République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة يحي فارس بالمدية
Université Yahia Farès Médéa

Faculté Des Sciences
Département de mathématique et Informatique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Informatique

Option : Ingénierie des systèmes et technologie du web

Conception et réalisation d'un logiciel pour la conversion des fichiers GCODE. Application à la machine CNC à deux Spindles à commande indépendante

Réalisé par :
Mme. YAGOUB Amina
Mme. BENNAIDJA Nadjet

Encadré par :
M. *OULD* CHERCHALI Noureddine
M. SAHMADI Brahim

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé le courage et la patience nécessaires pour achever ce travail.

Nous exprimons notre sincère gratitude à notre conseiller, M.Ould cherchali noureddine et M.Sehmadi Ibrahim , pour ses conseils précieux et son soutien tout au long de notre programme de master. Son expertise, ses encouragements et ses retours critiques ont été précieux pour structurer le travail et améliorer la qualité des différentes sections.

Nous tenons également à exprimer notre sincère reconnaissance aux membres du jury, M.RAFA Tahar et M.Toubal Elbahi et M.Abdellah Elhadj Abdellah pour l'honneur qu'ils nous ont fait en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Nous souhaitons aussi remercier M. Rebhi Redha pour leurs efforts dévoués à nous fournir une excellente éducation et formation.

Nos chers parents sont notre fierté et la source de notre succès, car ils ont fait des sacrifices pour nous offrir un environnement de travail propice et les meilleures conditions possibles. Sans eux, rien n'aurait été facile. Que Dieu les protège et les bénisse afin que nous puissions les rembourser pour tout ce qu'ils nous ont donné.

Nous tenons également à remercier nos amis et notre famille pour leur amour et leur soutien durant ce processus. Sans leur encouragement et leur motivation, nous n'aurions pas pu achever ce parcours.

Enfin, nous souhaitons remercier toute notre classe. Nous sommes également reconnaissants à tous nos enseignants et aux membres du Département de mathématique et Informatique de l'université Yahia fares .

Dédicace

" باسم خالقي و مُسير أمـوري و عصِمتُ أمري
لك كُل الحمـد والامتنـان"

*À mon cher père **Djelloul** et ma tendre mère **Kheira** , les mots ne suffiront jamais pour exprimer toute ma reconnaissance. Votre soutien infaillible a été le phare qui a guidé chacun de mes pas. L'amour, l'admiration et le respect que je vous porte sont indescriptibles. Je vous souhaite une vie emplie de bonheur et de santé .*

*À mes frères **Aïssa , Ali Khalil**, **Berkan** ,**Samir** , **Kadi** à mes sœurs **Rahma, Nasira, Zineb, Khaoula** et **Manel, Siham, Meriem, Weffa** ainsi qu'à mes nièces **Sadjida, Rahaf, Leyla, Wissal** et mes neveux **Ghaith, Nadim, Montassir et Moussa** Vous êtes ma vie ma source de force, Aucun mot ne saurait exprimer toute la gratitude et l'estime que j'ai pour votre soutien et vos encouragements constants. Je vous dédie ce travail en témoignage de l'amour quotidien et de l'exceptionnelle bienveillance que vous m'avez toujours montrée.*
Que Dieu nous garde unis et forts.

*J'aimerais exprimer une dédicace particulière à ma chère **Amina** Grâce à votre dévouement ce projet a été couronné de succès. Je suis profondément reconnaissant pour notre collaboration et fier de nos réussites ensemble.*

*À mes amies **Amina , Houda , Imane ,Amani, Nadjia, Rihan** Je vous remercie d'être les formidables amis que vous êtes. Je vous adresse cette dédicace pour exprimer ma gratitude pour votre présence dans ma vie, en signe de reconnaissance pour votre compréhension et votre soutien dans les moments difficiles, et pour m'avoir rappelé ma valeur Puissent nos liens d'amitié se consolider chaque jour.*

*Finalement, je consacre ce projet à **ma propre personne**, comme un rappel de ma puissance, Je suis très fier des avancées que j'ai accomplies et de la personne que je suis maintenant.*

"وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِين"

Nadjet

Dédicace

" وما توفيقي إلا بالله رب العالمين "

Je dédie ce modeste travail

À tous mes chers, qui ont été mon soutien et mon encouragement tout au long de mon parcours académique. Grâce à votre amour et à votre soutien, j'ai pu surmonter toutes les difficultés et atteindre cet accomplissement. Je vous dédie ce travail, fruit de nos efforts communs et de votre affection constante.

" Merci du fond du cœur"

Amina

Résumé

Ce travail vise à développer une application de simulation CNC qui permet aux utilisateurs de charger, visualiser et simuler des fichiers G-code. L'application offre des fonctionnalités avancées telles que la division des trajectoires en deux parties pour l'utilisation de deux têtes de découpe simultanées, la manipulation et la vérification des points XYZ pour assurer la précision des trajectoires, et la conversion automatisée en instructions G-code adaptées aux spécifications de la machine CNC. En outre, elle permet de contrôler la vitesse de simulation, de visualiser les chemins programmés et de sauvegarder les fichiers G-code modifiés, offrant ainsi une solution complète pour optimiser et sécuriser le processus de fabrication numérique.

Mots clés : Machines CNC, Conversion de G-Code, Multi-tête CNC, Fabrication assistée par ordinateur.

Abstract

This work aims to develop a CNC simulation application that allows users to load, view, and simulate G-code files. The application offers advanced features such as splitting trajectories into two parts for simultaneous use of two cutting heads, processing and verifying XYZ points to ensure trajectory accuracy, and automatically converting them into G-code instructions that comply with CNC machine specifications. Additionally, it allows for controlling the simulation speed, visualizing programmed paths, and saving modified G-code files, providing a comprehensive solution to optimize and secure the digital manufacturing process.

Key words: CNC machines, G-Code conversion, Multi-head CNC, Computer-Aided Manufacturing.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تطوير تطبيق لمحاكاة ماكينات CNC يتيح للمستخدمين تحميل ملفات G-code وعرضها ومحاكاتها. يوفر التطبيق ميزات متقدمة مثل تقسيم المسارات إلى جزأين لاستخدام رأسي قطع بشكل متزامن، ومعالجة وتحقق من نقاط XYZ لضمان دقة المسارات، وتحويل تلقائي إلى تعليمات G-code المتوافقة مع مواصفات ماكينة CNC. بالإضافة إلى ذلك، يتيح التحكم في سرعة المحاكاة، وعرض المسارات المبرمجة، وحفظ ملفات G-code المعدلة، مما يوفر حلاً شاملاً لتحسين وأمان عملية التصنيع الرقمي.

كلمات مفتاحية : آلات التحكم الرقمي بالكمبيوتر ،تحويل ملفات التحكم بالآلة ،آلات التحكم الرقمي بالكمبيوتر المتعددة الرؤوس،التصنيع بمساعدة الحاسوب.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des sigles et acronymes

INTRODUCTION GENERALE **1**

1 Généralités sur les machines CNC **3**

1.1 Introduction . . . 3
1.2 Développement historique de la technologie de commande numérique . . . 3
1.3 Définition d'une machine CNC . . . 6
1.4 La machine à commande numérique . . . 6
1.4.1 Comparaison entre MO conventionnelle et MOCN . . . 7
1.4.2 Compositions de la machine . . . 9
1.4.3 Principe de fonctionnement d'une machine CNC . . . 11
1.4.4 Domaines d'utilisation des machines CNC . . . 11
1.4.5 Classifications des machines CNC . . . 11
1.5 Les origines des systèmes de coordonnées . . . 18
1.6 Avantages et inconvénients liés aux machines CNC . . . 19
1.7 Conclusion . . . 19

2 Conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) **20**

2.1 Introduction . . . 20
2.2 Conception assistée par ordinateur (CAO) . . . 20
2.2.1 Méthodes de représentation des surfaces . . . 21
2.2.2 Format d'échange de données . . . 21
2.2.3 Avantages et inconvénients du format STL : . . . 23

2.2.4 Quelque Logiciels de CAO 24
2.3 Fabrication assistée par ordinateur (FAO) : 24
2.3.1 Structure d'un programme 24
2.3.2 Les fonctions préparatoires G 28
2.3.3 Les fonctions auxiliaires M 32
2.3.4 Quelque Logiciels de FAO 34
2.4 Conclusion 34

3 Conception **35**
3.1 Introduction 35
3.2 Solution proposée 36
3.2.1 Traitement des Points 36
3.2.2 Division des Points 36
3.2.3 Conversion en G-Code 36
3.2.4 Vérification et Correction 37
3.2.5 Intégration avec la Simulation CNC 37
3.3 Modélisation UML (Unified Modeling Language). 37
3.3.1 Diagramme de cas d'utilisation 38
3.3.2 Diagramme d'activité 40
3.4 Conclusion 42

4 Implémentation **43**
4.1 Introduction 43
4.2 Présentation des outils utilisés 43
4.2.1 Visual Studio 43
4.2.2 C# (C Sharp) 44
4.2.3 .NET Framework 44
4.3 Présentation de la plateforme logicielle 45
4.3.1 Fenêtres principales : 45
4.3.2 Ouverture de fichiers G-code 46
4.3.3 Simulation de fichiers G-code 47
4.3.4 Division Précise de Fichiers G-code avec le Bouton 'Split' 48
4.3.5 Simulation avec Deux Têtes d'un Fichier G-code 49
4.3.6 Contrôle flexible de la simulation G-code 49
4.4 Conclusion 50

Bibliographie **53**

A Les Fonctions préparatoires G

B Les Fonctions auxiliaires M

Table des figures

1.1 Tour a bois à pédale. . . . 4
1.2 Première MOCN en 1952. . . . 5
1.3 Structure D'une Machine A Commande Numérique. . . . 7
1.4 Comparaison entre MO conventionnelle et MOCN. . . . 9
1.5 Structure D'une Machine A Commande Numérique. . . . 10
1.6 Fonction D'une Commande Numérique CNC. . . . 10
1.7 Chaine D'information D'une Machine CNC. . . . 11
1.8 Fraiseuses CNC. . . . 12
1.9 Tours CNC. . . . 12
1.10 Forage du cylindre du moteur sur une machine CNC Forage. . . . 13
1.11 Découpeurs plasma CNC. . . . 13
1.12 Rectification d'un pièce. . . . 14
1.13 Commande Numérique Point A Point. . . . 14
1.14 Commande numérique paraxiale. . . . 15
1.15 Commande numérique de contournage(interpolation linéaire et circulaire). . . . 15
1.16 Fraiseuse CNC 3 axes (3D) 16
1.17 Fraiseuses 4 axes. . . . 17
1.18 Fraisage CNC 5 axes. . . . 17
1.19 Représentation des origines. . . . 18

2.1 Surface paramétrique. . . . 21
2.2 Echange de données entre deux systèmes. . . . 22
2.3 Représentation CAO représentation STL et paramètres d'un triangle. . . . 22
2.4 Formats STL ASCII et BINAIRE. . . . 23
2.5 Exemple de programme. . . . 25
2.6 Exemple Bloc 25
2.7 Structure d'un programme CN. . . . 27

2.8 Structure d'une opération CN. 28
2.9 Usinages absolue (G90) et Usinages relative (G91) 29
2.10 Interpolation linéaire à vitesse rapide G00 30
2.11 Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée G01 31
2.12 Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique 31
2.13 Interpolation circulaire sens trigonométrique 32
2.14 Rotation de broche dans le sens anti-trigonométrique. 32
2.15 Rotation de broche dans le sens trigonométrique. 33
2.16 Appel ou changement d'outil. 33

3.1 Diagramme de cas d'utilisation 39
3.2 Diagramme d'activité 41

4.1 Visual Studio 44
4.2 C# 44
4.3 .NET FrameWork 45
4.4 Fenêtres principales de la plateforme logicielle. 46
4.5 Ouvrire un fichier g-code 47
4.6 Simulation de fichiers G-code 48
4.7 Diviser le g-code avec "split" 48
4.8 Simulation avec Deux Têtes 49
4.9 Contrôle flexible de la simulation G-code 50

Liste des tableaux

1.1 Origines utilisées dans des MOCN. 18

Liste des sigles et acronymes

ASCII : Code américain normalisé pour l'échange d'information
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CFAO : Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
CNC : Commande numerique par calculateur
FAO : La fabrication Assistée par ordinateur
MIT : Massachusetts Institute of Technology
MOCN : Machine Outille a Commande Numerique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les machines CNC de sculpture sur bois en 3D sont couramment équipées d'un seul moteur de broche pour effectuer des sculptures complexes avec précision. Bien que certaines machines possèdent des têtes multiples, elles fonctionnent de manière synchrone, ce qui limite leur efficacité et leur flexibilité. Ce projet propose de développer un logiciel qui permet de contrôler deux têtes de broche de manière indépendante. En convertissant les fichiers G-code pour cette nouvelle fonction, l'application permettra de réaliser deux sculptures distinctes simultanément sur la même machine. Cette avancée offre des économies significatives de temps et de matériaux, améliorant ainsi l'efficacité globale des opérations de sculpture.

Notre étude cherche à répondre aux questions suivantes concernant la conversion des fichiers G-code en visualisations simulées du mouvement des têtes de la machine CNC :

- Peut-on développer des algorithmes d'analyse pour comprendre et interpréter avec précision les données des fichiers G-code ?
- Peut-on améliorer l'expérience utilisateur et la compréhension des opérations de la machine grâce à une interface utilisateur interactive permettant une simulation visuelle des opérations ?
- L'application de simulation peut-elle améliorer l'efficacité de la production et réduire les erreurs dans les opérations de fabrication ?

Ce mémoire explore en profondeur les machines CNC (Commandes Numériques par Calculateur) et la CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) à travers quatre chapitres distincts.

1. Le premier chapitre introduit les bases des machines CNC, leur fonctionnement, leurs composants et leurs applications.
2. Le deuxième chapitre se concentre sur la CAO et la FAO, détaillant les méthodes de conception et de fabrication assistées par ordinateur ainsi que les logiciels associés.
3. Le troisième chapitre présente la conception d'un simulateur CNC, mettant en avant

la modélisation UML et le traitement du G-Code.

4. Enfin, le quatrième chapitre décrit l'implémentation technique du simulateur, utilisant des outils comme Visual Studio et le .NET Framework.

Chapitre 1

Généralités sur les machines CNC

1.1 Introduction

Depuis quelques années, la commande des machines électrique est entrée dans une nouvelle ère de développement. Ce dernier est essentiellement dû aux innovations technologiques en informatique industrielle, aux progrès en mécatronique, et aussi aux technologies récentes d'intégration des composants, ainsi que des cartes électroniques, assurant de nouvelles fonctionnalités, et garantissant de meilleures performances, ce qui facilite l'implémentation des algorithmes complexes, menant vers un développement des solutions numériques efficaces. Après une première génération de commande numérique à logique câblée, sont apparues les commandes numériques par calculateur (CNC), ou par ordinateur, qui intègrent un ou plusieurs ordinateurs. Tous les systèmes de commandes numériques commercialisés actuellement contenant au moins un microprocesseur, les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes .

1.2 Développement historique de la technologie de commande numérique

De simples boules d'argile sont transformées en vase par les tours des potiers 3 500 ans avant Jésus-Christ, ce sont les premières machines-outils. Des rondins deviennent des quilles et des boules sur le tour à bois. Les objets uniques que les artisans fabriquent au tour à pédale ou à manivelle font place aux milliers de pièces identiques réalisées par des machines-outils de plus en plus perfectionnées. Précises et rapides, les nouvelles machines numériques sont pilotées par ordinateur et remplacent le savoir-faire de l'ouvrier.

Ci-dessous se trouve l'illustration 1.1 qui montre tour a bois à pédale.

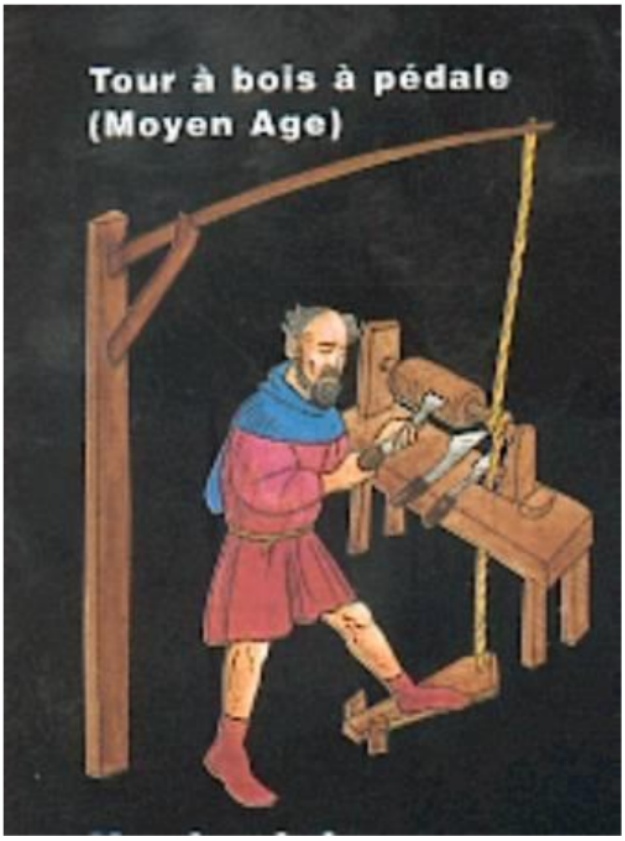


FIGURE 1.1 – Tour a bois à pédale.
[15]

Les travaux menés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIIIe siècle ont démontré qu'il était possible de commander les mouvements d'une machine à partir d'informations transmises par une carte perforée. Cette technique fut étendue à leurs métiers à tisser de 1805 lequel équipement est considéré comme l'ancêtre de la commande numérique après quoi l'exploitation industrielle de la CN devient rattachée au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabrique, pour le compte de l'US Air Force, des pales d'hélicoptère par reproduction. [19]
Au printemps 1949, il confie alors au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le soin de développer des asservissements capables de piloter une machine (fraiseuse prototype Cincinnati à broche verticale présentée en septembre 1952 dans le Servomécanismes Laboratoire du MIT) qui recevra des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes comme La figure 1.2.

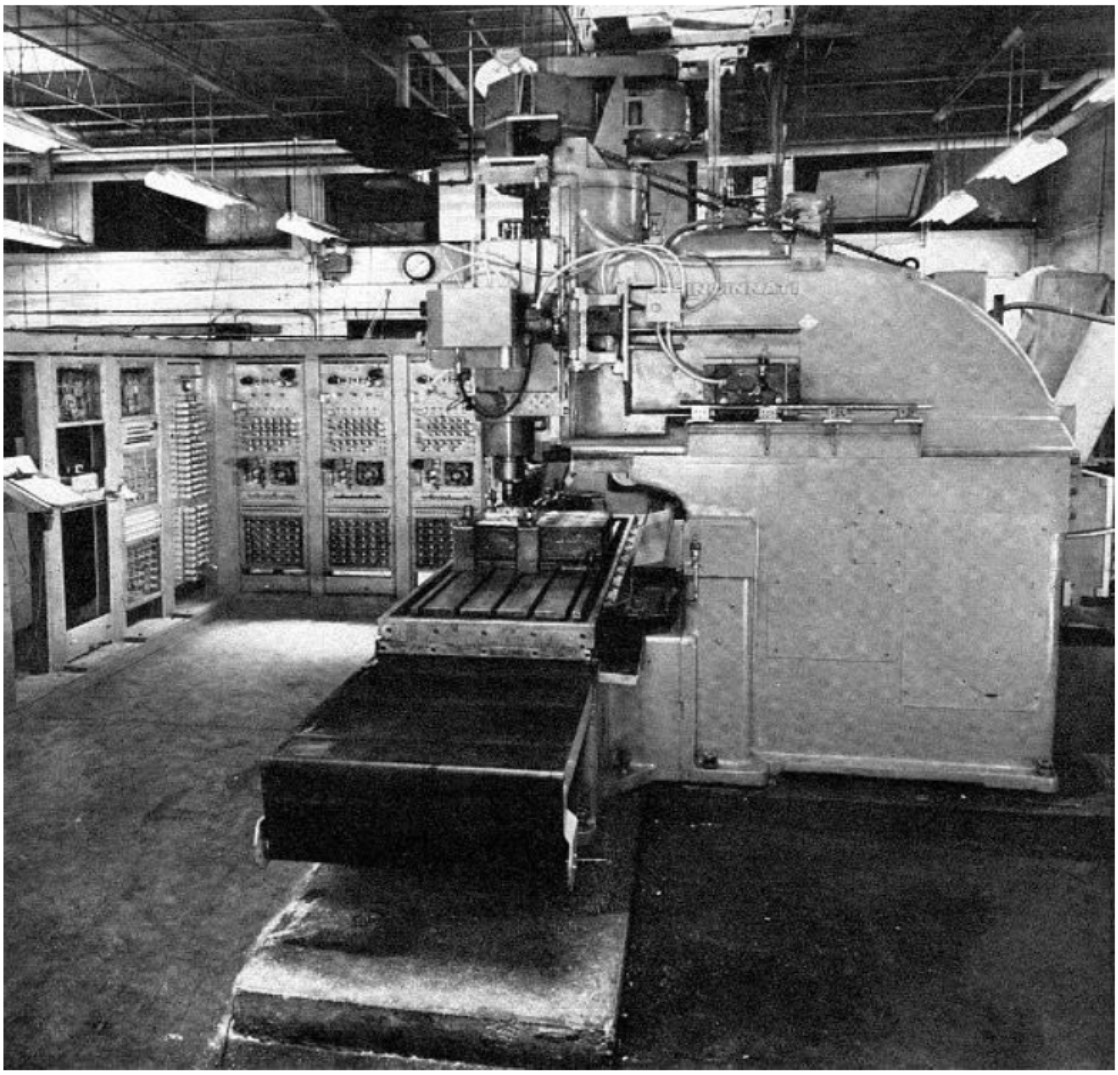


FIGURE 1.2 – Première MOCN en 1952.
[22]

Il faut encore attendre quelques années de vastes fonds de l'US Air Force et l'appui des chercheurs du MIT pour rendre la première MOCN réellement opérationnelle.[19]

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

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

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

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

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

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

1972 : les mini calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.
1976 : développement des CN à microprocesseurs.
1984 : apparition de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation Conversationnel.
1986 : les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la Fabrication flexible (CIM).
1990 : développement des CN à microprocesseurs 32 bits. [19]

1.3 Définition d'une machine CNC

C'est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des codes qui sont portés sur un support matériel (disquette, USB, ...). Lorsque la machine-outil est équipée d'une commande numérique capable de réaliser les calculs des coordonnées des points définissant une trajectoire (interpolation), on dit qu'elle est à calculateur. Elle est appelée CNC (Commande Numérique par Calculateur). Le premier rôle d'une machine CNC (Computerized Numerical Control), est de générer des mouvements. Elle recevra des valeurs de positionnement, de vitesse et d'accélération et générera, suite à un traitement, des consignes numériques en sortie. Elle dispose d'une grande puissance de calcul et d'une plus grande souplesse d'utilisation qu'un automate programmable. Ce dernier est néanmoins qu'un complément de la commande CNC pour ce qui est de la gestion des entrées telles que : interrupteur, bouton d'arrêt d'urgence, etc.. [10]

1.4 La machine à commande numérique

La Machine-outil programmable équipée d'une commande numérique par calculateur (CNC), pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une surface par enlèvement de matière. Elle réalise le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce. De plus, elle doit permettre l'obtention de pièces en respectant les spécifications fonctionnelles [17]. Les composants principaux d'une machine-outil ont connu des avancées technologiques importantes à la fin des années 1990. On peut citer par exemple le développement de broches à paliers magnétiques, de moteurs linéaires pour les axes de déplacement, de matériaux et de géométries spécifiques d'arêtes de coupe. La structure des MOCN a aussi dû être reconçue pour aboutir à des bâtis rigides

capables de supporter les fortes accélérations lors des changements de direction sans générer de vibrations, ainsi qu'à des carters offrant la protection requise lors de bris d'outil.[7]

1.4.1 Comparaison entre MO conventionnelle et MOCN

Si l'on compare une machine-outil conventionnelle (MO) et une machine-outil à commande numérique (MOCN), on peut considérer que le temps de coupe est assez similaire sur les deux types de machines. En revanche, la productivité comparative de diverses catégories de machines avec différents niveaux d'automatisation, c'est-à-dire ce même temps de coupe réduit au temps de production effectif, est très différente en tenant compte de la réduction significative des temps non productifs enregistrée sur les machines avec un taux d'automatisation élevé.[1]
La figure 1.3 représente la Structure D'une Machine A Commande Numérique.

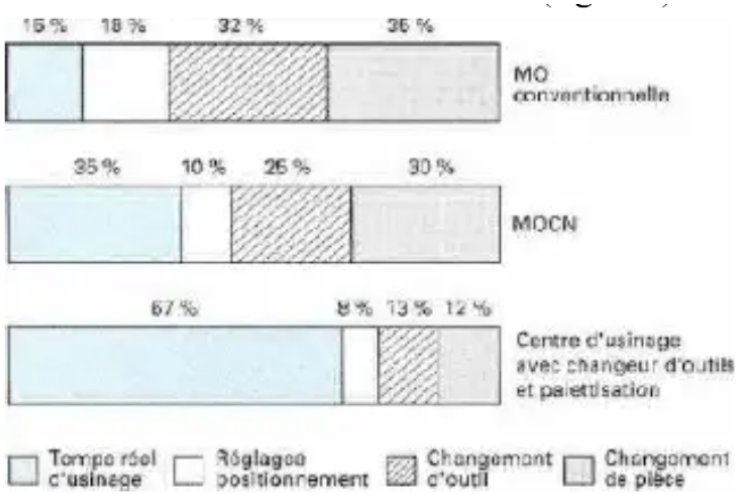


FIGURE 1.3 – Structure D'une Machine A Commande Numérique.

Les fonctions exécutées sont les mêmes que pour une machine conventionnelle :

— Positionner et maintenir la pièce ;
— Positionner et maintenir l'outil ;
— Assurer un mouvement relatif entre la pièce et l'outil.

La qualité mécanique générale de ces machines est bien supérieure à celle des machines-outils conventionnelles :

— Moteur plus puissant,
— Transmission à variation continue plus simple et plus robuste, capable de supporter des accélérations et des décélérations importantes,

- Contrôle des chariots par vis à billes avec système de compensation automatique du jeu,
- Glissières sans friction, utilisation de glissières à rouleaux, à billes, hydrostatiques, aérostatiques,
- Des garnitures sont ajoutées,
- Bâti largement dimensionné, très rigide avec un excellent amortissement.

Les principales caractéristiques des MOCN résultant de leur structure sont :

- Grande puissance et rapidité ;
- Robustesse et bonne résistance à l'usure ;
- Mouvement rapide et précis, sans à-coups ;
- Accélération et décélération très élevées ;
- Spécifications métrologiques très strictes ;
- Frottement et jeu très faibles ;
- Peu de vibrations ;
- Faible échauffement

La figure 1.4 représente la Comparaison entre MO conventionnelle et MOCN.

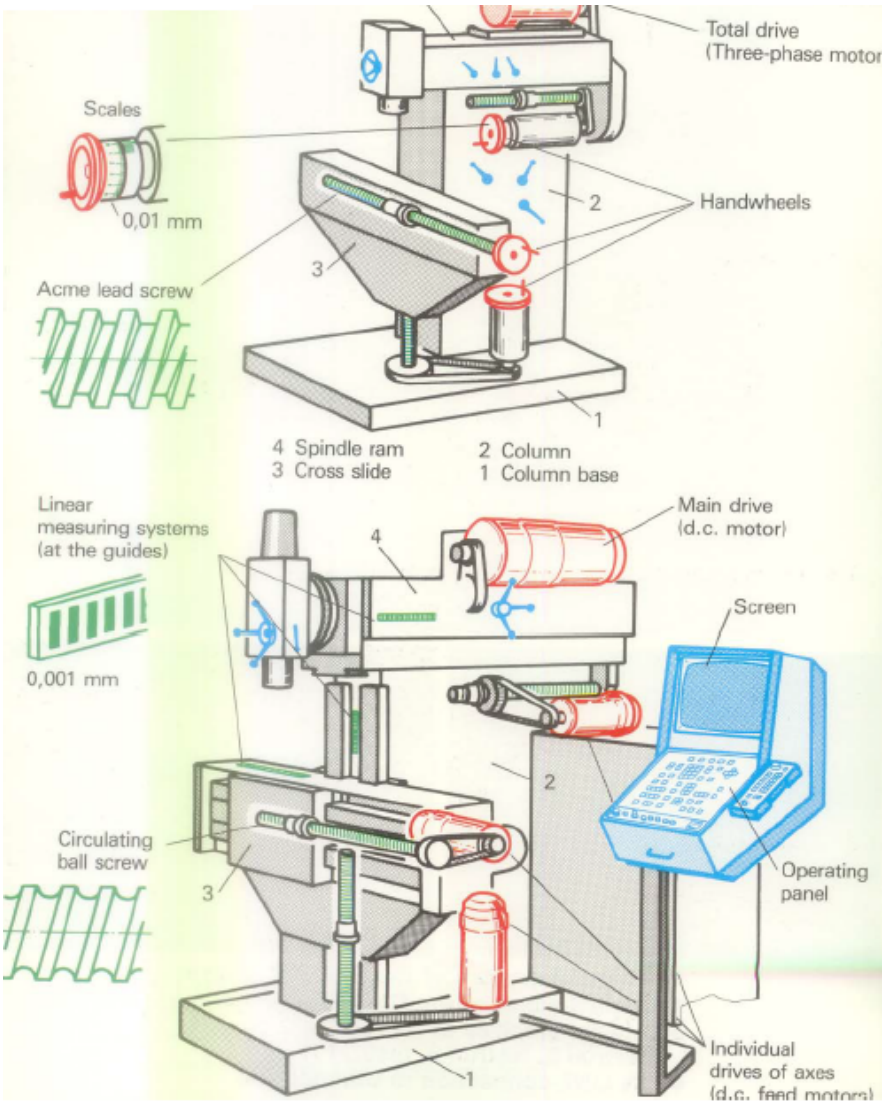


FIGURE 1.4 – Comparaison entre MO conventionnelle et MOCN.
[2]

1.4.2 Compositions de la machine

Une machine à commande numérique est composée de deux parties essentielles, qui sont la partie opérative et la partie commande.

1. **Partie opérative**
   La partie opérative désigne l'ensemble des systèmes matériels permettant au système industriel de fabriquer les produits finis ou de fournir des services [11].
   Dans le cas des MOCN la partie opérative est représentée généralement par des moteurs pas à pas, des relais, pièces mécanique...

La figure 1.5 représente la Structure D'une Machine A Commande Numérique.

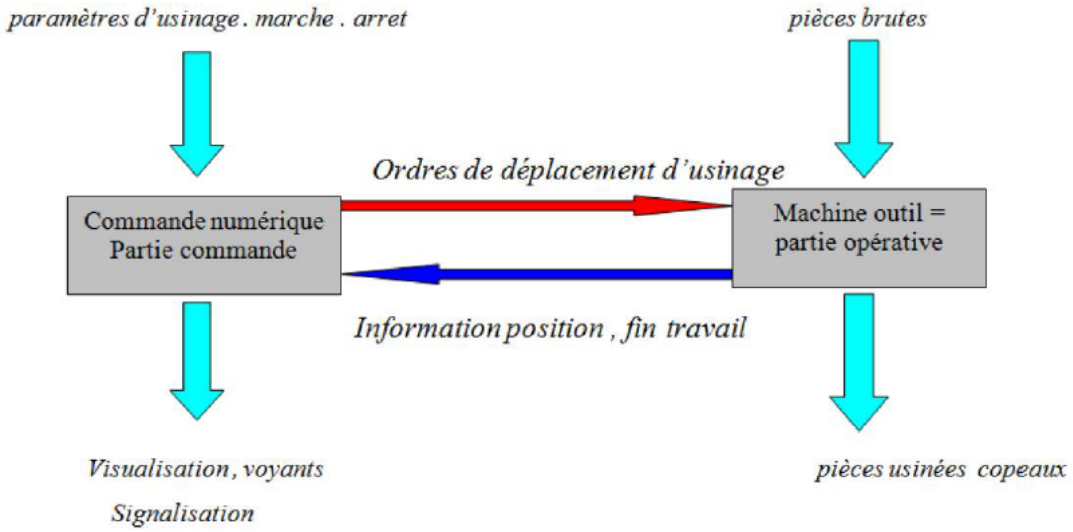


FIGURE 1.5 – Structure D'une Machine A Commande Numérique.

2. **Partie commande**

La partie commande (PC) a été définie comme un système relais entre l'opérateur et le procédé de production de biens et services [11].

Dans le cas des MOCN la partie commande est représentée généralement par des pupitres, écrans de visualisation, calculateurs, cartes électroniques. . ..

La figure 1.6 représente la Fonction D'une Commande Numérique CNC.



FIGURE 1.6 – Fonction D'une Commande Numérique CNC.
[15]

1.4.3 Principe de fonctionnement d'une machine CNC

Une machine CNC obéit aux ordres de l'opérateur de la machine et du logiciel FAO (fabrication assisté par ordinateur) qui est utilisé pour créer des trajectoires d'outils (modèle 3D ou 2D de la pièce à réaliser). Une fois que l'opérateur termine son travail de conception, le logiciel génère un code CAM, ce code passe dans un post-processus qui le transforme en G-Code que la machine peut lire. Enfin et à l'aide d'un FIRMWARE, la machine transforme les ordres G-Code reçu, en signaux électriques parfaitement synchronisés qui contrôlent toutes les fonctionnalités, et indiquent à la machine comment se déplacer, à quelle vitesse et quel est le type de broche utiliser. . .etc. Le couteau que la machine a dans la broche va sculpter le matériau et créer la forme voulue, le matériau qui a été retiré et appelé "copeaux" et il sera généralement recyclé.
On trouve dans la figure 1.7 la Chaine D'information D'une Machine CNC.

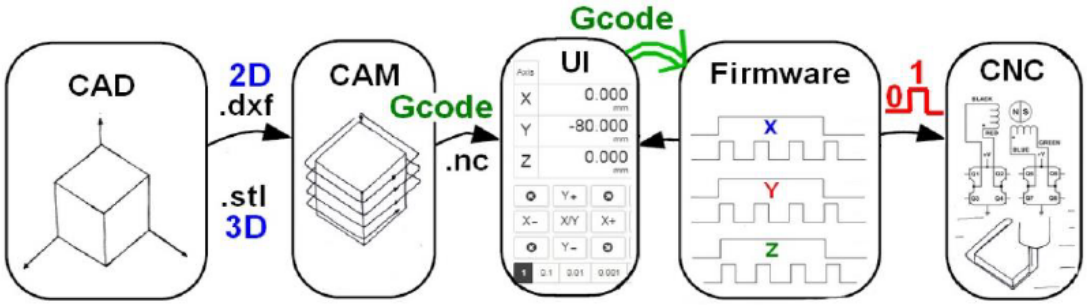


FIGURE 1.7 – Chaine D'information D'une Machine CNC.
[16]

1.4.4 Domaines d'utilisation des machines CNC

Les machines CNC sont employées dans de nombreux secteurs industriels (Métallurgie, Bois, Textile). Elles sont aussi associées à de nouvelles technologies de façonnage (Laser, Électroérosion, Jet d'eau).

1.4.5 Classifications des machines CNC

Plusieurs types de machines CNC existent, on peut les classées selon des critères bien définit, dont les différents catégories sont exposés aux paragraphes qui suivent.

1.4.5.1 Selon les types de pièces usinées

Selon les types de pièces usinées, les machines CNC peuvent être classées en cinq types : les fraiseuses CNC, les tours CNC, les perceuses CNC, les coupeurs plasma CNC et les rectifieuses CNC.

1. **Fraiseuses CNC :**utilisées pour créer des formes, des fentes, des trous, des encoches, des rainures, des poches et des faces spéciales, et effectuer le processus d'usinage de fabrication de pièces de fraisage CNC, les outils de coupe rotatifs sur le moulin pour enlever la matière de la pièce stationnaire, comme illustré dans la figure 1.8.

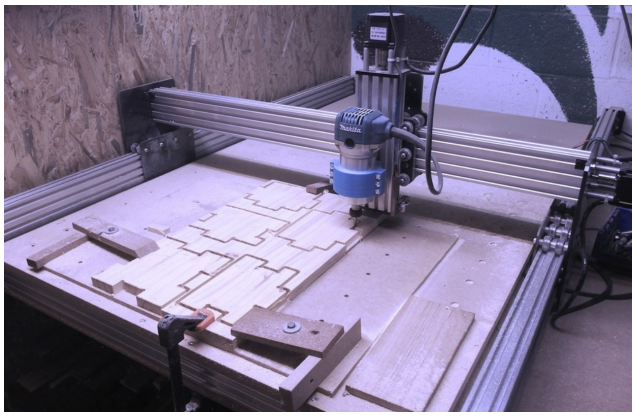


FIGURE 1.8 – Fraiseuses CNC.

2. **Tours CNC :**utilisés pour fabriquer des objets cylindriques et effectuer le processus de production de pièces de tournage CNC, un outil de coupe façonnera la pièce pendant que le bloc de matériau tourne rapidement sur une broche démontré par la figure 1.9.

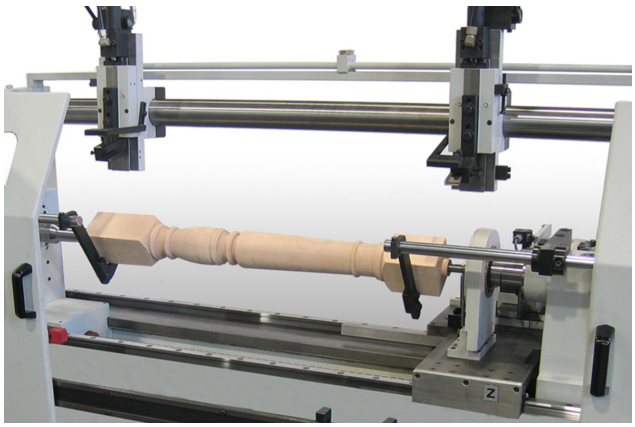


FIGURE 1.9 – Tours CNC.

3. **Machines de forage CNC :**utilisées pour percer des trous dans la pièce, l'outil peut localiser la position de forage rapidement et avec précision, des machines de forage sophistiquées peuvent également effectuer des trous d'alésage, de contre-alésage et de taraudage démontré par la figure 1.10.



FIGURE 1.10 – Forage du cylindre du moteur sur une machine CNC Forage.

4. **Découpeurs plasma CNC :**une machine porte une torche plasma, qui sert à couper les métaux, consiste à couper à travers des matériaux électriquement conducteurs par un jet accéléré de plasma chaud présenté par la figure 1.11.

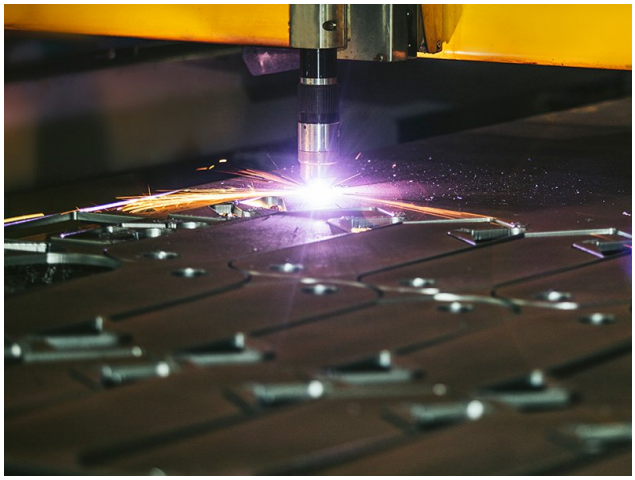


FIGURE 1.11 – Découpeurs plasma CNC.

5. **Rectifieuses CNC :**une machine utilise une roue rotative pour abraser le matériau en le meulant ou en le râpant à la forme souhaitée, il est plus facile à programmer que les fraiseuses et les tours présenté par la figure 1.12.

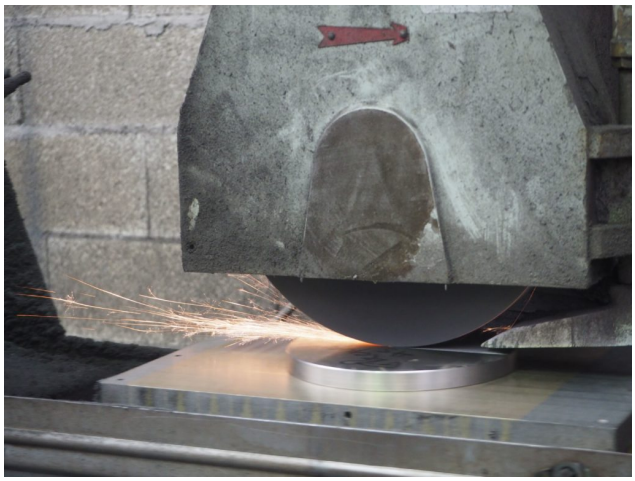


FIGURE 1.12 – Rectification d'un pièce.

1.4.5.2 Selon le type de mouvement ou le mode d'usinage

Classification par mouvement, les machines CNC peuvent être divisées en systèmes point à point, par axial et en systèmes de contournement.

1. **Systèmes point à point :**Tous les axes programmés démarrent toujours simultanément à vitesse rapide et continuent le mouvement jusqu'à ce que chaque axe ait atteint sa position cible. Aucun outil n'est engagé pendant le positionnement. L'usinage ne commence que lorsque tous les axes CN ont atteint leurs positions programmées [14]. Comme observé dans la Figure 1.13 intitulée Commande Numérique Point A Point .

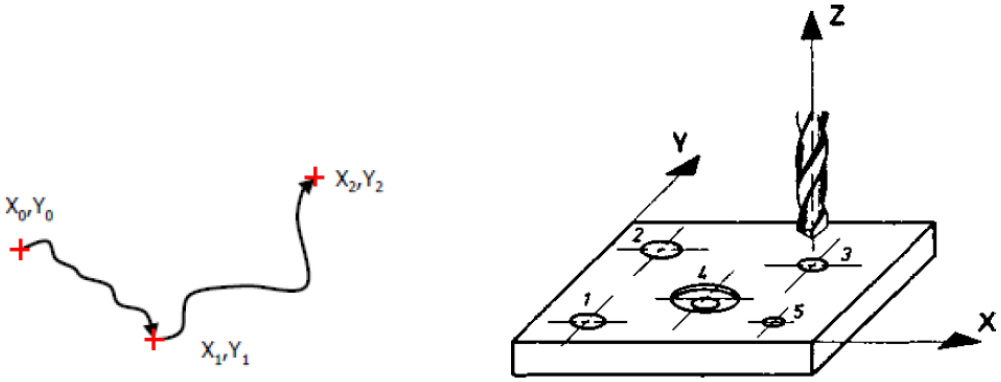


FIGURE 1.13 – Commande Numérique Point A Point.
[8]

2. **Système par axial :**Le mouvement dans ces systèmes peut avoir lieu le long des axes individuels l'un après l'autre à une vitesse d'avance programmable ; l'outil peut

être engagé pendant ce temps. Le mouvement de déplacement est toujours parallèle à l'axe et les vitesses d'avance doivent être programmables[14].Tel que représenté par la Figure 1.14, intitulée Commande numérique paraxiale.

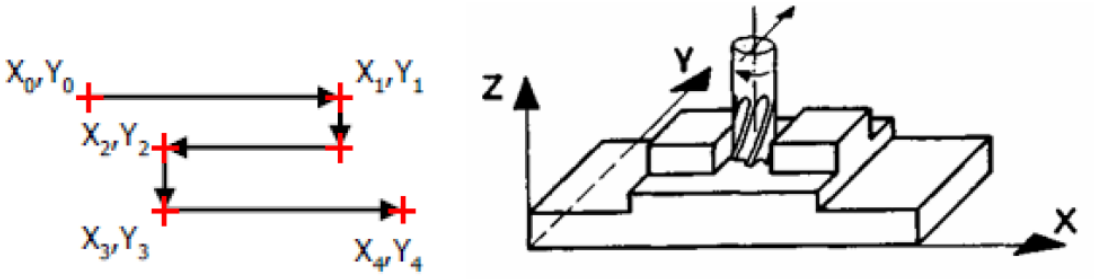


FIGURE 1.14 – Commande numérique paraxiale.
[8]

3. **Systèmes de contournement :**Ces systèmes peuvent "interpoler" les mouvements de deux ou plusieurs axes CN ; c'est-à-dire qu'ils peuvent exécuter leurs mouvements dans un rapport exact les uns par rapport aux autres. Les axes ne s'arrêtent cependant pas au point final programmé, mais continuent au contraire à se déplacer sans interruption jusqu'au point final de la section de trajectoire suivante. Les vitesses d'avance des axes sont contrôlées en continu de manière à maintenir la vitesse de coupe désignée [14].

   On trouve dans la figure 1.15 une représentation de commande numérique de contournage(interpolation linéaire et circulaire).

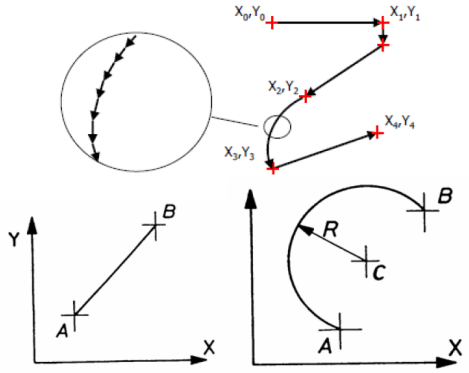


FIGURE 1.15 – Commande numérique de contournage(interpolation linéaire et circulaire).
[8]

1.4.5.3 Selon le nombre d'axes

Lorsqu'elles sont classées par nombre d'axes, les machines CNC peuvent généralement être divisées en cinq groupes : les machines à 2 axes, les machines à 2,5 axes, les machines à 3 axes, les machines à 4 axes et les machines à 5 axes.

1. **Machines CNC 2 axes :**une machine donne accès à seulement deux axes, comme les machines de tour, l'outil se déplace dans 2 directions, comme X et Z.
2. **Machines CNC 2,5 axes :**est également un système à 3 axes mais le mouvement n'est pas en trois dimensions, les axes X et Y sont d'abord déplacés vers la position, puis le troisième axe commence à fonctionner, comme le perçage et le taraudage Machines.
3. **Machines CNC à 3 axes :**trois axes (X, Y et Z) se déplacent simultanément en trois dimensions, c'est la machine la plus largement utilisée et la plus polyvalente qui peut atteindre une précision et une précision élevées, peut être utilisée pour un fonctionnement automatique / interactif, des fentes de fraisage, percer des trous et couper des arêtes vives. La figure 1.16 représente un fraiseuse CNC 3 axes (3D)

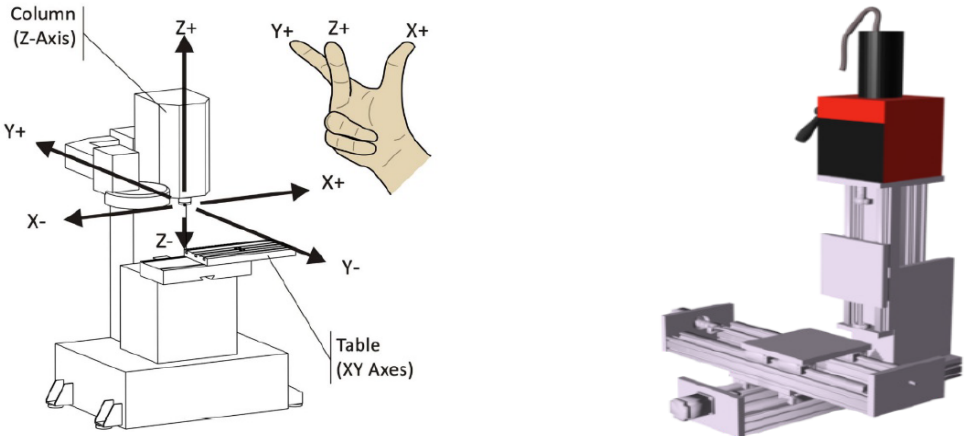


FIGURE 1.16 – Fraiseuse CNC 3 axes (3D)

4. **Machines CNC à 4 axes :**la machine à 3 axes avec une rotation supplémentaire sur l'axe A ou l'axe B, l'exemple courant est une machine verticale ou une machine horizontale. Dans le cas de l'usinage 4 axes, le fraisage est effectué sur l'axe supplémentaire, tandis que l'opération sur X, Y et Z est la même que sur le système 3 axes, et la rotation sur l'axe A ou B est autour du X -axe.
   La figure 1.17 représente un fraiseuses 4 axes.

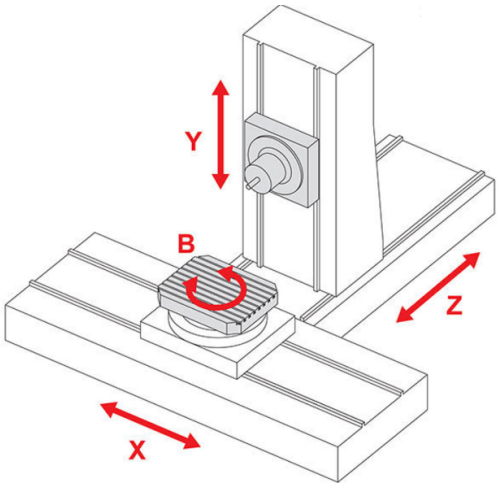


FIGURE 1.17 – Fraiseuses 4 axes.

5. **Machines CNC 5 axes :**la machine 3 axes avec rotation supplémentaire selon deux directions (Y et Z) sur axe A et axe B, les rotations sont respectivement données par le mouvement du banc et de la broche (point de pivot). Les machines à 5 axes sont des machines CNC avancées et sa rotation multidimensionnelle et son mouvement d'outil permettent la création de pièces précises et complexes en raison de l'accès amélioré aux contre-dépouilles et aux poches profondes, à une finition et à une vitesse inégalées, souvent utilisées pour des applications de haut niveau, comme les pièces aérospatiales.des os artificiels, des pièces en titane, des pièces de machines à pétrole et à gaz, des produits militaires et plus encore[14].
   La figure 1.18 représente un fraisage CNC 5 axes.

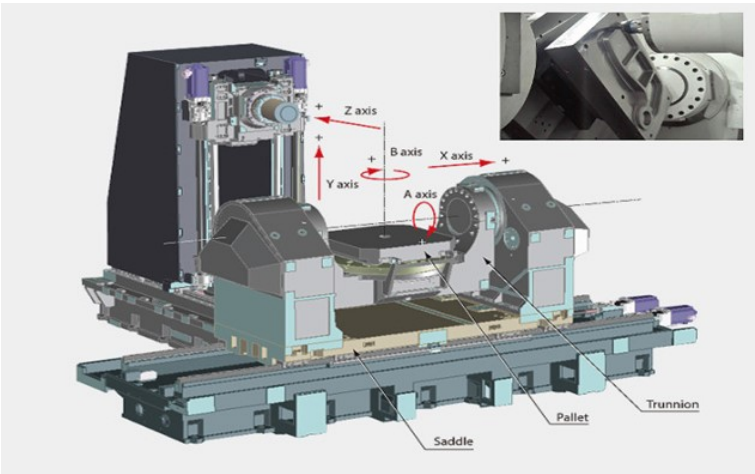


FIGURE 1.18 – Fraisage CNC 5 axes.

1.5 Les origines des systèmes de coordonnées

TABLE 1.1 – Origines utilisées dans des MOCN.

Points utilisées	Symbole	Définition
Origine machine (OM)		C'est la référence des déplacements de la machine .C'est un point défini (sur chaque axe) par le constructeur qui permet de définir l'origine absolue de la machine.OM et om peuvent être confondues.
Origine mesure (Om)		C'est le point de départ de toutes les mesures dans l'espace machine
Origine Programme OP		C'est le point de départ de toutes les cotes.
Origine Pièce W (Op)		origine de la mise en position (isostatique de la pièce)

La figure suivante représente la répartition des origines en tournage et en fraisage 1.19.

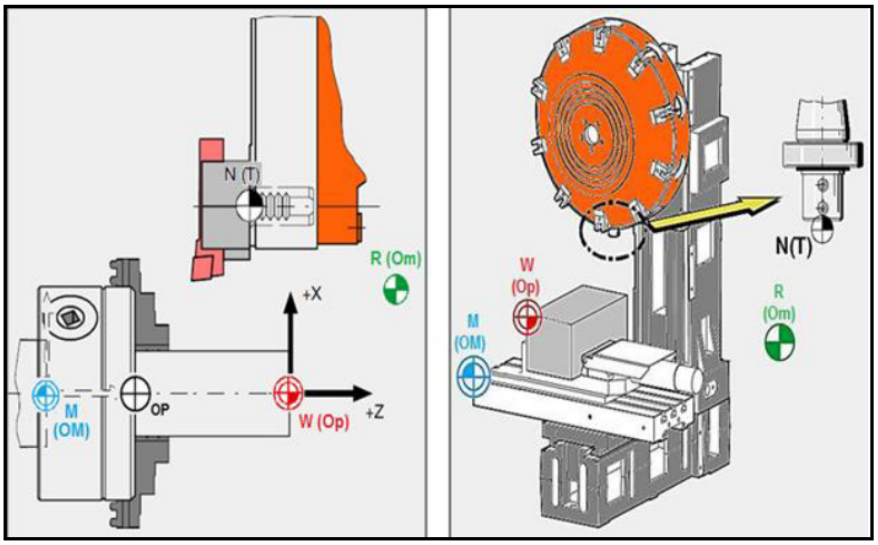


FIGURE 1.19 – Représentation des origines.
[20]

1.6 Avantages et inconvénients liés aux machines CNC

- **Avantages**
  - Permet la réalisation d'usinages impossibles sur les machines conventionnelles :Surfaces complexes et très grand nombre d'opération
  - 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
- **Inconvénients**
  - 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.
  - Equipement annexe : ordinateur, logiciel, banc de réglage des outils, changeur d'outil.
  - Changement dans les méthodes de préparation et de fabrication.
  - Réticence du personnel au changement.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré le domaine des machines à commande numérique par ordinateur (CNC). Nous avons examiné le principe de fonctionnement des machines CNC, leur large éventail d'applications dans différents secteurs industriels, ainsi que leur classification en fonction de divers critères tels que la structure, le type de mouvement et la complexité des opérations.

Chapitre 2

Conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO)

2.1 Introduction

La conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO) sont deux processus virtuels CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qui ont révolutionné les procédés de fabrication. La géométrie finale d'une pièce usinée peut être prédite grâce aux outils numériques de conception et de fabrication qui permettent de simuler le processus de coupe après définition de la pièce brute, de l'outil, du mouvement relatif entre la pièce et l'outil (trajectoire) et des conditions de coupe.

2.2 Conception assistée par ordinateur (CAO)

La conception assistée par ordinateur « CAO » comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer. Les surfaces en CAO sont de deux types.

— **Modèle continu :** il est basé sur les équations mathématiques des différentes entités géométriques

— **Modèle discret :**l'objet est défini par des entités géométriques simples.

2.2.1 Méthodes de représentation des surfaces

— **Méthodes de représentation des surfaces du modèle continu :** la plupart des surfaces usinées sont des surfaces complexes (surfaces gauches). En CAO, les méthodes de représentation des surfaces sont classées en deux catégories : surface non paramétrique et surface paramétrique.

— **Surface non paramétrique :** elle est de deux formes différentes :

— **Formes explicites :** elle est définie par une fonction de deux variables : Z = S(X, Y)

— **Formes implicites :** elle est définie par une fonction de trois variables : S(X, Y, Z) = 0

— **Surface paramétrique :** elles sont très utilisées dans la modélisation. Elles sont définies par un ensemble de trois fonctions réelles X(), Y() et Z(). Ces fonctions dépendent de deux paramètres u et v [13].

La figure 2.1 illustre la Surface paramétrique.

$$S(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v)) \qquad \text{Avec } u, v \in [0,1] \times [0,1]$$

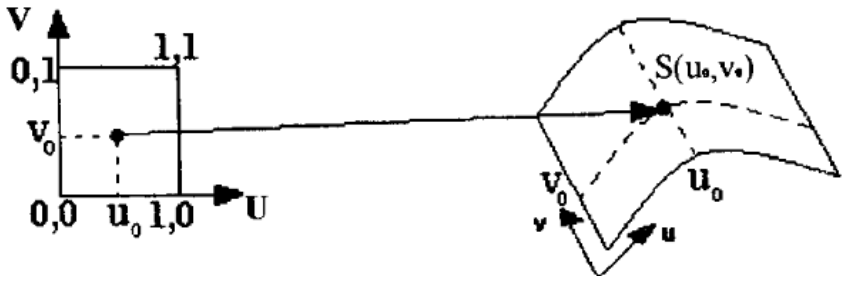


FIGURE 2.1 – Surface paramétrique.

— **Méthodes de représentation des surfaces du modèle discret :** dans le modèle discret les surfaces sont représentées par des éléments géométriques simples tels que points, triangles, tétraèdres . . . etc [13].

2.2.2 Format d'échange de données

C'est la convention qui permet d'échanger des données entre divers programmes ou logiciels par l'intermédiaire d'un fichier. Ils sont utilisés dans le cas où la CAO et la FAO ne font pas partie du même environnement pour assurer la transmission de l'information entre ces deux plateformes et garantir la compréhensibilité . Parmi ces formats, **STEP** (**S**tandard

d'**E**change et **T**ransfert), **IGES** (**I**nitial **G**raphical **E**xchange**S**ystem), **STL** (**S**tandard **T**assellation **L**anguage)[12].
La figure 2.2 illustre l'Echange de données entre deux systèmes.

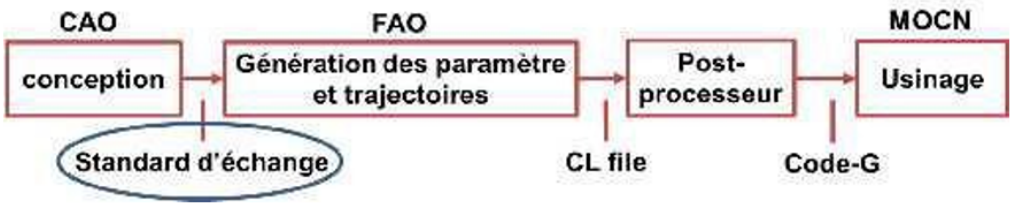


FIGURE 2.2 – Echange de données entre deux systèmes.
[12]

— **Format de fichier STL (Standard Tessellation Language) :** le format de fichier STL est un format de fichier natif du logiciel CAO créé par 3D System. Il est pris en charge par de nombreux logiciels. Il est largement utilisé dans le prototypage rapide et pour la fabrication assistée par ordinateur. Le fichier STL ne décrit que la géométrie des surfaces d'un objet en 03 dimensions par un ensemble de triangles[12].
On trouve dans la figure 2.3 une Représentation CAO représentation STL et paramètres d'un triangle.

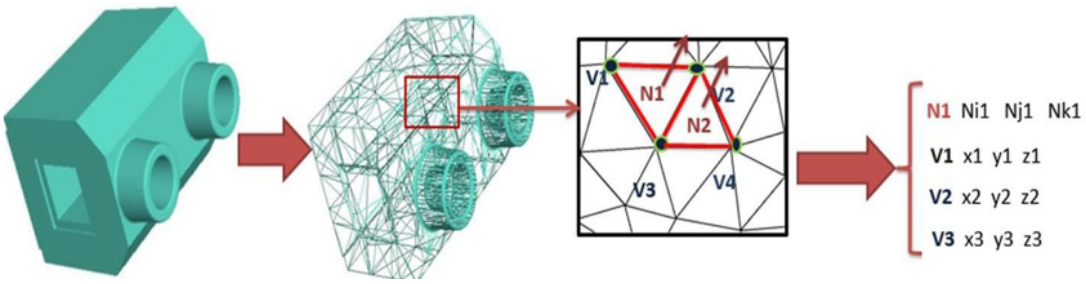


FIGURE 2.3 – Représentation CAO représentation STL et paramètres d'un triangle.
[12]

— **Stockage des informations dans un fichier STL :**les informations des triangles sont stockées avec deux manières : codage ASCII et codage binaire. Pour les deux codages, les coordonnées des sommets et les composantes du vecteur normal unitaire au triangle sont stockées mais de deux manières différentes.
  — **Format STL ASCII :**il est le plus descriptif et lisible mais de grande taille. Le fichier ASCII commence par la ligne « SolidName » où Name est une chaine de

caractère. Chaque triangle est défini par les coordonnées de ses sommets et les composantes de son vecteur normal unitaire. Il se termine par « endsolid Name »

— **Format STL BINAIRE :**il a moins de taille mais non lisible et trop condensé . Son entête se compose de 84 octets. Les premiers 80 octets sont utilisés pour obtenir des informations sur le fichier, et les 4 derniers octets représentent le nombre de facettes triangulaires. 50 octets sont utilisés pour représenter les composantes x, y et z de la normale pour chaque facette. 4 octets sont utilisés pour chaque coordonnée x, y et z de chaque sommet du triangle (48 octets par facette). Les deux derniers octets ne sont pas utilisés[12].
On trouve dans la figure 2.4 une Représentation de Formats STL ASCII et BINAIRE..

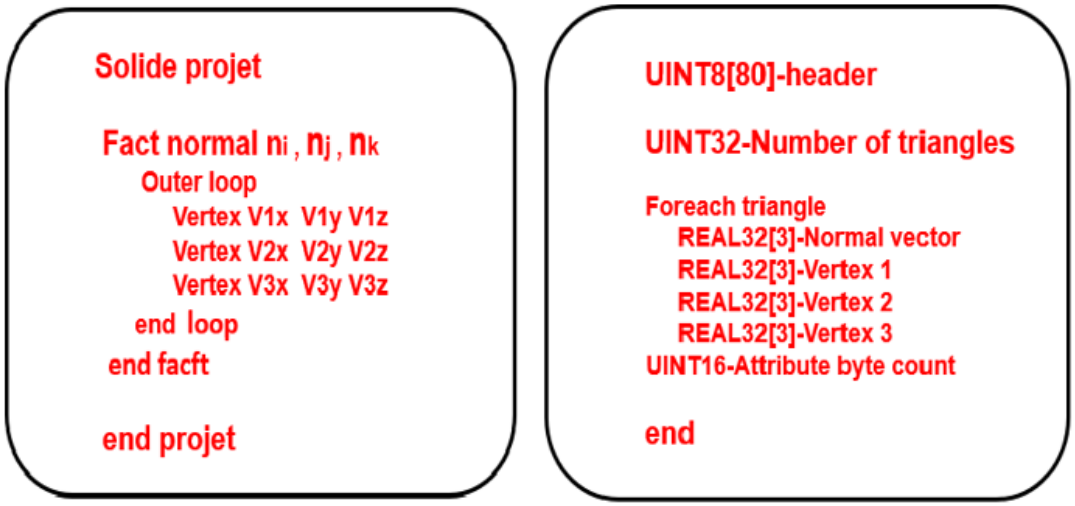


FIGURE 2.4 – Formats STL ASCII et BINAIRE.
[12]

2.2.3 Avantages et inconvénients du format STL :

— **Avantages :**
  — Format de fichier compact et simple.
  — Compatible avec de nombreux logiciels de modelage 3D.
  — Très répandu dans l'industrie des prototypes .

— **Inconvénients :**
  — Supprime les informations de connectivité.
  — Erreurs topologiques pour une géométrie complexe
  — Fichier volumineux .

— Le support des couleurs n'est pas standard et n'est souvent pas possible.
— Les faibles rayons de courbures exigent un grand nombre de triangles .

2.2.4 Quelque Logiciels de CAO

Un grand nombre de logiciels de CAO sont disponibles en open-source par exemple :
— Art of Illusion,Blender,
— FreeCAD,
— ImplicitCAD,
— QCAD,
— OpenCASCADE.
— Solidworks.
— Fusion360.

2.3 Fabrication assistée par ordinateur (FAO) :

Le but de la fabrication assistée par ordinateur « FAO » est de générer le fichier contenant le programme de pilotage d'une machine-outil à commande numérique. Ce fichier va décrire exactement les mouvements que doit exécuter la machine-outil pour réaliser la pièce demandée. Ce type de fichiers est appelé « G-Code »[23].

2.3.1 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[5].
Dans la figure 2.5, on a un exemple de programme.

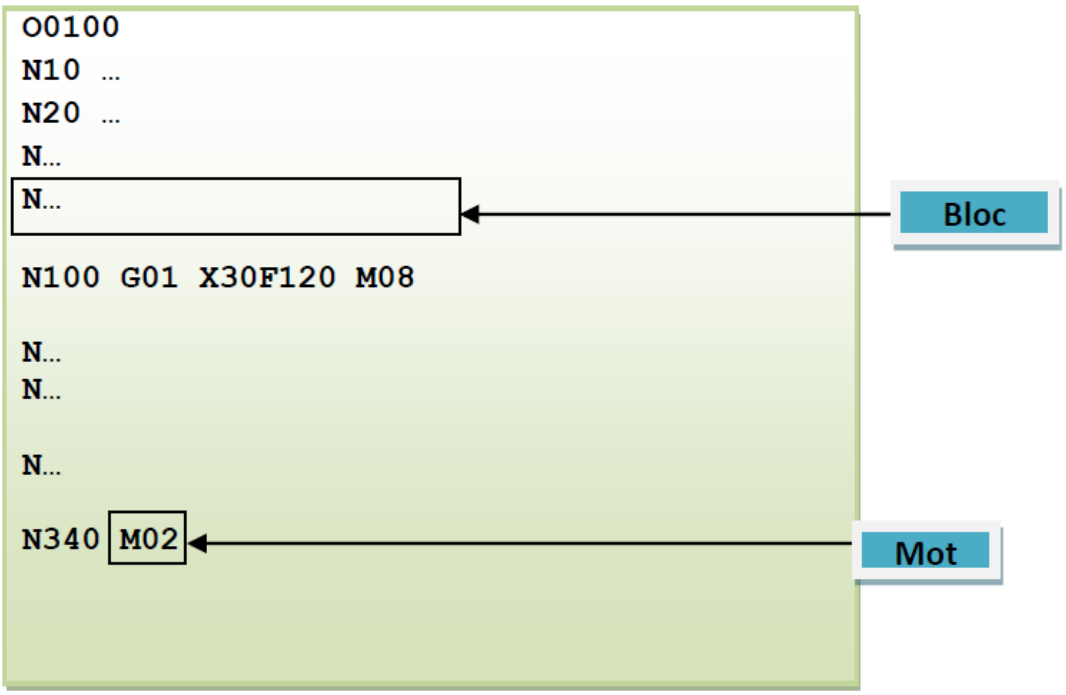
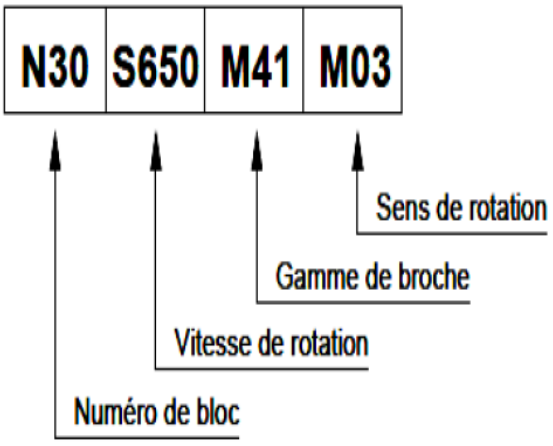
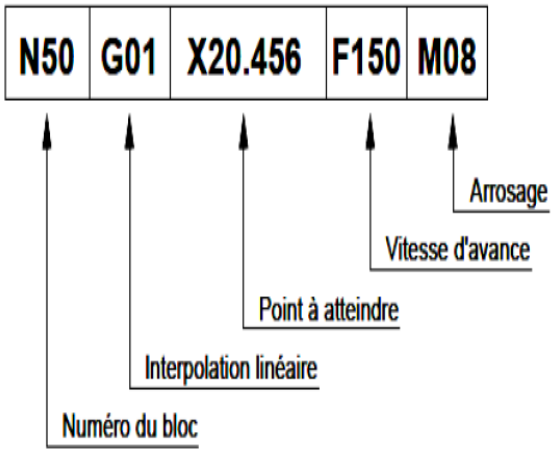


FIGURE 2.5 – Exemple de programme.

— **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[5].
Dans la figure 2.6, on a des Exemples de Blocs.



(a) Ecriture d'un bloc définissant la mise en rotation de broche.



(b) Ecriture d'un bloc définissant une trajectoire.

FIGURE 2.6 – Exemple Bloc

- **Mot :** ensemble de caractères comportant une adresse suivie de chiffres constituant une information. Exemple : X 10.850.
- **Adresse :** lettre débutant un mot d'un langage machine, qui précise la fonction générale commandée .
- **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.
- **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[5].

  Pour l'usinage d'une pièce simple ne nécessite pas de cycles d'ébauche, un programme CN peut être structuré de la manière illustré dans la figure 2.7 :

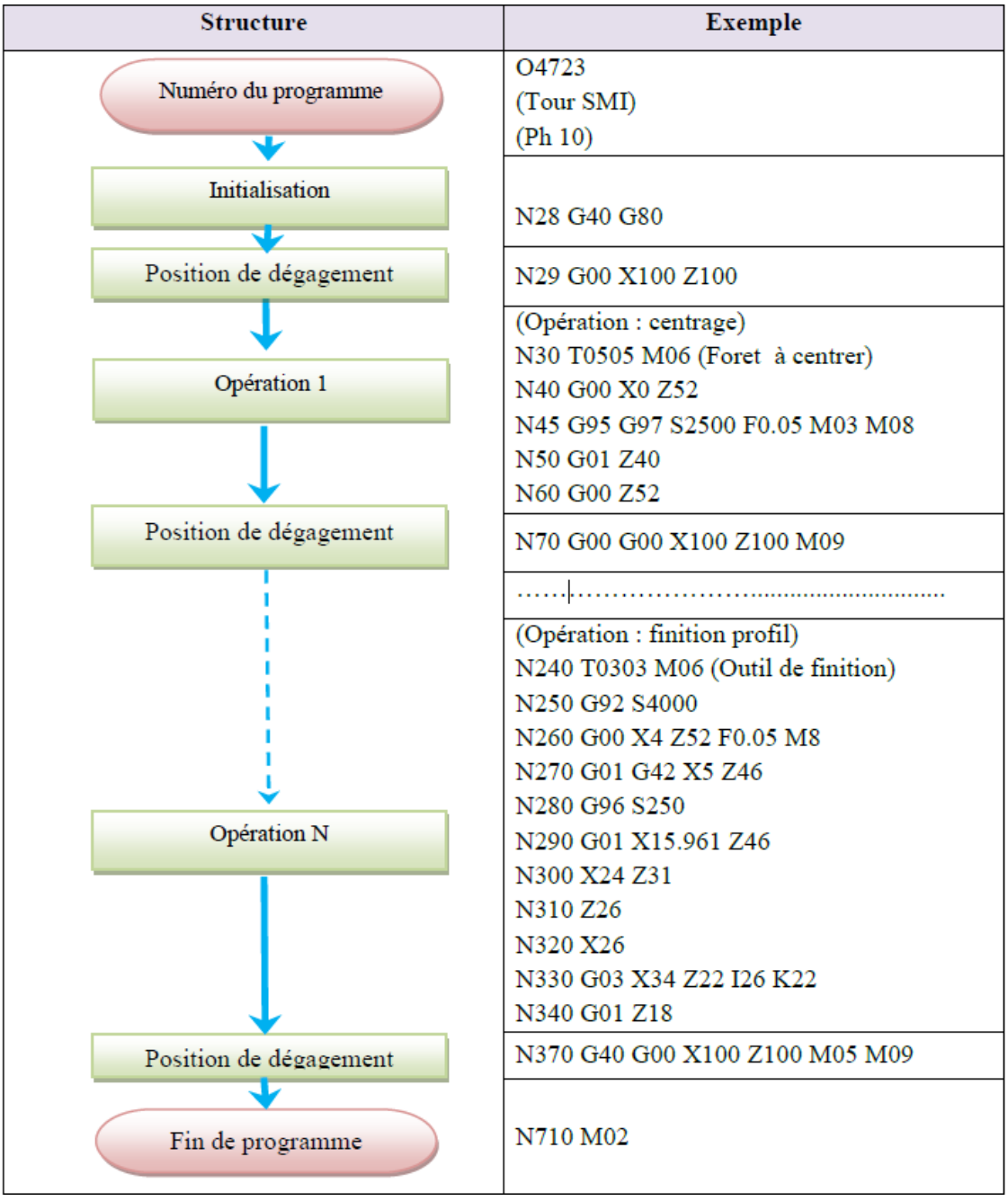


FIGURE 2.7 – Structure d'un programme CN.

[5]

— **Structure d'une opération :** Dans la figure 2.8, on peut observer les différents Structure d'une opération CN.

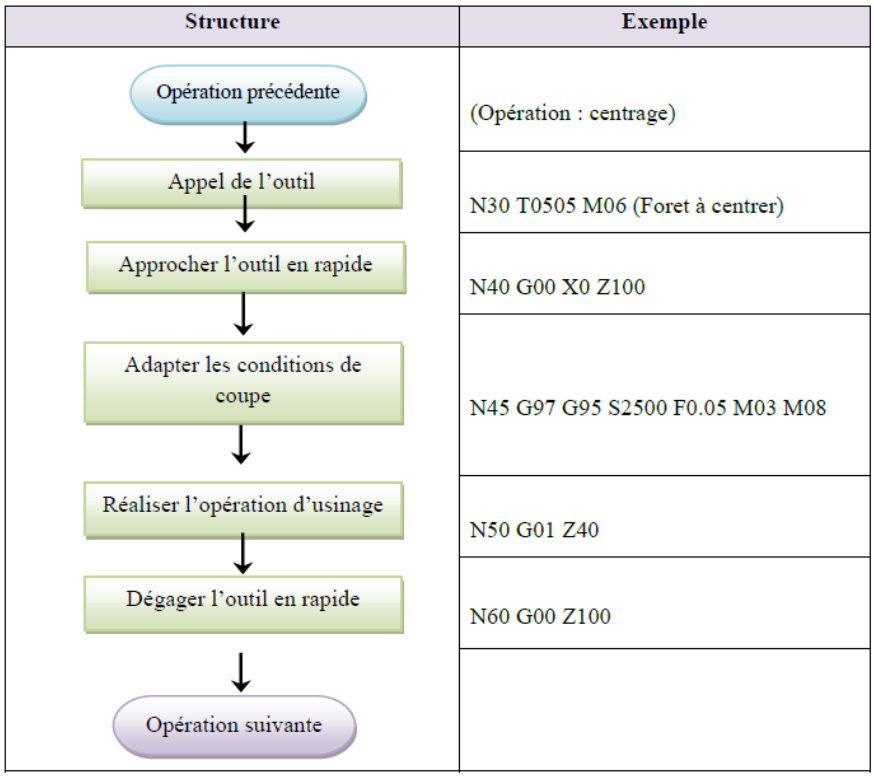


FIGURE 2.8 – Structure d'une opération CN.

[5]

2.3.2 Les fonctions préparatoires G

1. **Classification des fonctions préparatoires G**

   — **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.

   — **Fonctions G non modales :** Fonctions uniquement valide dans le bloc ou elles sont programmées (révoquée en fin de bloc).

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. Dans la figure 2.9, on peut observer l'Usinages absolue (G90) et l'Usinages relative (G91).

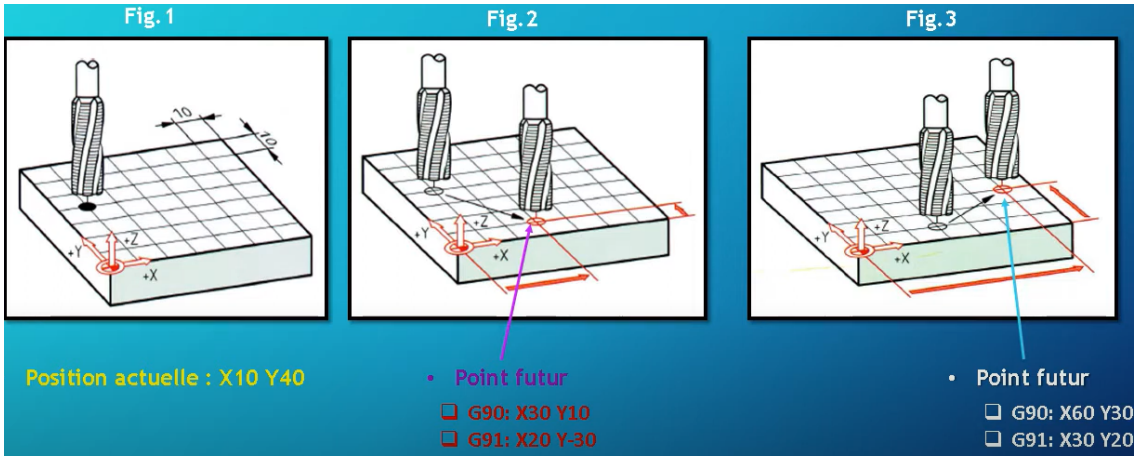


FIGURE 2.9 – Usinages absolue (G90) et Usinages relative (G91)

3. **Programmation des déplacements :**

   (a) **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.

Syntaxe

N..G00 X.. Y.. Z..

X.. Y.. Z.. Point à atteindre

Dans la figure 2.10, on peut observer Interpolation linéaire à vitesse rapide G00

.

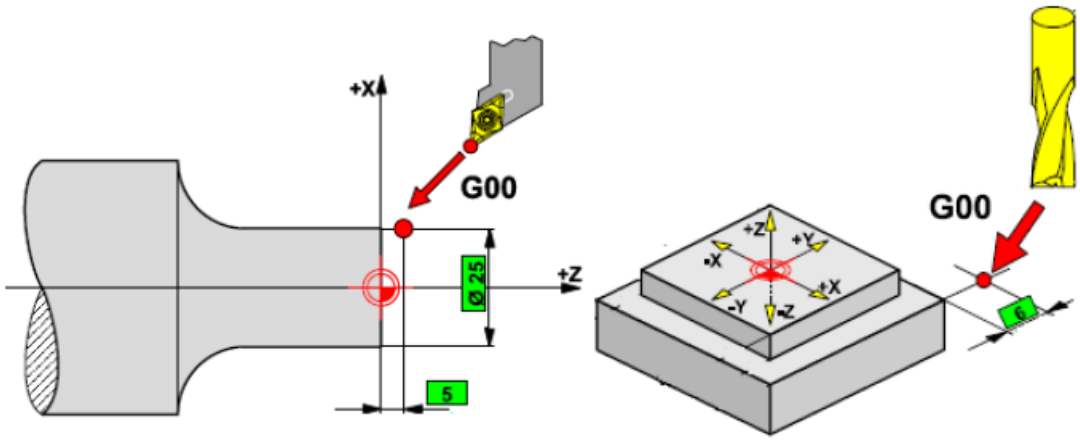


FIGURE 2.10 – Interpolation linéaire à vitesse rapide G00

(b) **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.

La figure 2.11 représente L'interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée G01

Syntaxe

N...G01 X.. Y.. Z.. [F..]

G01.. : Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée.

X.. Y.. Z.. : Point à atteindre .

F.. : Vitesse d'avance.

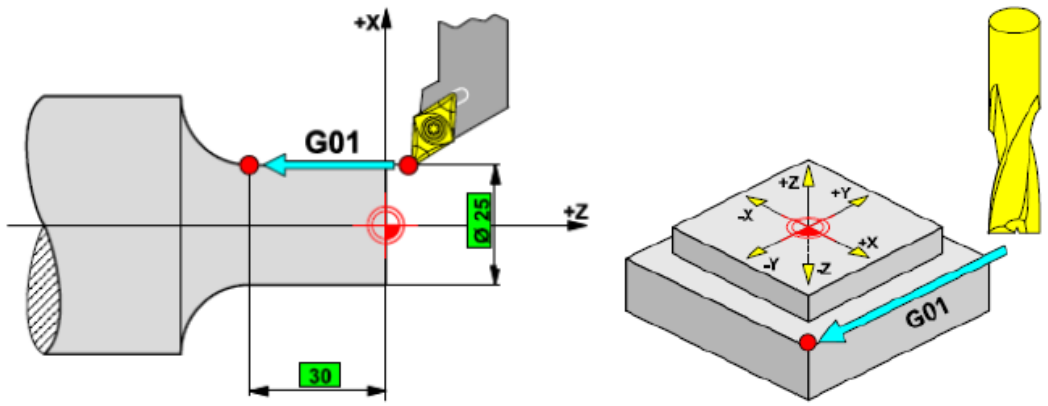


FIGURE 2.11 – Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée G01

(c) **Interpolation circulaire**

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

La figure 2.12 représente L'interpolation circulaire sens anti-trigonométrique à vitesse d'avance programmée[6].

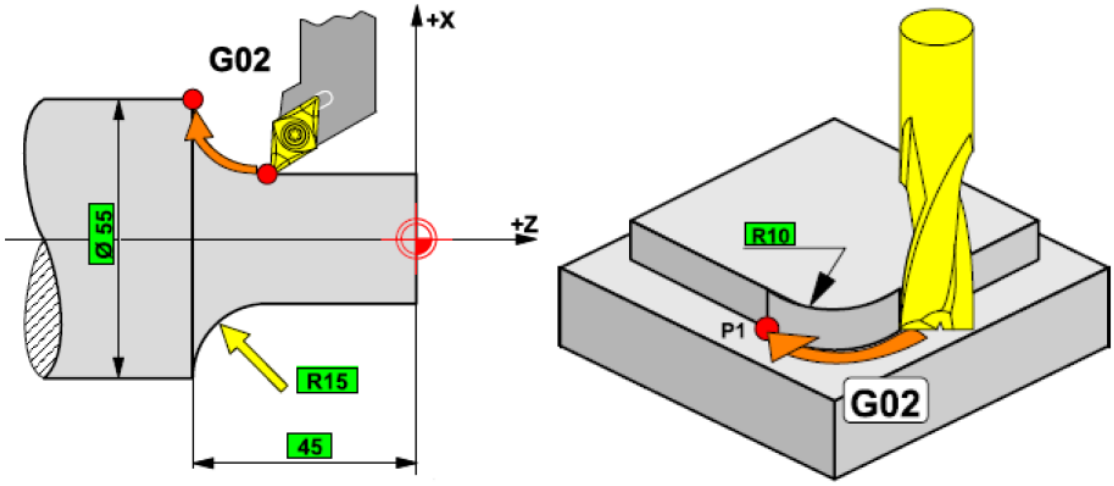


FIGURE 2.12 – Interpolation circulaire sens anti-trigonométrique

G03 : Interpolation circulaire sens trigonométrique à vitesse d'avance programmée[6].

La figure 2.13 représente L'Interpolation circulaire sens trigonométrique.

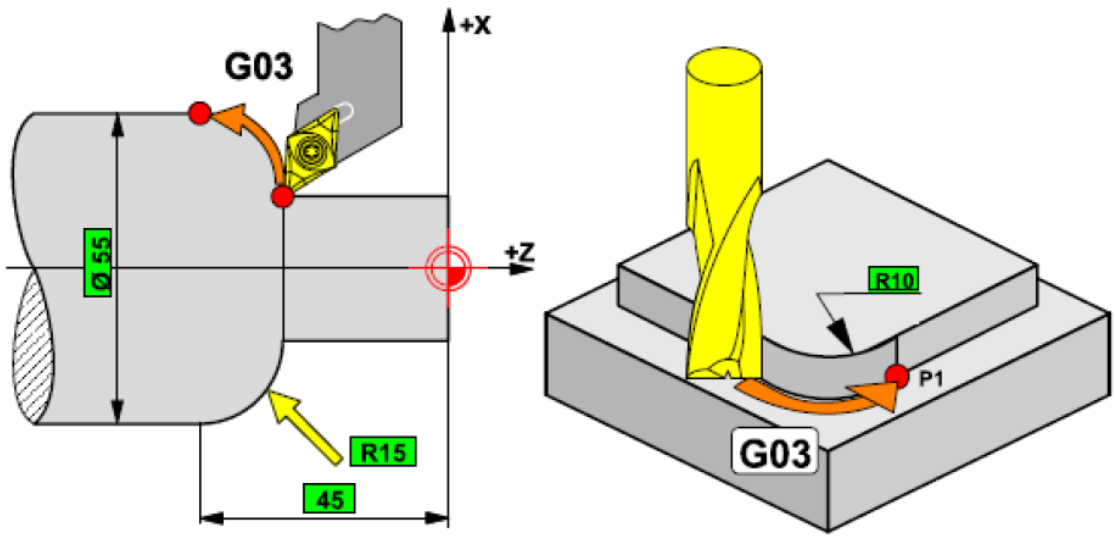


FIGURE 2.13 – Interpolation circulaire sens trigonométrique

2.3.3 Les fonctions auxiliaires M

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[6].

     La figure 2.14 représente La rotation de broche dans le sens anti-trigonométrique.

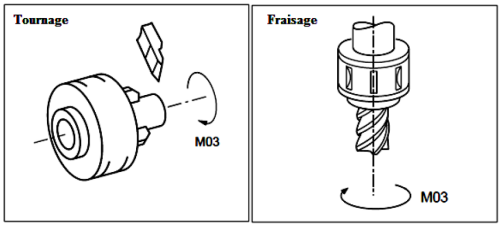


FIGURE 2.14 – Rotation de broche dans le sens anti-trigonométrique.

M04 : Rotation de broche dans le sens trigonométrique. La commande permet la mise en rotation de la broche à la vitesse programmée[6]. La figure 2.15 représente La rotation de broche dans le sens trigonométrique.

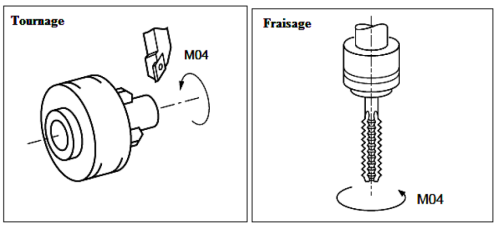


FIGURE 2.15 – Rotation de broche dans le sens trigonométrique.

Syntaxe

N..M03/M04/M05

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[6].

   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.

   La figure 2.16 représente La rotation de broche dans le sens trigonométrique

Syntaxe

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

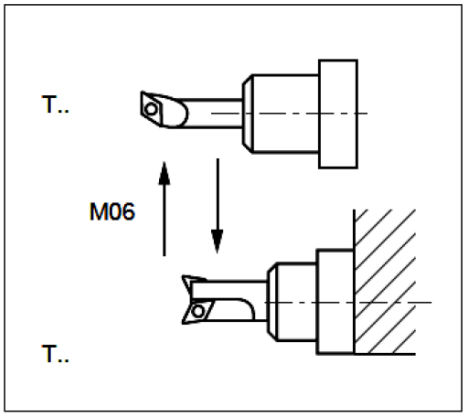


FIGURE 2.16 – Appel ou changement d'outil.

2.3.4 Quelque Logiciels de FAO

Les outils de la FAO sont des modeleurs, nous citons :

— Catia.
— RhinosCAM.
— SolidCAM.
— Power MILL.
— Hyper MILL.
— Camworks.
— Fusion360.
— ArtCAM.

2.4 Conclusion

Ce chapitre explore la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO). La CAO permet de créer des modèles virtuels de pièces avec des logiciels spécialisés, en utilisant notamment le format STL. La FAO génère des programmes de commande numérique (CNC) à partir de ces modèles pour piloter les machines-outils, en utilisant des fonctions préparatoires G et auxiliaires M. En conclusion, l'intégration de la CAO et de la FAO est cruciale pour une fabrication moderne précise et efficace, permettant une production rapide et économique dans diverses industries.

Chapitre 3

Conception

3.1 Introduction

Dans le domaine de la fabrication assistée par ordinateur (FAO), la conversion de conceptions virtuelles en instructions exécutables pour les machines CNC est une étape cruciale. Le convertisseur de points en code G est un outil essentiel dans ce processus, permettant de traduire les trajectoires de découpe ou de gravure en instructions précises pour les machines CNC. Dans cette exploration approfondie, nous examinerons en détail les fonctionnalités clés de ce convertisseur et leur importance dans le flux de travail de fabrication. L'objectif de notre travail est de fournir une analyse approfondie du convertisseur de points en code G, en explorant ses fonctionnalités clés et leur importance dans le processus de fabrication assistée par ordinateur.Pour cela, plusieurs problèmes doivent être résolus :

- Comment le convertisseur traite-t-il les points XYZ pour les rendre compatibles avec la conversion en code G ?
- Pourquoi est-il nécessaire de diviser les points en deux groupes distincts en fonction de leur position par rapport au point d'origine de la machine CNC ?
- Quels sont les éléments pris en compte lors de la conversion des trajectoires de points en instructions G-Code détaillées ?
- Quels types d'erreurs ou d'incohérences sont détectés et corrigés lors de la vérification des données avant la conversion finale en code G ?
- En quoi l'intégration avec une simulation CNC est-elle bénéfique pour valider les trajectoires de découpe ou de gravure avant leur exécution sur la machine réelle ?

3.2 Solution proposée

En informatique, la résolution d'un problème passe par sa décomposition en une suite d'étapes successives pour pouvoir proposer une solution adéquate. Dans notre cas, les étapes suivies sont présentées dans l'organigramme général suivant

3.2.1 Traitement des Points

- Cette étape initiale implique la manipulation des données XYZ représentant les trajectoires de découpe ou de gravure. Les données peuvent être obtenues à partir de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou de numérisations de modèles physiques.
- Le traitement des points vise à garantir leur cohérence et leur précision pour la conversion en code G. Cela peut impliquer des opérations telles que le filtrage pour éliminer le bruit, le lissage pour rendre les trajectoires plus fluides, ou la normalisation pour ajuster l'échelle ou l'orientation.
- Les points peuvent également être triés ou organisés selon divers critères, comme leur ordre séquentiel le long de la trajectoire ou leur position spatiale par rapport au point d'origine de la machine CNC.

3.2.2 Division des Points

- Une fois les données préparées, elles peuvent être divisées en deux groupes distincts en fonction d'un point de division spécifié par l'utilisateur (point X). Ce point de division est crucial pour séparer les trajectoires destinées à chaque tête de la machine CNC. La division des points permet de générer deux ensembles de trajectoires adaptées à chaque côté de la machine, évitant ainsi les collisions et optimisant les mouvements des têtes de découpe ou de gravure.

3.2.3 Conversion en G-Code

- Une fois les points divisés, chaque groupe de points est transformé en instructions G-Code appropriées. Cette conversion nécessite une compréhension approfondie des spécifications de la machine CNC cible, y compris ses capacités de mouvement, ses limitations matérielles et ses paramètres de configuration.
- Les trajectoires représentées par les points sont converties en une série d'instructions G-Code détaillées, spécifiant les mouvements de la machine. Cela comprend les déplacements

linéaires, les arcs de cercle, les changements d'outil, les vitesses d'avance, etc.

3.2.4 Vérification et Correction

- Avant de finaliser la conversion en code G, les données sont soumises à une vérification approfondie pour garantir leur précision et leur conformité aux spécifications de la machine CNC. Cela implique la détection et la correction d'éventuelles erreurs ou incohérences dans les données.
- Les erreurs peuvent inclure des points aberrants, des collisions potentielles d'outils ou des dépassements de capacité de la machine. Une fois détectées, ces erreurs sont corrigées pour garantir que les instructions G-Code générées produiront les résultats attendus lorsqu'elles seront exécutées sur la machine CNC réelle.

3.2.5 Intégration avec la Simulation CNC

- Enfin, le convertisseur peut être intégré dans des applications de simulation CNC existantes. Cela permet aux utilisateurs de visualiser et de valider les trajectoires de découpe ou de gravure avant de les envoyer à la machine réelle.
- La simulation permet une évaluation approfondie des programmes d'usinage, réduisant ainsi le risque d'erreurs et de dommages matériels lors de l'exécution sur la machine réelle. Les utilisateurs peuvent explorer virtuellement les trajectoires, détecter les erreurs ou les anomalies potentielles et apporter des ajustements si nécessaire, garantissant ainsi des performances optimales lors de la production réelle.

3.3 Modélisation UML (Unified Modeling Language).

UML est un langage visuel constitué d'un ensemble de schémas, appelés diagrammes, qui donnent chacun une vision différente du projet à traiter. Il nous fournit des diagrammes pour représenter le logiciel à développer : son fonctionnement, sa mise en route, les actions susceptibles d'être effectuées par le logiciel, . . .etc. UML permet de :

- Donner une structuration cohérente des fonctionnalités et des données.
- Penser objets dès le départ.
- Faciliter l'analyse, la compréhension et la réduction de la complexité d'un système.
  Dans ce projet, trois diagrammes sont utilisés à savoir diagramme de cas d'utilisation, diagramme d'activité et diagramme de classes.

3.3.1 Diagramme de cas d'utilisation

Nous commençons par le diagramme de cas d'utilisation général qui donne une vue globale du fonctionnement du système.

- **Ouvrir un fichier G-code :**L'utilisateur peut sélectionner cette option pour charger un fichier G-code dans l'application. Cela permet d'importer les instructions de commande pour la simulation.
- **Fermer un fichier G-code :**Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de fermer le fichier G-code actuellement chargé dans l'application. Cela peut être utile pour terminer une session de travail ou pour charger un autre fichier.
- **Démarrer la simulation :**En choisissant cette option, l'utilisateur lance la simulation du fichier G-code chargé. Cela déclenche l'exécution des commandes de mouvement et l'affichage du processus de fabrication dans le simulateur.
- **Arrêter la simulation :**Si l'utilisateur souhaite interrompre la simulation en cours, il peut sélectionner cette option. Cela met fin à l'exécution des commandes et arrête l'affichage du processus de fabrication.
- **Continuer la simulation :**Lorsque la simulation est arrêtée, cette option permet à l'utilisateur de reprendre là où il s'était arrêté. Cela peut être pratique pour examiner un point spécifique du processus de fabrication.
- **Ajuster la vitesse :**Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de régler la vitesse de simulation selon ses besoins. Il peut accélérer ou ralentir le défilement des commandes pour mieux visualiser le processus.
- **Préparation de la Simulation avec Deux Têtes (Option de Division) :** Avant de lancer la simulation, l'utilisateur peut activer l'option "Diviser" pour préparer la simulation avec deux têtes de machine CNC. En sélectionnant un point spécifique sur l'image de la pièce à usiner, l'utilisateur détermine où diviser le processus d'usinage. L'application ajuste alors la visualisation pour afficher deux trajectoires distinctes correspondant aux chemins de chaque tête de la machine CNC.
- **Enregistrement du Nouveau Fichier G-code :** Une fois la simulation avec deux têtes terminée et validée, l'utilisateur peut sauvegarder le nouveau fichier G-code modifié en utilisant le bouton "Enregistrer". Cela permet de conserver les modifications apportées, y compris les ajustements spécifiques pour la simulation à deux têtes.
- **Enregistrement de l'Image :**En plus de sauvegarder le fichier G-code, l'utilisateur peut également enregistrer l'image résultante de la simulation en utilisant une option dédiée. Cela capture visuellement le résultat de l'usinage simulé, offrant ainsi une

documentation visuelle du processus.

— **Viewer Path :** Cette fonctionnalité offre une vue détaillée des trajectoires de coupe, de perçage et d'autres mouvements programmés avant le début de la simulation. Lorsque cette option est activée, les chemins sont affichés avec des indications visuelles telles que des couleurs ou des intensités pour représenter la profondeur ou l'intensité des opérations prévues. En désactivant "Viewer Path", l'application se concentre uniquement sur l'affichage du résultat visible de la simulation en cours, ce qui facilite l'analyse directe de la performance réelle des opérations d'usinage sur la pièce.

Dans la figure 3.1, Le diagramme de cas d'utilisation permet de représenter les différentes façons dont un utilisateur peut interagir avec le système.

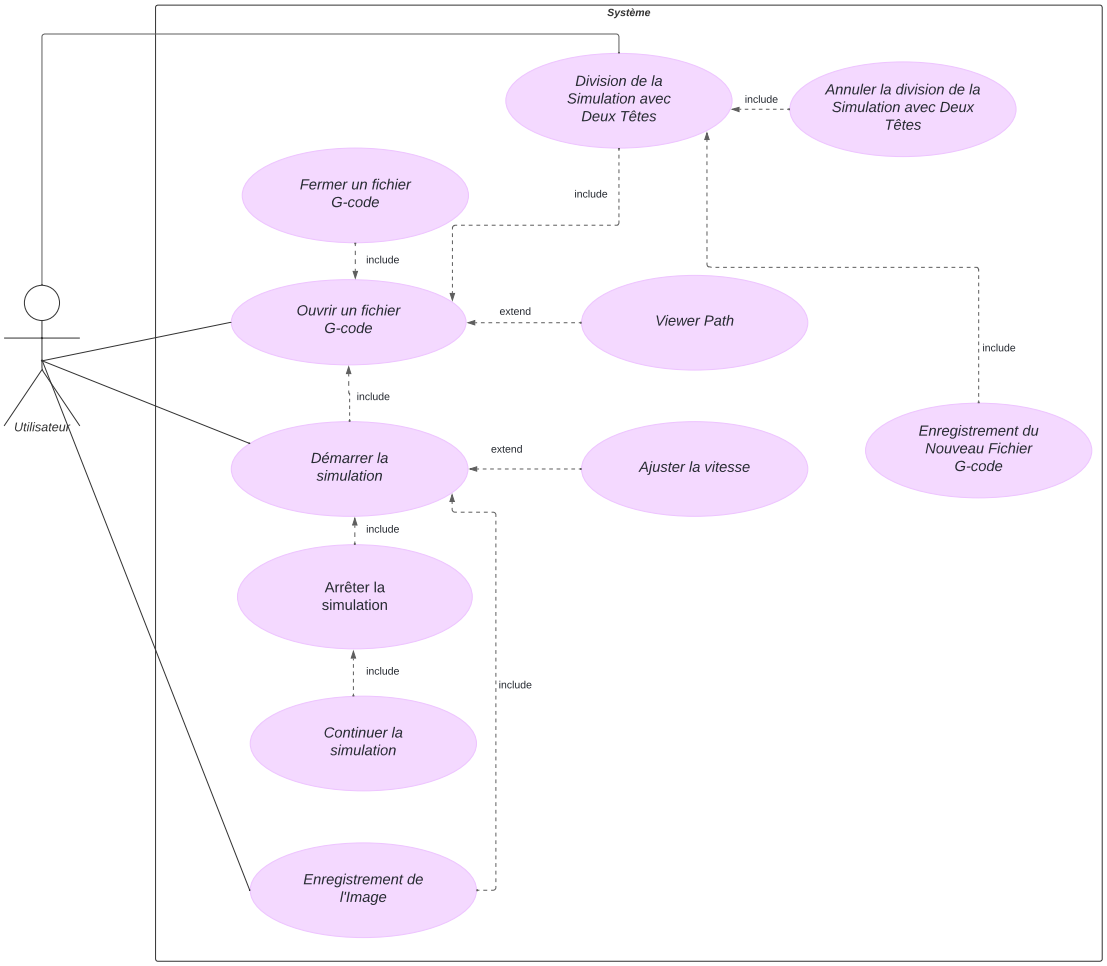


FIGURE 3.1 – Diagramme de cas d'utilisation

3.3.2 Diagramme d'activité

Ce diagramme d'activité décrit le processus d'interaction entre l'utilisateur et le système dans une application de simulation de fichier G-code(La figure 3.2).
Lorsque l'application démarre, l'utilisateur a plusieurs options. Premièrement, il peut sélectionner un fichier G-code à charger en utilisant le bouton "Open". Une fois le fichier chargé, le chemin du fichier est affiché dans le panneau de visualisation. En parallèle, l'utilisateur peut choisir d'activer l'option "Viewer Path" pour afficher tous les chemins programmés du G-code avant la simulation. Cette option est facultative et peut être désactivée si l'utilisateur préfère voir seulement le résultat de la simulation.

Ensuite, l'utilisateur peut décider d'activer l'option "Split" pour préparer la simulation avec deux têtes de machine CNC, sélectionnant un point spécifique sur l'image de la pièce pour diviser les opérations. Une fois toutes les configurations faites, l'utilisateur démarre la simulation en appuyant sur le bouton "Start". La simulation affiche alors en temps réel les mouvements de coupe et de perçage selon les trajectoires programmées dans le G-code.

Pendant la simulation, l'utilisateur a la possibilité d'arrêter immédiatement le processus avec le bouton "Stop" , cette action suspend toutes les opérations et les mouvements programmés de la machine CNC en cours d'exécution. L'utilisateur peut ensuite reprendre la simulation à partir du point où elle s'est arrêtée en utilisant le bouton "Continue". Cela permet de reprendre le processus de simulation sans avoir à recommencer depuis le début. Il peut également ajuster la vitesse de la simulation avec le bouton "Speed".

Une fois la simulation terminée et validée, l'utilisateur peut sauvegarder le nouveau fichier G-code modifié en utilisant le bouton "Enregistrer". Cette étape inclut toutes les modifications apportées pendant la simulation, comme celles faites avec l'option "Diviser". Enfin, l'utilisateur peut fermer le fichier G-code actuel avec le bouton "Fermer", ce qui permet de sélectionner un nouveau fichier pour démarrer un nouveau projet.

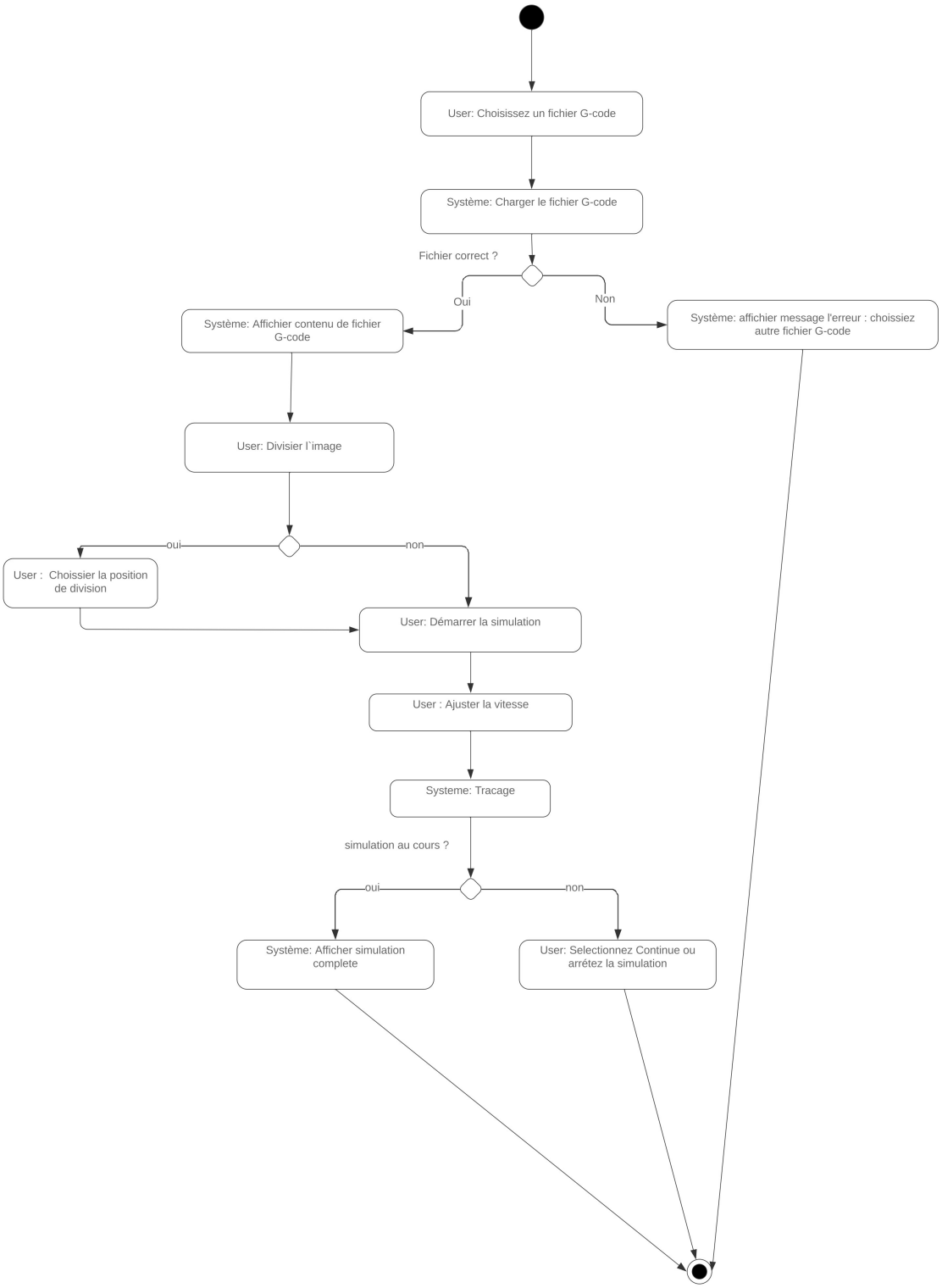


FIGURE 3.2 – Diagramme d'activité

3.4 Conclusion

Ce chapitre présente une méthode systématique pour traiter, diviser, convertir et vérifier des données XYZ en G-code, tout en intégrant la simulation CNC pour valider les trajectoires . L'utilisation de la modélisation UML facilite la compréhension des interactions utilisateur-système à travers des diagrammes de cas d'utilisation, d'activité et de classes. Ce processus rigoureux assure une conversion précise et efficace des données en instructions G-code, optimisant ainsi la performance des machines CNC tout en minimisant les erreurs potentielles. Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur la création de notre application conçue en traduisant les représentations abstraites en logiciel fonctionnel. Cette phase implique l'intégration des différents modules et composants, et le test du programme pour s'assurer de son bon fonctionnement.

Chapitre 4

Implémentation

4.1 Introduction

La plateforme logicielle CNC Simulator offre une suite d'outils puissants pour la simulation et la manipulation de fichiers G-code, permettant aux utilisateurs de visualiser et de contrôler efficacement les opérations d'usinage avant leur exécution sur une machine CNC réelle. En utilisant des outils avancés intégrés à l'environnement de développement Visual Studio, les développeurs ont créé une interface conviviale et complète qui simplifie le processus de simulation et offre un contrôle précis sur chaque étape du processus. Dans cet aperçu, nous explorerons les fonctionnalités clés de la plateforme, telles que l'ouverture de fichiers G-code, la division précise des fichiers, la simulation des trajectoires d'outil, et le contrôle flexible de la simulation.

4.2 Présentation des outils utilisés

4.2.1 Visual Studio

le code écrit dans l'environnement de développement intégré (IDE) Visual Studio, un outil populaire pour le développement d'applications .NET et C#.Il offre une interface conviviale regroupant une multitude de fonctionnalités essentielles au développement logiciel. Grâce à son éditeur de code avancé, les développeurs bénéficient de fonctionnalités telles que la coloration syntaxique, l'achèvement automatique et la mise en forme automatique du code. De plus, l'IDE propose des outils de débogage puissants, permettant d'identifier et de corriger rapidement les erreurs dans le code. La gestion de projet est également simplifiée grâce à Visual Studio, qui offre la possibilité de créer et de structurer efficacement les projets. Avec

son intégration native aux systèmes de contrôle de version comme Git, SVN et TFS, Visual Studio facilite également la collaboration au sein des équipes de développement.

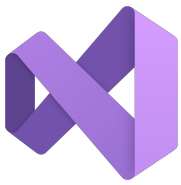


FIGURE 4.1 – Visual Studio

4.2.2 C# (C Sharp)

C# (C Sharp) est un langage de programmation moderne et polyvalent développé par Microsoft. Utilisé dans une grande variété de domaines, il est apprécié pour sa syntaxe claire et expressive qui favorise le développement efficace et la maintenance du code. En tant que langage orienté objet, C# permet aux développeurs de créer des programmes modulaires et structurés, facilitant ainsi la création de logiciels robustes et évolutifs. Que ce soit pour le développement d'applications Windows, de sites Web dynamiques, d'applications mobiles ou même d'applications d'entreprise complexes, C# offre une flexibilité et une puissance remarquables. Sa popularité continue de croître en raison de sa performance, de sa convivialité et de sa large adoption dans l'industrie du développement logiciel. En tant que choix privilégié pour de nombreux développeurs, C# reste un langage incontournable pour réaliser une multitude de projets de programmation.



FIGURE 4.2 – C#

4.2.3 .NET Framework

Le .NET Framework est une plateforme de développement logiciel développée par Microsoft, offrant un environnement d'exécution pour créer et exécuter une variété d'applications sur Windows. Il fournit une vaste bibliothèque de classes et de fonctionnalités prêtes à l'emploi, permettant aux développeurs de créer des applications robustes et évolutives plus rapi-

dement et plus facilement. En tant que cadre de développement, le .NET Framework prend en charge plusieurs langages de programmation, dont C#, Visual Basic et F#. Il fournit également des outils de développement avancés tels que Visual Studio, un environnement de développement intégré (IDE) qui facilite l'écriture, le débogage et le déploiement d'applications .NET. Avec sa prise en charge de divers types d'applications, y compris les applications de bureau, les applications Web, les services Web et les applications mobiles, le .NET Framework est devenu un élément essentiel de l'écosystème de développement logiciel de Microsoft. Bien que des alternatives plus récentes comme .NET Core et .NET 5+ aient émergé pour offrir une compatibilité multiplateforme et une performance améliorée, le .NET Framework reste largement utilisé pour prendre en charge les applications existantes sur la plateforme Windows.



FIGURE 4.3 – .NET FrameWork

4.3 Présentation de la plateforme logicielle

Notre plateforme logicielle est une solution complète pour la simulation 3 axes, offrant des fonctionnalités avancées pour la modélisation, l'analyse et la visualisation des données. Elle est conçue pour être conviviale et flexible, permettant aux utilisateurs de créer et de manipuler des modèles complexes avec facilité.

4.3.1 Fenêtres principales :

La fenêtre principale de la plateforme logicielle CNC Simulator offre une interface utilisateur complète pour contrôler et visualiser les opérations de simulation de machines à commande numérique (CNC). Dotée d'une disposition claire et ergonomique, elle permet aux utilisateurs d'accéder facilement aux fonctionnalités principales telles que l'ouverture et la fermeture de fichiers CNC, le démarrage et l'arrêt de la simulation, ainsi que le contrôle de la vitesse de simulation. La fenêtre principale intègre également des éléments interactifs tels qu'une liste de fichiers, des boutons de contrôle, une barre de progression et une zone d'affichage graphique dynamique. Avec ses fonctionnalités conviviales et sa conception intuitive,

cette fenêtre principale facilite la manipulation et la surveillance des processus de simulation CNC, offrant ainsi une expérience utilisateur fluide et efficace(Figure 4.4).

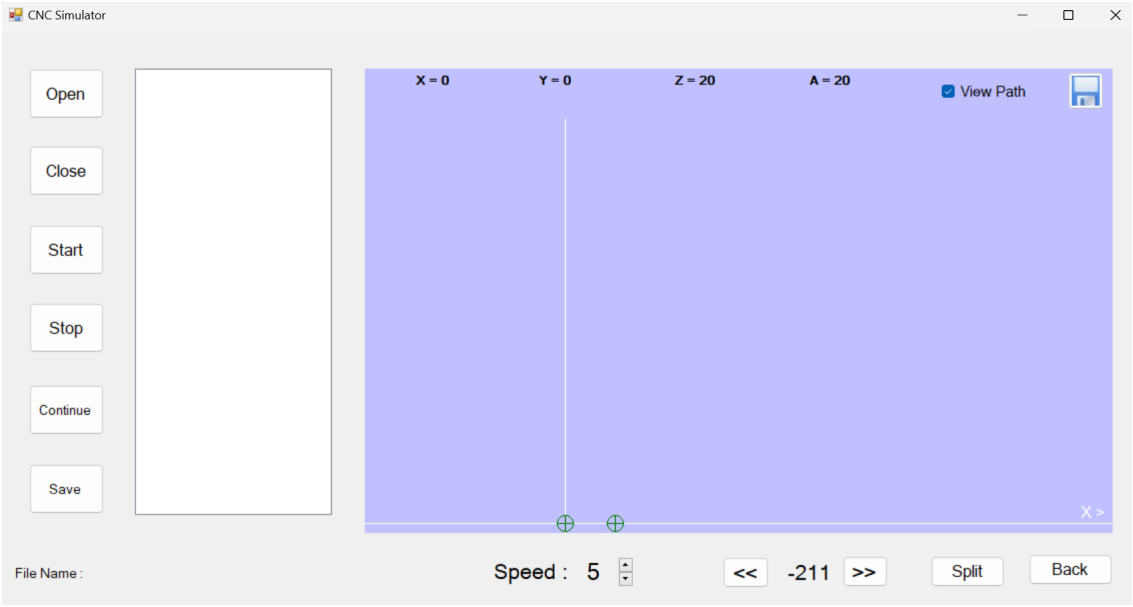


FIGURE 4.4 – Fenêtres principales de la plateforme logicielle.

4.3.2 Ouverture de fichiers G-code

Pour ouvrir un fichier G-code dans la plateforme logicielle CNC Simulator, les utilisateurs peuvent facilement accéder à cette fonctionnalité via la barre du menu principal. En sélectionnant l'option "Ouvrir" dans le menu Fichier, une boîte de dialogue s'affiche, permettant aux utilisateurs de naviguer jusqu'à l'emplacement du fichier G-code sur leur système de fichiers. Une fois le fichier sélectionné, les utilisateurs peuvent cliquer sur le bouton "Ouvrir" pour charger le fichier dans le simulateur. Une fois chargé, le fichier G-code est interprété et affiché dans l'interface, permettant aux utilisateurs de visualiser le parcours de l'outil, les différentes opérations d'usinage et d'autres informations pertinentes. Cette fonctionnalité permet aux utilisateurs de prévisualiser et de simuler l'usinage avant de l'exécuter sur une machine CNC réelle, ce qui contribue à minimiser les erreurs et à optimiser le processus de fabrication(Figure 4.5).

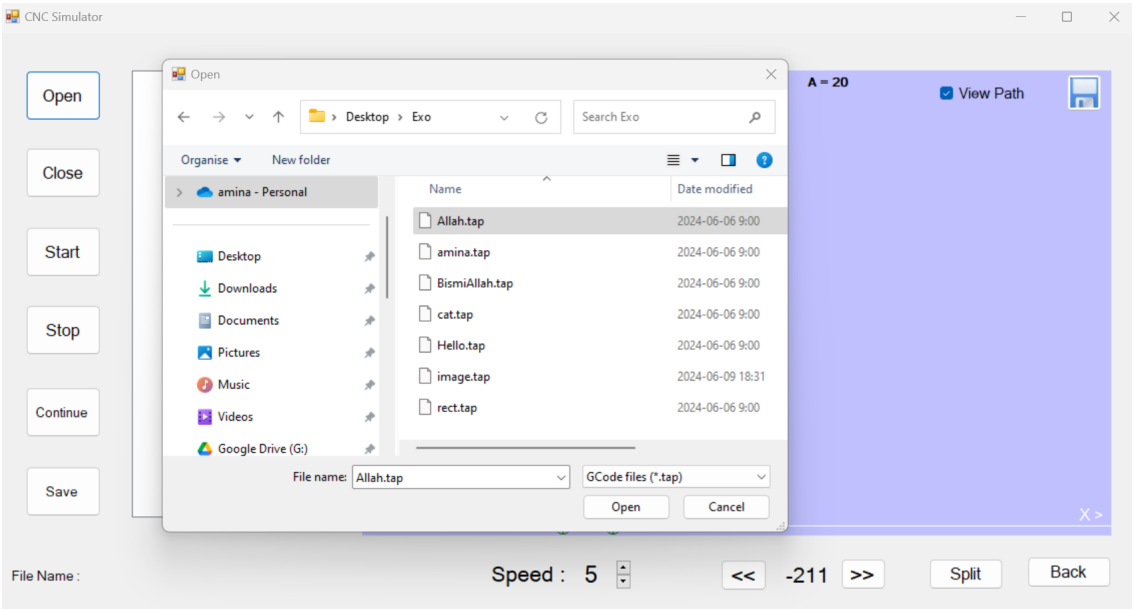


FIGURE 4.5 – Ouvrire un fichier g-code

4.3.3 Simulation de fichiers G-code

l'utilisateur peut charger le fichier G-code qu'il souhaite simuler. Une fois chargé, le logiciel affiche une représentation graphique de la trajectoire d'outil résultante, montrant comment l'outil se déplacera à travers les différentes opérations décrites dans le fichier G-code. Cette simulation permet à l'utilisateur de détecter les éventuels problèmes, tels que les collisions d'outil ou les mouvements incorrects, avant de lancer le processus de fabrication réel sur une machine CNC. Ainsi, l'onglet de simulation constitue un outil précieux pour vérifier la faisabilité et la précision de l'usinage avant sa mise en œuvre physique, contribuant ainsi à réduire les erreurs et à optimiser le processus de production(Figure 4.6).

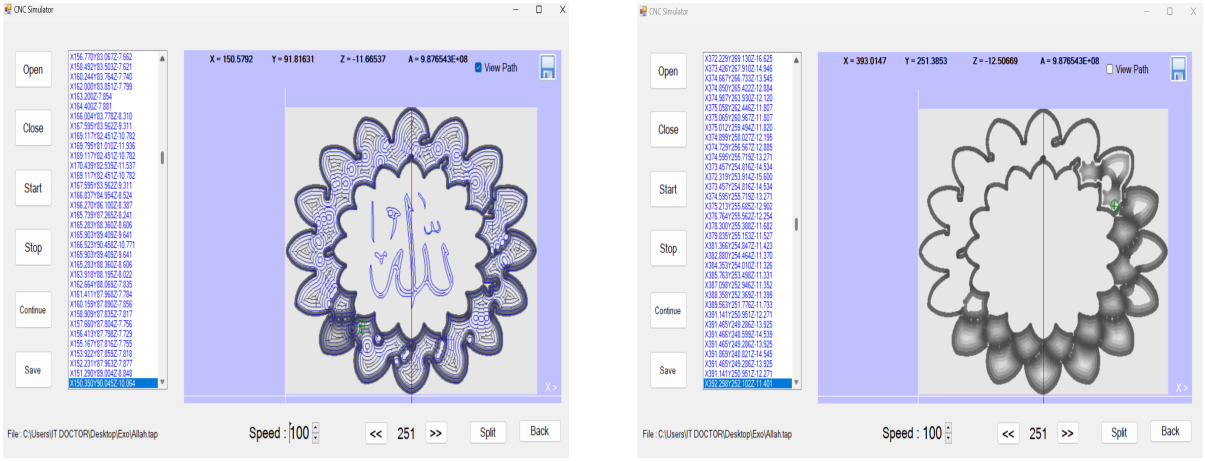


FIGURE 4.6 – Simulation de fichiers G-code

4.3.4 Division Précise de Fichiers G-code avec le Bouton 'Split'

Le bouton "Split" dans l'interface de conversion de fichier G-code permet à l'utilisateur de diviser efficacement le fichier G-code en segments plus petits ou en parties spécifiques. Lorsque l'utilisateur clique sur ce bouton, le logiciel analyse le fichier G-code en cours et applique les paramètres de division définis par l'utilisateur, tels que la taille des segments ou le nombre de lignes par segment. Ensuite, il génère un fichier G-code modifié qui peut être utilisé pour la simulation avec deux têtes d'outil travaillant simultanément mais indépendamment(Figure 4.7).

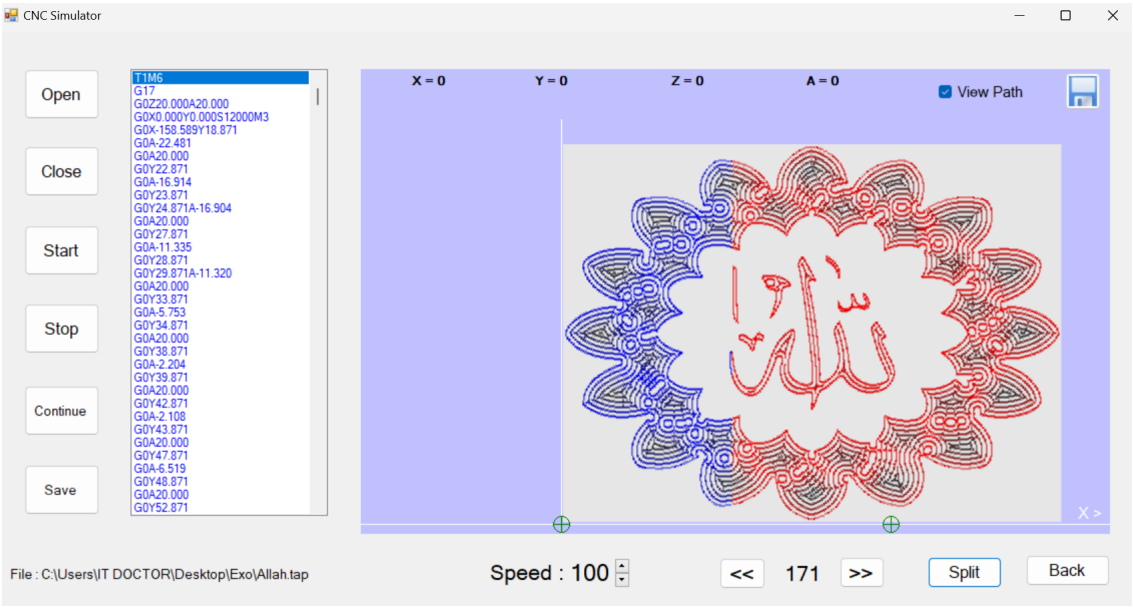


FIGURE 4.7 – Diviser le g-code avec "split"

4.3.5 Simulation avec Deux Têtes d'un Fichier G-code

L'utilisateur peut charger un seul fichier G-code et le diviser à un point désiré, puis simuler les deux parties simultanément avec deux têtes d'outil distinctes. Le logiciel affiche ensuite les deux trajectoires d'outil simultanément. Cette comparaison côte à côte permet à l'utilisateur de détecter facilement les différences entre les deux trajectoires, telles que les variations de parcours, les mouvements d'outil inattendus ou les erreurs de programmation. En offrant la possibilité de simuler deux parties d'un G-code simultanément, cet onglet permet à l'utilisateur de prendre des décisions éclairées sur la base de comparaisons visuelles directes, ce qui contribue à améliorer la qualité et la précision du processus d'usinage sur une machine CNC(Figure 4.8)..

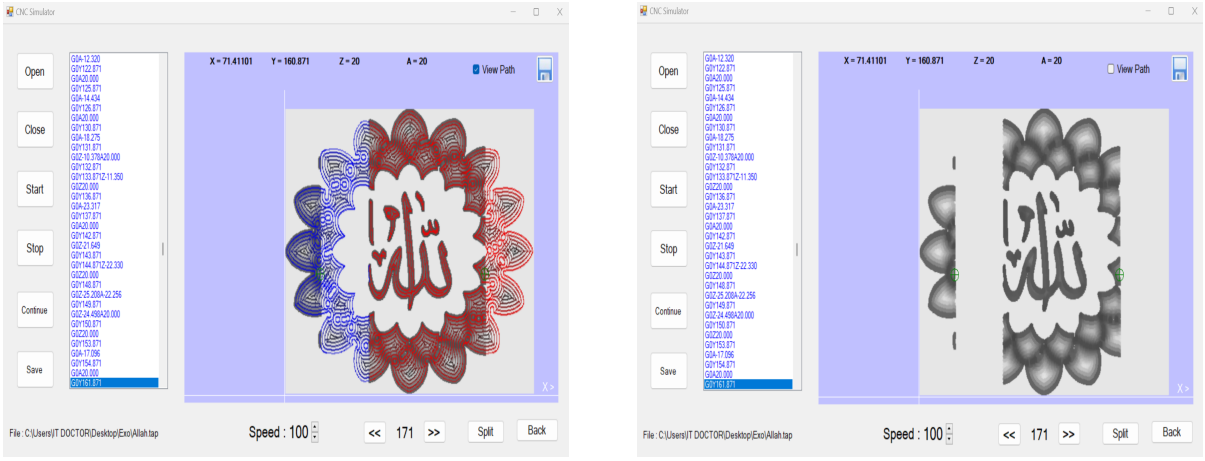


FIGURE 4.8 – Simulation avec Deux Têtes

4.3.6 Contrôle flexible de la simulation G-code

L'onglet de contrôle dans l'interface de simulation de fichiers G-code offre à l'utilisateur un contrôle complet sur le processus de simulation. Le bouton "Stop" permet d'arrêter la simulation à tout moment, donnant ainsi à l'utilisateur la possibilité de corriger des erreurs ou d'analyser des détails spécifiques. Ensuite, le bouton "Close" permet de fermer proprement la simulation et de revenir à l'interface principale du logiciel, offrant une sortie rapide et efficace de la simulation. Le bouton "Continue" permet de reprendre la simulation à partir du point où elle a été arrêtée, facilitant ainsi une interruption temporaire du processus sans perdre de progression. En ajustant la vitesse avec le contrôle "Speed", l'utilisateur peut régler la vitesse de simulation pour une visualisation plus détaillée ou une exécution plus rapide du processus, adaptant ainsi la simulation à ses besoins spécifiques. Le bouton "View Path"

permet à l'utilisateur de visualiser le chemin de l'outil lors de la simulation, offrant ainsi une compréhension visuelle plus approfondie du processus. Enregistrer la simulation est également simplifié grâce au bouton "Save", qui permet à l'utilisateur de sauvegarder le fichier G-code modifié après la division, ainsi que l'image de la simulation pour référence future(Figure 4.9).

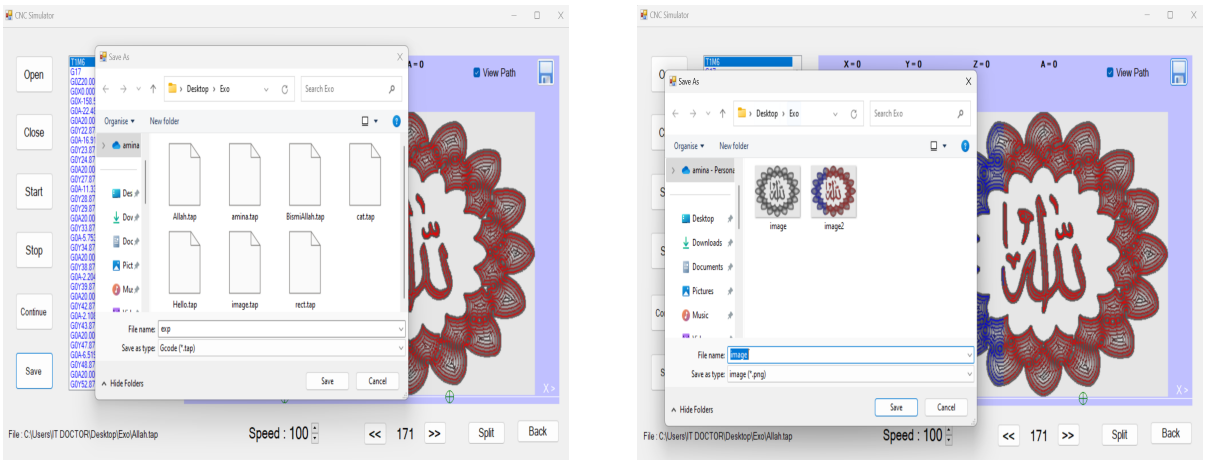


FIGURE 4.9 – Contrôle flexible de la simulation G-code

4.4 Conclusion

En conclusion, la plateforme logicielle CNC Simulator offre une solution complète et intuitive pour la simulation et la manipulation de fichiers G-code. Grâce à son interface conviviale et à ses fonctionnalités avancées, les utilisateurs peuvent prévisualiser, analyser et optimiser leurs opérations d'usinage avec une précision et une efficacité accrues. Que ce soit pour les développeurs souhaitant créer des programmes CNC, les opérateurs de machines cherchant à valider leurs processus d'usinage, ou les ingénieurs cherchant à optimiser la production, CNC Simulator offre les outils nécessaires pour relever les défis de l'usinage moderne.

Conclusion générale

Le développement et l'usage des machines à commande numérique (CNC) ont révolutionné le domaine de la fabrication, offrant des avantages considérables en termes de précision, de productivité et de flexibilité. Ce document offre une vue d'ensemble détaillée des principes fondamentaux des machines CNC, de la conception et de la fabrication assistées par ordinateur (CFAO), ainsi que de la conception spécifique du logiciel CNC Simulator.

En comprenant les compositions, les principes de fonctionnement, les domaines d'utilisation et les classifications des machines CNC, les lecteurs acquièrent une compréhension approfondie de leur potentiel et de leurs limites. De plus, l'explication des méthodes de représentation des surfaces, des formats d'échange de données et des fonctions préparatoires et auxiliaires du G-code dans le contexte de la CFAO offre un aperçu complet du processus de conception et de fabrication assisté par ordinateur.

La section détaillant la conception et l'implémentation de CNC Simulator met en lumière les outils et les technologies utilisés pour développer une plateforme logicielle efficace et conviviale. L'utilisation de Visual Studio, C# et .NET Framework permet de créer une interface intuitive et fonctionnelle pour la simulation de fichiers G-code. Les fonctionnalités clés telles que l'ouverture de fichiers G-code, la simulation précise des trajectoires d'outil, la division de fichiers et le contrôle flexible de la simulation offrent aux utilisateurs un moyen puissant de prévisualiser, d'analyser et d'optimiser leurs opérations d'usinage.

En conclusion, ce travail offre un aperçu complet et détaillé des machines CNC, de la CFAO et du logiciel CNC Simulator, mettant en évidence leur importance dans le domaine de la fabrication moderne. En combinant des concepts théoriques avec des applications pratiques, ce document fournit aux lecteurs les connaissances nécessaires pour comprendre, utiliser et tirer parti de ces technologies pour améliorer les processus de conception et de fabrication.

Perspectives

Comme perspective sur ce qui sera réalisé :

— Développer des algorithmes avancés pour améliorer la précision de la simulation des opérations d'usinage.

— Ajouter des capacités de simulation pour des types d'usinage plus complexes et des machines CNC plus avancées.

— Développer une interface utilisateur encore plus intuitive et adaptable pour répondre aux besoins variés des utilisateurs.

— Élargir la compatibilité pour permettre l'utilisation de la CNC Simulator sur différentes plates-formes et systèmes d'exploitation.

Bibliographie

[1] Chapitre 1 generalites machines outils commande numerique | download free pdf | machine-outil à commande numérique | usinage. URL https://www.scribd.com/document/375724333/Chapitre-1-Generalites-Machines-Outils-Commande-Numerique.

[2] Cnc explanation | pdf. URL https://www.scribd.com/document/547656625/CNC-explanation.

[3] (pdf) cours - mocn -epst -rahou | mohamed rahou - academia.edu. URL https://www.academia.edu/5498887/COURS_-_MOCN_-EPST_-RAHOU.

[4] Prise en compte des problèmes inter-métiers lors de l'introduction d'une innovation relative aux automatismes et systèmes d'information d'une entreprise : processus de spécification et de conception de l'offre. URL https://www.researchgate.net/publication/316096342_Prise_en_compte_des_problemes_inter-metiers_lors_de_l%27introduction_d%27une_innovation_relative_aux_automatismes_et_systemes_d%27information_d%27une_entreprise_processus_de_specification_et_de_conception_de_.

[5] Président Nehal Abdelaziz, Encadrant Moukas Nacer, and Examinateur Benchiheub Slimen Présenté par : Ouargli Amani. faculté : technologie département : génie mécanique domaine : science et technologie filière : génie mécanique spécialité : fabrication mécanique et productique conception et réalisation d'un porte fraise sur machine à commande numérique trois axes. ISSN 2021/2022. URL https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2023/06/Ouargli-Amani.pdf.

[6] AL-KEBSI Ebrahim Ahmed Ali and BEDLAOUI Allal. Comande numerique ml pdf | pdf | machine-outil à commande numérique | acier. URL https://www.scribd.com/document/396913159/comande-numerique-ml-pdf.

[7] B.LOUHICHI. *Intégration CAO/Calcul par reconstruction du modèle CAO à partir des résultats éléments finis*. Thèse doctorat Spécialité Mécanique, 2008.

[8] Pr DJAMAA Mohamed Cherif. Machines-outils a commande numerique. Technical report, UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA, 2020. URL https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14091/1/Cours%20MO%20%C3%A0%20CN_Djamaa_2020_1.pdf.

[9] Polycopie De Cours. Machines-outils a commande numerique. URL https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14091/1/Cours%20MO%20%C3%A0%20CN_Djamaa_2020_1.pdf.

[10] SMAINI Djamel and BEN KADI Rafik. Mémoire de fin d'etudes de master academique filière : Génie électrique conception et réalisation d'une machine cnc. URL https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/95c6f96f-dcee-44a2-ae7f-322361a43dd7/content.

[11] E.BONNETTO. *Prise en compte des problèmes inter-métiers lors de l'introduction d'une innovation relative aux automatismes et systèmes d'information d'une entreprise : processus de spécification et de conception de l'offre*. PhD thesis, Université Paris Saclay, 2016. URL https://www.researchgate.net/publication/316096342_Prise_en_compte_des_problemes_inter-metiers_lors_de_l%27introduction_d%27une_innovation_relative_aux_automatismes_et_systemes_d%27information_d%27une_entreprise_processus_de_specification_et_de_conception_de_.

[12] LEZAMI Samira et MADI Nada. Memoire de fin d'etude pour l'obtention d'un diplôme de master en informatique option : Systèmes informatiques et réseaux thème : Conception et développement d'une application logicielle pour la simulation d'usinage des pièces complexes sur fraiseuses numériques à 03-axes. 2019. URL https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/8469/1/Lezami%20Samira%20et%20Madi%20Nada.pdf.

[13] AGEUNINI Brahim et MESSAOUDI Hamza. Simulation et vérification de l'opération d'ebauchage des surfaces gauches sur des fraiseuses à commande numérique à 3 axes, 2006. URL https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/29854/1/ageunini%20brahim.pdf.

[14] ABDELLIOUA Haitem et ROULA Imad. Conception et réalisation d'une machine-outil à commande numérique, 2021. URL http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/9984.

[15] KHELIFI Fateh. Mémoire de master conception et réalisation d'une machine à commande numérique «fraiseuse ». 2017. URL https://di.univ-blida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/2483/Untitled.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[16] LOSSENDIERE. Les firmware, mars 14,2018. URL https://www.makerslidemachines.xyz/fr/2018/03/14/fr-les-firmware/.

[17] M.MADANI. *utilisation de l'outil CAO pour la conception d'une machine –outil*. Mémoire magister, spécialité Construction Mécanique, 2006.

[18] Arslane Mustapha. Cours cao / cfao chapitre 2 : Les mocn université de m'sila. URL https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/739733/mod_resource/content/1/CH%20II%20Les%20MOCN.pdf.

[19] Gilles PROD'HOMME. Commande numérique des machines-outils. *Ref : TIP153WEB - "Travail des matériaux - Assemblage"*, 2 1996. URL https://10.51257/A-V1-B7130.

[20] Mohamed RAHOU. Cours - mocn -epst -rahou. *COURS - MOCN -USINAGE- METROLOGIE*. URL https://www.academia.edu/5498887/COURS_MOCN_EPST_RAHOU.

[21] Agariadne Dwinggo Samala. Immersive learning experience design (ilxd) : Augmented reality mobile application for placing and interacting with 3d learning objects in engineering education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 2022. doi : https://doi.org/10.3991/ijim.v17i05.37067.

[22] Bantam Tools. *History of CNC Machining, Part 1.* Apr 12, 2019. URL https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d.

[23] YANBOUTIN. IntÉgration des cycles d'usinage avancÉs des machines-outils À commande numÉrique aux logiciels de fao, le 22 JANVIER 2002. URL https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/808/1/BOUTIN_Yan.pdf.

Annexe A

Les Fonctions préparatoires G

Fanuc 21i 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	00	Retour à la position d'origine
G30		Retour au $2^{ème}$, $3^{ème}$, $4^{ème}$ 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
G51.1		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

Annexe B

Les Fonctions auxiliaires M

Fanuc 21i 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	Avant
M04	Rotation broche sens trigonométrique (ou anti-horaire)	Avant
M05	Arrêt rotation broche	Après
M06	Changement outil	Après
M07	Marche second arrosage	Avant
M08	Marche arrosage principal	Avant
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