après avoir paramétré votre Phase d'usinage, cliquez une fois sur Programme de fabrication (dans l'arbre des spécifications) et sélectionnez l'icône d'usinage adéquat.
- ❖ Ici, cliquez sur « Ebauche de tournage », première opération de la première phase d'usinage.
- ❖ Une fenêtre comportant 5 onglets apparaît. Ce sera le cas pour chaque opération d'usinage.
- ❖ Faites glisser votre souris sur les éléments présents dans les différentes fenêtres et observez les messages.

Pour sélectionner les différents éléments de l'assemblage (fini, brut, etc.), utilisez la fonction « cacher/afficher » en pointant la souris sur l'élément présent dans l'arbre des spécification/clic droit. N'oubliez pas que vous utilisez l'environnement Windows...

III.5.1.5. Paramétrage Géométrique



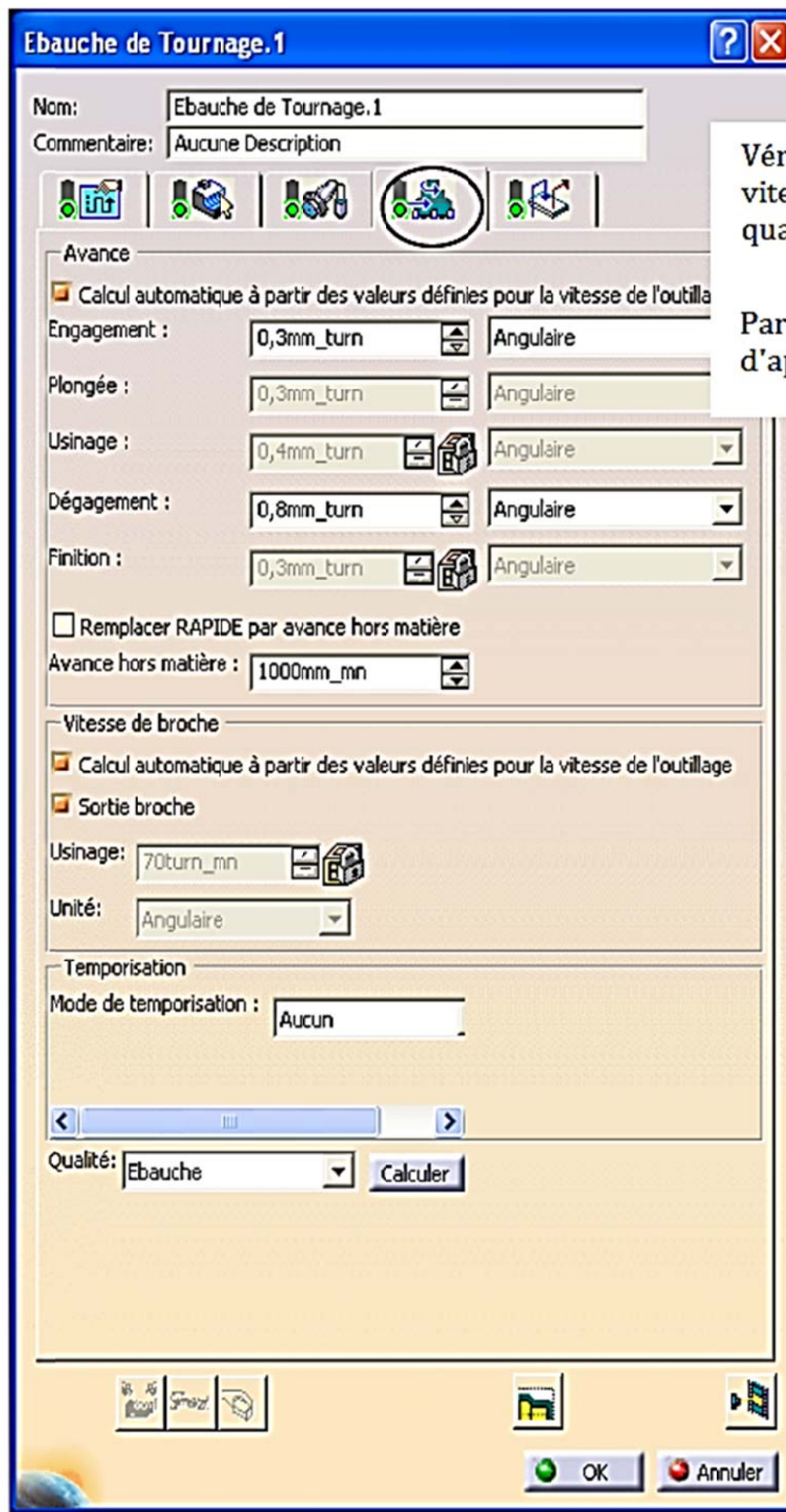
III.5.1.6. Paramétrage de l'outil

1- Choisissez le type d'outil
2- Entrez son nom et son numéro puis renseignez les caractéristiques de la page de droite

L'onglet "compensation" permet d'utiliser les paramètres outils, enregistrés dans la base de données de la MOCN

Par défaut nous prendrons la compensation P3 et lui attribuerons le n° de l'outil utilisé

III.5.1.7. Paramétrage cinématique



Vitesse

Vérifiez la cohérence des vitesses paramétrées et la qualité d'usinage

Paramétrez les vitesses d'approche et de retrait



III.5.1.8. Paramétrage de la stratégie

Ebauche de Tournage.1

Nom: Ebauche de Tournage.1
Commentaire: Aucune Description

Stratégie | Option

Stock
Part
Prof. coupe max. : 3mm

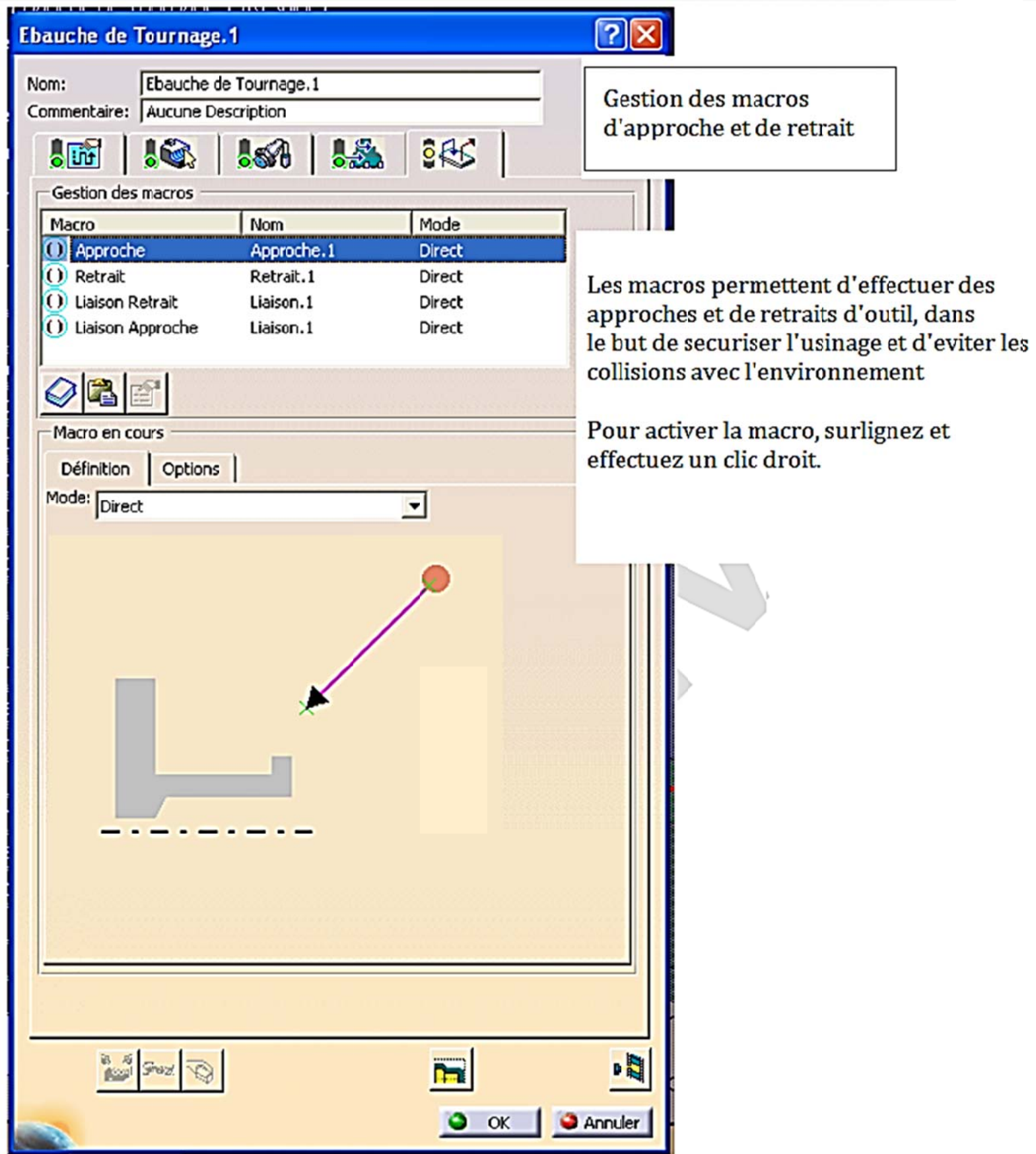
Mode d'ébauche: Chariotage
Orientation: Externe
Localisation: Avant
Direction d'usinage: Vers les mors
Contournage: Non
 Défonçage
 Usinage en dessous de l'axe broche
Compensation d'outil: P3

OK Annuler

Strategie

- 1- Choisissez le mode d'usinage en respectant les règles de fabrication
- 2- Vérifiez la compensation d'outil
- 3- Cliquer sur permet d'obtenir des informations sur le paramétrage

III.5.1.9. Gestion des Macros d'approche et retrait

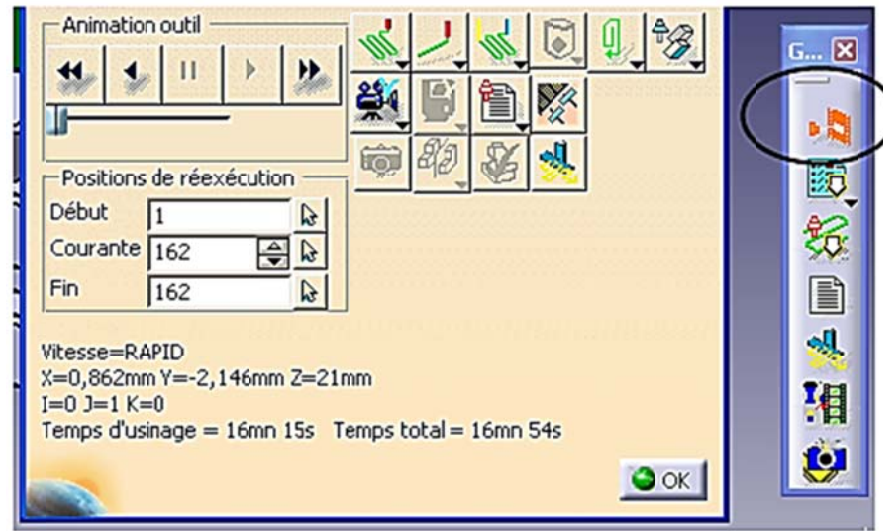


Une fois l'ébauche effectuée, réalisez la finition et un perçage de votre pièce pour prévoir une reprise de référence lors des autres phases d'usinage.

III.5.1.10. Simulation de l'opération d'usinage

Pour simuler l'opération d'usinage, tous les onglets vus précédemment doivent être passés au vert. Ensuite, cliquez sur l'icône située en bas à droite de la fenêtre de paramétrage que vous retrouvez dans les barres d'outils.





1- Sélectionnez le mode plusieurs couleurs. Cela vous permettra de visualiser les macros d'approche et retrait.



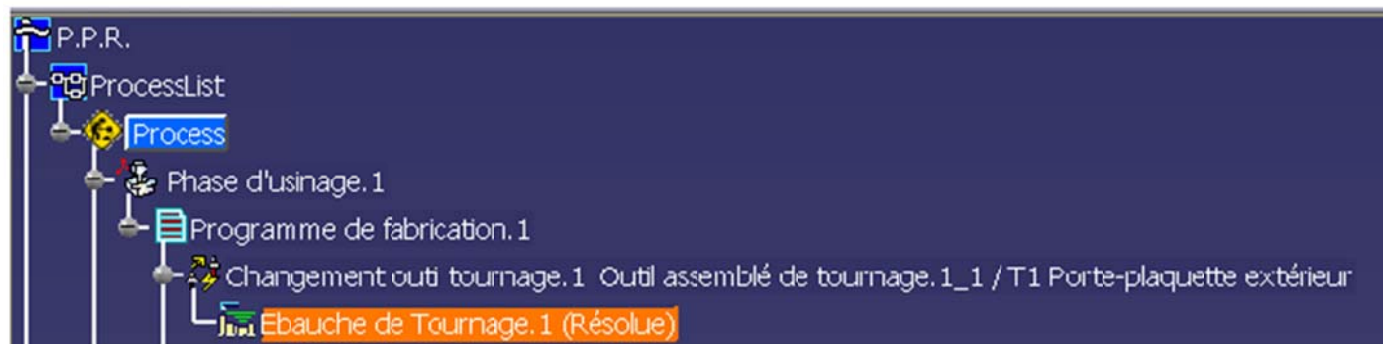
2- Sélectionnez le mode déroulement continu du trajet outil. (Continuous tool path display mode).



3- Sélectionnez le mode vidéo complète. (Full video mode).



4- Ensuite lancez la lecture. (Then start playback).



Votre première opération est réalisée. Si vous constatez une anomalie, vérifiez votre paramétrage. Sinon, passez à la seconde.

Pour lancer une deuxième opération d'usinage, veillez à surligner la première avant de cliquer sur une action d'usinage. Ceci afin de positionner correctement l'action dans l'arbre des spécifications.

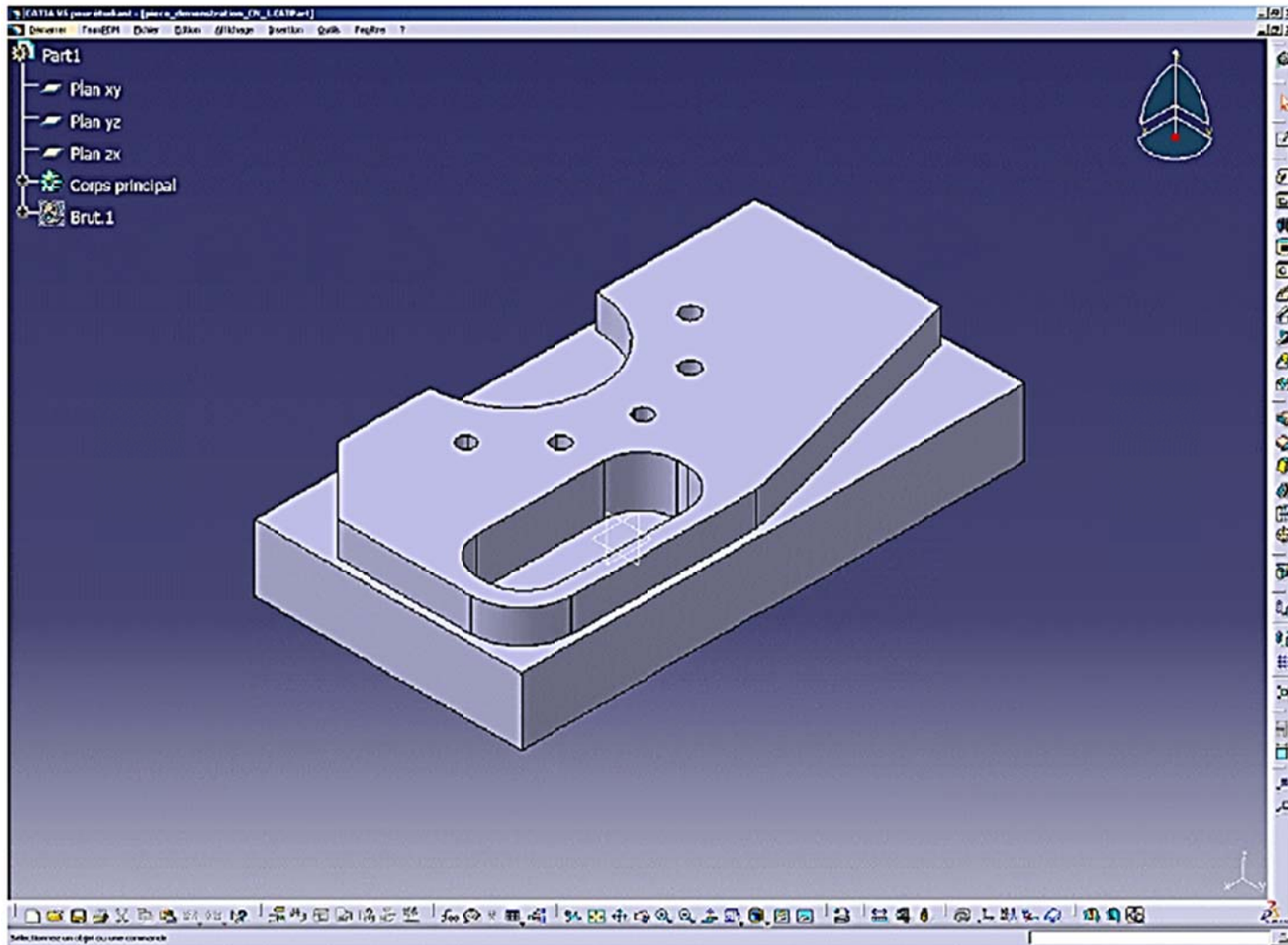
III.5.2. Cas de fraisage

III.5.2. 1. Ouvrir l'atelier Part Design

Il faut d'abord ouvrir le module Part design pour rappeler la pièce de démonstration

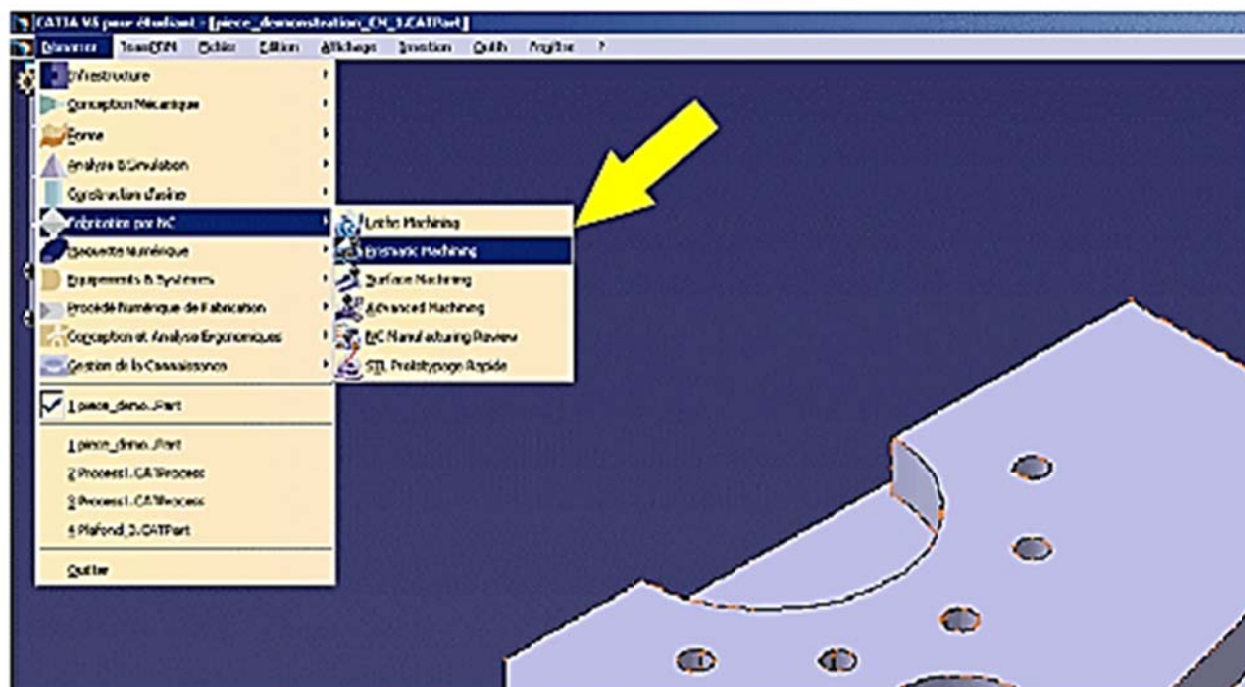
 piece_demonstration_CN_1.CATPart

Vous pouvez aussi très simplement double cliquer sur l'icône du fichier. Nota : le fichier fourni comporte une particularité, la pièce est composée d'un corps principal et d'un brute. Ce brut permettra par la suite de réaliser des simulations graphiques pour les cycles d'usinage.



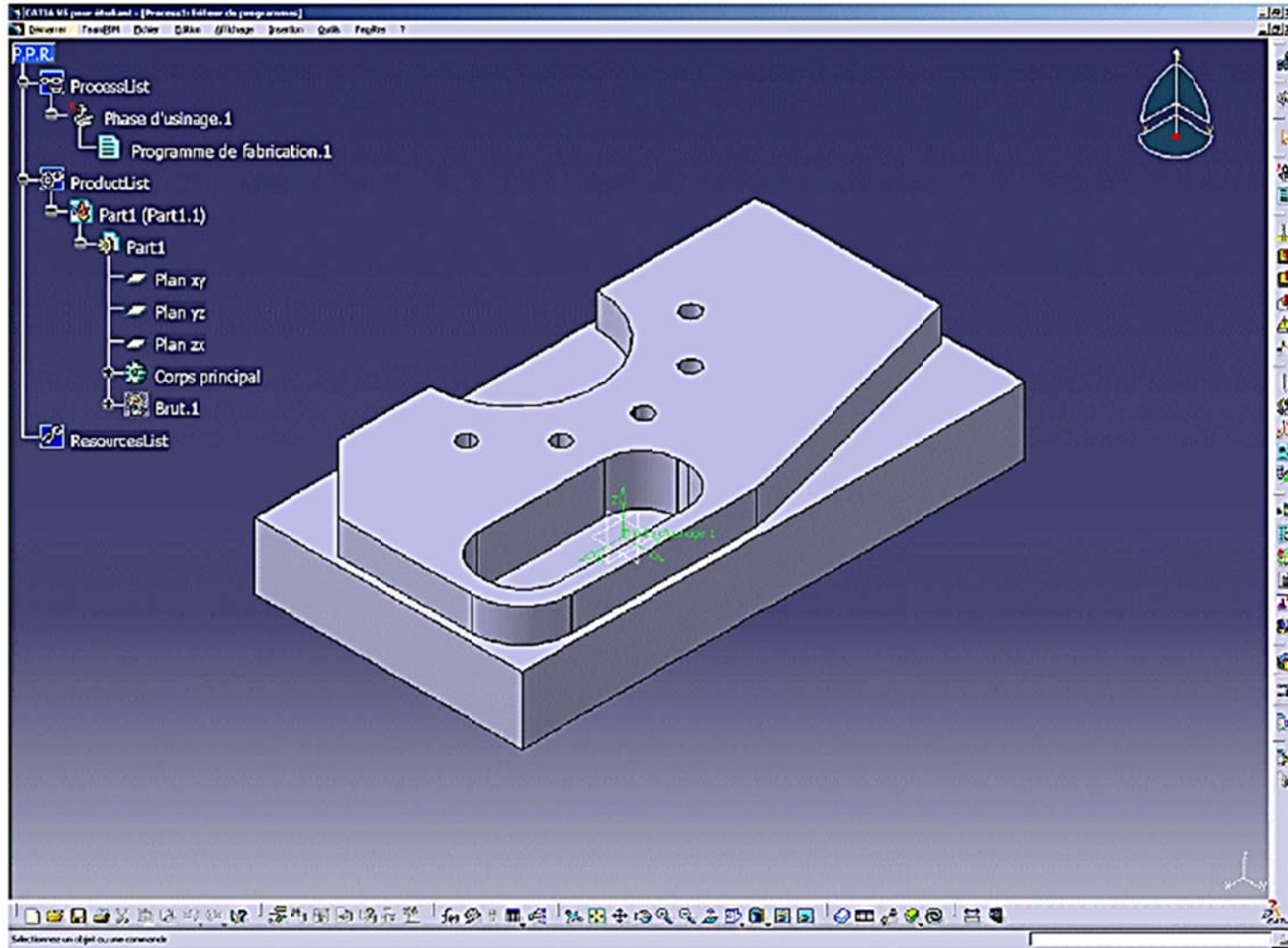
III.5.2. 2. Ouvrir l'atelier Prismatic Machining

Il cliquer sur l'icône de l'atelier "fabrication par NC"  puis l'icône du module fraisage 2,5 axes  comme d'écrit sur l'image suivante.




Vous voici dans l'atelier Prismatic Machining (atelier de fraisage 2,5 axes de CATIA V5).

Vous êtes prêt à commencer une gamme d'usinage. (Cela est bien évidemment possible car le logiciel a déjà tout un certain nombres de paramètres prés établies).

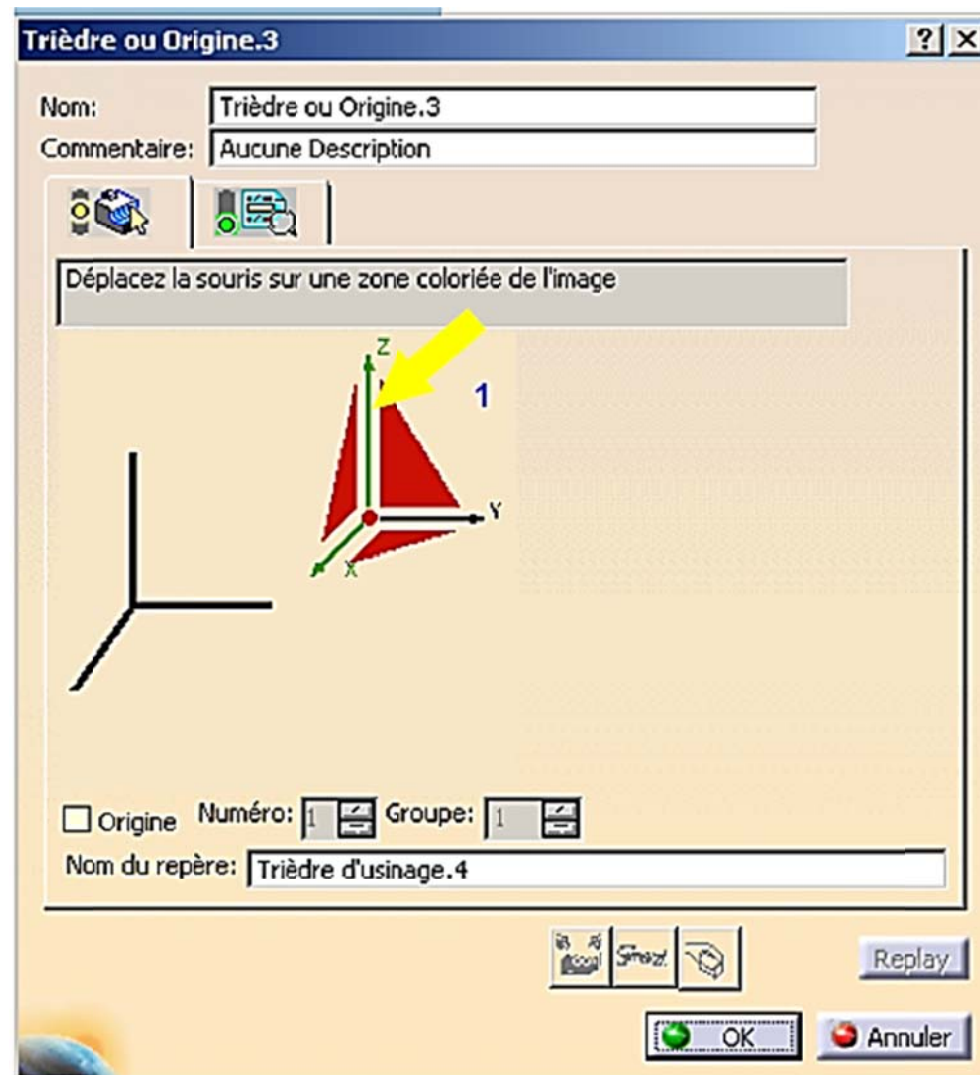


III.5.2. 3. Modification Trièdre d'usinage(si mal positionner)

Si les axes du trièdre, ne corresponde pas a votre gamme d'usinage (axe du montage, axe de la machine, ...)

Supprimer le trièdre existant (par un simple clic droit /supprimer), puis cliquer sur l'icône  (trièdre d'usinage ou origine.).

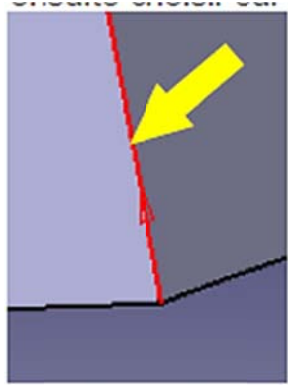
La fenêtre suivante s'ouvre:



Cliquer sur l'axe Z (indice 1), la fenêtre suivante s'ouvre.



Ensuite choisir sur la pièce l'arête OU l'axe parallèle à l'axe Z que l'on veut obtenir.

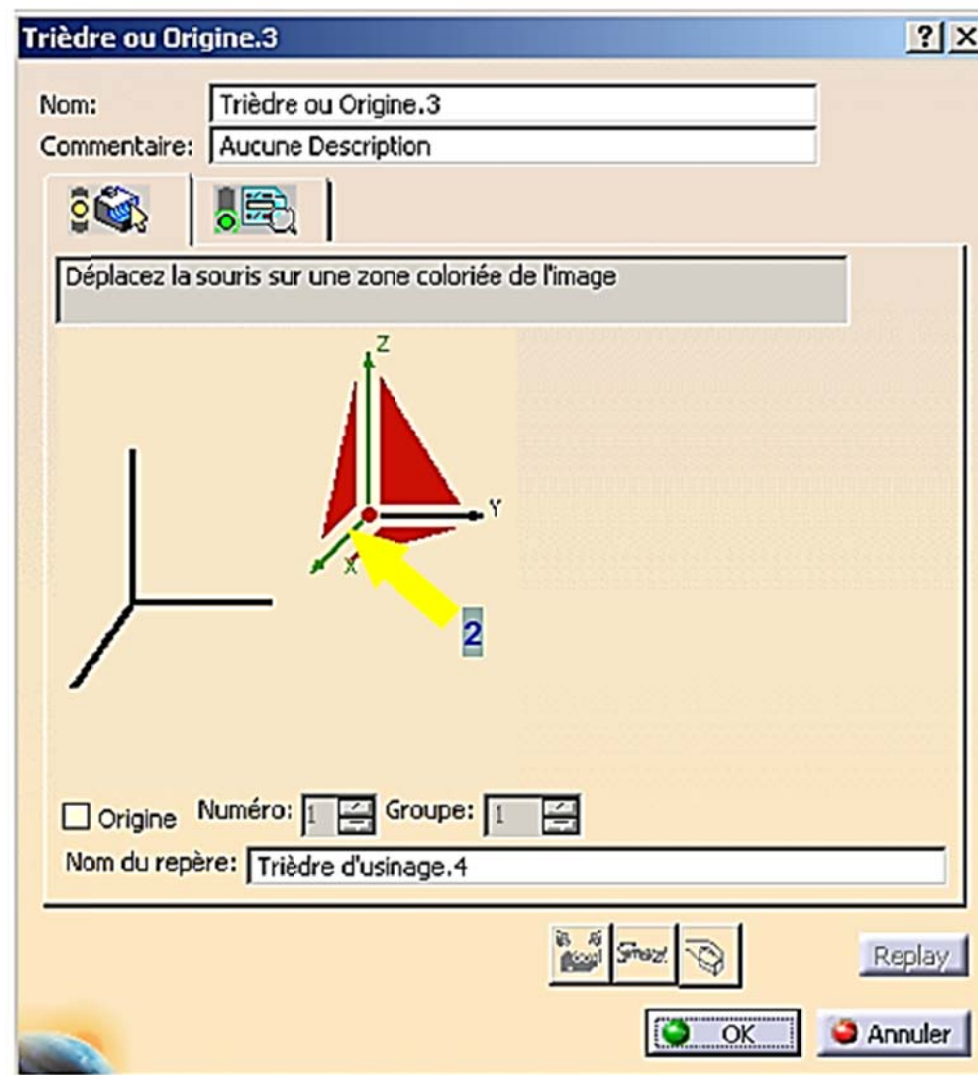


Remarque:

Ne pas oublier de choisir le sens de l'axe, en cliquant sur la petite flèche se trouvant sur la pièce ou sur le bouton **Inversion direction**.

Cliquer sur **OK**


La fenêtre suivante s'ouvre à nouveau :



Recommencer l'opération avec l'axe X (indice 2), de la même manière.







Votre trièdre d'usinage est en place.

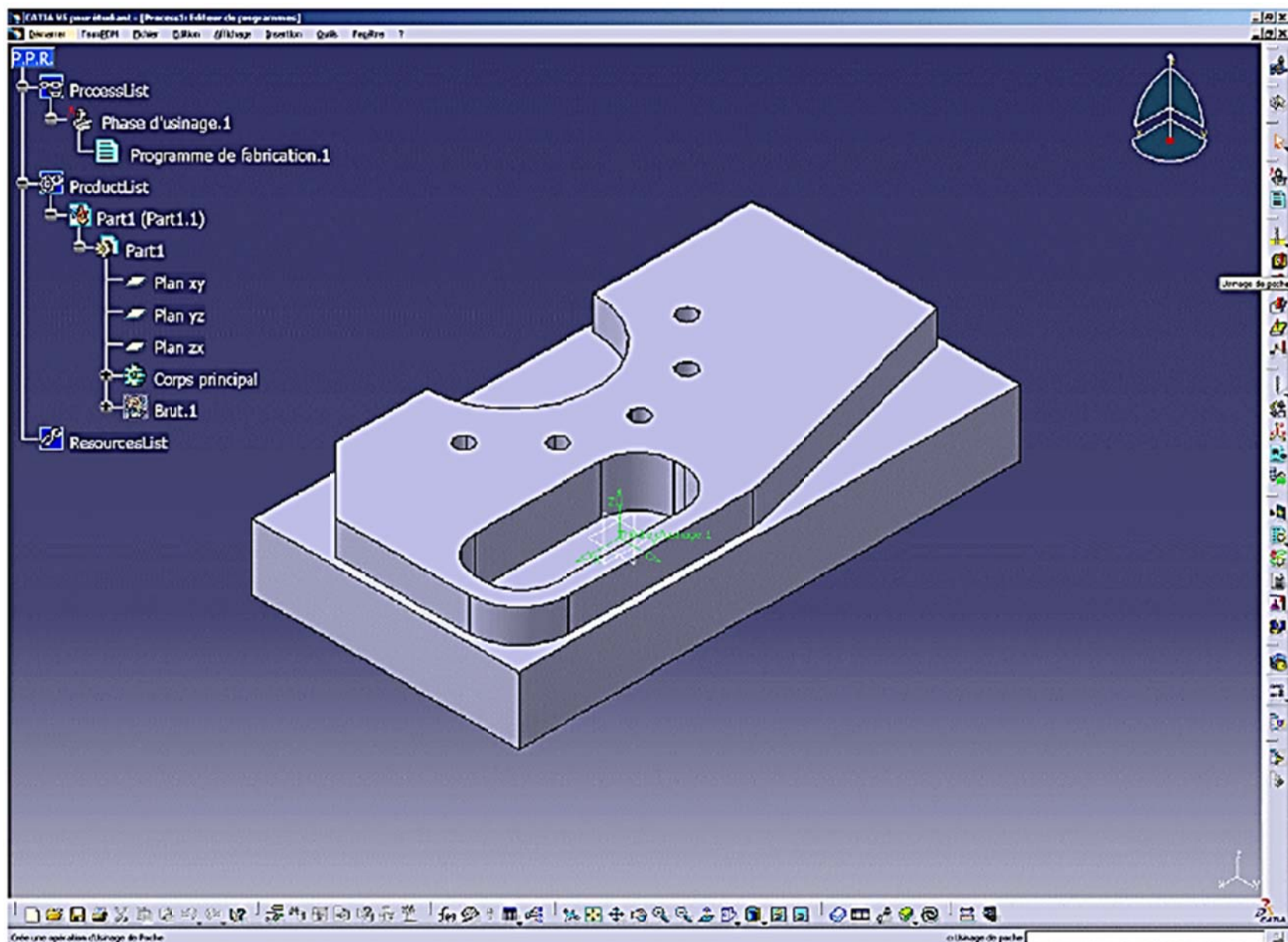
III.5.2. 4. Créé un cycle de poche

Sélectionner le cycle Usinage de poche  parmi les différents cycles disponibles avec le module de fraisage 2,5 axes de CATIA V5 (ou dans le menu CATIA : insertion/opération d'usinage/usinage poche).

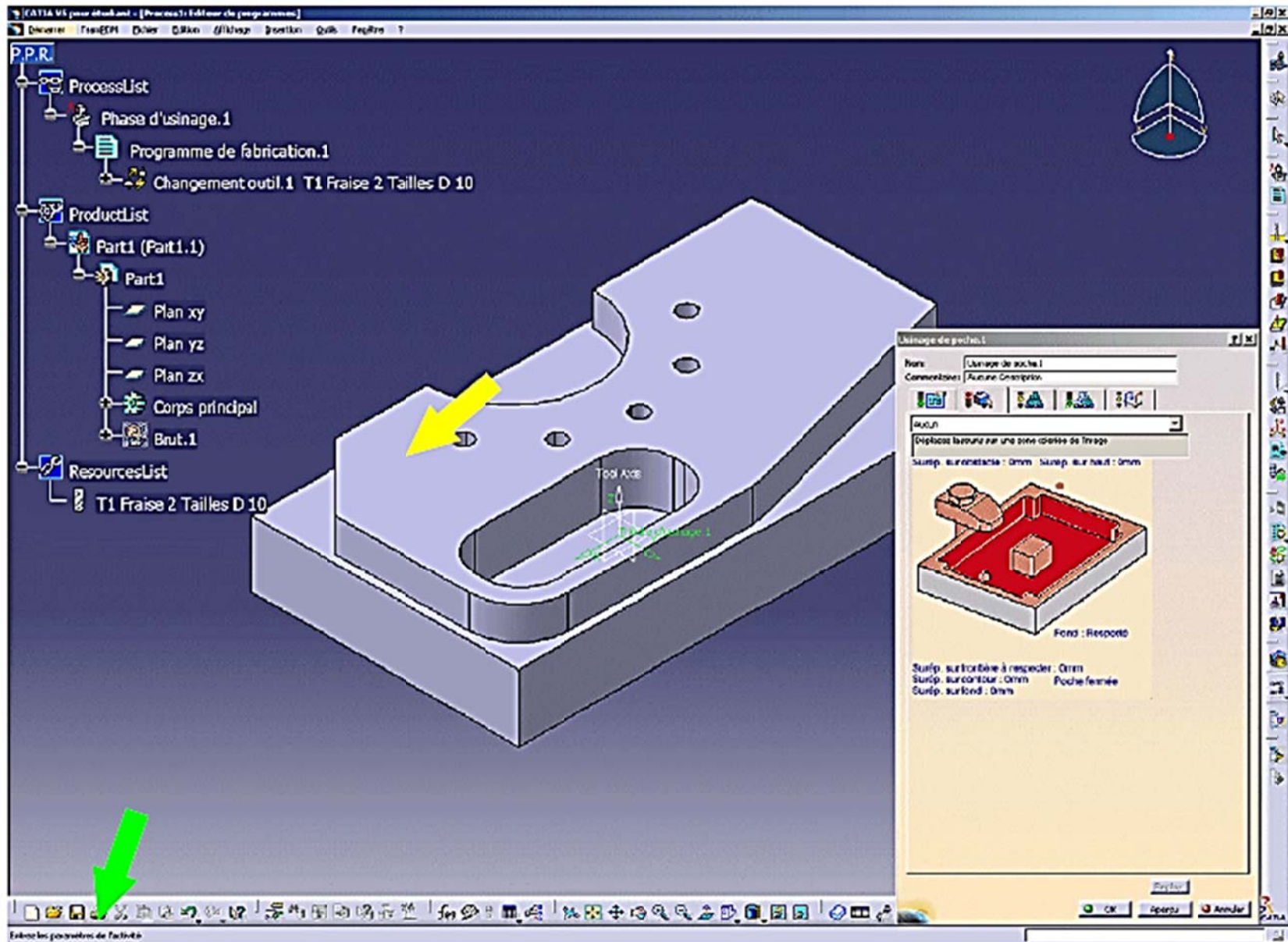


Voici les différents icônes réservés pour la création et l'édition des opérations de fraisage 2.5 axes.






-  Création d'opération axial
-  Création d'un cycle de poche
-  Création d'un cycle de surfacage
-  Création d'un cycle de contourage
-  Création d'un cycle de contourage (suivie de courbe)
-  Création d'un cycle point à point



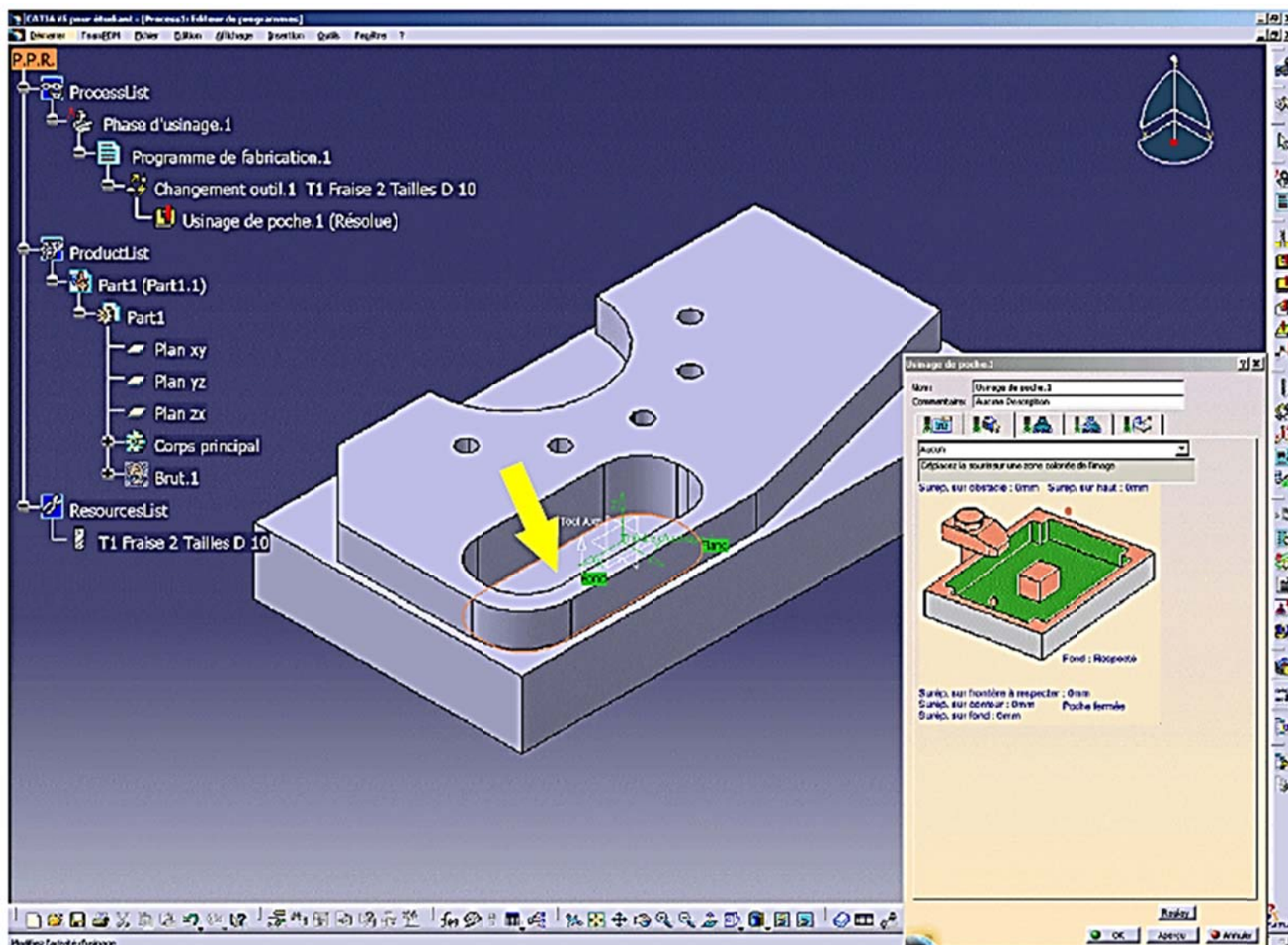
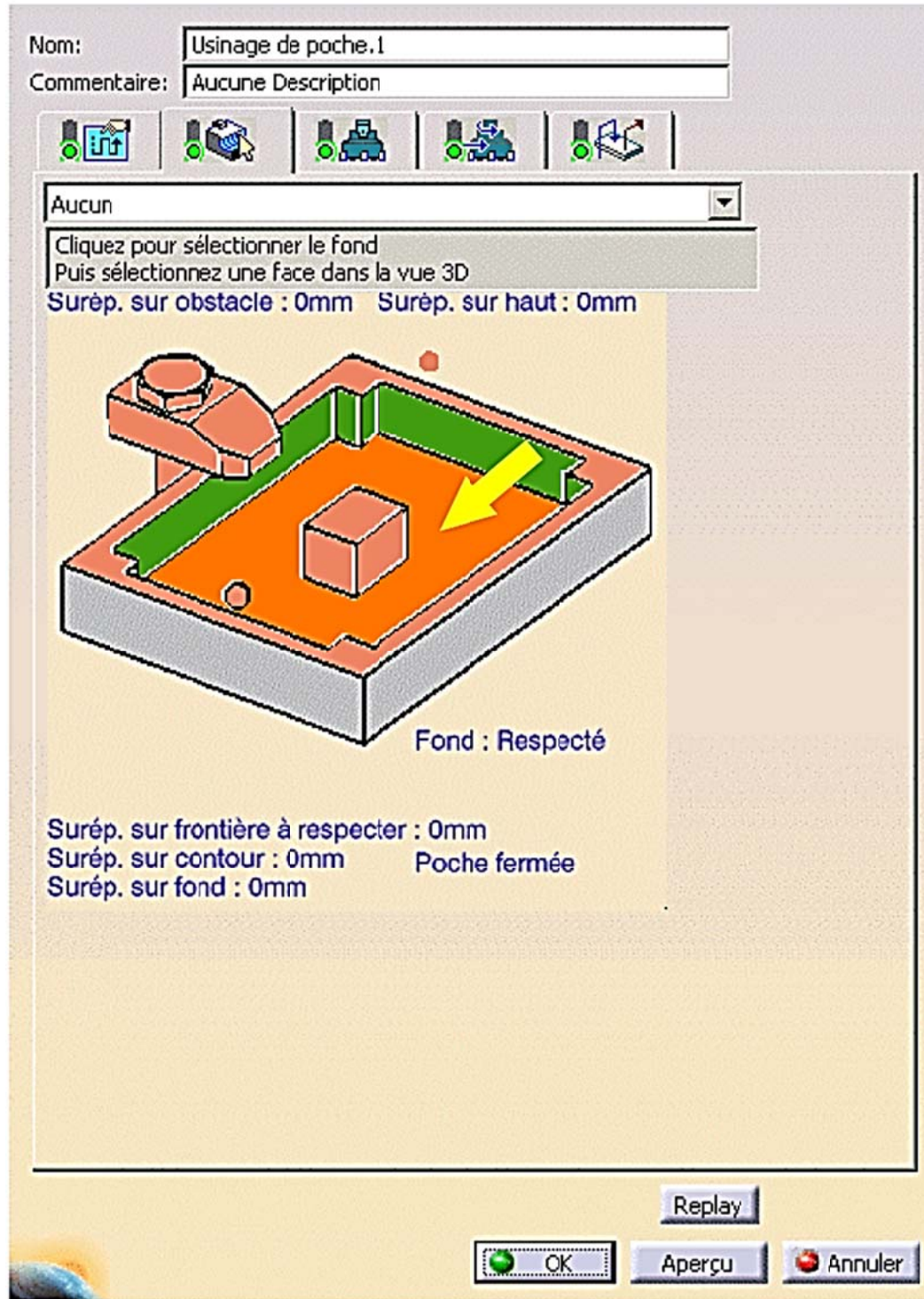
Sélectionner la face supérieur ou le fond de la poche (la fenêtre message vous demande d'identifier l'entité à usiner flèche verte, le message est : Crée une opération d'usinage de poche).







Pour créer ce cycle (cette opération) vous devrez d'abord définir les éléments suivants, en respectant l'ordre proposé:

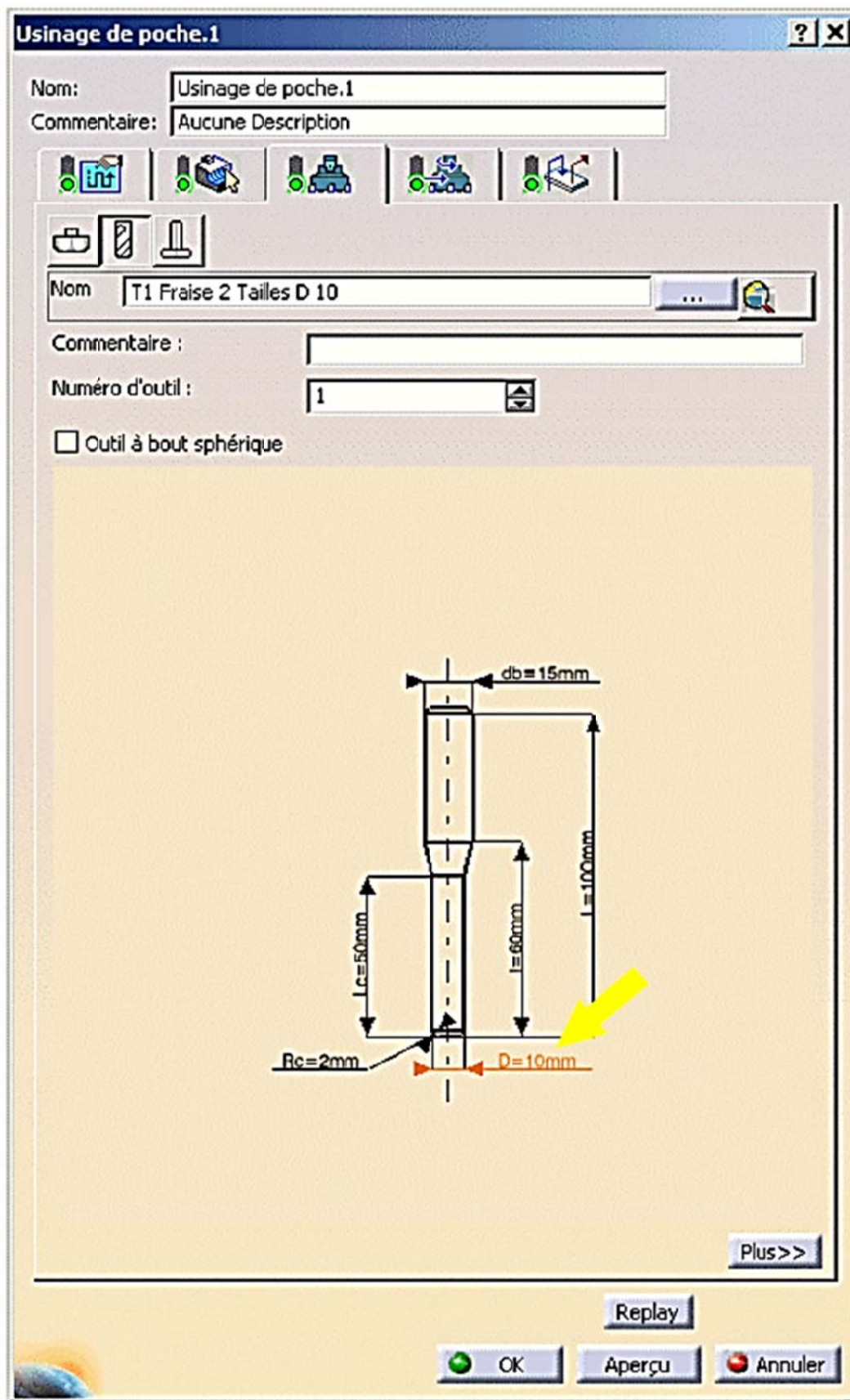
-  définition de la géométrie de la poche a usiner
-  Définition de l'outil utilisé pour le cycle
-  paramètres définissant la stratégie d'usinage
-  Paramètres technologique d'usinage (vitesse et avance)
-  paramètres définissant les "macro" de cycle (approche, sortie)

Dans la fenêtre d'usinage de poche ci-dessous, sélectionner le fond de la poche de couleur orange (flèche jaune), puis cliquer sur le fond de la poche de la pièce démonstration CN1, le fond et les cotes de la poche de la fenêtre devient vert.



Le logo de l'onglet a changé, il est passé de  à .







Remarque: Nota : pour les cinq onglets de la fenêtre Usinage poche.1, les "feux" doivent être tous aux verts ou à l'orange. Le calcul du cycle pourra ainsi s'effectuer. S'il reste des "feux" orange  le cycle sera toutefois incomplet. Il y a des zones non usinées, on ne peut réaliser la totalité de la géométrie avec ce type d'outil. Ici le diamètre de l'outil est trop important. Il faudra utiliser par la suite la fonction  pour créer des zones de reprises prismatique.



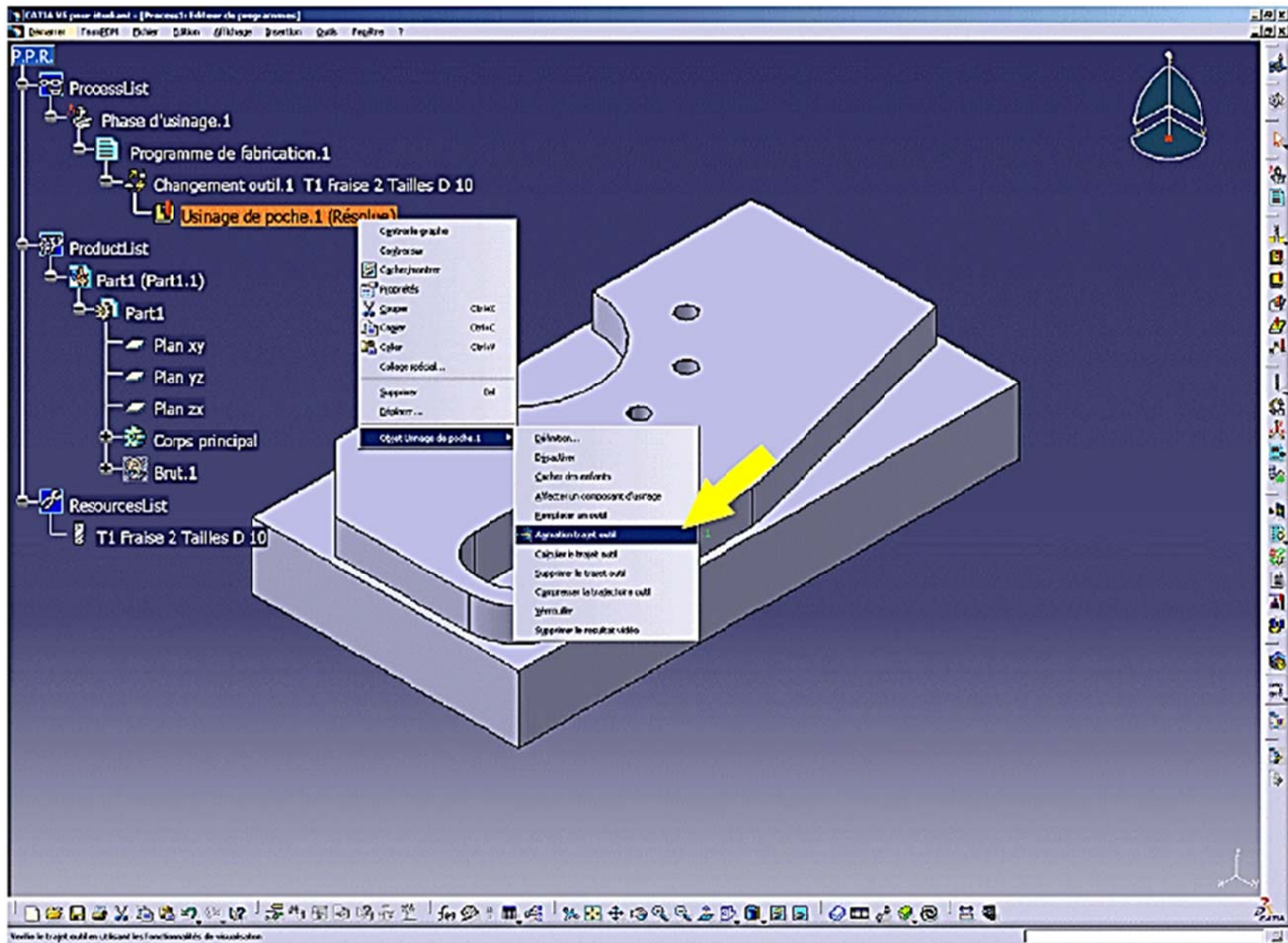
Dans la fenêtre d'usinage de poche dessus, cliquer sur la cote de D=10mm. Celle-ci devient orange (flèche jaune), Modifier la cote pour la porter à 8 mm.

III.5.2. 5. Simulation du cycle d'usinage

Les différentes phases des cycles d'usinages sont symbolisées par des lignes de couleurs différentes :

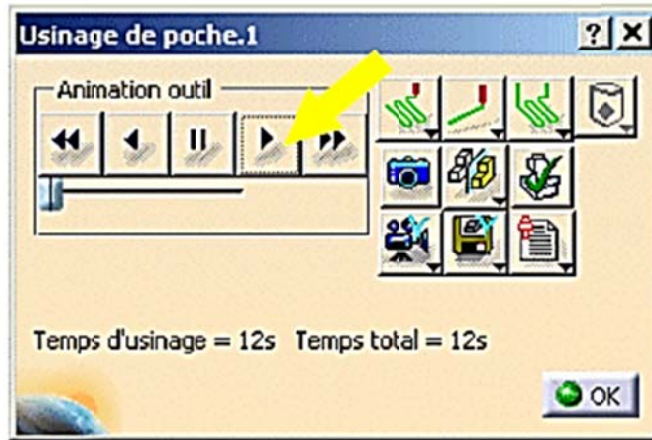
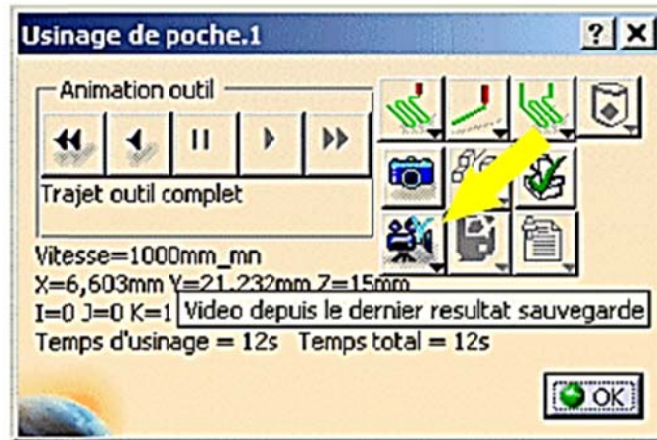
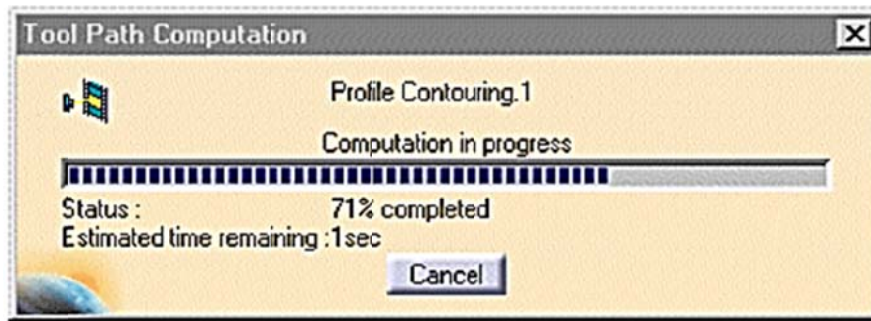
-  Jaune: phase d'approche (avance et vitesse d'approche)
-  Vert: phase de travail (avance et vitesse de travail)
-  Bleu: phase de retrait (avance et vitesse de retrait)
-  Rouge: phase d'avance rapide
-  Pourpre: phase de plongée
-  Blanc: phase d'avance rapide de la MOCN

Ces lignes définissent par défaut, le trajet du bout de l'outil, elles apparaissent ici sur le fond de la poche.

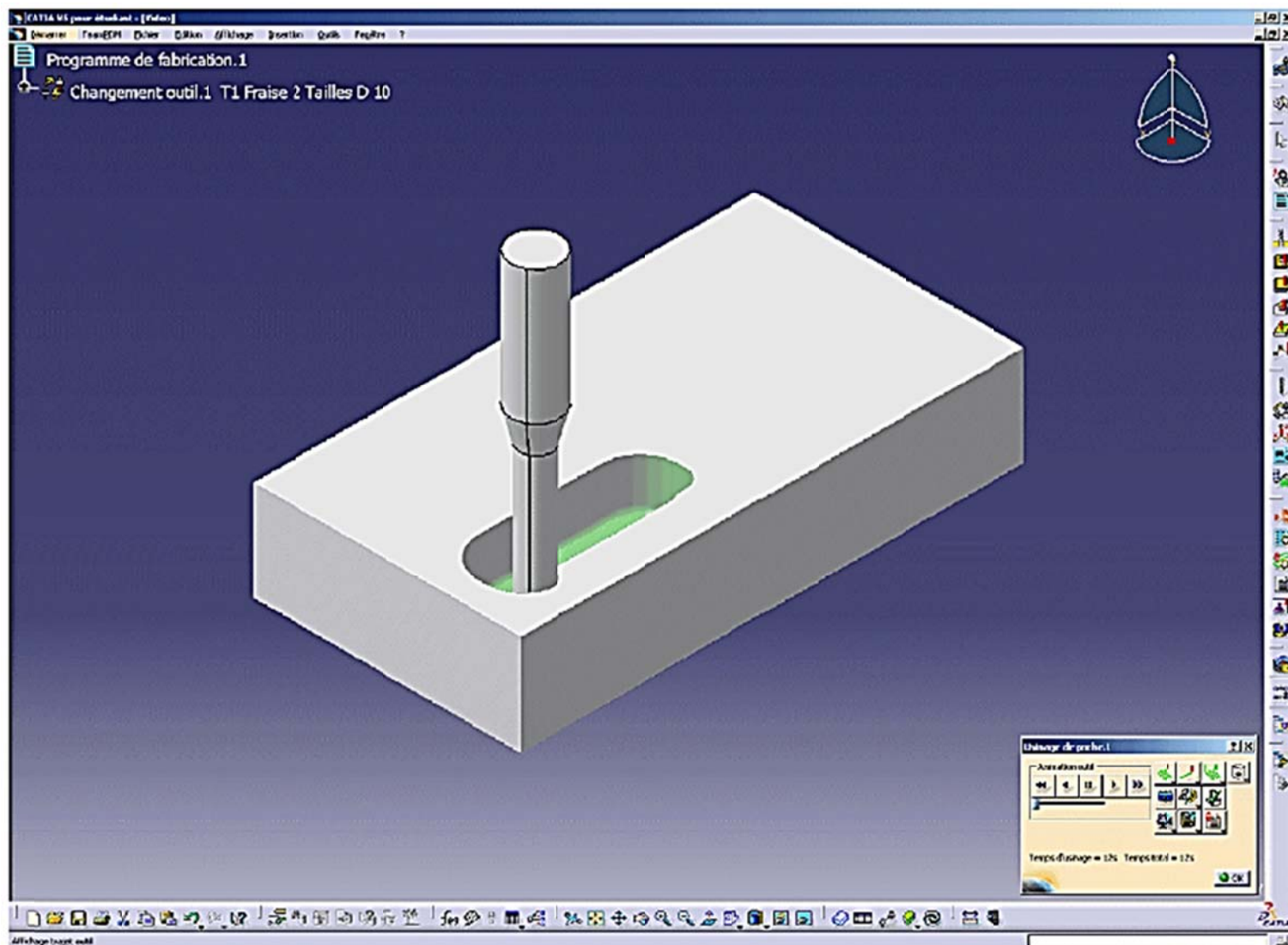


On utilise l'icône dédiée à l'animation de trajet d'outil





 Puis sur l'icône lecture 



III. 6. Création du programme: (après création des cycles)

Remarque: Attention : il faut bien respecter les actions à réaliser. Sinon la sanction sera que vous ne pourrez pas générer du "code pour votre CN".

III. 6.1. Dans le module CN

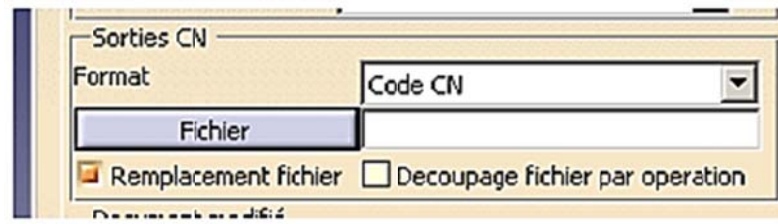
Remarque: Avant tout enregistrer le fichier .CATProcess, sinon aucune option de la sortie ne sera accessible. Vous ne pourrez pas générer le code CN.

Pour l'extraction d'un programme, un clic sur l'icône 

La fenêtre **Génération des sorties CN** en mode batch s'affiche.
Sous l'onglet **E/S**

Dans le menu déroulant de la section Sorties CN, choisir **code CN**.

Puis faire un clic sur **fichier**



Le chemin qui apparaît désigne le répertoire où va s'enregistrer le programme CN.

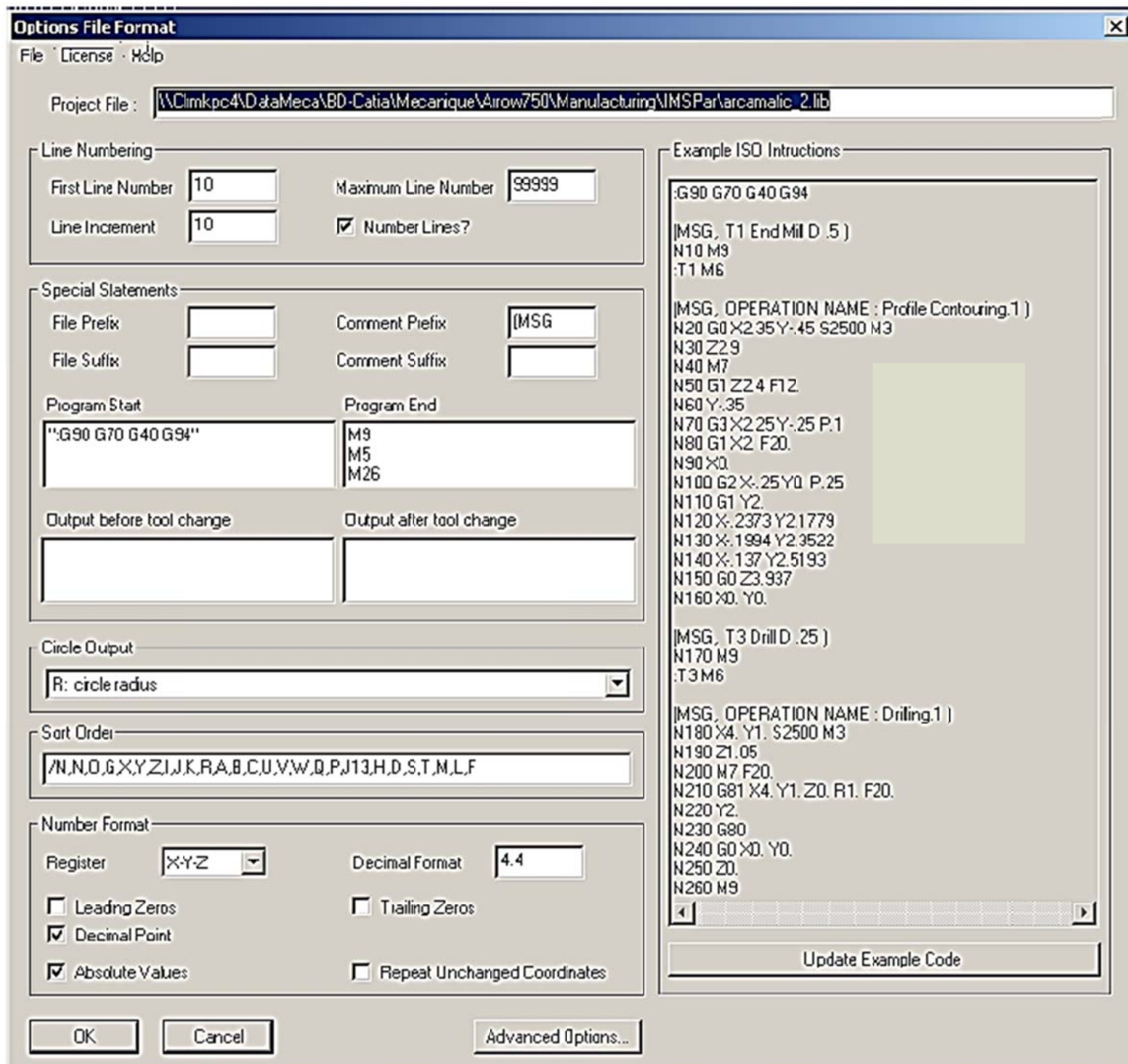
Sous l'onglet **Code CN**



Dans le menu déroulant de la section **Fichier post-processeur IMS**, choisir le nom de l'armoire CN. Pour les processeurs de machine CINCINNATI avec une armoire acramatic 2100, il y a une petite coquille. Le post-processeur s'appelle ARCAMATIC...

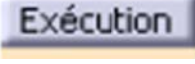
Si le formatage du programme ne convient pas, un clic sur Formater.

La fenêtre suivante s'ouvre:

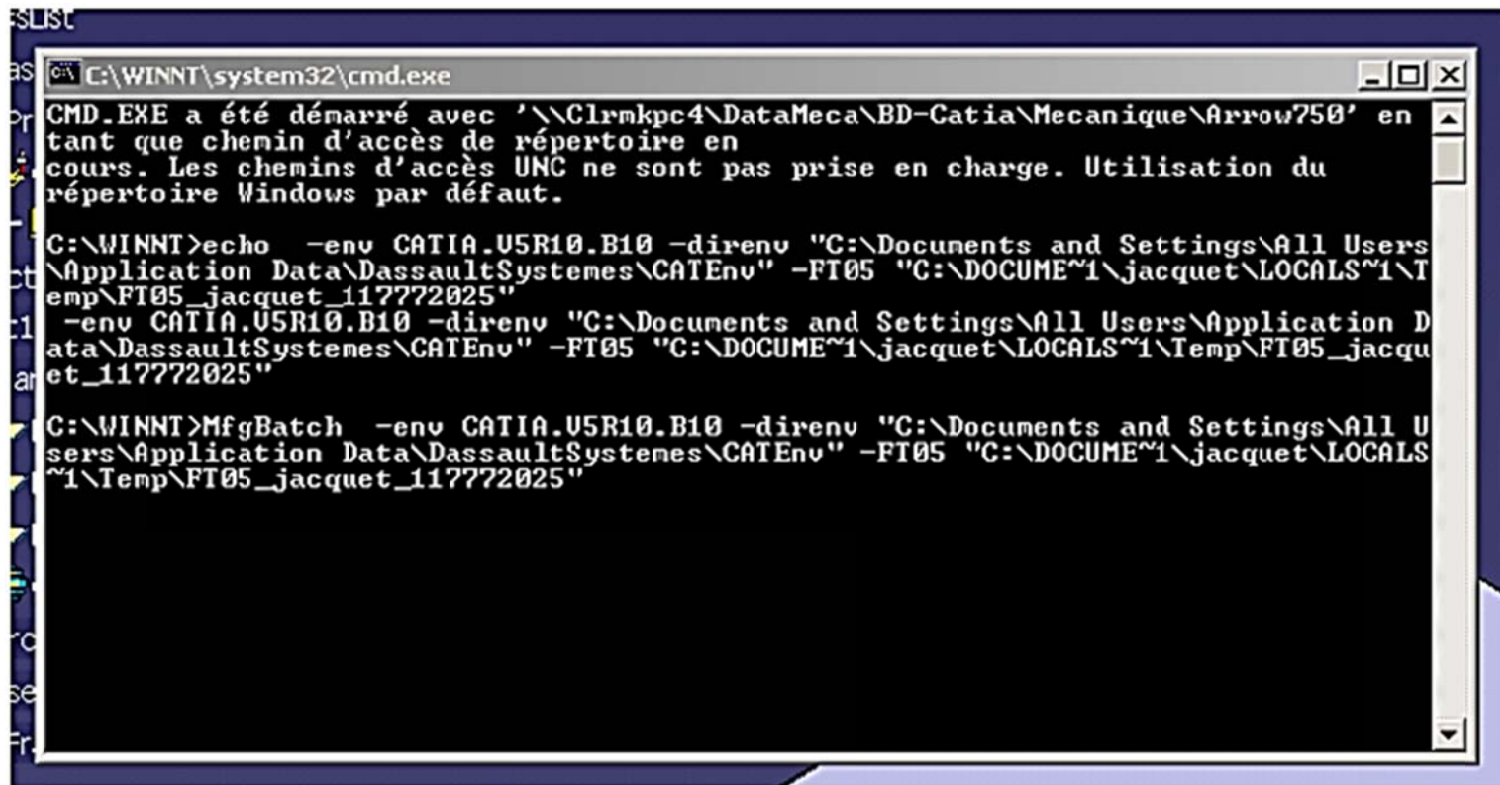


NOTA : L'enregistrement ne fonctionne pas parfaitement.

Pour la création du programme un clic sur l'icône exécution dans le bas de la fenêtre génération de code CN en mode

batch. 

La fenêtre suivante s'affiche au milieu de votre écran :



```

C:\WINNT>echo -env CATIA.V5R10.B10 -direnv "C:\Documents and Settings\All Users
\Application Data\DassaultSystemes\CATEnv" -FT05 "C:\DOCUME~1\jacquet\LOCALS~1\T
emp\FT05_jacquet_117772025"
- env CATIA.V5R10.B10 -direnv "C:\Documents and Settings\All Users\Appliation D
ata\DassaultSystemes\CATEnv" -FT05 "C:\DOCUME~1\jacquet\LOCALS~1\Temp\FT05_jacqu
et_117772025"

C:\WINNT>MfgBatch -env CATIA.V5R10.B10 -direnv "C:\Documents and Settings\All U
sers\Application Data\DassaultSystemes\CATEnv" -FT05 "C:\DOCUME~1\jacquet\LOCALS
~1\Temp\FT05_jacquet_117772025"

```

La fenêtre disparaît, le programme est à l'adresse définie plus haut. Les extensions sont FICHER.CATNCCode pour les codes purement ISO générés par le post-processeur choisi ou FICHER.aptsource pour les codes du type APT (instructions du type GOTO etc).

III. 6. 2. Récupération des fichiers

Voici quelques informations sur la nature des fichiers générés par le module de fraisage 2,5 axes de CATIA V5 (l'atelier Prismatic Machining). L'ensemble des fichiers se trouvent dans le répertoire que vous avez sélectionné dans le menu déroulant de la section Sorties CN, dans le paragraphe 6.1 Dans le module CN.

III. 6. 2. 1. Fichier log

Le fichier log contient l'ensemble des informations concernant la génération en mode batch, notamment l'endroit où se trouvent les fichiers suivants

Fichier.log

Input file name : C:\Documents and Settings\XXXXXXXXXX \Bureau\ichier_l.aptsource

Output file name : C:\Documents and Settings\XXXXXXXXXX \Bureau\ichier.CATNCCode

Fichier_l.log

Lecture du document à traiter : Début
Lecture du document à traiter : Fin.

Vérification du document à traiter : Début
Vérification du document à traiter : Fin.

Initialisation de la machine : Début
Initialisation de la machine : Fin.

Génération du fichier Code CN : Début
Information: ** activité Programme de fabrication.1 : DEBUT. **
Information: ** activité Changement outil.1 : DEBUT. **
Attention, L'activité Changement outil.1 n'est pas a jour .
Information: L'activité Changement outil.1 a été mise a jour .
Information: ** Temps d'usinage et total : 0s , 0s . **
Information: ** activité Changement outil.1 : FIN . **
Information: ** activité Usinage de poche.1 : DEBUT. **
Information: ** Temps d'usinage et total : 12s . 12s . **
Information: ** activité Usinage de poche.1 : FIN . **
Information: ** activité Programme de fabrication.1 : FIN . **
Génération du fichier Code CN : Fin.

Génération du fichier ISO Code : Début
Génération du fichier ISO Code : Fin.

Fin du Batch.

III. 6. 2. 2. Fichier _I.apSource

Le fichier aptSource contient l'ensemble des informations de votre gamme d'usinage converties dans un format neutre. On parle donc de fichier au format APT.

```

$$
$$ -----
$$ Généré le jeudi 02 octobre 2003 15:13:43
$$ -----
$$ Programme de fabrication.1
$$ Phase d'usinage.1
$$*CATIA0
$$ Programme de fabrication.1
$$ 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 1.00000 0.00000 0.00000
$$ 0.00000 0.00000 1.00000 0.00000
PARTNO PART TO BE MACHINED
COOLNT/ON
CUTCOM/OFF
PPRINT OPERATION NAME : Changement outil.1
$$ Début de génération de: Changement outil.1
TLAXIS/ 0.000000, 0.000000, 1.000000
$$ TOOLCHANGEBEGINNING
RAPID
GOTO / 0.00000, 0.00000, 100.00000
CUTTER/ 10.000000, 2.000000, 3.000000, 2.000000, 0.000000,$
0.000000, 50.000000
TOOLNO/1, 10.000000
TPRINT/T1 Fraise 2 Tailles D 10
LOADTL/1
$$ Fin de génération de: Changement outil.1
PPRINT OPERATION NAME : Usinage de poche.1
$$ Début de génération de: Usinage de poche.1
LOADTL/1,1
FEDRAT/ 1000.0000,MMPM
SPINDL/ 70.0000,RPM,CLW
GOTO / 11.60259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 11.60259, 18.23166, 15.00000
GOTO / 11.89548, 17.52455, 15.00000
GOTO / 12.60259, 17.23166, 15.00000
GOTO / 50.60259, 17.23166, 15.00000
GOTO / 51.30970, 17.52455, 15.00000
GOTO / 51.60259, 18.23166, 15.00000
GOTO / 51.60259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 51.30970, 21.93877, 15.00000
GOTO / 50.60259, 22.23166, 15.00000
GOTO / 12.60259, 22.23166, 15.00000
GOTO / 11.89548, 21.93877, 15.00000
GOTO / 11.60259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 9.10259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 6.60259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 6.60259, 18.23166, 15.00000
GOTO / 6.89625, 16.37756, 15.00000
GOTO / 7.74849, 14.70495, 15.00000
GOTO / 9.07588, 13.37756, 15.00000
GOTO / 10.74849, 12.52532, 15.00000
GOTO / 12.60259, 12.23166, 15.00000
GOTO / 50.60259, 12.23166, 15.00000
GOTO / 52.45669, 12.52532, 15.00000
GOTO / 54.12930, 13.37756, 15.00000
GOTO / 55.45669, 14.70495, 15.00000
GOTO / 56.30893, 16.37756, 15.00000
GOTO / 56.60259, 18.23166, 15.00000
GOTO / 56.60259, 21.23166, 15.00000
GOTO / 56.30893, 23.08576, 15.00000
GOTO / 55.45669, 24.75837, 15.00000
GOTO / 54.12930, 26.08576, 15.00000
GOTO / 52.45669, 26.93800, 15.00000
GOTO / 50.60259, 27.23166, 15.00000
GOTO / 12.60259, 27.23166, 15.00000
GOTO / 10.74849, 26.93800, 15.00000
GOTO / 9.07588, 26.08576, 15.00000
GOTO / 7.74849, 24.75837, 15.00000
GOTO / 6.89625, 23.08576, 15.00000
GOTO / 6.60259, 21.23166, 15.00000
$$ Fin de génération de: Usinage de poche.1
SPINDL/OFF
REWIND/0
END

```

III. 6. 2. 3. Fichier CATNCCode

Le fichier CATNCCode contient l'ensemble des informations permettant de piloter votre Machine Outil à Commande Numérique. Il sera cependant impératif d'éditer le fichier CATNCCode avec le Bloc-notes ou WordPad de Windows pour le corriger et ainsi obtenir un fichier "correct".




















III. 7. Annexes

III. 7. 1. Opérations axiales

Ce menu est accessible en déroulant l'icône dans le menu de création et l'édition des opérations de fraisage 2.5 axes.



Voici les différents icônes réservés pour la création et l'édition des opérations "axiales".

















-  Opération de perçage
-  Opération de pointage
-  Opération de perçage déburrage
-  Opération de perçage profond
-  Opération de perçage avec brise copeau
-  Opération de filetage horaire (rigide)
-  Opération de filetage anti horaire (rigide)
-  Opération de filetage (sans taraud)
-  Opération d'alésage
-  Opération d'alésage et de chanfreinage
-  Opération d'alésage avec arrêt de broche
-  Opération d'alésage de finition
-  Opération de lamage
-  Opération de chanfreinage
-  Opération de chanfreinage des deux cotés
-  Opération de contre alésage
-  Opération de rainurage
-  Opération de contourage circulaire
-  Opération de filetage avec une fraise à fileter

III. 7. 2. changement outil



Ce menu est accessible en déroulant l'icône dans le menu des opérations auxiliaires et changement d'outil.



-  Changement d'outil : foret de perçage
-  Changement d'outil : taraud
-  Changement d'outil : fraise à fileter
-  Changement d'outil : fraise à chanfreiner
-  Changement d'outil : alésoir
-  Changement d'outil : foret à pointer
-  Changement d'outil : foret à centrer
-  Changement d'outil : foret étagé
-  Changement d'outil : outil à percer et chanfreiner
-  Changement d'outil : outil à chanfreiner des deux coté
-  Changement d'outil : outil barre à aléser
-  Changement d'outil : fraise à lamer
-  Changement d'outil : fraise deux taille
-  Changement d'outil : fraise à surfacer
-  Changement d'outil : fraise conique
-  Changement d'outil : fraise trois taille

Références

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 01- CNC BOOK A – ANGE SOFTS. APPRENDRE La programmation CNC par la pratique. 2013.
- 02- Gilles PROD'HOMME. Commande numérique des machines-outils. Techniques de l'ingénieur. B7130. 1998.
- 03- Claud Hazard. La commande numérique des machines-outils. Technologie, programmation et applications. Foucher. 1984.
- 04- Philippe Jeantet. Documentation CATIA. INFORMATIONS DE BASE pour le module FAO de CATIA V5.
- 05- Jean-Pierre. Mémotech - Commande numérique programmation. Eyrolles. 1999.