



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique



## **Université Hadj lakhdar –Batna**

Faculté De Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Magister en Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par

**Tiffrent Imad**

Pour obtenir le diplôme de Magister en Génie Mécanique

---

### ***OPTIMISATION PAR STEP-NC DE L'EVIDEMENT DES POCHES EN USINAGE A GRANDE VITESSE***

---

Sous la direction du Dr Mr M. ASSAS

Mémoire soutenu le 08/04/2012.

Devant le jury composé de :

---

Jury	Grade	Affiliation	Qualité
Dr R. BENBOUTA	PROFESSEUR	Université de Batna	Président
Dr M. ASSAS	M.C (classe A)	Université de Batna	Rapporteur
Dr B. BENMOHAMED	M.C (classe A)	Université de Batna	Examineur
Dr L. LAOUAR	M.C (classe A)	Université d'Annaba	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## MEMOIRE

Présenté

AU DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
UNIVERSITE DE BATNA

Pour obtenir le titre de

**MAGISTER EN GENIE MECANIQUE**

**(Ecole Doctorale National De Mécanique)**

Option : **construction mécanique**

**Par**

**Mr Tiffrent Imad**

Ingénieur d'Etat en Mécanique Energétique, Université de Batna

---

### ***Optimisation par STEP-NC de l'évidement des poches en usinage a grande vitesse***

---

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Recherche en Productique (LRP)

Soutenu publiquement le .../.../2011, devant le jury composé de :

<b>Mr Benbouta Rachid</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Batna</b>	<b>Président</b>
<b>Mr Assas Meki</b>	<b>Maitre de Conférences</b>	<b>Université de Batna</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr Benmohamed Brahim</b>	<b>Maitre de Conférences</b>	<b>Université de Batna</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr Laour Lakhdar</b>	<b>Maitre de Conférences</b>	<b>Université d'Annaba</b>	<b>Examineur</b>



# *Hommage à ma mère*

*Maman,*

*Un jour, tu nous as quitté,  
Après tant de souffrances,  
Ce fut pour toi une délivrance,  
Et pour moi, un tel chagrin, une intolérance.*

*Maman,*

*Le temps qui passe ne comble pas ton absence  
Tu me manques tellement,  
Tellement, tellement, tellement ....*

*Maman,*

*Tu es si vivante dans mon esprit et mon cœur,  
Cette idée m'apporte un peu de douceur  
et me remplit d'espoir*

*À toi ma mère,*

*Je dédie ce travail*

*Maman,*

*Je t'aime très fort  
Et tu me manques tant.*

# *Remerciement*

*Ce travail a été effectué au Laboratoire de Recherche en Productique (LRP) de Batna, je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire Monsieur Assas Mekki, maître de conférences à l'université de Batna et directeur du laboratoire LRP d'avoir accepté de diriger ce mémoire et de m'avoir soutenu au long travail.*

*Mes plus sincères remerciements vont également à Monsieur Ameddah Hacene, Magistère construction mécanique, qui a participé dans le suivi de ma thèse et a fortement enrichi ma formation. Ses conseils et ses commentaires aurent été fort utiles.*

*Je remercie également Mr Benbouda Rachid. Professeur à l'Université de Batna, pour avoir présidé le jury de soutenance.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr Benmohamed Brahim, Maître de Conférences assistant à l'Universitaire de Batna, et à Mr Lacur Lakhdar, Maître de conférences assistant à l'Université de Annaba, pour avoir accepté d'examiner ce travail*

*Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes, aussi je voudrais simplement leur exprimer ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*Je ne peux pas oublier de remercier ma famille pour leur soutien durant cette formation, ainsi que tous mes amis.*

## REMERCIEMENTS

## DEDICACE

## TABLE DES MATIERES.....1

## TABLE DES ILLUSTRATIONS.....5

## ABREVIATIONS.....9

## NOMENCLATEUR.....10

## INTRODUCTION GENERALE.....11

### Chapitre I : Etude sur l'UGV

#### I.1 Introduction.....13

#### I.2 Définition de l'UGV.....13

##### I.2.1 Secteurs utilisant l'UGV.....14

##### I.2.2 Les avantages de l'UGV.....15

#### I.3 Machine-outil à commande numérique (MOCN).....16

##### I.3.1 Structure physique d'une MOCN.....18

##### I.3.2 Classification de MOCN selon le nombre d'axes.....19

##### I.3.3 La structure des machines-outils d'usinage à grande vitesse UGV.....21

###### I.3.3.1 Structures parallèles pour les machines-outils .....22

###### I.3.3.2 Structures hybride pour les machines-outils .....23

#### I.4 Outillage pour l'usinage a grande vitesse.....24

##### I.4.1 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe.....24

##### I.4.2 Géométrie des outils de coupe.....27

#### I.5 Programmation des opérations.....28

##### I.5.1 Structure d'un programme.....28

##### I.5.2 La programmation actuelle.....29

# Table des matières

---

I.5.2.1 Les lacunes de code G.....	29
I.5.2.2 Les principales fonctions.....	30
I.6 fraisage des poches.....	32
I.6.1 Analyse des poches.....	32
I.6.2 Programmation des poches.....	33
I.6.3Apport d'UGV et les machines outil a structure parallèle pour l'amélioration d'usinage des poches.....	34
I.7 Conclusion.....	35

## **Chapitre II : état de l'art sur STEP-NC**

II.1 Introduction.....	36
II.2 Historique et développement du la norme internationale STEP.....	36
II.3 Définition de STEP-NC.....	38
II.4 La vision de la maquette numérique avec le STEP-NC .....	40
II.5 Les apports du STEP-NC.....	41
II.6 Structure d'un programme STEP_NC.....	42
II.7 Les travaux de recherche effectués sur le Step_NC.....	45
II.8 Les normes STEP-NC.....	46
II.9 Plates formes et prototype STEP-NC existante.....	47
II.10 Intégration du standard STEP-NC.....	50
II.11 Définition d'entités d'usinage selon le standard STEP-NC.....	51
II.12 Conclusion.....	53

## **Chapitre III : les stratégies d'usinage**

III.1 Introduction.....	54
III.2 Définition de la stratégie d'usinage.....	54
III.2.1 Stratégies couramment utilises .....	55
III.2.2 Stratégies émergeant grâce à l'amélioration des performances des MOCN.....	56
III.2.3 Les travaux effectuent sur les stratégies d'usinages.....	57

# Table des matières

---

III.3 L'usinage trochoïdal.....	57
III.3.1 détermination de la trajectoire trochoïdal.....	58
III.3.2 Génération de la trajectoire trochoïdal.....	59
III.3.2.1 Construction de la courbe guide.....	60
A- Construction de la courbe guide stratégie zigzag.....	61
B- Construction de la courbe guide stratégie contour parallèle.....	64
III.3.2.2 Construction de la trajectoire trochoïdal.....	66
III.4 Conclusion.....	68

## **Chapitre III : Simulation d'usinage sous CATIA de la poche carré**

IV.1 Introduction.....	69
IV.2 Définition de la FAO.....	69
IV.3 Présentation du logiciel CATIA.....	70
IV.3.1 Description des modules utilisés dans CATIA.....	72
IV.3.2 Interface graphique.....	73
IV.4 Exemple d'application.....	74
IV.4.1 Organigramme.....	75
IV.4.2 Partie pratique.....	76
IV.4.2.1 Créer une pièce quelconque, dans le module Part Design (partie CAO).....	76
IV.4.2.2 Génération des trajectoires d'usinage grâce a l'atelier usinage (partie FAO).....	79
IV.4.2.2.a génération de la trajectoire zigzag bidirectionnelle.....	79
IV.4.2.2.b génération de la trajectoire contour parallèle.....	81
IV.4.2.2.c génération de la trajectoire trochoïdale.....	83

# Table des matières

---

IV.4.2.2.d Simulation de la machine CN et des trajectoires outils	
selon le code ISO dans un environnement FAO.....	86
IV.4.3 Résultats et interprétations.....	90
IV.5 Conclusion.....	91
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>92</b>

# Table des illustrations

---

## **Figure :**

<b>Figure 1.1 :</b> voiles minces en aluminium utilisée en aéronautique.....	14
<b>Figure 1.2 :</b> matrice de forge pour bielle.....	15
<b>Figure 1.3:</b> modèle de la structure d'une machine-outil.....	18
<b>Figure 1.4:</b> Système normalisé de coordonnées.....	20
<b>Figure 1.5:</b> machine de structure hexapodes (Okuma's Cosmo Center PM-600).....	22
<b>Figure 1.6:</b> machine de structure Delta (urane XS).....	23
<b>Figure 1.7:</b> machine de structure hybride (VERNE).....	24
<b>Figure 1.8:</b> classification de la dureté et la ténacité des matériaux.....	25
<b>Figure 1.9 :</b> Diversifications possibles au sein d'une famille d'outils.....	28
<b>Figure 1.10:</b> Exemple des entités poches.....	33
<b>Figure 1.11:</b> programme de fraisage d'une poche rectangulaire avec code G.....	34
<b>Figure 2.1 :</b> programmation directe avec reconnaissance des formes.....	39
<b>Figure 2.2 :</b> comparaison G-code et STEP-NC.....	39
<b>Figure 2.3 :</b> la maquette numérique basée sur le STEP-NC.....	41
<b>Figure 2.4 :</b> Future objectif de STEP-NC.....	42
<b>Figure 2.5 :</b> structure d'un programme STEP-NC.....	43
<b>Figure 2.6 :</b> exemple de programme STEP-NC.....	44
<b>Figure 2.7 :</b> information présentes dans le STEP-NC.....	45
<b>Figure 2.8 :</b> cycle de développement d'un AP.....	46
<b>Figure 2.9 :</b> programmation STEP-NC interprétée.....	48
<b>Figure 2.10 :</b> programmation STEP-NC intégrée.....	49

# Table des illustrations

---

<b>Figure 2.11</b> : programmation STEP-NC avancée.....	49
<b>Figure 2.12</b> : architecture de la plateforme SPAIM.....	50
<b>Figure 2.13</b> : la commande numérique dans la chaine numérique STEP-NC.....	51
<b>Figure 2.14</b> : exemple d'entité d'usinage.....	52
<b>Figure 2.15</b> : STEP AP-224.....	53
<b>Figure 3.1</b> : stratégie zigzag.....	56
<b>Figure 3.2</b> : stratégie contour parallèle.....	56
<b>Figure 3.3</b> : Mouvement trochoïdal.....	58
<b>Figure 3.4</b> : Les paramètres opératoires pour la construction d'une trochoïde.....	59
<b>Figure 3.5</b> : paramètres géométriques d'une poche quadrilatère.....	61
<b>Figure 3.6</b> : paramètres géométriques d'une poche carrée.....	61
<b>Figure 3.7</b> : Stratégie d'usinage en zigzag dans une poche carré.....	61
<b>Figure 3.8</b> : l'hauteur de la poche carré (cas stratégie zigzag).....	63
<b>Figure 3.9</b> : Stratégie d'usinage en zigzag sous MATLAB.....	64
<b>Figure 3.10</b> : Stratégie d'usinage en contour parallèle dans une poche carré.....	64
<b>Figure 3.11</b> : Stratégie d'usinage en contour parallèle sous MATLAB (poche carre).....	66
<b>Figure 3.12</b> : Stratégie d'usinage en contour parallèle sous MATLAB (poche rectangle)....	66
<b>Figure 3.13</b> : Stratégie trochoïdale contour parallèle générer par MATLAB.....	67
<b>Figure 3.14</b> : Stratégie trochoïdale zigzag générer par MATLAB.....	67
<b>Figure 4.1</b> : logiciel CATIA V5R20.....	71
<b>Figure 4.2</b> : interface CATIA.....	74
<b>Figure 4.3</b> : organigramme présente la démarche CFAO.....	75
<b>Figure 4.4</b> : Entrer de module de conception des pièces (part design).....	76
<b>Figure 4.5</b> : plan de base de la conception de la pièce.....	76



# Table des illustrations

---

<b>Figure 4.6 :</b> l'élément surfacique de la pièce.....	77
<b>Figure 4.7 :</b> Création de l'élément volumique et l'entité poche.....	77
<b>Figure 4.8 :</b> choix de matériaux de la pièce.....	78
<b>Figure 4.9 :</b> pièce a usinée.....	78
<b>Figure 4.10 :</b> module d'usinage « prismatic machining ».....	79
<b>Figure 4.11 :</b> définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie zigzag.....	80
<b>Figure 4.12 :</b> La stratégie zigzag bidirectionnelle.....	81
<b>Figure 4.13 :</b> Poche carré usiné avec la stratégie zigzag bidirectionnelle.....	81
<b>Figure 4.14 :</b> définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie contour parallèle.....	82
<b>Figure 4.15 :</b> La stratégie contour parallèle.....	82
<b>Figure 4.16 :</b> Poche carré usiné avec la stratégie contour parallèle.....	83
<b>Figure 4.17 :</b> module d'usinage « Advanced machining ».....	83
<b>Figure 4.18 :</b> l'élément d'usinage « ébauche de cavité ».....	84
<b>Figure 4.19 :</b> choix de la courbe guide et le motif trochoïdal.....	84
<b>Figure 4.20 :</b> définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie trochoïdale.....	85
<b>Figure 4.21 :</b> Poche carré usiné avec la stratégie trochoïdale zigzag.....	85
<b>Figure 4.21 :</b> Poche carré usiné avec la stratégie trochoïdale contour parallèle.....	86
<b>Figure 4.22 :</b> Choix de la machine et post-processeur.....	87
<b>Figure 4.23 :</b> Phase usinage.....	87
<b>Figure 4.24 :</b> identification de la machine.....	88

# Table des illustrations

---

<b>Figure 4.25 :</b> Quelques paramètres de la machine.....	88
<b>Figure 4.26 :</b> format de programme de fabrication.....	89
<b>Figure 4.27 :</b> exemple de programme de fabrication en format STEP-NC.....	89

## **Tableaux :**

<b>Tableau 1.1 :</b> classification des MOCN par nombre d'axes.....	19
<b>Tableau 1.2 :</b> Exemples de couples outil/matière avec ordres de grandeur de $V_c$ .....	27
<b>Tableau 1.3:</b> les instructions G.....	30
<b>Tableau 1.4:</b> les fonctions M.....	31
<b>Tableau IV.1 :</b> présentation des ateliers et leurs modules de CATIA V5.....	72
<b>Tableau 4.2 :</b> Tableau des résultats obtenu par CATIA.....	90

# Abréviations

---

UGV : Usinage à Grande Vitesse

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

MOCN : Machine Outil à Commande Numérique

CU : Centre d'usinage

DCN : Directeur de Commande Numérique

ARS : Acier Rapides Supérieurs

CBN : Nitrure de Bore Cubique

ISO : International Standard Organisation

STEP : Standard for The Exchange of Product

IGES : Initial Graphic Exchange Specification

XML : Extensible Mark-up Language

AAM : Application Activity Model (Modèle d'application d'activité)

ARM : Application Reference Model (Modèle d'application de référence)

AIM : Application Interpreted Model (Modèle d'application interprété)

AP : Applicaton Protocol (Protocole d'application)

NBS : National Bureau of Standard

SET : Standard d'Echange et de transfert

PDES : Product Data Exchange Specification

VDA : Verband der Automobilindustrie

# Nomenclature

---

$V$  : vitesse du centre du cercle dans son mouvement rectiligne uniforme

$w$ : Pulsation

$t$  : Paramètre de la courbe

$L$  : Largeur de la rainure

$D$  : Diamètre de l'outil utilisé

$P\%$  : Pas de balayage (exprimé en % du diamètre outil)

$P_{tro}$  : Pas de trochoïde

$P$  : L'incrément entre deux passes

$h$  : Hauteur de la poche

$R$  : rayon de l'outil

$n$  : Le nombre d'incrément

$\rho$  : Coefficient de recouvrement d'usinage

$E$  : Coefficient de correction

$L_{hZ}$  : Somme de tous les segments horizontaux

$L_{vZ}$  : Somme de tous les segments entre passes

$L_{TZ}$  : Longueur totale de la trajectoire zigzag

$L_{/A}$  : Longueur des segments parallèles à [A]

$L_{/B}$  : Longueur des segments parallèles à [B]

$L_{/C}$  : Longueur des segments parallèles à [C]

$L_{/D}$  : Longueur des segments parallèles à [D]

# Introduction générale

# Introduction générale

---

L'usinage à grande vitesse a constitué un saut technologique important ; il offre en effet la possibilité de diminuer considérablement les temps de production et d'augmenter les capacités des moyens de production. Parmi les nombreuses innovations liées aux applications UGV, l'émergence et le développement des MOCN à structure parallèle visent à répondre aux besoins toujours croissants en termes de performances cinématiques.

Un des axes actuels de recherche visant l'amélioration de la production sur machine outils est le développement de nouveaux formats de programmation. L'objectif visé est la simplification du flux des données tout au long de la chaîne numérique.

L'usinage à grande vitesse permet aujourd'hui d'accroître la productivité au travers des gains de temps et de qualité qui ne sont plus à démontrer. Ce mode d'usinage récent met en jeu des phénomènes de coupe et dynamiques particuliers qui le différentient de l'usinage conventionnel. Ces phénomènes ont une influence sur la trajectoire de l'outil et beaucoup d'efforts de recherche ont lieu dans ce domaine pour pouvoir adapter au mieux ces trajectoires. De même, l'amélioration des technologies machines, tant au niveau de la multiplication des axes et des possibilités que de la rigidité et de la dynamique permettent d'exploiter au mieux de nouveaux types d'usinage comme l'usinage trochoïdal.

Pour finir, la programmation actuelle des machines outils à commande numérique s'effectue actuellement, et ce depuis le début des années 80, à l'aide du code G. Cette programmation, dont on voit réellement aujourd'hui les limites face aux évolutions citées précédemment, s'avère moins efficace et ne répond plus aux attentes de la technologie. De nouveaux travaux de recherche sont menés depuis quelques années pour faire évoluer ce langage de programmation vers un langage universel qui se doit de pallier aux manques du code G. C'est ainsi que le STEP-NC a été développé et demande aujourd'hui à être mis en pratique et amélioré. Ce changement de vision dans la programmation des MOCN pourra alors permettre une meilleure intégration de la fabrication dans la chaîne numérique.

# Introduction générale

---

Le mémoire est structuré de la manière suivante :

Dans le premier nous donnons une description de l'Usinage à grande vitesse UGV et les machines outils à commande numérique avec un aperçu sur le fraisage des poches.

Dans le deuxième chapitre nous présentons un état de l'art sur le STEP-NC.

Le troisième chapitre traite mathématiquement la stratégie d'usinage trochoïdale et ces courbes guident (stratégie zigzag, stratégie contour parallèle), ensuite propose une construction des trajectoires d'outil sous le logiciel MATLAB pour les trois stratégies d'usinage.

Finalement, le quatrième chapitre est consacré à la simulation d'usinage sous CATIA en se basant sur la stratégie d'usinage trochoïdal.

Nous terminons par une conclusion générale.

# Chapitre I :

## Étude de l'UGV



## **I.1 Introduction :**

L'usinage à grande vitesse (UGV) permet de réduire le temps d'usinage, d'accroître la qualité des surfaces finies [1]. Le progrès les plus notables réalisés en UGV sont au niveau de la conception des machines outils à commande numériques, de la géométrie des outils de coupe et des revêtements multicouches ainsi que au niveau des stratégies d'usinage et les programmations de ces stratégies.

Le présent chapitre comprend quatre parties, nous commençons ce chapitre par la présentation de l'UGV et ses avantages, ensuite nous avons présenté les différents types d'une machine-outil à commande numérique, ainsi que les outils de coupe. Après nous avons fait un rappel sur la programmation actuelle des machines-outils à commande numérique.

## **I.2 Définition de l'UGV**

L'UGV est une technique d'obtention de pièces par enlèvement de copeaux, caractérisée par des conditions de coupe particulières. La capacité d'enlèvement de copeaux n'est pas directement rattachée à la vitesse de rotation. Elle est déterminée par la combinaison de la vitesse de coupe et d'avance. [2]

L'UGV est ainsi devenu une réalité industrielle depuis la fin des années 1990, qui nécessite une parfaite connaissance des méthodes d'usinage, outils, matières, conditions de coupe, programmation des trajectoires d'outils (CFAO) sont autant de paramètres qu'il convient de prendre en compte pour faire l'investissement le mieux adapté. [3]

Résultat de la conjugaison d'avancées technologiques diverses concernant les outils, les broches, les moteurs et les calculateurs numériques, l'UGV a permis au secteur manufacturier de franchir un palier important. [4]

La mise en place de technologies d'Usinage à Grande Vitesse s'accompagne d'importantes modifications dans l'organisation du secteur fabrication des entreprises de production mécanique. En effet, pour tenir les promesses faites par l'UGV en termes de temps de fabrication et de capacité des MOCN, l'ensemble de la production doit subir une réorganisation. [4]

Il existe différentes définitions de l'UGV suivant les domaines d'utilisations. [5]

- usinage à grande vitesse de coupe ( $V_c$ )
- usinage à grande vitesse de broche ( $N$ )
- usinage à forte avance ( $V_f$ )
- usinage haute productivité

Toutefois si on considère le couple outil-matière, on peut dire d'une façon plus générale: "UGV est un procédé d'enlèvement de matière dont les conditions de coupe sont 5 à 10 fois supérieures à celles utilisées en usinage conventionnel pour un matériau donné."

### I.2.1 Secteurs utilisant l'UGV :

L'usinage à grande vitesse est en constant développement dans l'industrie depuis quelques décennies. Les deux secteurs industriels ayant historiquement suivi le développement de l'UGV sont l'aéronautique et l'industrie de fabrication d'outillages (moules, matrices et poinçons).

En aéronautique, la diminution de la masse à vide des avions est un enjeu majeur. Ceci passe notamment par la réalisation de nombreuses fraisées dans la masse présentant un nombre important de poches et de voiles minces. Ces éléments sont destinés à alléger les structures tout en leur concevant une résistance et une rigidité suffisantes.

Grace a la réduction des efforts engendrés durant la coupe, il est possible d'usiner des voiles de plus en plus minces diminuant l'autant leur masse.

Lors de l'usinage des voiles minces on utilise des vitesses de coupe élevés, des avances et de profondeur de coupe élevée.



**Figure 1.1 :** voiles minces en aluminium utilisées en aéronautique. [5]

La fabrication des outillages pour la fonderie et le forgeage est un autre domaine d'intérêt pour l'UGV. Ces secteurs sont encore peu automatisés, notamment au niveau de la finition des pièces. Les longs temps de polissage manuel nécessaires pour obtenir un état de surface correct augmentent fortement le coût des pièces réalisées. L'usinage à grande vitesse permet d'usiner les aciers spéciaux en réduisant les avances (donc la rugosité) tout en conservant un temps de cycle acceptable. Ceci permet d'obtenir un temps de polissage beaucoup plus réduit.

Pour l'usinage des matrices, les vitesses de coupe sont élevées, par contre l'avance et les profondeurs sont réduites.



**Figure 1.2 :** matrice de forge pour bielle. [5]

### **I.2.2 Les avantages de l'UGV :**

- La conservation des propriétés des matériaux usinés pendant la formation de copeau et le transfert de chaleur occasionné par l'effort de coupe. [2]
- Avec l'UGV, on obtient une meilleure qualité de surface (rectitude des parois, des angles vifs, sans trace de raccords...) [2], l'usinage à grande vitesse respecte des tolérances beaucoup plus exigeantes que l'usinage normal. [6]
- L'UGV offre une précision dimensionnelle plus grande et une fois la gamme d'usinage fiabilisée une meilleure répétabilité (répétitivité) sur la série. [2]
- L'UGV permet de réaliser des formes complexes, qui sont impossible à réaliser en usinage conventionnel. [3]
- L'UGV apporte une réduction des délais de fabrication en apportant une simplification du processus de fabrication. [3]
- L'UGV permet de bénéficier d'une réduction des coûts de production grâce à la diminution des opérations de production induisent une réduction du parc machines. Un

nombre d'opérateurs plus faible, des frais d'outillage et de manutention réduits, un gain d'espace sont autant d'éléments qui vont accroître la compétitivité. [6]

- La polyvalence de certaines machines UGV donne une grande flexibilité de la capacité de production. [2]

### **I.3 Machine-outil à commande numérique (MOCN):**

Une machine-outil a pour but de réaliser physiquement les mouvements de coupe nécessaires à l'obtention d'une forme par enlèvement de matière. [7]

Les contraintes technologiques et économiques pesant sur les machines-outils d'usinage ont beaucoup augmenté tant du point de vue de la réduction des temps de cycle que de l'accroissement de la flexibilité de leur production. La réduction des temps de cycle est dictée par des critères économiques et la flexibilité par une grande capacité de réaction à l'évolution des marchés des pièces fabriquées. Ces contraintes ont abouti à de nombreuses évolutions dans le secteur de la machine-outil. [8]

Le problème de la flexibilité a été résolu grâce à l'utilisation des commandes numériques sur les structures conventionnelles. Par contre, la réduction des temps de cycle fait intervenir plusieurs facteurs dont principalement le temps copeau, le temps de changement d'outil et le temps de déplacement rapide. Afin d'accroître la productivité, il faut donc réduire chacun de ces temps :

- La solution adoptée pour la diminution du temps copeau est l'utilisation de l'Usinage à Grande Vitesse (UGV).
- Diverses dispositions constructives ont été prises afin de réduire le temps de changement d'outil comme, par exemple, les changeurs d'outils intégrés à la broche ou les machines à deux broches qui changent d'outil en temps masqué.
- La réduction des temps de déplacement rapide passe par l'amélioration de la dynamique de la machine, pour cela, plusieurs étapes ont été franchies :
  - Utilisation de moteurs linéaires dont la dynamique est meilleure que celle des systèmes moteurs rotatifs + réducteur + système vis-écrou dont la vitesse est limitée par l'utilisation de vis à billes.
  - Réduction des masses déplacées grâce à l'utilisation d'alliages d'aluminium pour la réalisation des pièces massives en mouvement.

- Utilisation de structures parallèles dont les performances dynamiques sont intrinsèquement meilleures que celles des structures cartésiennes conventionnelles.

Les machines-outils employées pour le travail des métaux sont très diverses et très répandues, et de nos jours les exigences de la construction ont amené à produire des types d'une grandeur vraiment colossale. [8]

Les constructeurs de machines-outils étant nombreux et différents des fournisseurs de commandes numériques, une normalisation sur la dénomination des axes de ces machines a été nécessaire afin que l'association commande numérique-machine soit simple à réaliser. [6]

Le Mémotech de 'génie mécanique' (collection A. Capiliez, Educavivres, éditions Casteilla, 1993) donne des définitions générales relatives à la désignation des machines d'usinage :

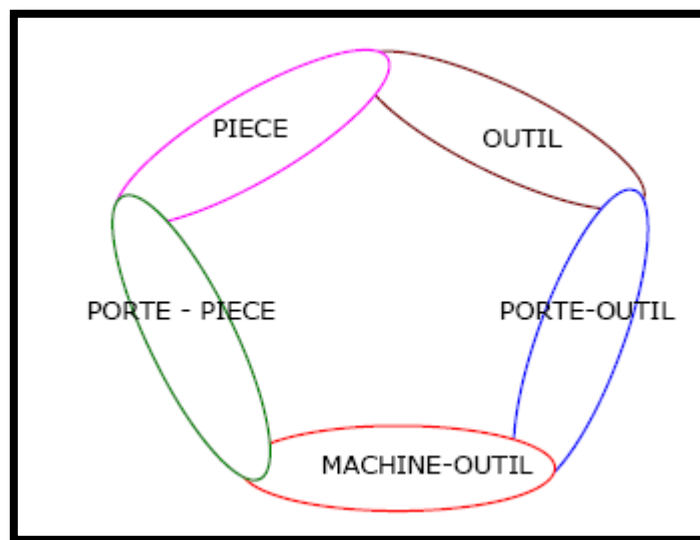
- **Machine-outil à commande numérique (MOCN) :** Machine-outil programmable équipée d'une commande numérique par ordinateur (CNC). Elle est dédiée à des fabrications variées de pièces différentes lancées en petits lots répétitifs. [8]
- **Centre d'usinage (CU) :** C'est une MOCN équipée d'équipements périphériques qui assurent le changement automatique d'outils stockés dans les magasins d'outils, le changement automatique de pièces (palettisation) et éventuellement le convoyage des copeaux (convoyeur). Il est dédié à des fabrications variées de pièces différentes. [8]
- **Machine autonome flexible :** C'est un CU doté d'un carrousel de palettes pour le chargement et le déchargement des pièces, de plusieurs magasins d'outils, de moyens d'autocontrôle, d'un système de détection des bris et usures d'outils. Elle est dédiée à des fabrications variées de plusieurs familles de pièces. [8]
- **Cellule flexible :** Il s'agit d'un système formé de plusieurs CU (2 à 3) semblables ou non reliés entre eux par un dispositif de transfert de pièces. Les fonctions de stockage, chargement et déchargement des pièces brutes et finies sont aussi automatiques. Elle est dédiée à des opérations spécifiques sur plusieurs familles de pièces. [8]
- **Ligne transfert flexible :** Il s'agit d'un système formé de plusieurs MOCN, machines spéciales (à têtes interchangeable automatiquement) agencées linéairement conformément au flux des produits (gamme de fabrication). Elle est dédiée à une famille de pièces. [8]
- **Atelier flexible :** C'est un système formé de plusieurs MOCN ou cellules flexibles (de 5 à 15) associé à des dispositifs de transfert de pièces (chargement, déchargement,

stockage, contrôle) entièrement automatisés et gérés par un ordinateur central. Il est dédié à l'usinage des pièces d'une même famille. [6]

### I.3.1 Structure physique d'une MOCN:

Une machine outil à commande numérique assure la réalisation automatisée des pièces, les mouvements nécessaires sont décrits dans un programme.

On représente la structure d'une machine, en cours d'usinage, par un système bouclé, chaque élément contribue à la réalisation du contrat fonctionnel. Le réglage de la machine consiste à mettre en position relative ces différents éléments. [5]



**Figure 1.3:** modèle de la structure d'une machine-outil. [5]

La structure matérielle de la partie opérative 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.

Toutefois, il n'est pas nécessaire pour une MOCN dédiée à l'UGV de cumuler l'ensemble des dernières technologies de composants pour être opérationnelle dans un contexte de production industrielle, essentiellement pour des raisons économiques. Ainsi, un

certain nombre de machines outils à structure parallèle s'appuient toujours sur des moteurs vis à bille, l'architecture de ces machines leur permettant malgré tout de proposer des performances cinématiques élevées. A l'inverse, lors de la définition du cahier des charges d'une MOCN, il appartient en priorité de définir son domaine d'application pour déterminer les performances technico-économiques optimales. Pour cause, étant donné la variété de solutions technologiques possibles, la meilleure machine outil n'existe plus et toute caractéristique doit être évaluée en rapport avec le type d'application visé (morphologie de pièces, matériaux à usiner, tailles de lots, ...).

Les travaux de recherche menés sur les architectures de machines outils ont conduit à l'émergence de MOCN à structure parallèle. L'idée associée a été de pouvoir proposer des performances cinématiques importantes (vitesse, accélération), en allégeant les masses en mouvement. Pour cela, il a fallu tirer profit du développement des performances des DCN pour assurer la gestion d'un modèle de transformation géométrique complexe en parallèle du pilotage des divers composants de la machine outil. [4]

### I.3.2 Classification de MOCN selon le nombre d'axes :

En peut classer les machines-outils par le nombre de mouvement élémentaires qu'elles peuvent mettre en œuvre lors du déplacement de l'outil par rapport à la pièce [9]. Dans MOCN la commande numérique permet de faire bouger simultanément des axes qui étaient autrefois presque symétriquement fixes. Cela a entraîné une révision des classifications plus dépendantes des contraintes rencontrées au niveau des opérations d'usinage [5].

**Tableau 1.1** : classification des MOCN par nombre d'axes. [5]

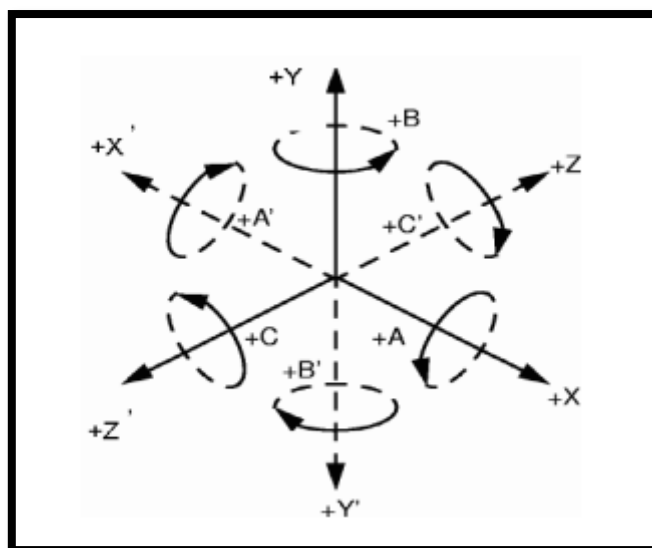
Nbr d'axes	Mouvement	Désignation du type d'usinage des opérations possibles
3	X, Y, Z	fraisage : surfacage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste parallèle à une direction fixe par rapport à la pièce.
4	X, Y, Z, B X, Y, Z, C	fraisage : surfacage, perçage, fraisage de poches, de rainures et de surfaces gauches. L'axe outil reste contenu dans un plan fixe par rapport à la pièce.
5	X, Y, Z, A, C	fraisage de formes gauches : fraisage avec le flanc de

	X, Y, Z, B, C	l'outil, fraisage avec de pinçage, perçage en toutes directions.
	X, Y, Z, A, B	

Le tableau au dessus montre les classifications des fraiseuses par nombre des axes.

La norme NF Z 68-020 définit un système de coordonnées machine et les mouvements de la machine de telle façon qu'un programmeur puisse décrire les opérations d'usinage sans avoir à distinguer si l'outil s'approche de la pièce ou la pièce de l'outil. Ce système d'axes peut être défini d'après cette norme pour n'importe quel type de machine. Cette normalisation est notamment nécessaire pour garantir l'interchangeabilité des programmes sur plusieurs machines différentes. [8]

Le système normal de coordonnées est un système cartésien rectangulaire de sens direct avec les trois principaux axes appelés X, Y et Z et avec des axes de rotation autour de chacun de ces axes appelés respectivement A, B et C. [8]



**Figure 1.4:** Système normalisé de coordonnées

### Mouvements de translation X, Y, Z: [8]

**Axe Z de mouvement:** L'axe Z est parallèle à la broche principale de la machine. Lorsque la broche principale est pivotante ou orientable, l'axe Z doit être parallèle à l'axe de la broche quand cette dernière est dans la position zéro. La position zéro de référence est de préférence celle où la broche est perpendiculaire à la surface de bridage de la pièce.



**Axe X de mouvement:** Quand cela est possible, l'axe X doit être horizontal et parallèle à la surface de bridage de la pièce. Pour les machines avec des pièces en rotation, l'axe X doit être radial et parallèle aux glissières du chariot transversal.

**Axe Y de mouvement:** L'axe Y de mouvement forme avec les axes X et Z un trièdre de sens direct.

**Mouvements de rotation A, B, C :** [8]

Les angles A, B et C définissent les mouvements de rotation effectués respectivement autour d'axes parallèles à X, Y et Z.

**Direction :**

Le sens positif des axes est défini de manière telle qu'un mouvement dans une direction positive d'axes de translation ou de rotation, augmente les valeurs positives de la position de la pièce par rapport à la machine.

**Mouvements additionnels :** [8]

**Mouvements de translation :** Quand, en plus des mouvements de translation primaire X, Y et Z, il existe des mouvements de translation secondaires parallèles à ceux-ci, ils seront respectivement désignés par U, V et W.

**Mouvements de rotation :** Quand, en plus des mouvements de rotation primaires A, B et C, il existe des mouvements de rotation secondaires parallèles ou non à A, B et C, ceux-ci seront désignés par les lettres D ou E.

### **I.3.3 La structure des machines-outils d'usinage à grande vitesse UGV**

Pour obtenir des pièces usinées de grande qualité et éviter les vibrations, la structure de la machine UGV doit être rigide, notamment grâce à un bâti souvent réalisé en béton de synthèse précontraint renforcé de fibres et de matériaux spéciaux.

Les éléments mobiles, mus par des vis à billes ou des moteurs linéaires, sont conçus pour autoriser de grandes accélérations et vitesses. On peut atteindre des vitesses de l'ordre de 60 m/min avec les nouvelles générations de vis à billes et 90 m/min avec les moteurs linéaires. Les carters doivent résister aux chocs et aux grandes températures car la chaleur élevée des copeaux, l'éclatement de l'outil ou l'éjection de plaquettes, combinés aux grandes

vitesse de rotation de la broche, peuvent avoir des conséquences sur la sécurité de l'opérateur. [5]

Les électro-broches à haute fréquence utilisées dans les machines UGV peuvent être équipées de roulements précontraints en acier, de roulements hybrides à billes en céramique sur cages en acier ou encore de paliers magnétiques actifs. Les vitesses de rotation peuvent atteindre 160 000 tr/min et les puissances disponibles jusqu'à 100 kW.

### **I.3.3.1 Structures parallèles pour les machines-outils :**

Les machines outils pleinement parallèles ont été les premières applications de mécanismes parallèles pour des applications d'usinage. Bien qu'elles présentent toutes une architecture propre, elles peuvent être réparties en deux familles, les « hexapodes », dont la longueur des bras est variable et les « glides » dont la longueur des jambes reste fixe. [10]

Les machines hexapodes sont les plus anciennes, Cependant ce type de structure présente des inconvénients qui nuisent à la capacité des machines outils développées : couplage de la position et de l'orientation, redondances d'axes, ainsi que la disponibilité d'un espace de travail relativement restreint au regard de l'encombrement de la machine. [4]



**Figure 1.5:** machine de structure hexapodes (Okuma's Cosmo Center PM-600). [11]

La seconde famille de cinématiques de machines outils à structure parallèle contient les structures Glides et Delta. A la différence des machines hexapodes, la longueur des jambes reste constante lors des déplacements, qui s'effectuent par translation des points d'accroche du module parallèle sur le bâti. Cette solution technique permet d'alléger singulièrement la masse des éléments mobiles et autorise l'emploi d'actionneurs linéaires, augmentant ainsi les capacités cinématiques de la machine outil et les rendant plus aptes à la réalisation d'usinages à grande vitesse. [10]

Les machines Delta et Glide destinées à des applications d'usinage cinq axes présentent elles aussi un couplage entre l'orientation et la position de l'outil, ce qui rend leur commande difficile et limite leur espace de travail. C'est pourquoi les concepteurs de machines à structure parallèle se sont tournés par la suite vers des MOCN hybrides. Celles-ci combinent dans la majorité des cas un module parallèle de type Glide ou Delta à un module sériel. [4]



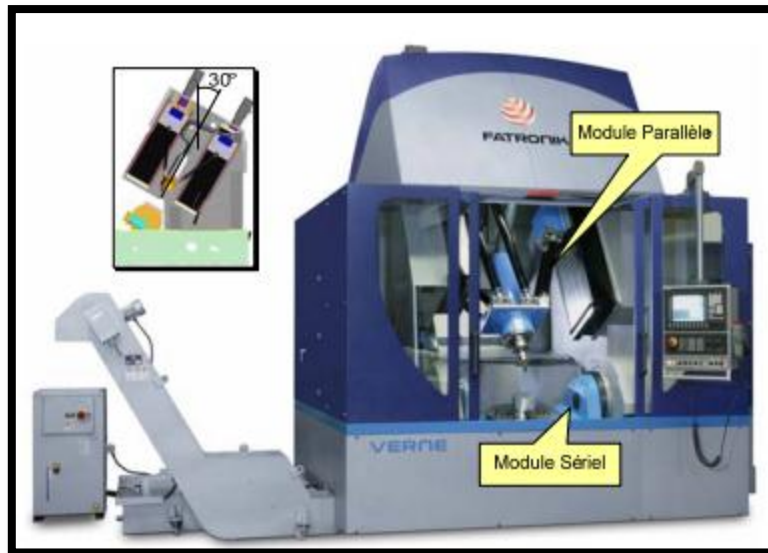
**Figure 1.6:** machine de structure Delta (urane XS). [4]

### **I.3.3.2 Structures hybride pour les machines-outils: [4]**

Les machines outils à structure hybride sont constituées d'un mécanisme sériel et d'un mécanisme parallèle. Toute machine outil parallèle possédant au moins l'une des caractéristiques suivantes peut être considérée comme hybride :

- $f$  Il existe une chaîne passive pour restreindre le mouvement
- $f$  Seul un sous-ensemble de la MOCN est parallèle
- $f$  Certains actionneurs sont positionnés en série

L'objet de ce type d'architecture de MOCN est de profiter des avantages des structures parallèles tout en s'affranchissant de leurs inconvénients. Grâce à l'ajout d'un modèle sériel, ces mécanismes offrent un volume de travail et des capacités d'inclinaison de l'effecteur bien meilleurs que les architectures pleinement parallèles.



**Figure 1.7:** machine de structure hybride (VERNE). [4]

#### **I.4 Outillage pour l'usinage a grande vitesse :**

Le corps de l'outil est relativement fin pour minimiser les masses en mouvements. En conséquence, les sollicitations mécaniques du couple outil/matière et les effets dynamiques accrus engendrent des déformations à prendre en compte dans les stratégies d'usinage. En ce qui concerne le choix de l'outil de coupe, il faut aussi tenir compte des spécificités de l'UGV.

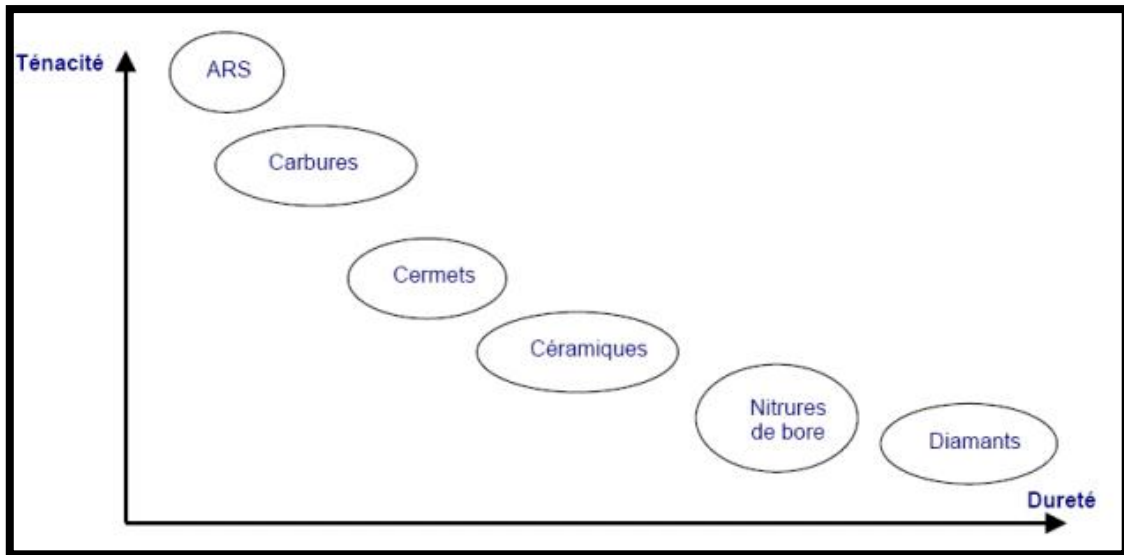
La température de coupe élevée engendre une usure prépondérante par diffusion et abrasion ; les carburiers proposent des produits nombreux et de plus en plus pointus, répondant à des applications quasi spécifiques pour chaque usineur.

##### **I.4.1 Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe :**

Les performances des machines outils dépendent étroitement de celles des outils de coupe qu'elles actionnent et des conditions d'utilisation des outils.

Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user, ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce à usiner.

Une classification de la dureté des matériaux peut être établie comme suit:



**Figure 1.8:** classification de la dureté et la ténacité des matériaux

#### - **Acier Rapides Supérieurs :**

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forets, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible. [12]

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

#### - **Carbures :**

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide. [12]

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

#### - **Cermets : [12]**

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane.

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité.

Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition.

Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

- **Céramiques :**

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium. [12]

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil). [12]

- **Nitrure de Bore Cubique (CBN) :** [12]

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

- Une machine stable
- Une grande rigidité de la pièce et de la porte pièce
- Un arrosage

- **Diamant :**

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de ré affûtage des meules. [12]

Aussi, il trouve surtout son emploi à très grandes vitesses sur les matériaux ductiles que durs. Travail de finition du cuivre, bronze, aluminium pour obtenir un beau poli de la surface le diamant peut usiner tous les métaux quelque soit leur dureté.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). [13]

Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphite... On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

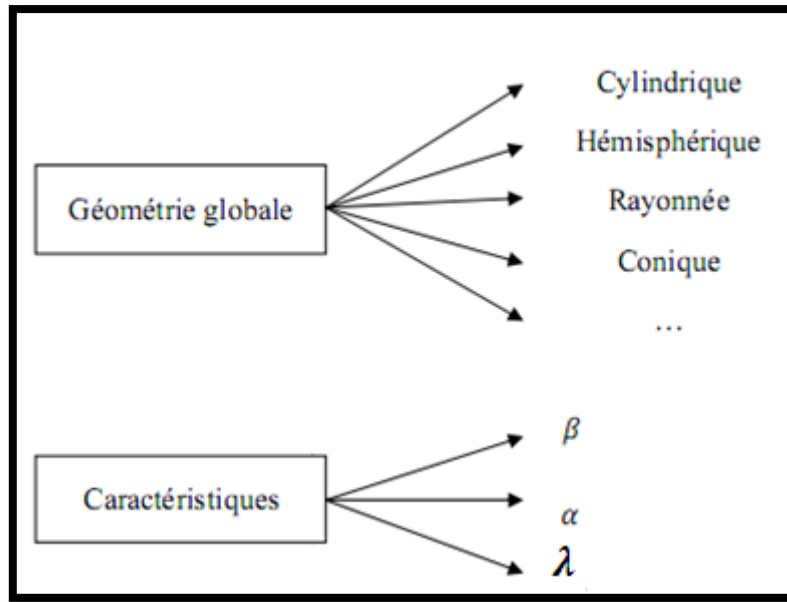
Le tableau suivant présente les matériaux de coupe pour quelques matériaux à usiner.

**Tableau 1.2 :** Exemples de couples outil/matière avec ordres de grandeur de  $V_c$ .

Matériaux à usiner	Matériaux de coupe	Revêtements	$V_c(m/mn)$
Acier a outil HRC<50	Carbure monobloc	TiCN	300-600
	Cermet	Aucun	300-800
	Céramique $Al_2O_3+TiC$	aucun	60-300
Acier a outil HRC<58	Carbure monobloc	TiCN	200-500
	PCBN	Aucun	500-1000
	Céramique $Al_2O_3+TiC$	Aucun	50-200
Acier a outil HRC<63	Carbure monobloc	TiCN	50-300
	PCBN	Aucun	300-600
	Céramique $Al_2O_3+TiC$	Aucun	30-140
TA6V4 (titane)	Carbure monobloc	TiCN	100-400
Alliages à base nickel	Carbure monobloc	TiCN	80-250
	Céramique $Al_2O_3+SiC$	Aucun	120
Font GG-25	Céramique $Si_2N_4$	Aucun	500-1200
	PCBN	Aucun	1250-3000
Alliages légers $Re<500MPa$	Carbure monobloc K20	Aucun	3000-4700

#### I.4.2 Géométrie des outils de coupe :

Au sein d'une même famille, les outils peuvent être de figure cylindrique, hémisphérique, rayonnée,... Il est possible d'inclure des outils possédant des angles d'hélice divers ou des angles de coupe évolutifs. Egalement c'est souvent le cas pour les fraises hémisphériques à condition que le type d'arête reste similaire [14]. Le diamètre ou le nombre de dents de l'outil peuvent aussi changer. Les notions de type d'arêtes et de familles d'outils sont ici équivalentes : le type d'arête définit la famille d'outils.



**Figure I.9 :** Diversifications possibles au sein d'une famille d'outils. [14]

$\alpha$ : Angle dépouille

$\beta$ : Angle d'attaque

$\lambda$ : Angle d'hélice

## **I.5 Programmation des opérations d'usinage:**

### **I.5.1 Structure d'un programme :**

Le programme ne définit pas uniquement la trajectoire de l'outil. Il permet de commander l'automate pour réaliser des fonctions auxiliaires telles que mise en route et arrêt de la broche et de l'arrosage, changements d'outils ou pièces... il définit aussi les unités, les modes de travail et les différents repères.

Les règles de base pour la structure d'un programme sont :

- Le programme doit faire clairement apparaître la gamme de fabrication,
- Le programme doit être constitué de parties indépendantes,
- Le programme doit être structuré : initialisation, partie principal et remise en configuration standard.



### **I.5.2 La programmation actuelle : [9]**

La programmation actuelle des machines outils se fait par l'intermédiaire du langage G ou G-code dont les principes sont regroupés dans la norme Iso 6983 et annexes.

A l'origine, le code G est basé sur un principe de programmation qui remonte à la période des cartes perforées, au début des années 60. Il a tout d'abord été développé par l'EIA (Electronic Industries Alliances) et a été normalisé sous la référence RS274D ou ISO 6983 en février 1980.

Cette programmation s'appuie sur des fonctions préparatoires de type G. Elle est complétée par des fonctions auxiliaires (de type M) et technologiques (F, S, etc....). Par l'intermédiaire de ce code, l'utilisateur communique à la machine un ensemble d'instructions explicites. Un programme en G-code est donc la traduction d'une suite d'actions et de déplacements élémentaires (ligne droite ou arc de cercle par exemple) qui permettent de générer des conditions d'usinage ainsi qu'une trajectoire plus ou moins approximée.

D'une manière générale, le code G s'intéresse à programmer une trajectoire en respectant les mouvements des axes machine plutôt que de se concentrer sur les besoins de l'usinage en respectant la pièce.

#### **I.5.2.1 Les lacunes de code G : [9]**

Nous pouvons en particulier noter les principales lacunes qui posent problème lors de la programmation et de manière plus générale dans l'intégration de l'usinage dans la chaîne CAO-FAO-CN :

- La sémantique peut parfois s'avérer ambiguë
- Les constructeurs rajoutent parfois des extensions au langage pour combler les manques et s'adapter à l'évolution des technologies. La 'portabilité' d'un programme s'avère alors impossible entre les différents fabricants.
- Le flux de l'information est unidirectionnel : l'absence de 'feedback' possible de la production à la conception entraîne des difficultés de communication et de correction. De même, la préservation et la capitalisation des expériences se révèlent compliquées.
- L'utilisation du code G rend les modifications au pied de la machine, dans la CN, difficiles et laborieuses ainsi qu'un contrôle limité de l'exécution du programme.
- L'utilisation de post-processeurs rajoute une étape et une perte d'information entre le modèle CAO et l'usinage de la pièce. La vérification de la conformité de la pièce qui doit être usinée avec le modèle CAO est alors complexe voire impossible.

- Le G-code n'est pas bien adapté pour la programmation des courbes complexes. Des pertes d'informations peuvent être engendrées lors de discrétisations et d'approximations.

Pour conclure, nous pouvons voir que le G-code, qui est basé sur des principes qui commencent à dater, ne répond plus aux exigences de programmation des usinages nouveaux et que son emploi constitue une rupture dans la chaîne numérique.

### I.5.2.2 Les principales fonctions :

- Les fonctions préparatoires (G) :

**Tableau 1.3:** les instructions G. [15]

Fonction	Définition
G00	Interpolation linéaire à vitesse d'avance rapide
G01	Interpolation linéaire à vitesse d'avance programmée
G02	Interpolation circulaire à vitesse d'avance dans le sens anti trigonométrique (horaire)
G03	Interpolation circulaire à vitesse d'avance dans le sens trigonométrique (antihoraire)
G04	Temporisation programmable a l'adresse F
G09	Arrêt préciser fin bloc avant enchainement sur bloc suivant
G10	Bloc interruptible
G17	Choix du plan XY
G18	Choix du plan ZX
G19	Choix du plan YZ
G23	Interpolation circulaire définie par trois points
G29	Correction d'outil dans l'espace
G31	Cycle de filetage au grain
G40	Annulation de correction de rayon d'outil
G41	correction de rayon d'outil a gauche de profil a usiné
G42	correction de rayon d'outil a droite de profil a usiné
G45	Cycle de poche simple

G46	Cycle de poche ou surfacage avec contour quelconque
G75	Validation d'un sous programme de dégagement d'urgence
G77	Appel inconditionnel d'un sous programme ou d'une suite de séquence avec retour
G79	Saut conditionnel ou inconditionnel a une séquence sans retour
G80	Annulation d'un cycle d'usinage
G84	Cycle taraudage
G85	Cycle d'alésage
G86	Cycle d'alésage avec arrêt de broche indexe en fond de trou
G89	Cycle d'alésage avec temporisation fin de trou
G90	Programmation absolue par rapport à l'origine programme
G91	Programmation relative par rapport au point départ du bloc
G92	Présélection de l'origine programme
G97	Fréquence de rotation de broche en tour par minute
G104	Lisage de courbe dans l'espace

- Les fonctions auxiliaires logiques (M) :

**Tableau 1.4:** les fonctions M. [15]

Fonction	Définition
M00	Arrêt programme
M01	Arrêt optionnel programmé
M02	Fin de programme
M03	Rotation de la broche sens anti trigonométrique (horaire)
M04	Rotation de la broche sens trigonométrique
M05	Arrêt de la broche
M06	Appel d'outil
M10	Blocage d'axe
M11	Déblocage d'axe
M12*	Arrêt d'usinage programmé
M19	Indication de broche
M40 a M45	Gammes de broche

M48	Validation des potentiomètres de broche d'avance
M49	Inhabitation des potentiomètres de broche d'avance
M61 *	Libération de la broche courante dans le groupe d'axes
M62 a M65	Commande des broches 1 à 4
M66 a M69	Mesure des broches 1 à 4

### **I.6 fraisage des poches :**

L'usinage des poches est une opération qui profite beaucoup de l'apport de l'UGV. Le principal besoin de cette opération est d'enlever le maximum de matière en un minimum de temps à partir d'une pièce brute prismatique pour obtenir une pièce finale ayant des faibles épaisseurs de toiles. L'augmentation de la fréquence de rotation, et donc du débit copeau lors de l'usinage d'un matériau plutôt tendre répond tout à fait au besoin, avec des moyens relativement classiques. Actuellement, les essais s'intéressent à l'application des méthodes d'usinage aux poches fabriquées dans des matériaux plus résistant comme les aciers à matrices ou le titane. Cette fois-ci, l'opération est plus difficile, car les sollicitations mécaniques dues à la coupe provoquent des vibrations de l'outil. [16]

La principale difficulté est due à la forme de la pièce à obtenir. En effet, il n'est pas possible d'usiner une poche fermée directement. Il doit exister un avant trou qui permette le passage de la fraise, ou bien la stratégie d'usinage et l'outil permettent d'usiner en plongeant.

D'un point de vue géométrique, on s'intéresse à :

- la profondeur de la poche,
- la valeur du plus petit rayon de raccordement en fond de poche, ou dans les coins,
- la valeur de l'épaisseur de toile de fond de poche attendue.

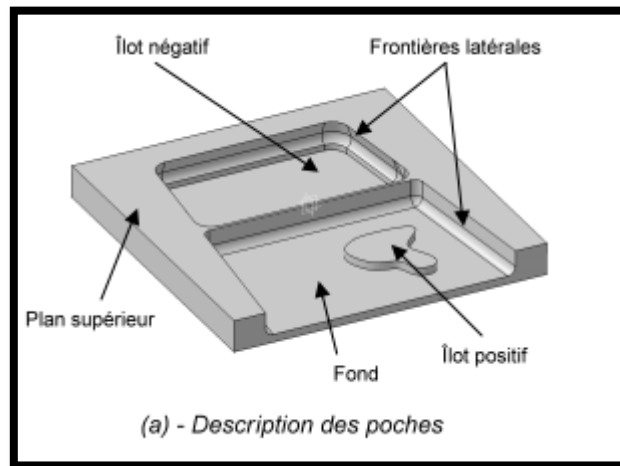
#### **I.6.1 Analyse des poches :**

Une poche se présente comme une concavité plus ou moins profonde. Le profil extérieur de la poche est un contour, fermé ou ouvert, constitué d'une succession d'entités géométriques telles que le segment de droite, l'arc de cercle ou la courbe paramétrique. [17]

Les cavités considérées dans le domaine aéronautique sont composées d'un fond, d'une frontière latérale et éventuellement d'îlots.

Le fond d'une poche peut être constitué d'une ou plusieurs surfaces, permettant ainsi de distinguer les poches à fond plan et celles à fond complexe. La frontière latérale s'appuie sur un contour appartenant soit au fond de la poche, soit à la surface supérieure généralement plane (plan supérieur). Il peut être fermée ou non. Dans ce dernier cas, on parle de poche de coin ou de poche ouverte. Par ailleurs, cette frontière latérale peut être perpendiculaire ou non au fond de la poche. Les îlots sont définis à partir d'un contour fermé appartenant au fond de la poche. [18]

Les différentes formes prises par chaque élément géométrique et les différentes configurations topologiques entre ces éléments géométriques constituent autant de critères de classification des poches [18], et permet aussi, de produire et concevoir les opérations et les moyens de conception et la fabrication de la pièce.



**Figure 1.10:** Exemple des entités poches. [18]

### I.6.2 Programmation des poches

La fonction G45 permet d'usiner des poches de forme simple : poches circulaires, oblongues, rectangulaires et rectangulaires avec congés aux quatre coins.

L'image suivante présente un exemple de programmation d'usinage d'une poche rectangulaire avec congés avec les dimensions suivantes :

Longueur :  $L=100\text{mm}$  ;

Largueur :  $I= 50\text{mm}$  ;

Profondeur :  $\text{prof}=44\text{mm}$  ;

Congés :  $R=20\text{mm}$  ;

Rayon outil :  $R_{\text{outil}}=4\text{mm}$

```
% 100  
  
N10 T1 D1 M6  
  
N20 M3 M40 S2000  
  
N30 G X Y Z50  
  
N40 G45 X75 Y52 Z-44 ER2 EX100 EY50 EB20 P10 Q7 EP100 EQ500  
  
N50 Z50  
  
N60 X Y  
  
N70 M2 (fin programme)
```

**Figure 1.11:** programme de fraisage d'une poche rectangulaire avec code G.

### **I.6.3 Apport d'UGV et les machines outil a structure parallèle pour l'amélioration d'usinage des poches :**

Le développement des domaines d'application de l'UGV et les progrès technologique ont conduit à une segmentation du marché des MOCN parallèle, qui présente des caractéristiques cinématiques plus homogènes que leurs consœurs sérielles dans le sens où elle proposent de fortes accélérations couplées à des vitesses d'avance. Ceci peut être bénéfique dans les opérations d'ébauche des poches prismatiques. [18]

L'émergence des machines à structure parallèle modifie le panel de stratégies d'usinage disponibles ainsi que leur domaine de performances. Certains types de parcours d'usinage des poches récents peuvent également devenir compétitifs.

Les MOCN parallèle ont ainsi un avenir dans les tâches qui nécessite des précisions [19]. Elles s'insèrent ainsi totalement dans la démarche actuelle qui vise à définir et optimiser le moyen de fabrication idéal (parcours, temps, cout...etc.) pour une application donnée.

## **I.7 Conclusion**

Ce premier chapitre a permis de définir le cadre de nos travaux de recherche. Ainsi, l'émergence de l'Usinage à Grande Vitesse s'est accompagné de profonds changements de la fonction fabrication des entreprises de production mécanique. Elle a pu toutefois s'appuyer sur les progrès technologiques des moyens de fabrication, tout en servant de moteur à ces avancées.

Dans cette partie nous avons aussi fait un rappel sur la programmation actuel des machines-outils. Généralement, on considère que l'on obtient des pièces de meilleure qualité pour des coûts identiques est le seul objectif, mais l'évolution de la programmation numérique a un rôle très important dans la simplification des gammes de fabrication automatique.

## **Chapitre II :**

### **État de l'art sur STEP-NC**



## **II.1 Introduction :**

L'augmentation de la productivité sur machine à commande numérique (MOCN) passe, entre autre, par l'amélioration de la programmation de celle-ci [9]. Le langage actuellement utilisé pour la programmation des machines à commande numérique est le code G, sa normalisation date du début des années 80 à travers la norme ISO 6983, dont les principes de base s'appuient sur les premières MOCN programmées à l'aide des cartes perfores. Le code G ne répond plus aux exigences de la technologie moderne des MOCN [20]. Il existe aujourd'hui réellement une demande et de nouvelles opportunités pour dépasser le stade de la programmation basée sur l'échange d'informations de bas niveau, à travers la description d'actions élémentaires, engendré par l'utilisation du code G [21]. Jusqu'au début des années 2000, peu de travaux de recherches se sont intéressés au standard de programmation en lui-même. Aujourd'hui, un nouveau standard de données connu sous le nom de STEP-NC voit le jour et vise à pallier aux manques de la programmation structurée G-code par une approche orientée objet et à intégrer la fabrication dans la chaîne numérique complète (CAO/FAO/CN) [21].

Dans ce chapitre nous avons présentes un' état de l'art sur le STEP-NC, les travaux qui ont été menés dans ce domaine et l'intégration du ce standard dans la chaîne numérique.

## **II.2 Historique et développement du la norme internationale STEP :**

La recherche d'un format commun pour les données issues de la CAO est un souci récurrent des industriels dans le monde entier depuis les années 70. La mise en œuvre d'échange et de partage des données a amené les industriels, surtout ceux qui utilisent beaucoup la sous-traitance (l'industrie automobile, aérospatiale), à créer des standards qui ont beaucoup servi aux différents partenaires pour mener à bien leurs projets. [22]

En 1979, aux Etats Unis, les utilisateurs et les éditeurs de systèmes CAO se sont mobilisés pour créer le premier standard d'échange de données CAO. Au printemps 1980 le National Bureau of Standard (NBS) avait formé l'organisation IGES (Initial Graphics Exchange Specification). IGES est un standard d'échange, dont

le principal objectif est l'échange des dessins techniques. Il est utilisé principalement dans le domaine de mécanique et d'aéronautique. Au début, il contenait des entités de base telle que la géométrie, l'annotation et la structure. Les nouvelles versions ont intégré les méthodes éléments finis et les systèmes électriques [22]. Le standard IGES en est maintenant à sa sixième révision et est proposé par la quasi-totalité des systèmes de CAO [13].

A la même époque, l'industrie automobile allemande a développé le standard d'échange VDA (Verband der Automobilindustrie), utilisé notamment par Volkswagen puis par le groupe Volkswagen – Audi – Seat – Skoda pour les échanges dans le Groupe [13]. Il a été normalisé en 1985 par DIN (l'organisme de normalisation allemande). Cette norme était basée sur IGES mais a ajouté en particulier un format d'échange de fichiers de calcul à celle-ci [22].

Le Standard d'Echange et de transfert (SET) est un standard français lancé en 1983 par Aérospatiale [22], avec l'objectif de faire mieux qu'IGES ou VDA. Aérospatiale avait besoin d'une base de données commune pour des données issues de différents systèmes de CAO. Le standard représente une solution aux exigences relatives à l'échange de données entre différents systèmes de CFAO, et au besoin d'archiver ces données.

En 1987 est apparu le groupe opérationnel GOSET dont les principaux objectifs étaient de développer SET, d'apporter une aide technique aux utilisateurs de la norme, de valider les interfaces entre les logiciels de CFAO et la norme et de participer aux travaux de normalisation nationaux et internationaux dans le domaine des échanges de données CFAO. [22]

Pour fédérer ces différentes initiatives et disposer enfin d'un langage neutre d'échange de données entre systèmes de CFAO, l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) a lancé le projet de norme PDES/STEP pour (Product Data Exchange Specification/STandard for the Exchange of Product model). Le but consistait à définir les méthodes pour créer des modèles de données du produit pouvant être interprétés par les ordinateurs. Ces modèles avaient pour but de permettre l'échange et le partage des données des produits de manière à ce que ces données ne se trouvent jamais modifiées tout au cours du cycle de vie du produit.

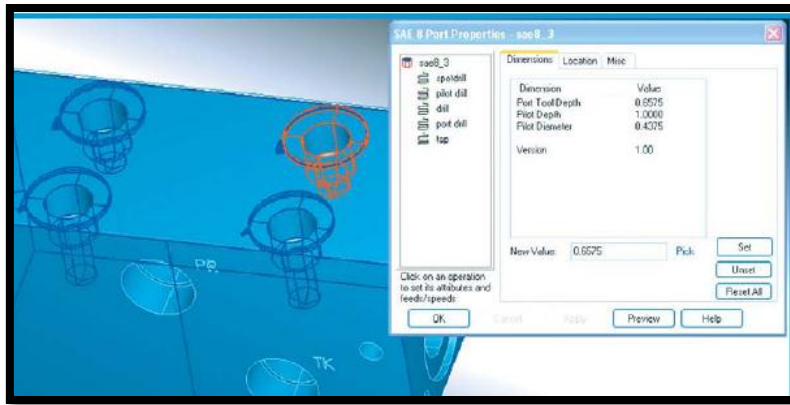
La norme STEP porte sur la représentation et l'échange de données de produits et a pour objectif d'intégrer les processus de conception, de développement, de fabrication et de maintenance de ces derniers. Cette méthode permet donc de définir une représentation non ambiguë des données du produit, interprétable par tout système informatique, et couvrant tout le cycle de vie des produits. [22]

Les standards internationaux couvrant ces modèles de données du produit sont devenus plus connus sous le nom de STEP. Au cours de ces quinze dernières années, différents groupes et comités, comprenant essentiellement des utilisateurs plutôt que des fournisseurs se sont réunis régulièrement pour développer d'autres standards des modèles des données du produit. Ils ont fait rapidement d'énormes progrès et, comme les standards STEP ont été suffisamment développés pour couvrir tous les buts originels d'IGES, ce standard ne doit plus connaître d'autres développements et c'est officiellement STEP qui a pris sa place.

### II.3 Définition de STEP-NC :

Le STEP-NC est un standard d'échange de données pour la programmation de commande numérique basé sur le STEP (standard for the exchange of product). Le STEP-NC est conforme à l'utilisation directe par la commande numérique, il permet l'éradication des postes processeurs.

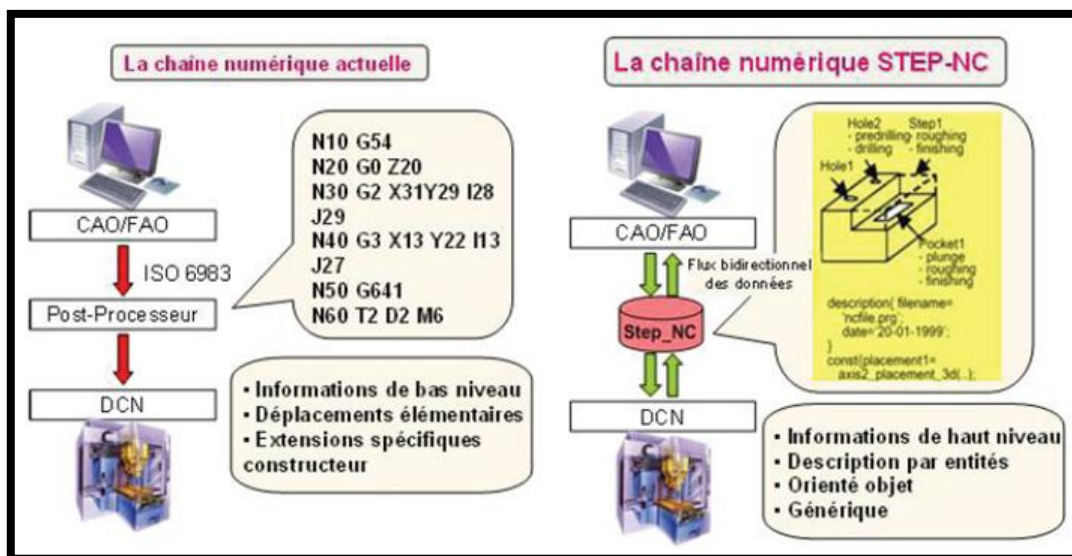
Contrairement au G-code (ISO6983) qui s'intéressait à décrire **comment faire** et quels étaient les trajectoires de l'outil et les mouvements à effectuer au niveau des axes, le STEP-NC décrit le **quoi faire**, il fournit un modèle de données orientées vers l'objet décrivant des informations de haut niveau comme les entités géométriques (trou, poche,...), les données de procès, les outils utilisés, les gammes de fabrication, et les critères de qualité (tolérances, état de surface). Il permet aussi de corriger en temps réel les trajectoires.



**Figure 2.1 :** programmation directe avec reconnaissance des formes.

L'objectif d'une programmation de haut niveau est l'utilisation d'un unique fichier contenant l'ensemble des données de la pièce, il peut aussi l'utiliser de façon générique sur plusieurs types de MOCN, indépendamment de leur marque ou de leur structure. Cette implémentation d'un unique fichier CAO/FAO/CN permet un flux bidirectionnel des données et un **feed-back** du DCN en direction de la FAO/CAO, qui est impossible avec le code de G/M.

Ainsi le standard STEP-NC fournit un modèle de données complet et structuré regroupant les informations de géométrie et les techniques sans perte d'informations pendant les différentes étapes de construction de la maquette numérique.



**Figure 2.2 :** comparaison G-code et STEP-NC. [21]

Pour comprendre STEP-NC et ce qu'il apporte de plus, il est bon de commencer par regarder STEP et sa relation avec IGES (Initial Graphic Exchange Specification).

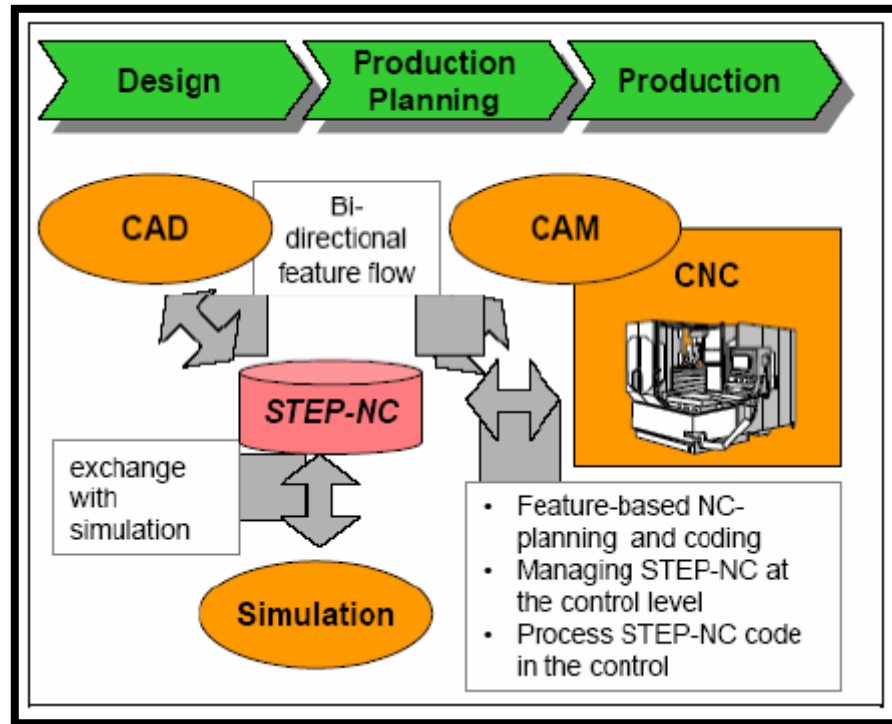
Le standard IGES sert à l'échange des données, seulement des données contenues dans les fichiers graphiques. Le standard STEP concerne l'échange des données permettant à plusieurs personnes de travailler ensemble en communiquant leurs informations de manière interactive. Il y a vingt ans, lorsque les concepteurs et les ingénieurs se sont intéressés aux ordinateurs pour **développer des concepts des produits qui est né IGES**. Au lieu des lignes, des dessins, des segments et des cercles sur papier pour donner des représentations graphiques de ce à quoi ressembleraient au produit, ils ont commencé par dresser ces lignes et ces arcs de cercles sur un écran d'ordinateur. Le dessin complet peut être sauvegardé sous forme d'un fichier numérique. Bien que la création du fichier d'un dessin original puisse prendre plus de temps que de le tracer sur papier, ce fichier est rapide à copier, à modifier, à imprimer et à manipuler. Ces économies de temps compensent largement le temps supplémentaire pris pour le préparer. En plus, la nature numérique du dessin permet d'y inclure un bien plus grand nombre d'informations dans un format nettement plus flexible.

### II.4 La vision de la maquette numérique avec le STEP-NC:

Le besoin de changer et de simplifier le mode de programmation se fait ressentir, tant au niveau des interfaces proposées par les constructeurs qu'au niveau de la recherche [9]. Des efforts sont mis en œuvre pour créer des interfaces Homme/Commande Numérique, plus accueillantes, plus simples, plus pratiques et plus fonctionnelles.

Avec l'arrivée de STEP-NC, c'est une nouvelle vision de la chaîne numérique. De nombreux travaux proposent des modèles en relation avec ce désir d'intégration de l'ensemble de la chaîne numérique [23]. Cette dernière n'a plus besoin du code G, car le Step-NC a pour objectif de pallier aux inconvénients de ce code. La réorganisation de la chaîne numérique ne se restreint pas à la seule programmation des commandes numériques, mais vise à l'implémentation d'un seul fichier lors des différentes étapes de la conception jusqu'à la fabrication. Ainsi, sur un noyau central de la maquette numérique au format STEP, on construit l'ensemble des éléments nécessaires pour la réalisation du produit. Ainsi, la maquette numérique issue de CAO est enrichie des diverses simulations, est complétée en FAO par le choix des stratégies et des trajectoires outils [9]. Les parcours de l'outil sont destinés à être élaborés par la

MOCN (machine à commande numérique) elle-même à partir du modèle de pièce [24]. En retour, l'expérience et les changements effectués sur la CN, en FAO, en CAO ou lors des simulations se retrouvent directement dans le fichier STEP-NC,



**Figure 2.3 :** la maquette numérique basée sur le STEP-NC.

## II.5 Les apports du STEP-NC :

Les principales améliorations de ce standard sont :

- réduction significative de temps en CAO et dans la préparation des données avec l'existence d'un unique fichier. [9]
- réduction du nombre de fichiers envoyés de la CAO à la FAO.
- réduction de temps d'usinage pour les petites et moyennes séries par optimisation intelligente au sein de la commande numérique ;
- Eradication des post-processeurs. [23]

Les principaux objectifs :

- fournir une architecture distribuée pour l'e-fabrication.
- soutenir l'exécution intelligente et autonome des machines en utilisant entièrement l'information riche de STEP-NC.

- soutenir la génération automatisée et interactive d'un plan de processus utilisant l'identification de dispositif, la génération alternative, l'ordre de processus, les conditions de coupe, etc.
- fournir une variété de données d'interface pour l'e-fabrication comprenant le dossier physique et la marque extensible vers le haut des possibilités de traduction des langues XML (Extensible Mark-up Language).
- L'e-fabrication est le futur objectif de la production en série industrielle pour les compagnies, qui ont un certain nombre de chaînes de productions partout dans le monde. Avec cette méthode, on donnera l'occasion aux ingénieurs mécaniciens et aux concepteurs, de concevoir et décider le procédé dans leur bureau, et mettre les données dans les machines-outils dans la chaîne de production dans l'autre coin de la terre, comme représenté dans la figure suivante. [25]

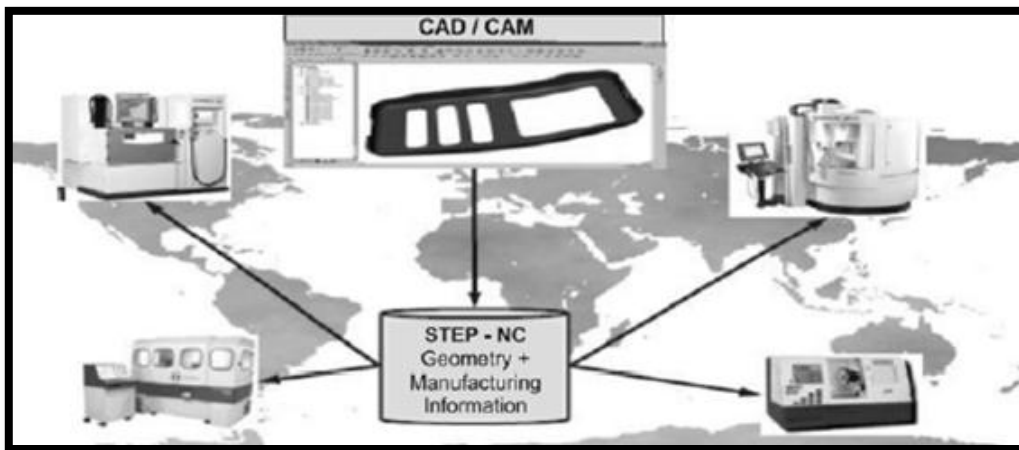


Figure 2.4 : Future objectif de STEP-NC. [25]

## II.6 Structure d'un programme STEP-NC :

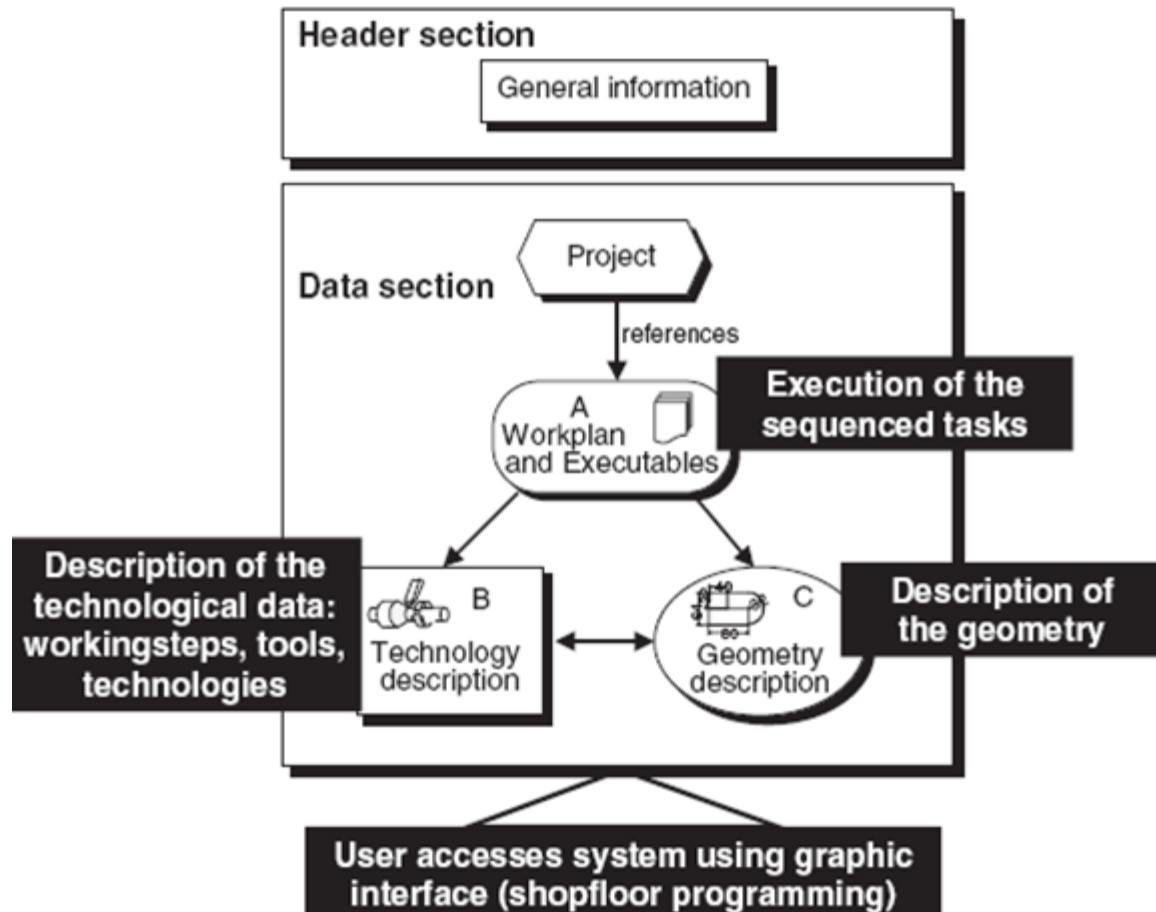
Le STEP-NC décrit les données selon le concept « **orienté objet** », ce programme est divisé en deux sections principales:

- La première section est l'entête « **HEADER** ». cette section contient les informations d'ordre général comme le nom du fichier, l'auteur, la date et les commentaires. [9]
- La seconde est la section de données « **DATA** », c'est la partie principale. Dans celle ci on classe les informations concernant la géométrie et les paramètres d'usinage. [9]



La section « DATA » contient, tout d'abord, une première entité « Project » qui sert de point de départ à l'exécution du programme. Elle est, ensuite, divisée en 3 parties :

- a) Workplan and Executables : recense les informations concernant l'ordre et le séquençage des opérations à établir. Ainsi que les exécutables associés.
- b) Technology description : permet de décrire les entités d'usinage, les opérations, les outils, etc.
- c) geometry description : renvoie à la géométrie de la pièce. [23], [26]



**Figure 2.5 :** structure d'un programme STEP-NC. [9], [26].

Nous retrouvons ces différentes parties dans l'exemple suivant extrait d'un programme STEP-NC :



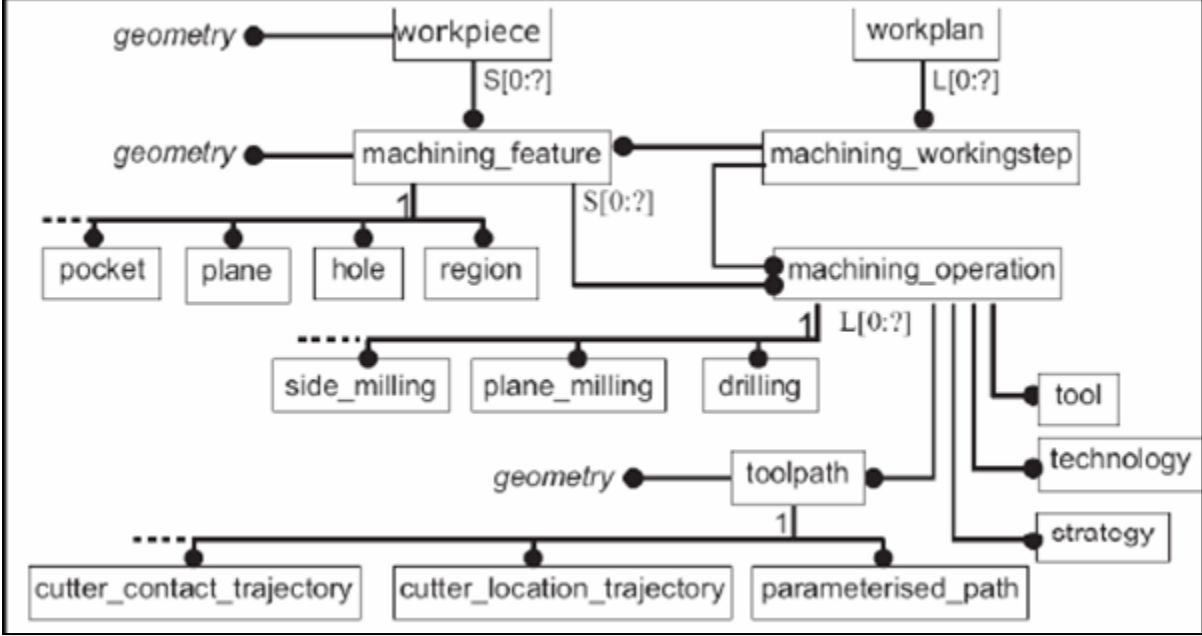
```

HEADER: FILE_DESCRIPTION ((EXAMPLE OF NC PROGRAMME FOR MILLING: SLOT, POCKET, HOLE.),'1');
      FILE_NAME ('tape.STP',$,('ISO14649'),(''),'R.D.Allen','Loughborough University','UK');
      FILE_SCHEMA (('MACHINING_SCHEMA','MILLING_SCHEMA'));
ENDSEC;

#1=WORKPIECE('PART2',#2,0.1,$,$,$,($200,#201,#202,#203,#204));
#2=MATERIAL('LM25','ALUMINIUM',($));
...
#9=CLOSED_POCKET('pocket1',#1,($40,#41,),$74,$,$,$,$,$,($,$,#17,#160)
#10=ROUND_HOLE('hole1',#1,($42,#43,),$76,#146,$,$,$,$,$,$,#147,$,#18,$,$)
...
#19=PROJECT('EXECUTE EXAMPLE2'),#20,($1,)
#20=WORKPLAN('EXAMPLE2',($21,#22,#23,#24,#25,#26,#27,#28,#29,#30,),$,$71);
#21=MACHINING_WORKINGSTEP('ROUGH_POCKET1',#86,#9,#40);
#22=MACHINING_WORKINGSTEP('FINISH_POCKET1',#86,#9,#41);
#23=MACHINING_WORKINGSTEP('DRILL_HOLE1',#87,#10,#42);
#24=MACHINING_WORKINGSTEP('REAM_HOLE1',#87,#10,#43);
#25=MACHINING_WORKINGSTEP('ROUGH_SLOT1',#88,#11,#44);
#26=MACHINING_WORKINGSTEP('FINISH_SLOT1',#88,#11,#45);
...
#41=BOTTOM_AND_SIDE_FINISH_MILLING($,$,'FINISH_POCKET1',#51,15.0,$,$97,#81,#70,$,$,2.0,1$);
#42=DRILLING($,$,'DRILL_HOLE1',#52,1$,$,$98,#82,#70,$,$)
#43=REAMING($,$,'REAM_HOLE1',#53,1$,$,$99,#83,#70,$,$,F,$,$)
...
#50=CONTOUR_BIDIRECTIONAL(0,0,F,0,0,0,0);
#51=CONTOUR_PARALLEL(4,0,5,0,T,CW,$,CONVENTIONAL);
#52=DRILLING_TYPE_STRATEGY($,$,$,$,2.0,2.0,20$);
#53=DRILLING_TYPE_STRATEGY(75.0,5$,$,2.0,5$,8.0,1$,$,20$);
...
#60=MILLING_TECHNOLOGY($,TCP,$,2.0,$,0.3,F,,F,,F.);
...
#71=SETUP(SETUP1,#72,#85,($83,));
#72=AXIS2_PLACEMENT_3D('SETUP1',#164,#165,#166);
...
#83=WORKPIECE_POSITIONS(#1,#84,$);
...
#96=MILLING_CUTTING_TOOL('TAPERED_ENDMILL_20MM',#126,($106,),(5$),8$,#91,$);
...
#125=MATERIAL('EMD5C05','HSS/CO',($));
#126=TAPERED_ENDMILL(#136,4,null,F,,,$,$);
...
#136=TOOL_DIMENSION(2$,$,$,$,1.5,$,$);
...
#159=TOLERANCED_LENGTH_MEASURE($,null,$,$);
#160=POLYLINE('pocket1',($205,#206,#207,#208,#209,#210,#211,));
...
#200=CARTESIAN_POINT('CLAMPING_POSITION1',($,2$,25.0));
...
#217=CARTESIAN_POINT('SLOT3_2',(1$,2$,,$));
...
ENDSEC;

```

Figure 2.6 : exemple de programme STEP-NC.



**Figure 2.7 :** information présentes dans le STEP-NC. [9]

Pour prendre le seul exemple des outils, les données qui peuvent être présentes dans le fichier STEP-NC sont le type d'outil, sa géométrie, sa durée de vie attendue, etc. Le fichier est donc vraiment complet et dispose de l'ensemble des données permettant d'être directement utilisé par la commande numérique. Cela permet d'éviter les conversions de formats qui sont source de perte d'informations. De plus, la séparation existante entre les données de la géométrie, des opérations et du processus permet une simplification du flux et du stockage des données. Il permet aussi de rendre possible l'échange avec des modules situés en amont de la chaîne numérique (par exemple avec la CAO).

## II.7 Les travaux de recherche effectués sur le Step\_NC :

Plusieurs actions regroupant industriels et chercheurs ont vu le jour pour mener à bien ce projet. En 1997, Ford, Allied signal et Step Tools ont montré le premier succès de l'échange de données géométriques 3D par l'utilisation de STEP, ce projet est appelé Aero STEP [21]. Toujours en 1997 le laboratoire NRL-SNT (National Research Laboratory for Step\_NC Technology) de l'université de Pohang s'applique à développer un système complet basé sur le Step\_NC. Dans ce but, il a été réalisé un système de commande numérique autonome basé sur le Step\_NC et il a été construit un système de production virtuel à architecture ouverte. Ensuite, le projet Super

Model initiée par le NIST (National Institut of Standard and Technology) a regroupé à partir de 1999 plusieurs des plus grandes firmes américaines comme Boeing, General Motors, Daimler-Chrysler dans le but de construire une base de données qui pourrait contenir l'ensemble des informations nécessaires à la fabrication des pièces [21]. Une des clefs de la base de données du Super Model est l'utilisation d'interface au format XML, ce qui constitue un moyen pratique de lier les trajectoires, les stratégies d'usinage et les caractéristiques outils aux données de géométrie, d'entité et de phases d'usinage [9].

Le projet IMS Step\_NC, approuvé en Novembre 2001, regroupe un ensemble d'actions de recherche au niveau international avec des laboratoires d'Europe, de Suisse, de Corée et des USA. Font partie de ce projet, des utilisateurs, des fabricants des systèmes CAO, FAO, de machines outils et CN, etc. Les coordinateurs régionaux sont Siemens pour l'Europe, CADCAMation pour la Suisse, Step Tools pour les USA et ERC-ACI pour la Corée. Ce projet a permis de coordonner au niveau international la recherche concernant le STEP-NC et a donné lieu au projet européen Esprit STEP-NC. Dans le cadre de ce projet, un prototype pour le fraisage a été mise au point et présenté en octobre 2001, Aachen en Allemagne [9].

Tous ces projets ont posé les bases de la programmation orientée objet à l'édition d'une première norme STEP-NC en 2002.

## II.8 Les normes STEP-NC :

Le STEP-NC s'appuie sur la technologie STEP de modélisation, cette modélisation s'appuie sur une approche générique complétée par des protocoles d'application élaborés à partir des caractéristiques propres à chaque métier. L'ISO propose une méthodologie pour l'élaboration de ces protocoles d'application basée sur la spécification des besoins. L'élaboration de l'AAM (Application Activity Model), de l'ARM (Application Reference Model) et de l'AIM (Application Interpreted Model) comme dans la figure suivante :



**Figure 2.8 :** cycle de développement d'un AP. [21]

L'AAM permet de recenser les différentes activités du modèle, le flux d'informations à prendre en compte et d'établir un glossaire du vocabulaire utilisé. Ensuite, l'ARM mène à une formulation avancée des données utilisateurs regroupés en unités fonctionnelles. Pour finir, l'AIM est une opération de mise en correspondance des données utilisateurs avec les ressources intégrées génériques. [21] Il existe aujourd'hui deux comités ISO différents avec des centres d'intérêts distincts. Le groupe ISO TC 184/SC1 travaille sur l'ISO 14649 représentant l'application du modèle ARM. Quant au groupe ISO TC 184/SC4, il travaille sur la seconde norme STEP AP238 (ISO 10303-238) pour l'AIM (Application Interpreted Model). La principale différence entre ces 2 modèles est le degré auquel ils font appel quant aux méthodes de représentation et à l'architecture STEP.

ISO 14649 et ISO 10303-238 peuvent être vues comme 2 différentes méthodes d'implémentation du standard STEP-NC :

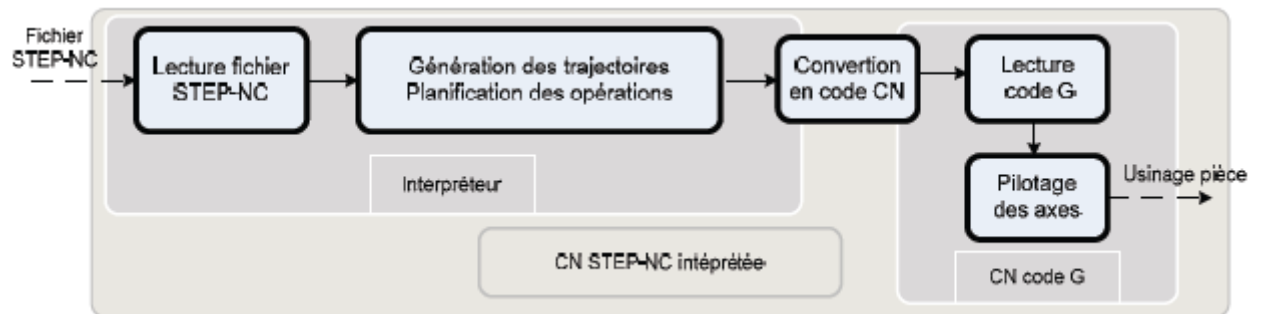
- ISO 14649 est plus utilisée dans un environnement dans lequel les systèmes de CAO possèdent des informations exactes concernant le moyen de production et son environnement. Ce standard n'a pas de mécanisme spécifique pour intégrer les autres types de données au format STEP. Ainsi, le flux bidirectionnel des données entre la conception et la fabrication est rendu plus difficile.
- STEP AP-238 est plus adaptée à une intégration complète de la conception et de la fabrication. Ce standard permet d'intégrer toutes les informations du fichier STEP ainsi que certaines construites à partir de l'ISO 14649. L'échange bidirectionnel des données est ainsi possible.

Cependant, l'un des problèmes de l'AP-238 est qu'il ne donne qu'une vue informationnelle des données contrairement au standard ARM qui en fournit une vue fonctionnelle. En outre, dans le premier cas, les données peuvent s'avérer plus difficiles à déchiffrer, sa structure est plus complexe et la taille des fichiers nécessite plus d'espace de stockage.

## **II.9 Plates formes et prototype STEP-NC existante :**

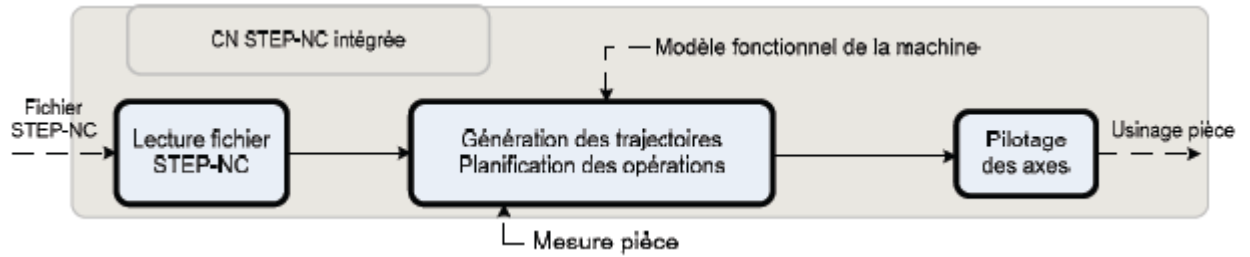
Il est possible de distinguer plusieurs prototypes nécessitant encore l'emploi du code G pour exécuter les résultats de l'interpréteur STEP-NC. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés dans le cadre du projet européen Esprit STEP-NC et

ont mené à une application permettant de générer le fichier STEP-NC à partir de Catia (Dassault Systemes) et d'Open Mind. Ces démonstrations ont permis d'illustrer la capacité d'intégrer le standard dans des suites CAO/FAO pour l'exporter vers une CN Siemens 840D adaptée à cet effet. Aujourd'hui, l'entreprise STEP Tools développe un logiciel (ST Machine) permettant de générer et de traiter un fichier STEP-NC ISO 10303 AP238. Il fonctionne comme une interface CN important le modèle CAO et les trajectoires outils dans un format générique. Celles-ci sont, ensuite, transformées en STEP-NC AP238. Malgré les avancées liées à la généricité du format. Cet interpréteur ne propose que partiellement les possibilités initialement prévues par l'ARM (ISO 14649). Un autre interpréteur a été développé à l'université de Loughborough et permet de traduire un fichier STEP-NC en code G pour des opérations d'usinage.



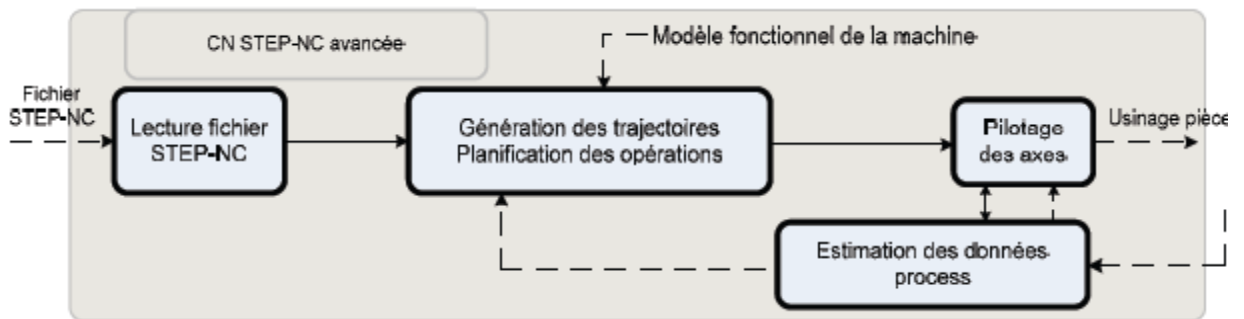
**Figure 2.9 :** programmation STEP-NC interprétée.

Une autre catégorie de prototype intègre permet d'afficher le code G. les chercheurs du laboratoire de Postech en Corée ont développé un système de contrôle autonome basé sur plusieurs modules indépendants (module de génération du fichier STEP-NC, génération de trajectoires, module de visualisation, module de commande et de contrôle des axes machine). Ce prototype a ouvert la voie du contrôle d'axes machine directement à partir du fichier STEP-NC. Il est implémenté sur une machine miniature de laboratoire. Un autre prototype est présent à l'université d'Auckland et pose les bases d'une architecture CN complète dédiée aux applications de fraisage sans l'utilisation de code G.



**Figure 2.10** : programmation STEP-NC intégrée.

Malgré la diversité des prototypes, il y a toujours un manque de solutions réelles pour l'implémentation et le traitement de fichier STEP-NC ISO 14649 au cœur des CN actuelles. Des plateformes de développement sont indispensables pour implémenter et valider les nouvelles propositions et optimisations des outils de programmation avancée.



**Figure 2.11** : programmation STEP-NC avancée.

L'IRCCyN a développé une plateforme SPAIM, qu'elle est basée sur une approche de programmation interprétée STEP-NC, ce qui permet une implantation rapide sur la plupart des commandes numériques industrielles actuelles.

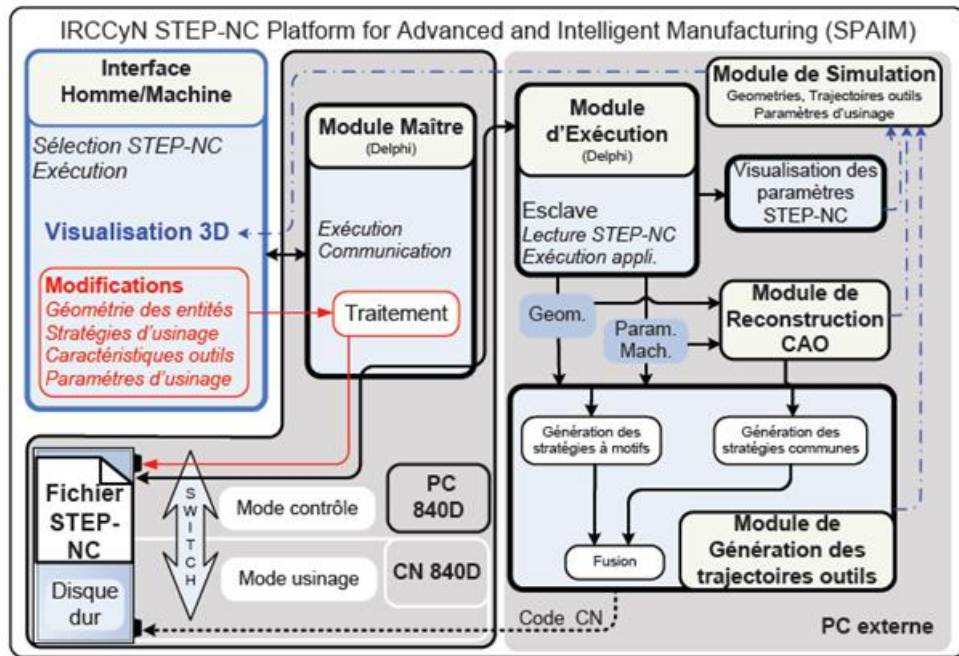


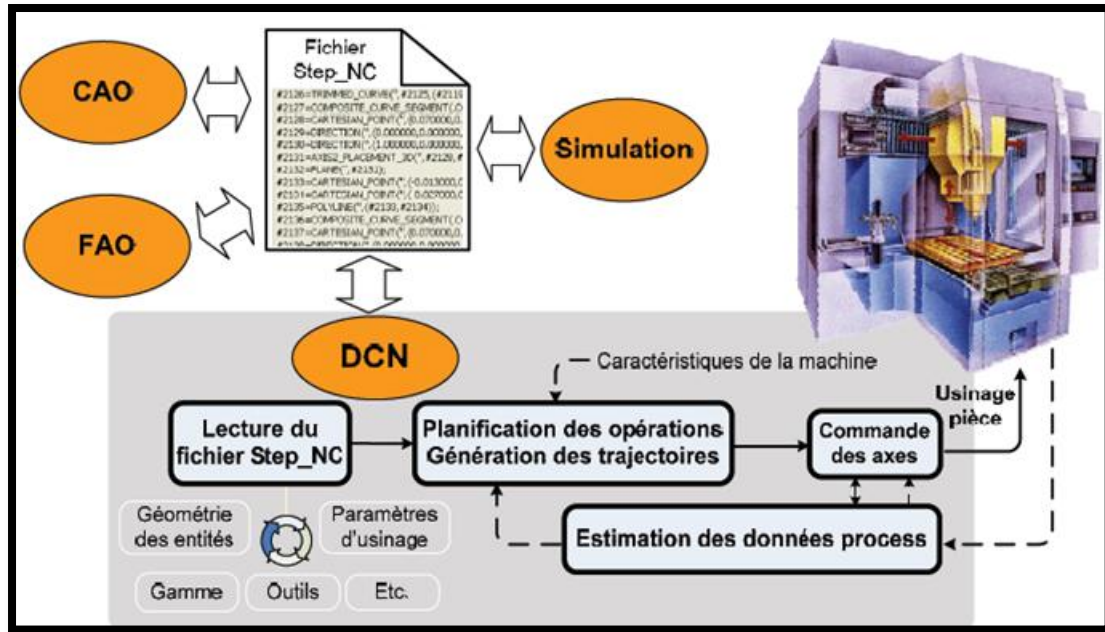
Figure 2.12 : architecture de la plateforme SPAIM.

## II.10 Intégration du standard STEP-NC :

Il est difficile d'imaginer un déploiement massif et rapide de l'utilisation du STEP-NC, ceci nécessiterait de lourds investissements et une remise à niveau de la majeure partie du parc machine ainsi que l'environnement logiciel [21]. L'usinage d'une pièce nécessite la commande des différents éléments de la machine outil ce qui implique de traduire **les informations de haut niveau orientées objet en informations de plus bas niveau pour l'exécution des tâches**. C'est le rôle de l'interpréteur, celui-ci intègre une grande partie de l'intelligence qui est reportée de la FAO traditionnelle vers la CN [21]. Dans le cas particulier de l'usinage trochoïdal, le STEP-NC permettra de montrer l'efficacité de l'utilisation des trajectoires à motifs en partant du modèle CAO jusqu'à la pièce usinée sur des moyens de productions actuels.

L'intégration des stratégies à motifs peut être schématisée de la manière suivante.





**Figure 2.13 :** la commande numérique dans la chaîne numérique STEP-NC. [21]

Cette architecture offre de nouvelles possibilités dans tous les domaines de programmation de la cellule d'usinage et en particulier pour la programmation des trajectoires d'usinage.

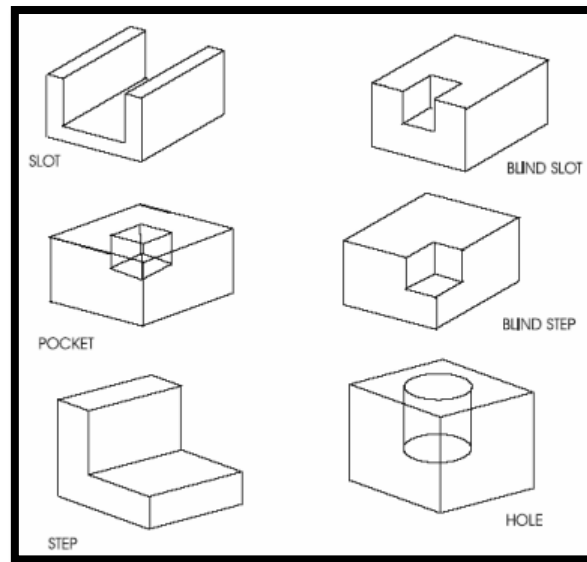
Actuellement, dans le cas de l'usinage 2D, certaines trajectoires usuelles sont d'ores et déjà présentées dans la norme STEP-NC. On y retrouve l'usinage unidirectionnel, contour parallèle et spiral. Toute autre stratégie peut être décrite sous l'attribut explicite en définissant l'ensemble de la trajectoire si celle-ci ne peut être décrite à l'aide de celles déjà normalisées [23].

## II.11 Définition d'entités d'usinage selon le standard STEP-NC :

La notion d'« entité » nommée ainsi en France, correspond au terme anglais « feature ». Ce concept apparaît dans les années 80 comme le point commun de rapprochement entre les divers acteurs de description des pièces (métier de concepteur) et les modèles de préparation à la fabrication.

Une entité d'usinage (machining feature) est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquelles un processus d'usinage est connu, ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités. [28]



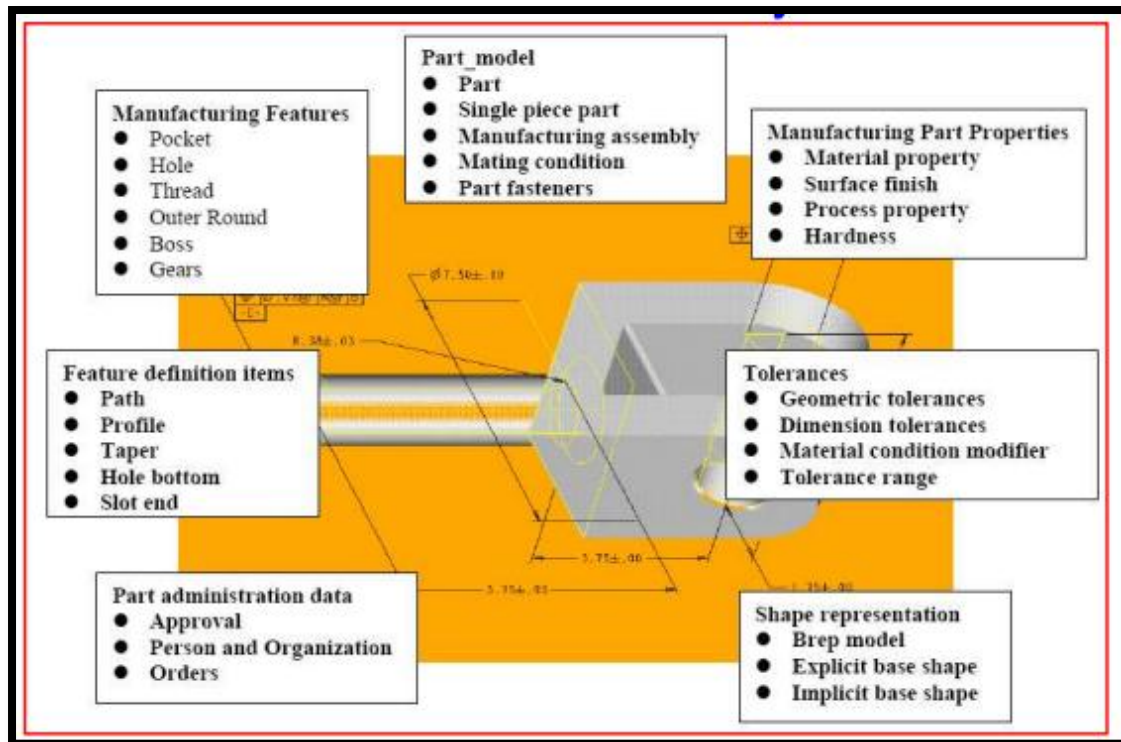


**Figure 2.14** : exemple d'entité d'usinage. [29]

Il n'existe pas un nombre limité et standard d'entités d'usinage permettant la définition complète d'une pièce. En effet, il est difficile de définir a priori les diverses entités d'usinage représentant les différentes pièces mécaniques. L'existence d'une entité est liée à l'existence d'un processus d'usinage permettant sa réalisation. Le catalogue des entités utiles au modèle de représentation des pièces résulte du domaine de l'expert en fabrication. [29]

Parmi plusieurs classifications de types des entités d'usinage, nous adoptons celle du protocole STEP AP-224 ISO 10303. Elle contient toutes les données de représentation et d'échange exigées pour définir les données nécessaires afin d'usiner une pièce mécanique.

En effet, la référence AP-224 définit largement les entités d'usinage par une bibliothèque structurée, mais également permet la définition des entités d'usinage en termes de B-rep. La deuxième édition de la référence AP-224 a classifié 16 catégories différentes d'entités d'usinage.



**Figure 2.15 : STEP AP-224.**

Aujourd'hui la réalisation des pièces prismatiques est basé sur le concept d'entités d'usinage tel que les opérations d'usinage (perçage, fraisage...).

## Conclusion

Malgré le nombre de travaux de recherche qui ont été réalisés concernant la programmation STEP-NC, ce mode de programmation est encore à ces premiers pas. Ils manquent cependant d'une réelle expertise dans ce domaine et beaucoup de travail de recherche est nécessaire pour vulgariser et implémenter ce format. C'est en effet une nouvelle vision de la chaîne numérique qui s'offre et qui doit entraîner des changements profonds tant au niveau matériel que dans l'approche de l'ensemble des intervenants à toutes les étapes de la chaîne numérique.

Dans ce chapitre nous avons présenté cette nouvelle technologie pour essayer de l'utiliser dans la suite de notre travail.

## **Chapitre III :**

### **Les stratégies d'usinage**

### **III.1 Introduction :**

Le vidage de poches est une problématique centrale du fraisage d'ébauche. La principale contrainte associée est d'obtenir un débit de copeau maximal tout en produisant des surfaces répondant aux spécifications pour faciliter le déroulement des opérations de finition. Pourtant, bien que de nombreux progrès aient été effectués sur les machines outils, avec notamment le développement de l'usinage grand vitesse, des nouvelles stratégies de fabrication ont été déployées dans les systèmes industriels [10]. Certains types de parcours récents peuvent également devenir compétitifs.

Dans ce chapitre nous présentons une modélisation de trajectoire d'outil avec la stratégie trochoïdale qu'est basée sur les deux stratégies classiques (zigzag, contour parallèle) comme des courbes guide. Cette modélisation a été développée dans ce chapitre avec le logiciel MATLAB. Nous avons créé un programme qui permet de calculer la longueur et de tracer les trajectoires d'outils pour les stratégies proposées dans le cas d'évidement de poche carré.

### **III.2 Définition de la stratégie d'usinage :**

Une stratégie d'usinage est le choix des mouvements de l'outil nécessaire à la réalisation d'une entité. Elle consiste à proposer à partir des trajectoires d'usinage les chemins (trajectoires successives) suivis par l'outil pour usiner partiellement ou entièrement le volume de matière. La stratégie d'usinage peut être compliquée dans le cas d'usinage d'une poche ou d'un moule en UGV. Principalement, l'attention se focalise sur le mouvement de l'outil en contact avec la pièce, pour réaliser la forme attendue et respecte les conditions d'usinage (qualité de surface et productivité).

Une stratégie d'usinage est définie par :

- Un mode de parcours ou balayage de la poche (aller-retour, spiral, nurbus...)
- Les trajets d'entrée-sortie matière de l'outil (entrée tangentielle par le flanc pour les poches ouvertes, pénétration en spiral pour les poches fermes...)
- Les paramètres opératoires (vitesse d'avance, tolérance d'usinage, prise de passe...), sont généralement définis par la base de données COM ainsi que par les spécifications géométriques de défaut de forme et d'état de surface.

- Les paramètres spécifiques UGV, ils permettent de garantir un mouvement contenu et fluide (sans à coup) de l'outil en cours d'usinage. En effet, les trajectoires, lorsqu'elle est décrite sous format linéaire, est constituées d'un ensemble de segments de droites raccordés entre eux, chaque changement de direction important entraîne une chute de vitesse, ce qui conduit à une diminution du temps d'usinage mais aussi dans certains cas à des marques sur la pièce. Pour pallier à ce problème, les directeurs de commande numérique (DCN) ont intégré des fonctionnalités qui lissent les trajectoires, soit par ajout des arcs de cercle au franchissement des discontinuités soit en approxime la trajectoire par une fonction polynomial.

Dans le cas des stratégies connues en fraisage 2 ½ axes, la norme STEP-NC nous propose la classe Two5DMillingStrategy. Celle-ci regroupe l'ensemble des stratégies suivantes : [9]

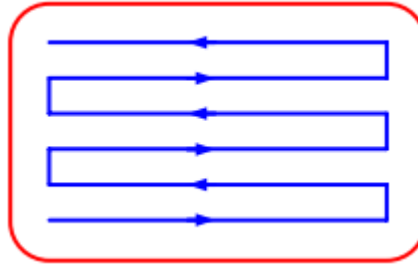
- Les quatre stratégies d'usinage de base : Contour Spiral, Contour Parallèle, Unidirectionnel et Bidirectionnel (zigzag)
- Deux stratégies « composées » : Contour-Bidirectionnel : il s'agit de réaliser un contour de la poche avec une stratégie Contour parallèle puis usiner la matière restante en Zigzag (Bidirectionnel). La seconde stratégie Bidirectionnel-Contour est l'inverse de la précédente : stratégie zig-zag en premier lieu puis Contour Parallèle.
- Center\_Milling permet l'usinage au centre d'une entité (souvent utilisé dans le cas de rainures)
- Explicit Strategy regroupe toutes les stratégies qui ne peuvent pas être décrites par les stratégies précédentes. Elle nécessite alors l'entière définition de tous les mouvements.

#### III.2.1 Stratégies couramment utilisées:

Les deux types classiques de trajectoires d'usinage les plus utilisés en fraisage d'ébauche sont le zigzag et le contour parallèle.

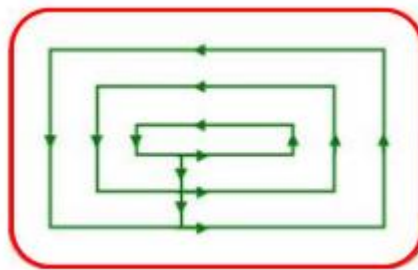
- **Stratégie zigzag :** Le déplacement de l'outil suit une direction de forme rectangulaire parallèle à la surface usinée. Les trajectoires sont construites de

manière élémentaire a partir de segments de droites parallèles entre elles et dont les extrémités sont obtenues a partir des contours de la poche. [30]



**Figure 3.1 :** stratégie zigzag.

- **Stratégie de contour parallèle :** La direction de déplacement de l'outil correspond à des contours homothétiques au contour de la poche. On utilise les contours de la poche pour construire des trajectoires décales les unes a l'intérieures des autres. Ces morceaux de trajectoires sont ensuite reliés entre elle par des trajectoires d'entrée en matière. [30]



**Figure 3.2 :** stratégie contour parallèle.

### III.2.2 Stratégies émergent grâce à l'amélioration des performances des MOCN

Les machines à structure parallèle, de par leurs capacités cinématiques et la puissance des DCN implantés, ouvrent la porte à de nouveaux types de trajectoires restées marginales jusqu'à présent, en particulier pour des questions de productivité. Ainsi, le tréflage et les trajectoires trochoïdales sont des stratégies d'usinage innovantes qui ont trouvé des domaines d'application dans l'usinage des matériaux durs. Jusqu'à présent, leur application à l'usinage d'alliages d'aluminium est restée très marginale, en particulier parce que ces deux types de trajectoires nécessitent d'une part une dynamique de machine élevée et d'autre part un DCN puissant pour être compétitives.

### **III.2.3 Les travaux effectués sur les stratégies d'usinages :**

Des nombreux travaux ont été publiés sur l'optimisation de ces deux types de stratégies d'usinage. Par exemple, I.HAMZA propose une méthodologie d'optimisation du choix des outils de coupe pour usiner des poches quadrilatères en  $2D^{1/2}$  [31]. Pour le contour parallèle, les études se sont focalisées sur le diagramme de Voronon, sur des approches par pixellisation ou sur des décalages apprariés [32].

Dans ces travaux, Patelop a étudié les modes d'interpolation de la courbure et de la continuité de la trajectoire sur le temps de parcours d'une trajectoire d'évidement de poche [10]. Pour ce qui est des stratégies en zigzag, l'accent a été mis sur l'optimisation de la direction de balayage, ceci afin de minimiser la longueur de trajet [31]. Plus récemment, les caractéristiques technologiques liées aux moyens de fabrications ont été intégrées dans la boucle d'optimisation.

La géométrie des trajectoires a été modifiée pour limiter le nombre de discontinuités apparaissant à chaque changement de direction et qui peuvent réduire l'avance de manière conséquente [10]. Dans leur étude, Mawussi et al. Proposent des éléments pour le choix de stratégie d'usinage pour le vidage de poche en s'appuyant sur des critères géométriques, les caractéristiques dynamiques du moyen utiliser doivent aussi être prise en compte [33].

### **III.3 L'usinage trochoïdal**

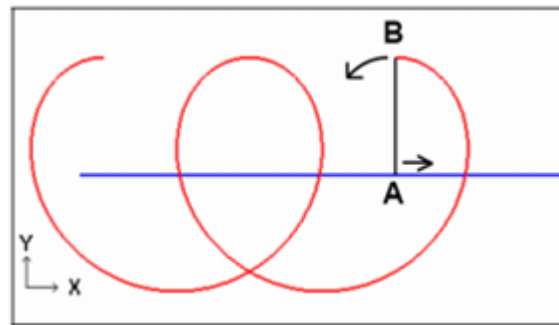
L'usinage trochoïdal est un type de trajectoire d'usinage émergent grâce à l'augmentation des performances des moyens de fabrication. Le principe d'une courbe trochoïdale est de faire décrire à l'outil de coupe une courbe de courbure continue, lui évitant ainsi de travailler en pleine matière. Comme nous le montrerons par la suite, elles permettent donc de contrôler l'engagement axial de l'outil ce qui conduit à une meilleure gestion des efforts de coupe.

Dans cette partie, après avoir présenté de manière détaillée les courbes trochoïdales, nous mettrons en place un programme MATLAB qui nous avons développé pour construire les trajectoires trochoïdales pour le vidage de poche. Ce programme aura pour objectif de visualiser les parcours et les points de contact de l'outil avec la matière.

### III.3.1 détermination de la trajectoire trochoïdal:

La stratégie trochoïdal est une stratégie construite par répétition d'un motif circulaire le long d'une courbe guide [34]. L'un des avantages de cette méthode est la possibilité d'utiliser les trajectoires existantes (zigzag, contour parallèle, spiral, etc.) comme base pour pouvoir construire les courbes guides [9]. Les paramètres de la courbe guide seront repris à partir de l'entité d'usinage. Le motif, quand à lui, est indépendant de la géométrie de l'entité [34].

D'un point de vue mathématique, on désigne par trochoïde la courbe obtenue par la combinaison d'un mouvement circulaire uniforme et d'un mouvement linéaire uniforme. Dans la figure 3-3, le point B tourne de manière uniforme autour du point A, lui-même étant animé d'un mouvement linéaire.



**Figure 3.3 :** Mouvement trochoïdal. [9]

Une équation paramétrée d'une trochoïde est donnée dans le plan complexe avec des coordonnées cartésiennes par l'équation :

$$z = V \cdot t + R \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (3.1)$$

Cette équation correspond à l'équation suivante :

$$\begin{cases} x = V \cdot t + R \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ y = R \cdot \sin(\omega \cdot t) \end{cases} \quad (3.2)$$

$V$  : vitesse du centre du cercle dans son mouvement rectiligne uniforme,

$R$ : rayon du cercle ( $R > 0$ ),

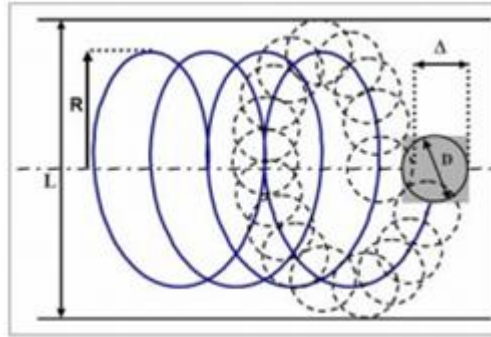
$\omega$ : pulsation ( $\omega > 0$ )

$t$  : paramètre de la courbe ( $t > 0$ ).



### III.3.2 Génération de la trajectoire trochoïdal:

Nous avons développé notre propre programme MATLAB pour construire la trajectoire trochoïdal pour l'application de vidage de poche. Ce programme permet de visualiser le parcours de l'outil et de bien maîtriser les paramètres opératoires et leur influence sur le déroulement du procès avant les appliques sur les logiciels FAO.



**Figure 3.4 :** Les paramètres opératoires pour la construction d'une trochoïde.

[9]

$L = 2 \times (R_{outil} + R_{trochoïde})$ : Largeur de la rainure

$D = D_{outil} = 2 \times R_{outil}$ : Diamètre de l'outil utilisé

$P\% = P_{tro} / D$ : Pas de balayage (exprimé en % du diamètre outil)

$P_{tro}$ : Pas de trochoïde

Lors de l'usinage d'une poche complète, les principales problématiques résident dans le franchissement des discontinuités géométriques du trajet ; l'objectif du modèle développé est de produire des trajectoires continues (évitant ainsi les chutes de vitesse d'avance) et permettant de maîtriser l'engagement radial. C'est pourquoi, la définition mathématique du trajet trochoïdal présentée par l'équation (3.2) a été modifiée afin de pouvoir prendre en compte la géométrie de la poche.

Le mouvement trochoïdal est défini alors par la relation suivante :

$$\begin{cases} x = X_0 + V_x(t - t_0) + R \cdot \cos(w \cdot t) \\ y = Y_0 + V_y(t - t_0) + R \cdot \sin(w \cdot t) \end{cases} \quad (3.3)$$

Cette définition est bien adaptée dans le cas d'une courbe guide polygonale. Chacun des segments constituant la courbe guide est considéré localement comme une courbe guide simple dont le vecteur directeur unitaire est projeté sur chacun des axes. Un décalage des coordonnées du point d'origine ainsi que de l'incrément

permettent de réinitialiser la construction à chaque segment. Cette réinitialisation n'a pas lieu dans les fonctions sinusoïdales, ce qui permet de repartir de la position du segment précédent et ainsi d'assurer la continuité de la courbe.

Le paramètre  $t$  est incrémenté pour pouvoir définir les coordonnées des points de la trochoïde. Pour des raisons de simplification et de clarification, nous avons choisi une pulsation  $w = 2\pi$ . Cela permet de réaliser un motif complet (un tour) de trochoïde pour un incrément unitaire de  $t$ . Le produit  $w \cdot t$  représente alors l'angle entre la droite reliant le centre instantané de la trochoïde et le point de la trochoïde, et le vecteur directeur de la courbe guide.

Le paramètre  $V$  représente le vecteur directeur de segments linéaire.

La courbe du type de celle suivie par le point A de la Figure 3.3. Celle-ci définit à l'aide de segments droite, chacun d'entre eux est caractérisé par un point de départ  $M_i(X_i, Y_i)$ , une direction  $V_i(V_{xi}, V_{yi})$ , et une longueur  $l_i$ .

Pour le motif trochoïde soit conforme, nous avons remplacé le paramètre  $t$  par  $t_i$  définie à l'aide de l'équation suivante :

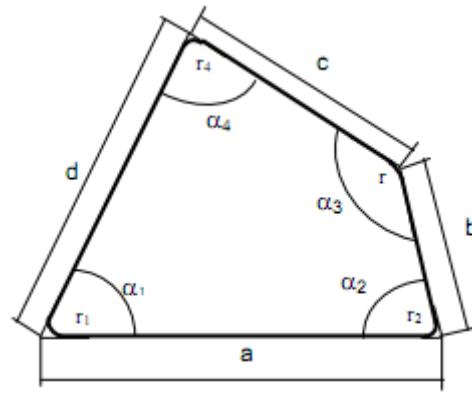
$$\forall i \in [0, n - 1], \begin{cases} t_0 = 0 \\ t_{i+1} = t_i + \frac{P_{tro}}{k} \end{cases} \quad (3.4)$$

La trajectoire trochoïdal sera donc générée avec le paramètre indiciel  $t_i$

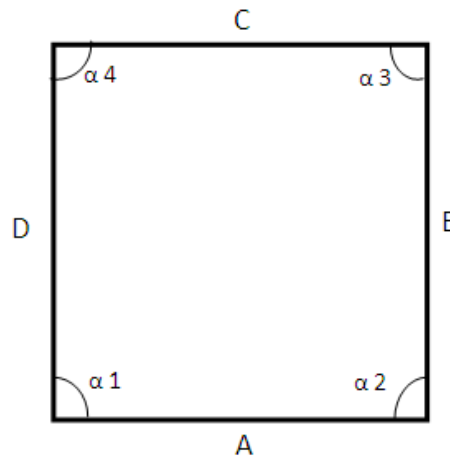
$$\forall i \in [0, n - 1], \begin{cases} x_{i+1} = x_i + V_x \cdot k \cdot (t_{i+1} - t_i) + R \cdot \cos(w \cdot t_{i+1}) \\ y_{i+1} = y_i + V_y \cdot k \cdot (t_{i+1} - t_i) + R \cdot \sin(w \cdot t_{i+1}) \end{cases} \quad (3.5)$$

### III.3.2.1 Construction de la courbe guide :

A partir de la géométrie de la poche quadrilatère, nous sommes en mesure de présenter le modèle mathématique général qui calcule les longueurs de la trajectoire d'une géométrie quadrilatère. Dans notre travail, nous avons basés sur les modèles développés par [Hamza I. 42] et [Behloul E. 13] pour construire nos trajectoires. Pour cela nous avons créé deux programmes MATLAB qui gèrent les deux courbes guides dans une poche carré simple, nous avons fait une simplification avec des angles de  $90^\circ$ .



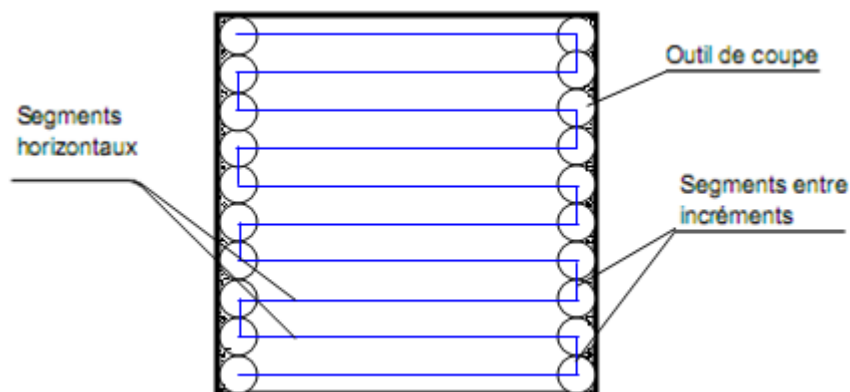
**Figure 3.5 :** paramètres géométriques d'une poche quadrilatère. [31]



**Figure 3.6 :** paramètres géométriques d'une poche carrée.

**A- Construction de la courbe guide stratégie zigzag :** pour la construction de cette courbe il faut tout d'abord récupérer les paramètres de la poche (longueur des cotes, les angles...) et de l'outil (rayon d'outil), ensuite calculer les longueurs des segments et le nombre de passe nécessaire.

Nous avons basé dans cette stratégie à un modèle de calcul, qui est simplifié pour une poche carrée, le modèle est bien détaillé dans la suite : [32]



**Figure 3.7:** Stratégie d'usinage en zigzag dans une poche carrée.

L'incrément « **P** » entre deux passes : il est calculé pour un nombre entier  $n$

$$P = \frac{h}{n} \quad (3.6)$$

$h$  : Hauteur de la poche

$$h = \left( D - R \cot g\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) - R \cot g\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) \right) \sin \alpha_1 \quad (3.7)$$

$R$  : rayon de l'outil.

Le nombre d'incrément :

$$n = E \left( \frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R} \right) + 1 = E \left( \frac{\left( D - R \cot g\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) - R \cot g\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) \right) \sin \alpha_1}{2 \cdot \rho \cdot R} \right) + 1 \quad (3.8)$$

Avec le coefficient de recouvrement d'usinage:  $\rho < 1$

Le coefficient de correction :

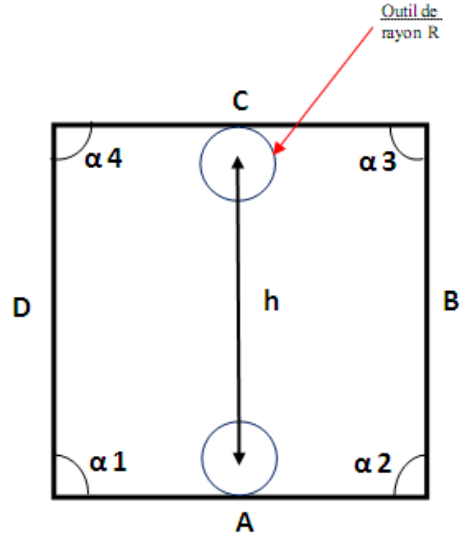
**\*1<sup>er</sup> cas :**  $\frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R} = k$ : *nombre entier*

$$E \left( \frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R} \right) + 1 = \frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R} - 1 + 1 \quad (3.9)$$

$$E = 1 - \frac{2 \cdot \rho \cdot R}{h} \quad (3.10)$$

**\*2<sup>eme</sup> cas :**  $\frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R} = k + \varepsilon$ : *nombre reel*

$$E = \frac{\text{integrer}\left(\frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R}\right)}{\frac{h}{2 \cdot \rho \cdot R}} \quad (3.11)$$



**Figure 3.8:** l'hauteur de la poche carré (cas stratégie zigzag).

La longueur des segments : [32]

$L_{hZ}$  est la somme de tous les segments horizontaux

$$L_{hZ} = \sum_{i=0}^{n+1} \left[ A_{R \cot g(\frac{\alpha_1}{2})} - R \cot g(\frac{\alpha_2}{2}) P(i-1) (\cot g \alpha_1 + \cot g \alpha_2) \right] \quad (3.12)$$

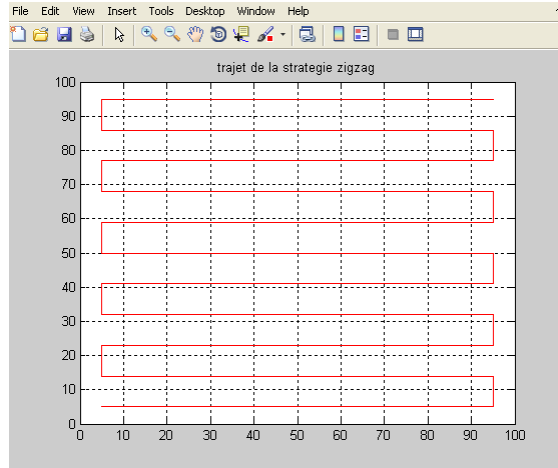
$L_{vZ}$  est la somme de tous les segment entre passes

$$L_{vZ} = \sum_{i=1}^n [P \sin(\alpha_1)] \quad (3.13)$$

La longueur totale de la trajectoire zigzag :

$$L_{TZ} = L_{hZ} + L_{vZ} \quad (3.14)$$

Après cette simplifications des calculs, nous avons les interprété dans le programme MATLAB (courbeguidezigzag.m), ensuite nous avons construire les courbes guides suivantes :



**Figure 3.9:** Stratégie d'usinage en zigzag sous MATLAB.

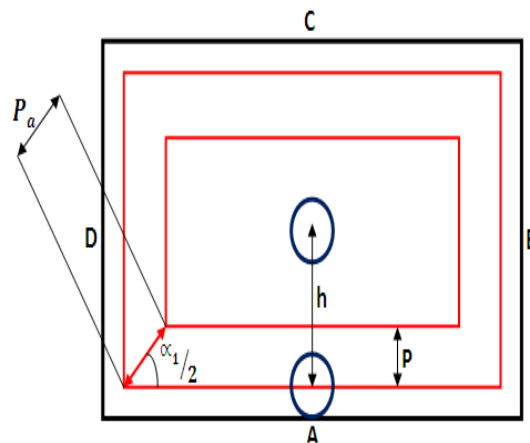
**B- Construction de la courbe guide stratégie contour parallèle:** dans cette construction nous avons aussi détaillé les calculs des segments de la trajectoire contour parallèle pour l'usinage d'une poche quadrilatère par un autre modèle de calcul, qu'est développé pour cette stratégie.

Calcul de l'incrément P

$$\text{On a : } n = E\left(\frac{h}{2 \cdot \rho R}\right) + 1 \quad (3.15)$$

$$\text{Avec : } h = \overline{og} - \rho R \quad (3.16)$$

$$\text{Alors : } P = \frac{h}{n} = \frac{h}{E\left(\frac{\overline{og} - \rho R}{2 \rho R}\right) + 1} \quad (3.17)$$



**Figure 3.10:** Stratégie d'usinage en contour parallèle dans une poche carré.

Calcul des segments de passage d'un contour a un autre Pa

On a :  $\sin \frac{\alpha_1}{2} = \frac{P}{P_a}$

$$P_a = \frac{P}{\sin \frac{\alpha_1}{2}} \quad (3.18)$$

$$\text{Alors : } P_{aTOT} = P_a \times n \quad (3.19)$$

Calcul de longueur totale des segments :

$$L_{cont} = L_{/A} + L_{/B} + L_{/C} + L_{/D} + P_{aTOT} \quad (3.20)$$

Calcul de la longueur des segments parallèles a [A]

$$(L_{/A})_1 = A - R \cot g\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) - R \cot g\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \quad (3.21)$$

$$L_{/A} = (L_{/A})_1 + \sum_{i=2}^{n+1} \left[ (L_{/A})_{i-1} - P \left[ \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_1}{2}\right) + \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_2}{2}\right) \right] \right] \quad (3.22)$$

Calcul de la longueur des segments parallèles à [B]

$$(L_{/B})_1 = B - R \cot g\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) - R \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_3}{2}\right) \quad (3.23)$$

$$L_{/B} = (L_{/B})_1 + \sum_{i=2}^{n+1} \left[ (L_{/B})_{i-1} - P \left[ \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_3}{2}\right) - \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_2}{2}\right) \right] \right] \quad (3.24)$$

Calcul de la longueur des segments parallèles à [C]

$$(L_{/C})_1 = C - R \cot g\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) - R \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_3}{2}\right) \quad (3.25)$$

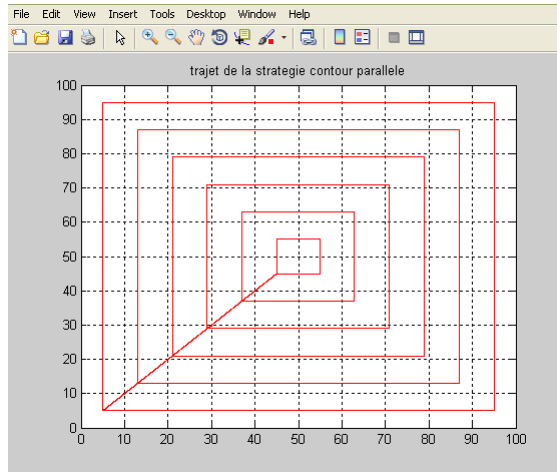
$$L_{/C} = (L_{/C})_1 + \sum_{i=2}^{n+1} \left[ (L_{/C})_{i-1} - P \left[ \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_3}{2}\right) + \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_1}{2}\right) \right] \right] \quad (3.26)$$

Calcul de la longueur des segments parallèles a [C]

$$(L_{/D})_1 = D - R \cot g\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) - R \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_4}{2}\right) \quad (3.27)$$

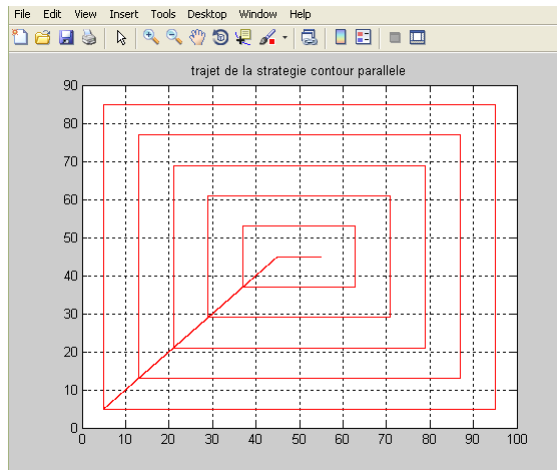
$$L_{/D} = (L_{/D})_1 + \sum_{i=2}^{n+1} \left[ (L_{/D})_{i-1} - P \left[ \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_1}{2}\right) - \tan g\left(\frac{\pi-\alpha_4}{2}\right) \right] \right] \quad (3.28)$$

Le programme MATLAB (courbeguidecontourparallele.m) permet d'automatiser ces calculs et de tracer la trajectoire contour parallèle selon les paramètres récupéré.



**Figure 3.11:** Stratégie d'usinage en contour parallèle sous MATLAB (poche carre).

Si la poche n'est pas vidée et qu'elle ne possède pas un autre contour complet, la courbe guide est étendue d'un seul segment qui permet de vider la matière restante.



**Figure 3.12:** Stratégie d'usinage en contour parallèle sous MATLAB (poche rectangle).

Une fois la courbe guide définie, nous pouvons maintenant calculer les points de la trajectoire  $M_i(X_i, Y_i)$ .

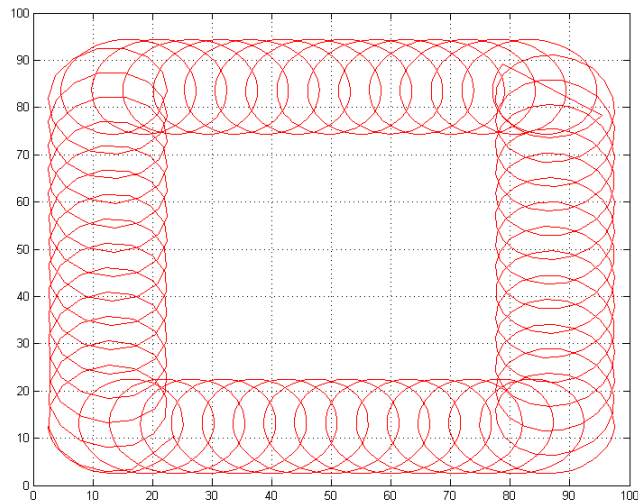
### III.3.2.2 Construction de la trajectoire trochoïdal:

La définition de la trajectoire trochoïde que nous avons donnée précédemment par l'équation (3.5), a été développé dans un programme MATLAB (strategietrochoide.m), ce programme permet construire et de visualiser la trajectoire et de créer un fichier texte contenant l'ensemble des points. Le nombre de points, qui

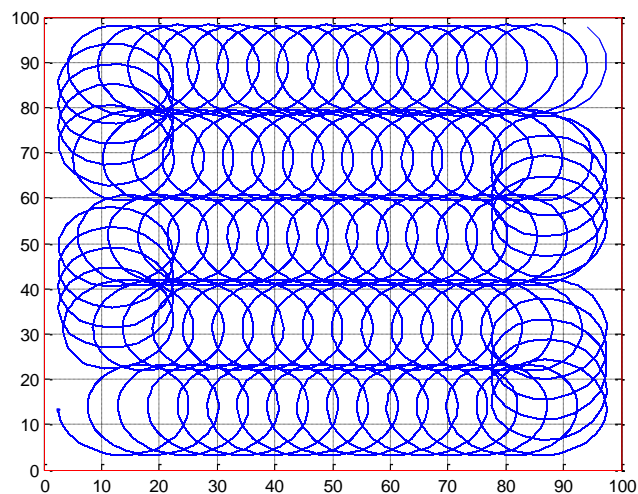


correspond à la discrétisation de la trochoïde, dépend directement de l'incrément que nous fixons pour le paramètre  $t$ . Si le nombre obtenu de points est trop important, il risque d'entraîner des problèmes de calcul. A l'inverse, s'il est trop faible, il risque d'entraîner un mauvais suivi de la trajectoire.

Pour les deux types de courbes guide que nous avons développés, la construction et la visualisation des trajectoires trochoïdales donnent les résultats suivants dans le cas du vidage d'une poche carre de dimensions de dimension  $(100mm \times 100mm)$ :



**Figure 3.13:** Stratégie trochoïdale contour parallèle générée par MATLAB.



**Figure 3.14:** Stratégie trochoïdale zigzag générée par MATLAB.

Cette construction de trajectoire permet de visualiser le parcours de l'outil lors de l'usinage. Avec cette stratégie, la réduction des vitesses ne sont pas utile dans les changements de direction de la courbe guide.

### **III.4 Conclusion :**

Les programmes que nous avons développés dans ce chapitre permettent de calculer le nombre des passes horizontales dans le cas de stratégie zigzag et le nombre des contours dans le cas de stratégie contour parallèle et la longueur des trajectoires à partir de la dimension d'outil et de la poche, ce qui ne permet pas de faire une optimisation des trajectoires. Ces programmes nous permettent aussi de visualiser les trajectoires et l'ensemble des points qui construisent ces trajectoires à partir des paramètres et la courbe guide que nous choisissons.

Nous avons donc démontré la faisabilité de la génération des trajectoires trochoïdales avec les paramètres des courbes à motifs. Cette stratégie qui ne permet pas d'éliminer les discontinuités dans le cas de changement de direction.

Cette partie a été suivie par une génération des trajectoires sous le logiciel CATIA dans le chapitre suivant.

## **Chapitre IV :**

### **Simulation d'usinage sous CATIA de la poche carré**

#### **IV.1 Introduction :**

Actuellement, l'emploi de l'outil informatique en terme de conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) est fortement recommandé. L'intégration de la CFAO dans un processus de fabrication se traduit par la prise en compte du savoir faire de fabrication dès la phase de conception.

Les systèmes de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) ont longtemps évolué en parallèle, sans véritable concertation, posant ainsi des problèmes pour passer de l'un à l'autre. Des écarts supplémentaires sont introduits d'abord en FAO, plus lors de l'usinage a cause des performances de la commande numériques. Pour supprimer ces écarts, de nombreuses logiciels de CAO et FAO ont été développés et de commercialisées au cours de ces dernières années.

Il existe aujourd'hui, des logiciels indépendants de simulation d'usinage permettant de reproduire en 3D le comportement de la MOCN et créer des programmes de forme STEP-NC qui peuvent gérer directement l'opération d'usinage. Ces logiciels, permettant aussi de générer et calculer les trajectoires d'outil en temps réels, qui nous permet d'optimiser les opérations d'usinage.

Dans ce chapitre, nous propose une simulation d'usinage d'une poche quadrilatère simple, cette simulation est faite sous CATIA V5R20, selon trois stratégies d'usinage. Le but de cette simulation, est de montrer la faisabilité de la génération de ces stratégies en STEP-NC.

#### **IV.2 Définition de la FAO :**

FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) : procédé de fabrication automatisé dans lequel on utilise des systèmes informatiques pour la conduite et le contrôle du processus de production. Le procédé utilise à la fois les techniques de l'informatique et du transfert des données, avec celles s'occupant de la gestion et du développement des tâches de production (assurance qualité, gammes de fabrication, calculs, contrôles, coûts, achats, réceptions...) regroupant, notamment, les systèmes à commande

numérique (CN) en : tournage, fraisage, découpage (laser, chalumeau...), soudage par point, poinçonnage, etc.

Les progrès réalisés dans ce domaine sont :

- **Des bases de données expertes intelligents** : bibliothèques de données divers, d'outils, d'attachements, de systèmes de bridages, de paramètres de coupe, etc.
- **Des algorithmes spécialisés** : des formules conçus pour être utilisés dans des calculs rencontres lors de certaines applications ont été ajoutés. Les multiples options d'usinage en ébauche désormais proposées en sont un exemple tout comme les stratégies destinées à améliorer les états de surface dans les opérations de finition à grande vitesse.
- **La reconnaissance des formes ou features** : par association de formes géométriques connues avec le modèle à usiner a beaucoup progressé, surtout au niveau des trous et des poches.
- **Simulation et détection** par des écrans de plus en plus réalistes où les outils, le brut en cours d'usinage, le système de bridage et l'environnement machine sont visualisés de plus en plus fidèlement.
- **L'optimisation** des paramètres de coupe est assurée par des fonctionnalités spéciales qui prennent en compte le type d'outil, la matière, l'épaisseur de copeau en temps réel, la précision, l'état de surface demandé et tout cela en fonction des caractéristiques géométriques reconnues de la pièce.

### IV.3 Présentation du logiciel CATIA

CATIA est un puissant logiciel de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur), conçu par Dassault Systèmes et commercialisé par IBM. Il est très utilisé en aéronautique et en automobile.

Le logiciel fournit une large gamme de solutions intégrées pour couvrir tous les aspects de design et de fabrication. Parmi les nombreuses fonctionnalités de base, on peut citer :

- Conception de pièces,
- Assemblages,

- Rendre réaliste un objet,
- Dessin interactif et génératif.

Il permet ainsi de concevoir des pièces et des assemblages de pièces directement en 3 dimensions sans dessiner de plan.

Lorsqu'on parle de la version 5, on utilise souvent la notion de maquette numérique. Ce terme désigne l'ensemble des données informatiques qui permet de manipuler un objet aussi bien ou mieux qu'on ne pourrait le faire avec une maquette réelle. Au moment ou ce travail a été fait CATIA V5R20 est la nouvelle release existe sur le marche, ce release a implanté des nouveaux modules d'usinage comme l'ébauche de cavité et des nouvelles stratégies comme la stratégie trochoïdale.



**Figure 4.1 :** logiciel CATIA V5R20.

Grâce au module de fabrication, on peut simuler l'usinage des pièces sur des machines à commande numérique et on peut générer automatiquement les trajectoires d'outil aux cours d'une opération d'usinage, c'est que nous permet de faire une évaluation de l'opération. Cette évaluation permet de changer les paramètres d'usinage nécessaire pour optimiser les couts et les délais d'usinage.

















Le logiciel CATIA est parmi les logiciels qui peuvent créer des programmes de fabrication en format STEP-NC, ces programmes comme nous avons bien détaillé dans le chapitre II, le format STEP-NC permet de gérer les opérations d'usinage directement.




### IV.3.1 Description des modules utilisés dans 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.

Ce logiciel est organisé en modules fonctionnels nommés "Ateliers" permettant chacun de créer ou de modifier un type d'objet bien précis. L'architecture simplifiée de quelques modules de CATIA est résumée par le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.1** : présentation des ateliers et leurs modules de CATIA V5. [35]

Atelier	Modules de l'atelier
 <b>Infrastructure</b>	
 <b>Conception mécanique</b>	
 <b>Forme</b>	
 <b>Analyse et simulation</b>	
 <b>Construction d'usine</b>	
 <b>Usinage</b>	
 <b>Maquette numérique</b>	
 <b>Equipements et systèmes</b>	

 <b>Simulation d'usinage</b>	 
--	---

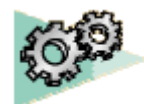
Les modules les plus intéressants pour nous dans ce travail sont les suivants :  
[36]



**Sketcher** : permet de faire l'esquisse d'un profil en 2D. C'est donc le point de départ obligé pour toute création d'objet.



**Part Design** : module utilisé pour la conception de pièces mécaniques en 3D. Ce module est exploité de pair avec le sketcher. Il permet un paramétrage 3D pendant ou après la conception.



**Part Design** : module utilisé pour la conception de pièces mécaniques en 3D. Ce module est exploité de pair avec le sketcher. Il permet un paramétrage 3D pendant ou après la conception.



**Appliquer des matériaux** : ce module permet d'identifier le matériau de la pièce.



**Prismatic machining (Usinage 2,5 axes)**: Les différents cycles d'usinage sont générés au moyen de fenêtres contextuelles modèles élémentaires. Module d'apparence simple mais pourtant sophistiqué.



**Multi-Axis Surface Machining (Usinage surfacique 5 axes)**: Les différents cycles d'usinage 5 axes sont générés grâce à ce module très puissant. Les calculs générés ne peuvent être réalisés sans de tel outil.



**3-Axis Surface Machining (usinage 3 axes)** : module qui permet de définir et gérer des programmes destinés à des machines à commande numérique 3 axes : opérations de fraisage (surface, poche et contour) et de perçage. Il permet aussi d'avoir une simulation de l'enlèvement de matière. Il intègre des notions telles que la génération de trajectoire et la gestion d'outils.



**Phase usinage** : ce module permet de la simulation de l'opération d'usinage.



**Génération des sorties CN** : Pour l'extraction d'un programme. Dans le menu déroulant de la section Sorties CN on peut choisir le format de code CN.

#### IV.3.2 Interface graphique :

L'interface CATIA a l'aspect suivant :



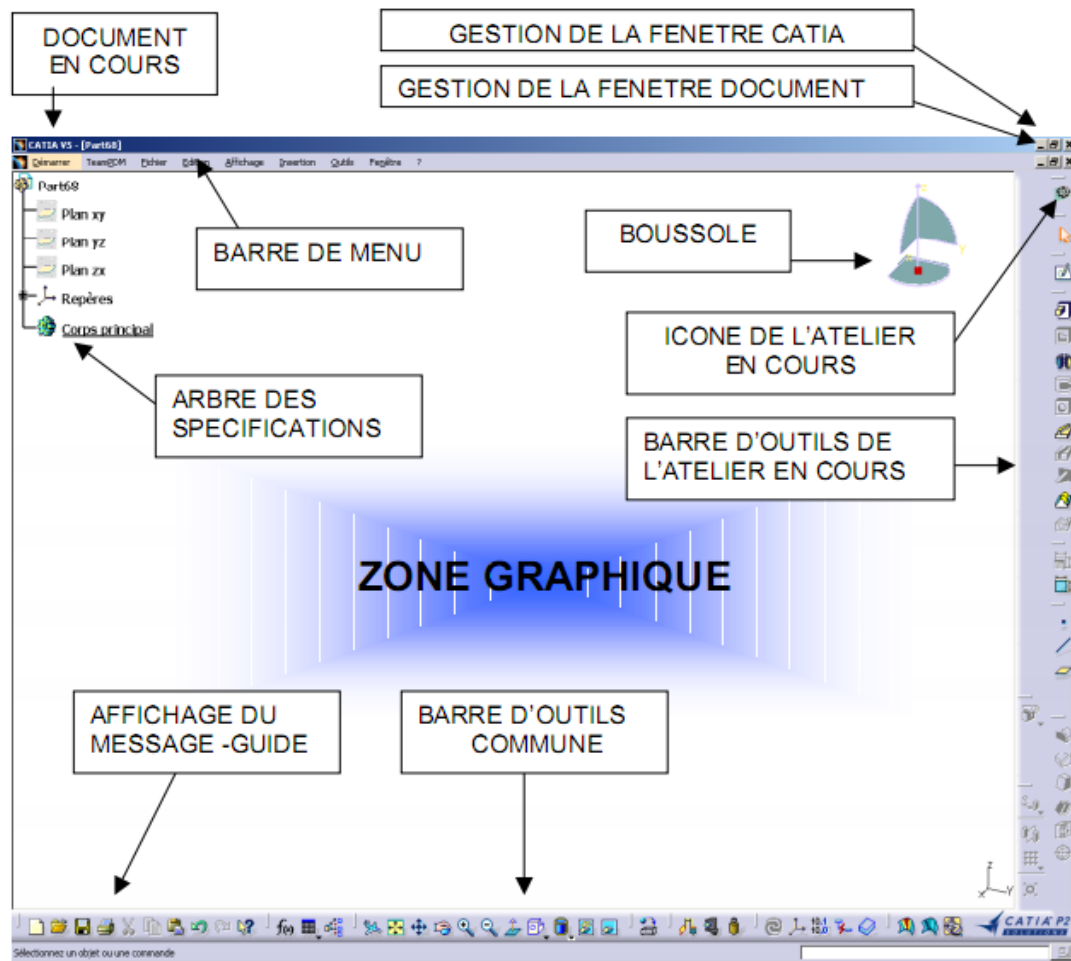


Figure 4.2 : interface CATIA. [37]

#### IV.4 Exemple d'application :

L'exemple ci après est une démarche de génération de trajectoires d'outil dans le cas d'ébauche une poche quadrilatère (carre) avec trois stratégies d'usinage (zigzag, contour parallèle et trochoïdale).

L'usinage de la poche a été effectué à partir d'un brut en' Alliage d'Aluminium avec une dimension de 100x100x4 mm.

La vitesse de rotation de l'outil est fixée à ( $V_c=3000\text{m/mn}$ ), l'avance par dent  $f_z = 0.2\text{mm/dent}$ , le diamètre de l'outil torique utilisé est de 10 mm avec plaquette de carbure. Le choix d'un outil d'ébauche d'un petit diamètre nous a permis d'ébaucher plus la matière brute et minimiser la matière restante dans les coins, ce choix de diamètre est fait dans le troisième chapitre, on prit en considération le nombre d'incréments nécessaire pour une opération d'ébauche sans les rayons de

raccordements, parce que c'est un autre travail que nous voulons l'étudier dans autre étude.

Dans notre cas d'usinage en ébauche nous avons intéressé en particulier à la génération des trajectoires d'ébauche, la gestion des collisions et des parcours hors matière nous n'intéresse pas. L'optimisation de génération des trajectoires d'ébauche est faite sur le nombre d'incréments et la longueur de la trajectoire, c'est qui peut minimiser le temps d'usinage. Une autre optimisation faite sur le format de programme de fabrication (code-NC). Parce que le but de notre travail est de crée des programmes de fabrications en format STEP-NC, cette format permis de faire d'autre optimisation comme nous avons vue dans le deuxième chapitre.

### IV.4.1 Organigramme :

Pour traite notre cas d'étude, nous avons établir un organigramme (Figure 4.3) qui facilite notre démarche de génération des trajectoires.

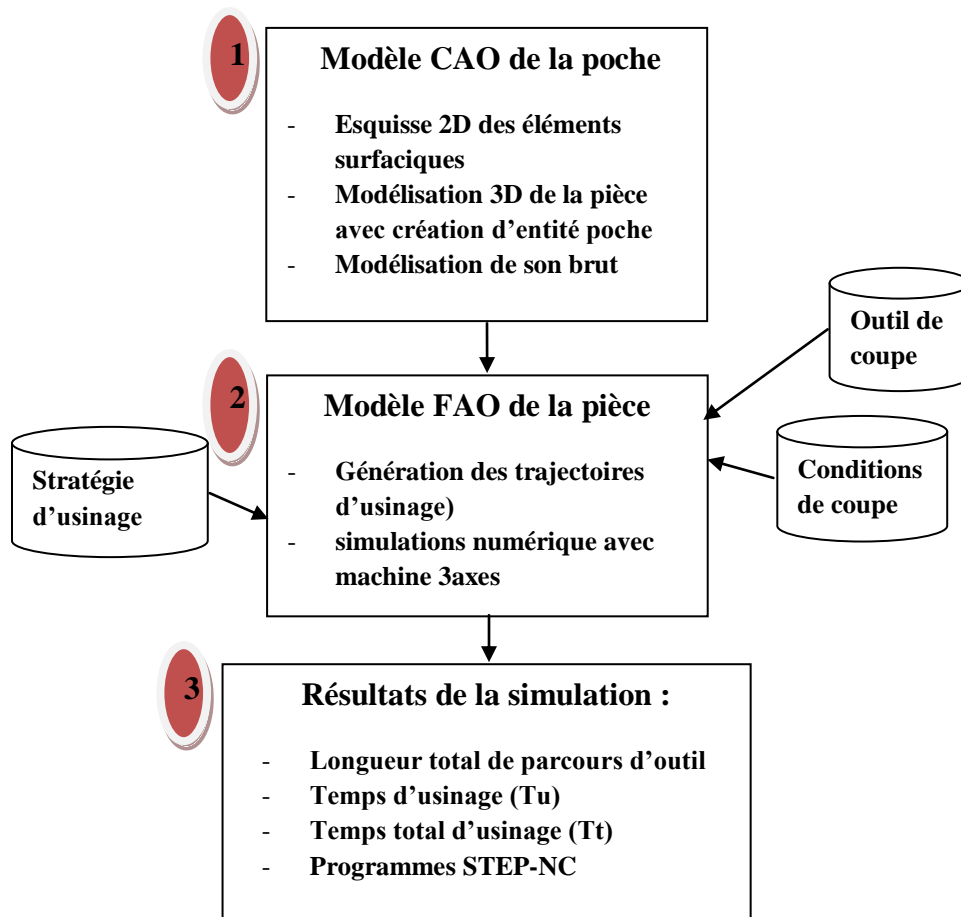
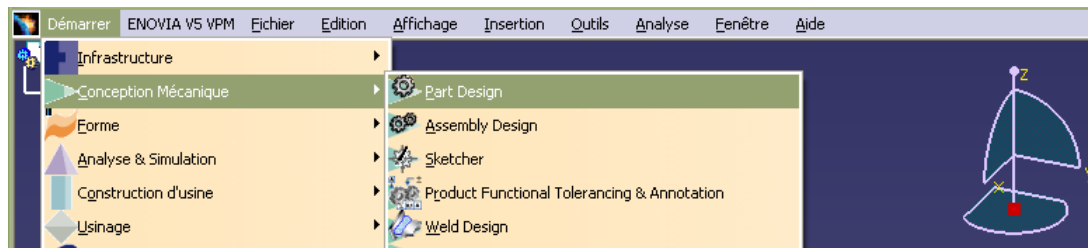


Figure 4.3 : organigramme présente la démarche CFAO.

#### IV.4.2 Partie pratique :

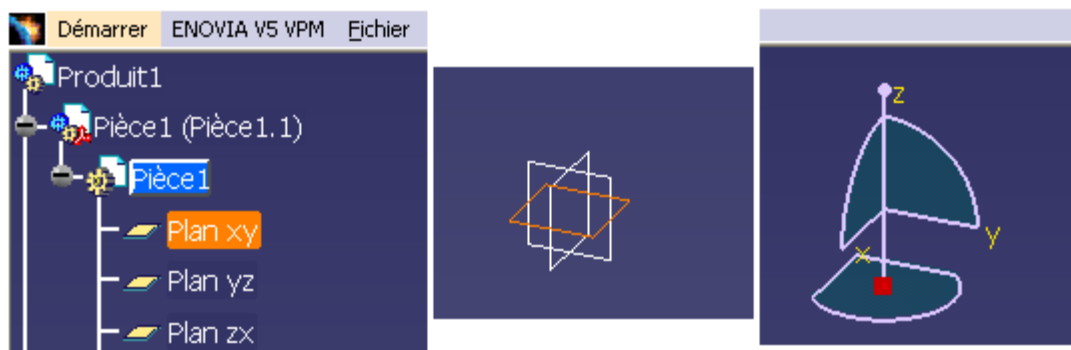
##### IV.4.2.1 Créer une pièce quelconque, dans le module Part Design (partie CAO):

Comme nous avons montré dans l'organigramme (Figure 4.3), nous avons tout d'abord créé la pièce finale que nous voulons usiner. Dans un premier temps, nous avons suivi la démarche suivante: « démarrer », « conception mécanique », « part design », cette démarche est pour la création de la pièce en 3D.




**Figure 4.4 :** Entrer de module de conception des pièces (part design).

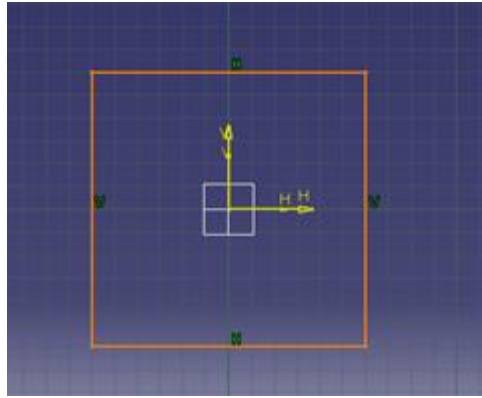
Après cette étape, nous avons choisi le plan base de la conception de la pièce usinée. La figure 4.4 présente les trois plans de l'espace sous CATIA.





**Figure 4.5 :** plan de base de la conception de la pièce.

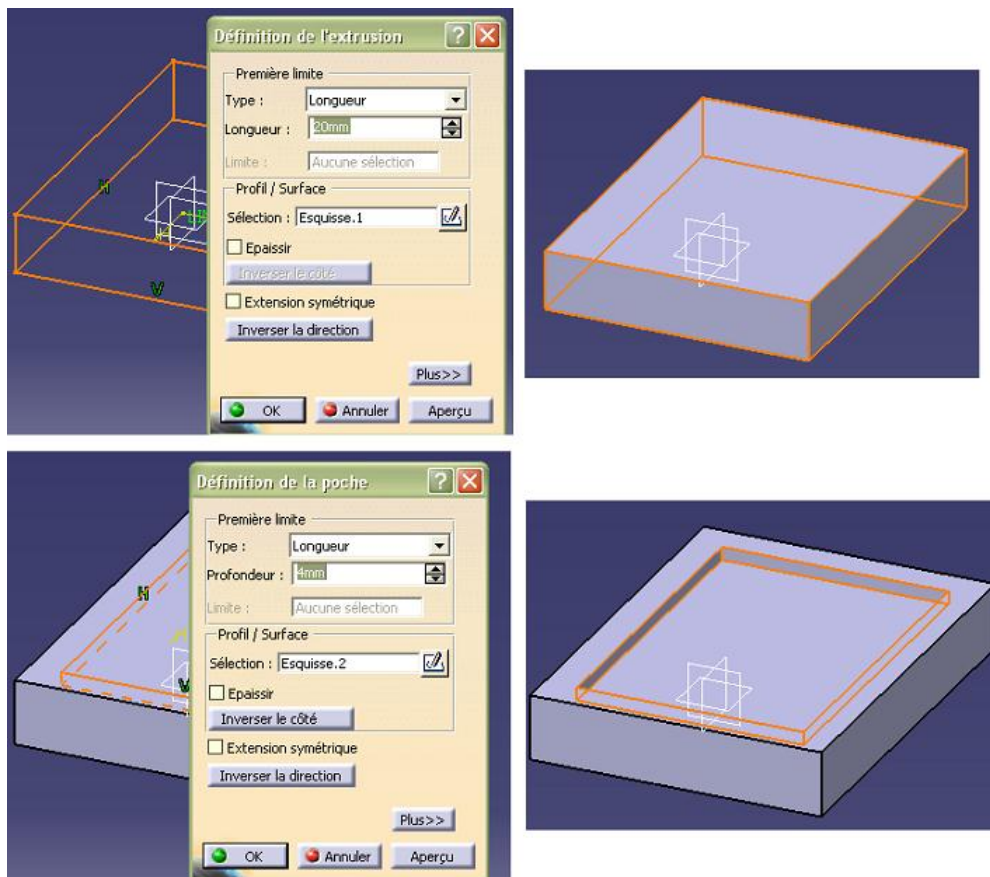
Après nous avons passé à la création de la surface base de notre pièce avec l'éditeur d'esquisse . Nous avons choisi le contour surfacique carre pour des raisons de simplifications, malgré que l'éditeur d'esquisse nous permis de créer n'importe quel contour avec ces outils :






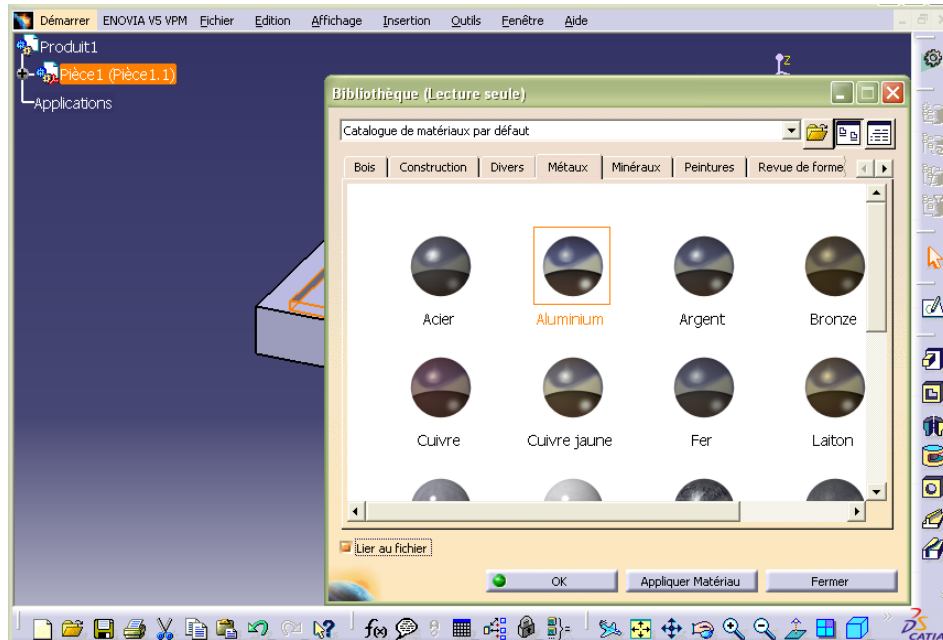
**Figure 4.6 :** l'élément surfacique de la pièce.

Ensuite nous avons passe a la création de l'élément volumique de la pièce, nous avons utilise l'outil extrusion  pour définir l'épaisseur de la pièce qui nous avons choisi aléatoirement 2mm, après nous avons passe a la création de l'entité poche avec l'outil poche , dans celle la nous avons défini les paramètres géométrique de l'entité poche (longueur, largeur et profondeur).



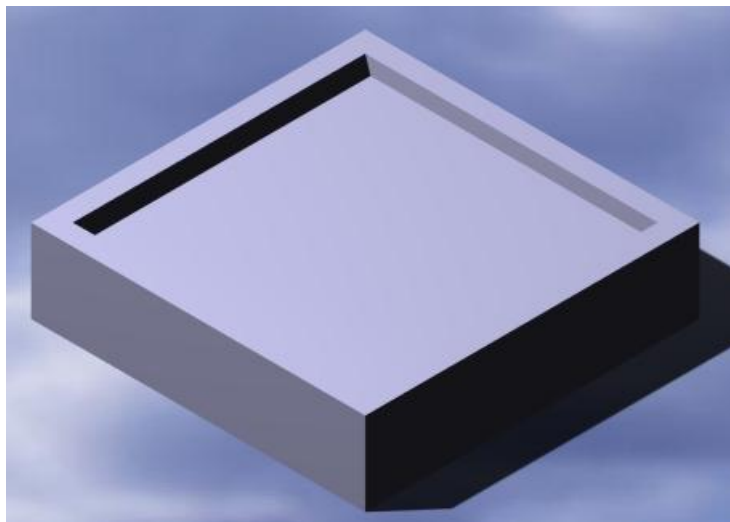
**Figure 4.7 :** Création de l'élément volumique et l'entité poche.

Dans la partie CAO on peut aussi définir le brut de la pièce, dans ce cas nous avons ajouté l'aluminium à notre pièce avec l'outil , qui se trouve dans la barre en bas de logiciel.



**Figure 4.8 :** choix de matériaux de la pièce.

Suite aux étapes précédentes nous avons terminé de créer la pièce à usinée.




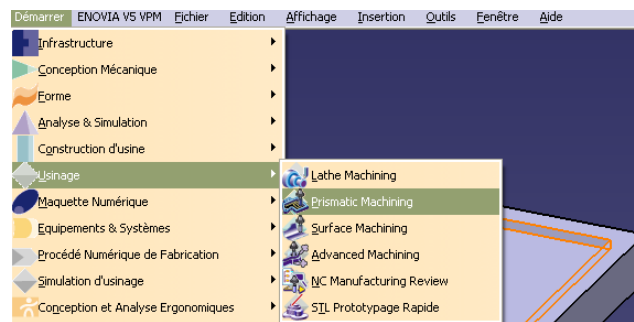
**Figure 4.9 :** pièce à usinée.

#### IV.4.2.2 Génération des trajectoires d'usinage grâce a l'atelier usinage (partie FAO):


Dans la partie FAO nous avons étudié les trois stratégies d'usinage proposes (zigzag bidirectionnelle, contour parallèle et trochoïdale) sur la pièce qui nous avons construit dans la partie CAO, nous avons généré les trajectoires une par une, après nous avons fait les simulations numérique pour chaque stratégie.

##### IV.4.2.2.a génération de la trajectoire zigzag bidirectionnelle

Pour la génération de la stratégie zigzag bidirectionnelle nous avons utilise dans l'atelier d'usinage le module « **prismatic machining** »  , la pièce crée précédemment est prise par défaut. Le programme de fabrication est nomme **fabrication1**.



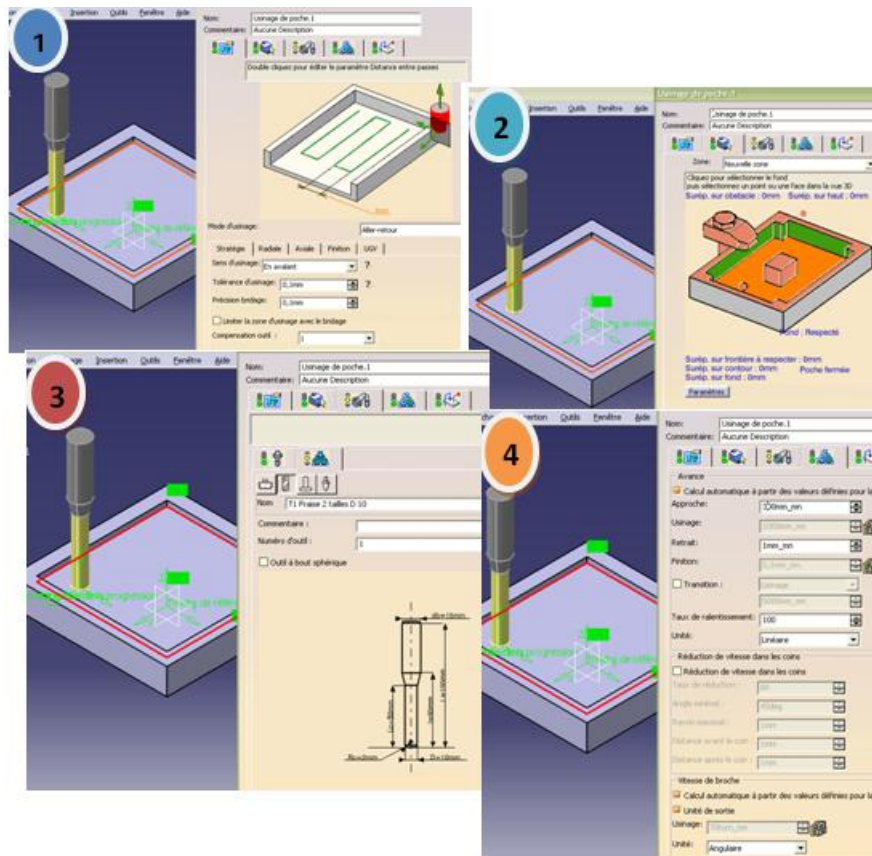
**Figure 4.10 :** module d'usinage « prismatic machining ».

Dans un premier temps nous avons choisir tout d'abord l'opération d'usinage « **usinage de poche** »  .

Après la sélection de l'opération d'usinage, nous avons sélectionne dans l'arbre de programme de fabrication1 (stratégie zigzag bidirectionnelle) l'activité mère, comme l'indique dans la figure 4.11, après nous avons défini tous les paramètres nécessaires à la génération d'un programme d'usinage. Il y a cinq onglets, correspondant chacun a une famille de paramètres à définir.

Le premier permet de sélectionner la stratégie d'usinage, dans ce cas nous avons choisi la stratégie zigzag. Le second défini la géométrie a usiné. Après dans le troisième onglet nous avons défini l'outil à utiliser. Dans la suite nous avons édité les paramètres de la coupe, les macros approche de la pièce et l'avance rapide, etc.

Le cinquième onglet est pour définir les rayons de raccordements, et comme nous avons dit avant dans ce travail nous n'intéresse pas aux rayons de raccordements et l'engagement de l'outil dans la matière. Pour cela nous n'avons pas pareille de cet onglet.



**Figure 4.11 :** définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie zigzag.

Après la définition de la pièce usinée, les paramètres d'usinage et l'outil, il est possible de lancer le calcul des trajectoires ainsi qu'une animation, en cliquant sur

l'icône « **animation de trajet d'outil** » .



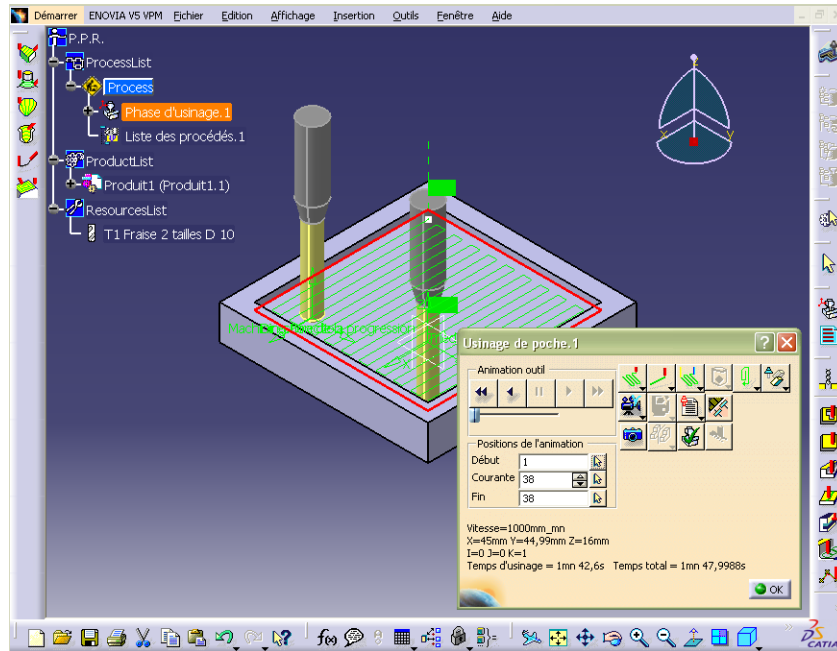


Figure 4.12 : La stratégie zigzag bidirectionnelle.

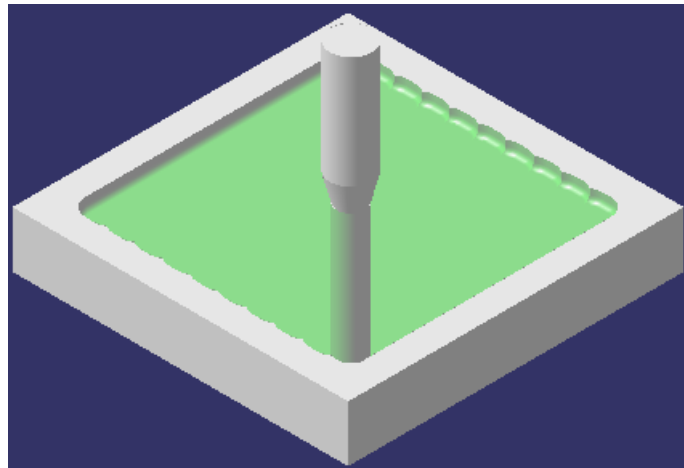



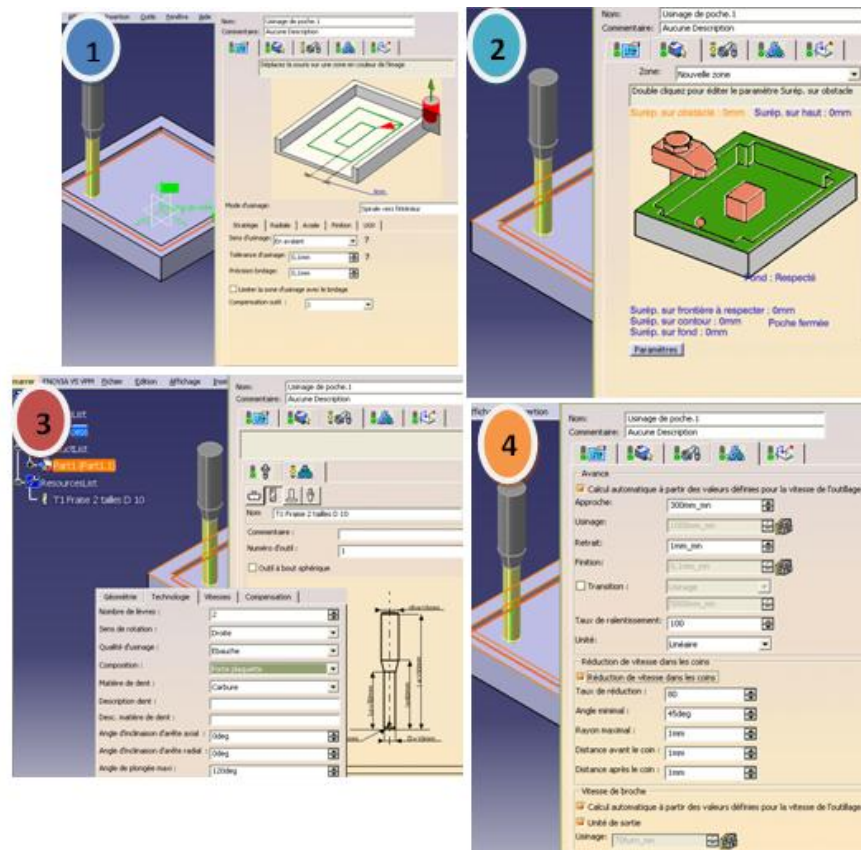
Figure 4.13 : Poche carré usiné avec la stratégie zigzag bidirectionnelle.

### IV.4.2.2.b génération de la trajectoire contour parallèle :

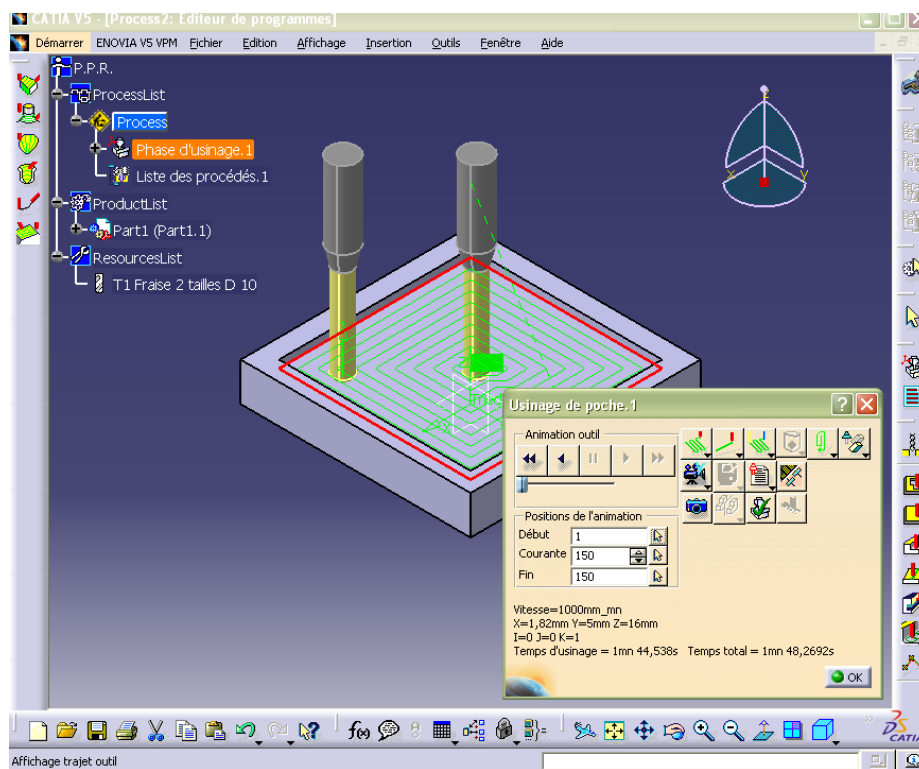
Dans cette partie nous avons suivi la même démarche comme la précédente (stratégie zigzag bidirectionnelle) : « **démarrer** », « **usinage** », « **prismatic machining** », « **usinage de poche** » .

Après on a sélectionné dans l'arbre de programme de fabrication2 (stratégie contour parallèle) comme l'indique la figure 4.13. Après on a défini tous les paramètres restants dans l'arbre de programme, comme la stratégie précédente. Nous avons choisi le même outil de la fabrication1.

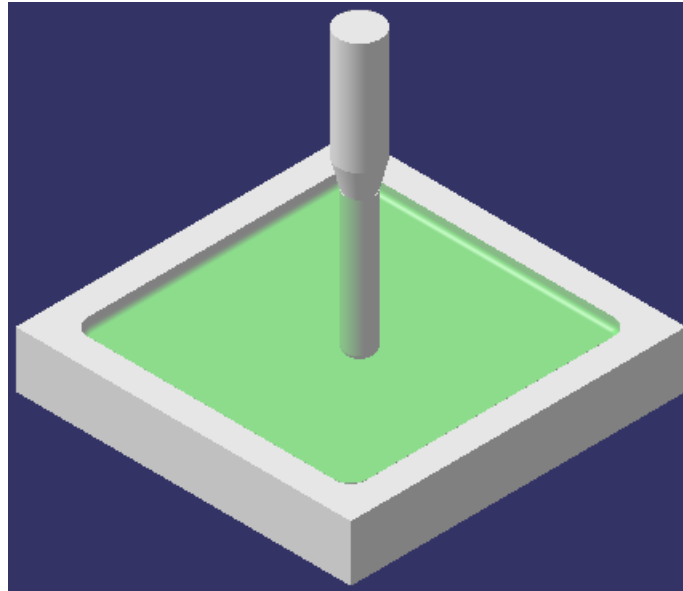




**Figure 4.14 :** définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie contour parallèle.




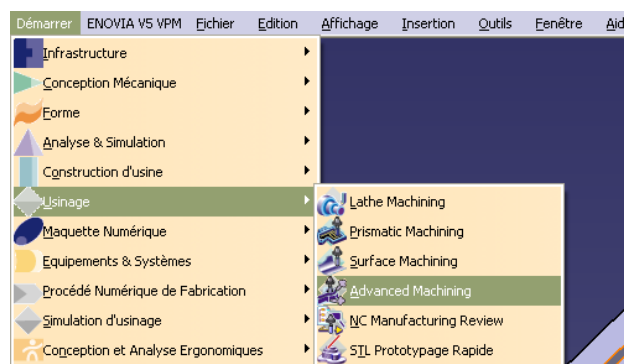
**Figure 4.15 :** La stratégie contour parallèle.



**Figure 4.16 :** Poche carré usiné avec la stratégie contour parallèle.


#### IV.4.2.2.c génération de la trajectoire trochoïdale

Pour la génération de la stratégie trochoïdale nous avons utilisé dans l'atelier d'usinage le module « **advanced machining** » , dans cette stratégie nous avons géré deux programmes de fabrication, le premier programme (**fabrication3**) pour la stratégie trochoïdale zigzag et le deuxième (**fabrication4**) pour la stratégie trochoïdale contour parallèle.



**Figure 4.17 :** module d'usinage « Advanced machining »

Dans ce module on trouve plusieurs types et stratégies d'usinage, parmi elles la stratégie trochoïdale. Pour la génération de la stratégie à motif (trochoïdale), nous avons suivi la démarche suivante :

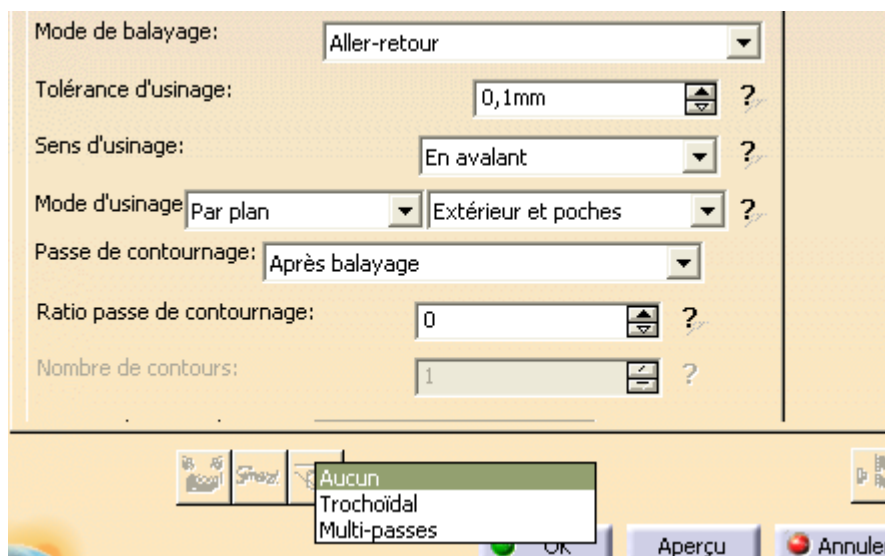
Dans un premier temps nous avons choisir tout d'abord l'opération d'usinage « **ébauche de cavité** » .



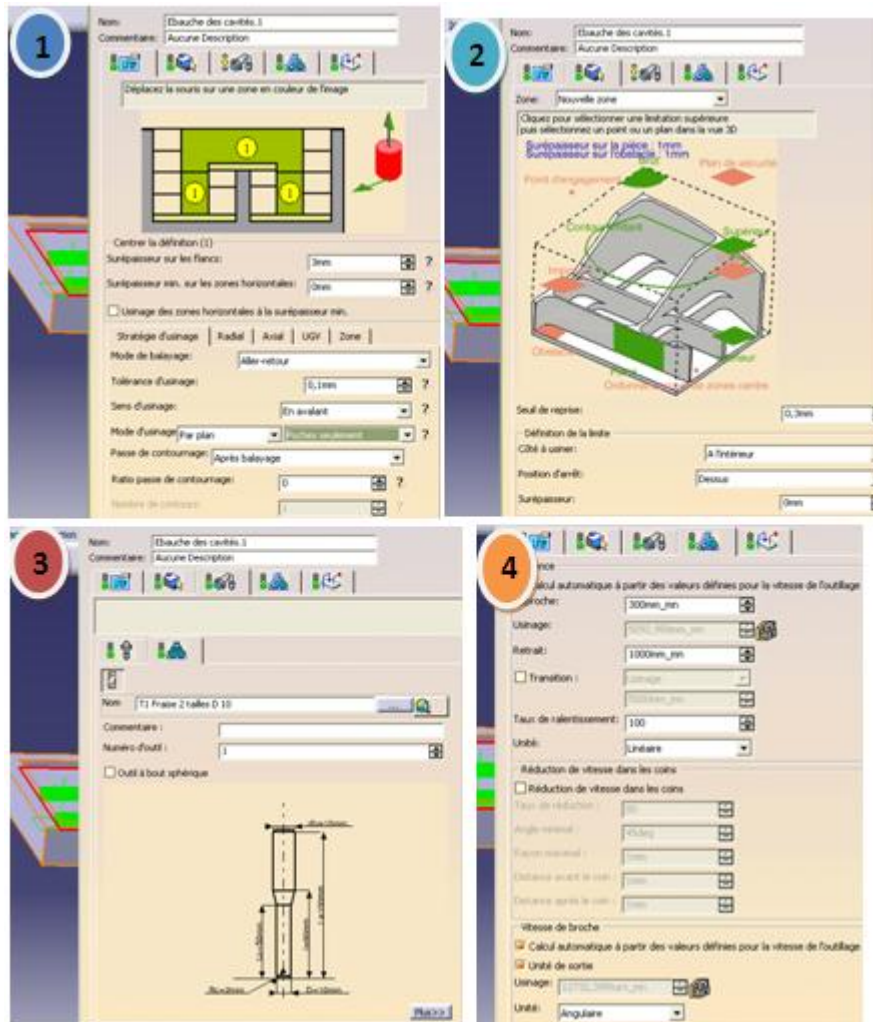
**Figure 4.18 :** l'élément d'usinage « ébauche de cavité »

Après la sélection de l'opération d'usinage « **ébauche de cavité** », nous avons défini tous les paramètres nécessaires à la génération d'un programme d'usinage (figure 4.18). Il y a cinq onglets, correspondant chacun a une famille de paramètres à définir comme les stratégies précédentes.

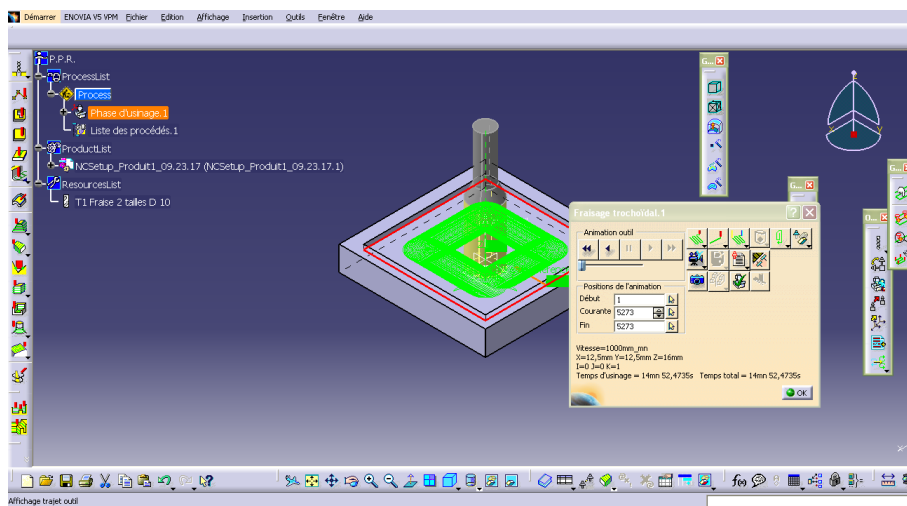
Le premier onglet permet de sélectionner la courbe guide de la stratégie et le motif trochoïdal (figure 4.17).



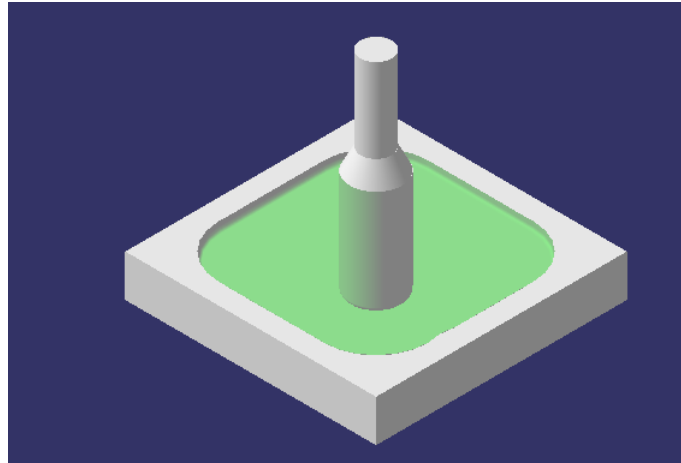
**Figure 4.19 :** choix de la courbe guide et le motif trochoïdal.



**Figure 4.20 :** définition des paramètres nécessaires pour générer la stratégie trochoïdale.



**Figure 4.21 :** Poche carré usiné avec la stratégie trochoïdale.



**Figure 4.21 :** Poche carré usiné avec la stratégie trochoïdale contour parallèle.

#### **IV.4.2.2.d Simulation de la machine CN et des trajectoires outils selon le code ISO dans un environnement FAO :**

Les solutions Dassault Systèmes permettent la simulation complète, en temps réel et dans l'espace, des trajectoires d'usinage issues du Post-Processur, incluant les cinématiques complètes de la machine. Entièrement intégrée dans l'architecture PLM V5, cette solution complète et homogène permet de passer alternativement de la définition des trajectoires d'outil à leur validation, sans perdre de temps en transferts ou en préparation de données. Cela élimine les problèmes d'interface et améliore considérablement la rentabilité.

La simulation des trajectoires outils ou du code ISO est devenue un facteur essentiel du contrôle du processus d'usinage avant la mise en fabrication. Elle permet de diminuer les temps de mise au point et d'arrêts sur machine tout en garantissant les stratégies d'usinage mises en œuvre.

Avant qu'en passe à la simulation numérique, il faut tout d'abord choisir la machine et le post-processeur sur lesquelles nous avons travaillé, la figure montre le choix des machines et post-processeurs qui nous propose le logiciel CATIA.

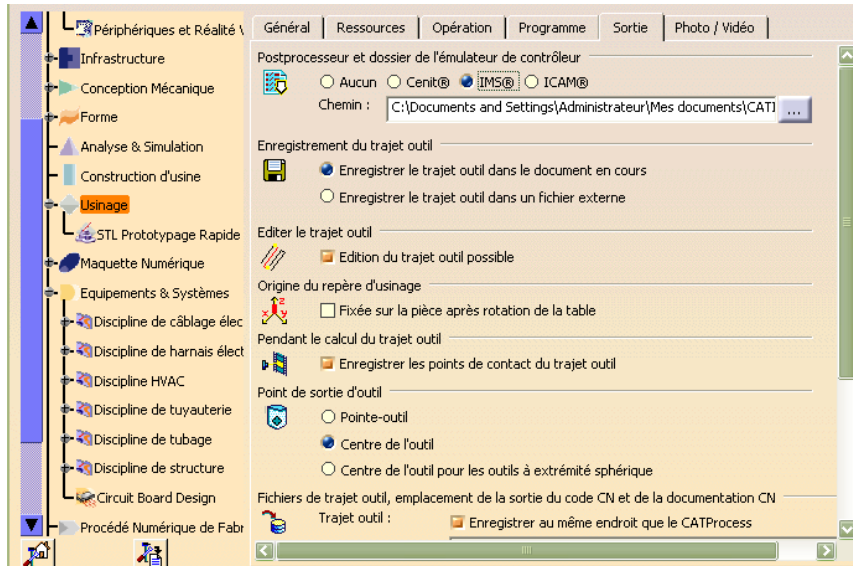



Figure 4.22 : Choix de la machine et post-processeur.

Après la sélection de machine et post-processeur nous avons passé à la simulation numérique par le module « **phase d'usinage** » .

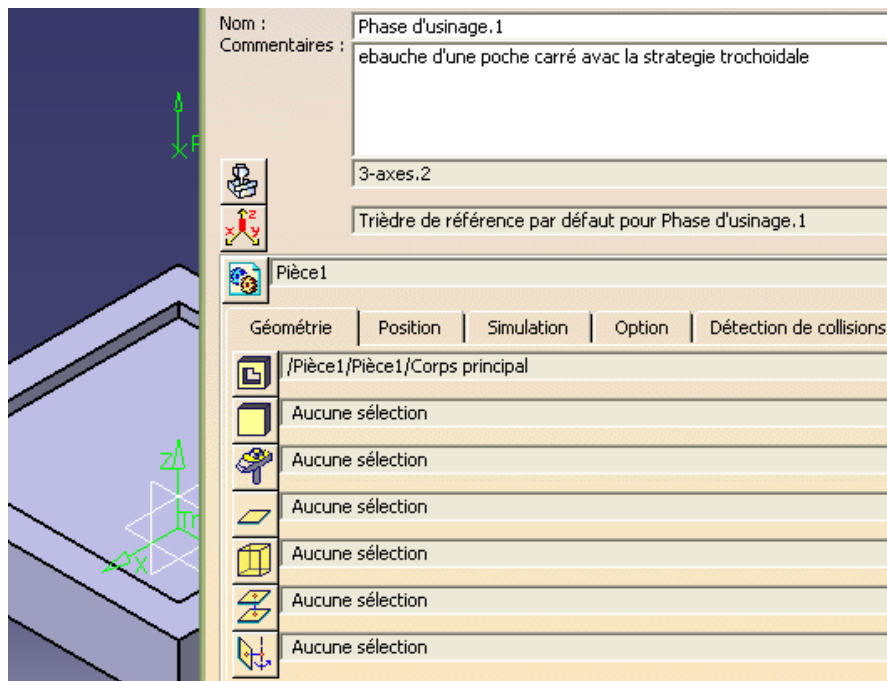


Figure 4.23 : Phase usinage.

Dans cette phase nous avons rempli les champs nécessaires de notre opération, les figures présentent la définition de la machine (machine 3axes).



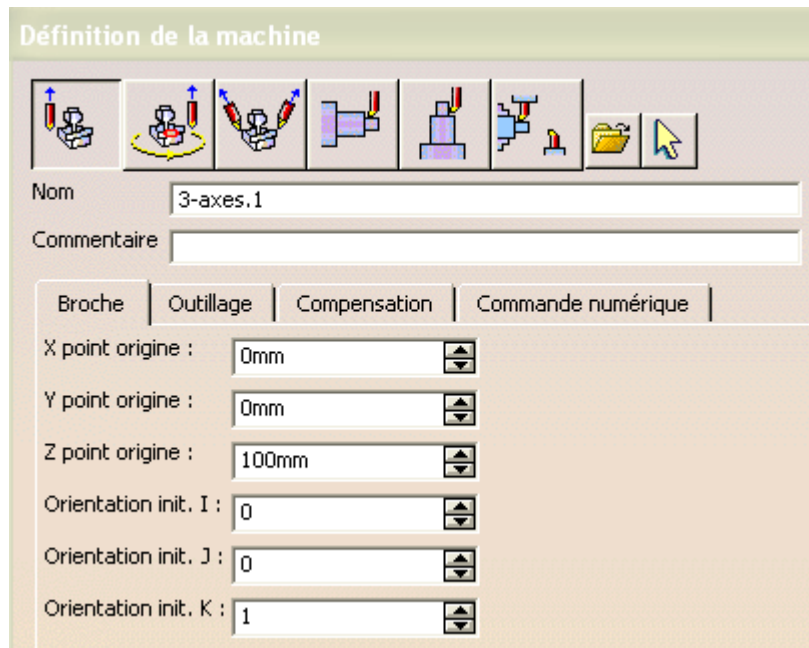


Figure 4.24 : identification de la machine.

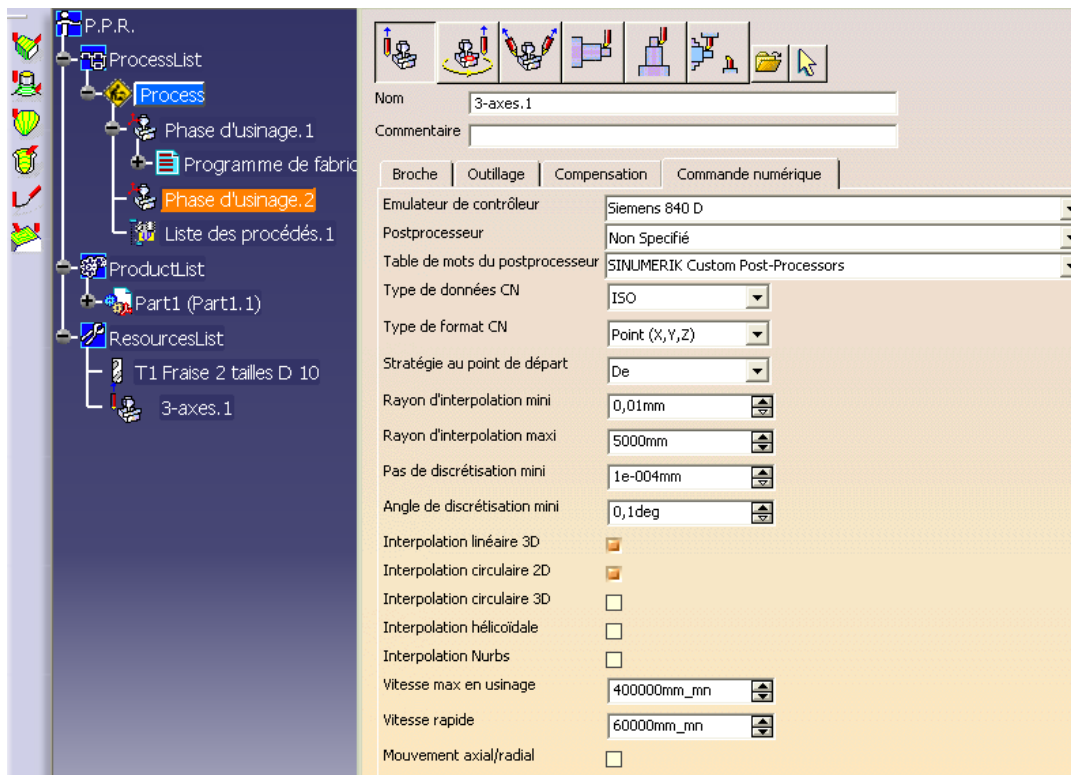
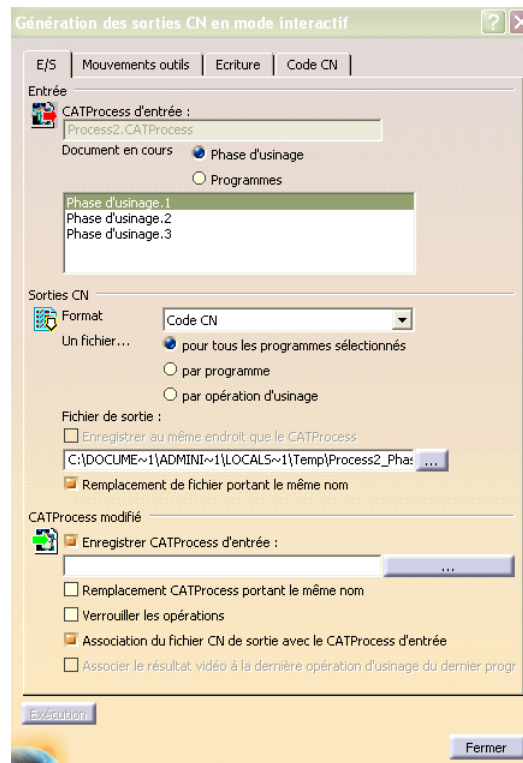


Figure 4.25 : Quelques paramètres de la machine.

Après nous avons sélectionné le format de programme de fabrication (code CN).



**Figure 4.26 :** format de programme de fabrication.

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION(('CATIA V5 STEP Exchange'), '2;1');

FILE_NAME('C:\\Documents and Settings\\Administrateur\\Mes documents\\Product1.
FILE_SCHEMA(('CONFIG_CONTROL_DESIGN'));

ENDSEC;
/* file written by CATIA V5R16 */
DATA;
#5=PRODUCT('Product1', ' ', ' ', (#2)) ;
#54=PRODUCT('Part1', ' ', ' ', (#2)) ;
#1=APPLICATION_CONTEXT('configuration controlled 3D design of mechanical parts
#17=PRODUCT_DEFINITION('Product1', ' ', #6, #3) ;
#19=SECURITY_CLASSIFICATION(' ', ' ', #18) ;
#18=SECURITY_CLASSIFICATION_LEVEL('unclassified') ;
#61=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location', (-50., 50., 0.)) ;
#66=CARTESIAN_POINT('Line origine', (50., 50., 10.)) ;
#70=CARTESIAN_POINT('vertex', (50., 50., 0.)) ;
#72=CARTESIAN_POINT('vertex', (50., 50., 20.)) ;
#75=CARTESIAN_POINT('Line origine', (0., 50., 0.)) ;
#79=CARTESIAN_POINT('vertex', (-50., 50., 0.)) ;
#82=CARTESIAN_POINT('Line origine', (-50., 50., 10.)) ;
#86=CARTESIAN_POINT('vertex', (-50., 50., 20.)) ;
#89=CARTESIAN_POINT('Line origine', (0., 50., 20.)) ;
#101=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location', (-50., -50., 0.)) ;
#106=CARTESIAN_POINT('Line origine', (-50., 0., 0.)) ;
#110=CARTESIAN_POINT('vertex', (-50., -50., 0.)) ;
#113=CARTESIAN_POINT('Line origine', (-50., -50., 10.)) ;
#117=CARTESIAN_POINT('vertex', (-50., -50., 20.)) ;
#120=CARTESIAN_POINT('Line origine', (-50., 0., 20.)) ;
#132=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location', (50., -50., 0.)) ;
#137=CARTESIAN_POINT('Line origine', (0., -50., 0.)) ;
```

**Figure 4.27 :** exemple de programme de fabrication en format STEP-NC.

*Nota : Vous trouvez tous les programmes d'usinage en format STEP-NC dans l'annexe.*



#### IV.4.3 comparaison des stratégies d'usinage utilisées :

Les résultats regroupés dans le tableau 4.2, sont établis pour un alliage d'aluminium, avec les mêmes paramètres d'usinage (vitesse de coupe, diamètre d'outil, etc.).

Ce tableau représente à la fois les résultats relatifs aux quatre stratégies d'évidement de la poche.

Le temps d'usinage est le plus important dans le domaine de fabrication, c'est pour ça nous avons limité les résultats, notre objectif dans ce travail est la génération des trajectoires trochoïdale ainsi que la création des programmes en STEP-NC.

**Tableau 4.2 :** Tableau des résultats obtenu par CATIA.

Stratégie d'usinage	$V_c$ (m/mn)	$f$ (mn/tr)	Longueur total (m)	Temps totale d'usinage $T_t$ (mn)
Zigzag	400	0.4	1.672	1.39886
Contour parallèle	400	0.4	1.7423	1.41724
Trochoïdale zigzag	400	0.4	9.8184	7.7114
Trochoïdale parallèle	400	0.4	10.1412	7.96614

Il est remarquable que le temps d'usinage varie selon le type de la trajectoire de l'outil (le même diamètre).

Pour une trajectoire de type zigzag (aller retour) le temps d'usinage est inférieur à celui d'une trajectoire contour parallèle.

On remarque aussi que le temps d'usinage et la longueur de la trajectoire avec la stratégie trochoïdale sont supérieurs à ceux des stratégies classiques, lorsqu'on utilise les mêmes conditions de coupe. Cependant la stratégie trochoïdale est destinée à être employée dans le cas de l'usinage à grande vitesse vu qu'elle assure une bonne dynamique du processus de coupe et ainsi la productivité associée à cette stratégie est améliorée.

**Tableau 4.3 :** Tableau des résultats obtenu par CATIA.

Stratégie d'usinage	$V_c$ (m/mn)	$f$ (mn/tr)	Longueur total (m)	Temps totale d'usinage $T_t$ (mn)
Trochoïdale zigzag	2000	0.4	9.8184	1.536
Trochoïdale parallèle	2000	0.4	10.1412	1.592

On remarque dans le tableau 4.3 que lorsque les conditions utilisées sont servies, le temps d'usinage obtenu en utilisant la stratégie trochoïdale est inférieur à celui des deux stratégies classiques.

#### IV.5 Conclusion

Ce chapitre présente un modèle de génération de trajectoires d'usinage sous CATIA, en vue d'étudier les stratégies d'usinage proposées en se basant sur la simulation d'usinage. Nous localisons par la méthodologie proposée le processus d'usinage qui permet de visualiser les parcours de l'outil et de créer des programmes de fabrication en format STEP-NC.

En perspective une application expérimentale sur une MOCN des programmes STEP-NC créés par le logiciel CATIA permettra de montrer l'utilité de la programmation STEP-NC et ses avantages par rapport à la programmation en code G.

Il y a d'autres paramètres qui influent sur la stratégie trochoïdale, ces paramètres peuvent rendre cette stratégie plus pratique. Cette étude sera suivie dans futur par d'autres travaux pour améliorer la manière de l'exploitation des résultats de la simulation. Ces travaux ont pour objet l'étude de la qualité de surface usinée et le débit de copeaux et pourquoi pas une application expérimentale sur une MOCN avec les programmes STEP-NC créés par le logiciel CATIA.

## Conclusion générale

# Conclusion

---

L'optimisation de l'usinage de matériaux avancés n'est concevable que par l'intégration des innovations technologiques au niveau des machines, des outils et de l'élaboration des matériaux. L'étude expérimentale s'avère souvent nécessaire, mais l'utilisation de logiciels capitalisant les différents savoirs faire offre des perspectives intéressantes face au marché de plus en plus versatile et aux exigences de plus en plus sévères des clients. Le couplage de différents logiciels de FAO pour la définition des stratégies d'usinages avec des logiciels de simulation des procédés d'usinage pour l'optimisation des paramètres de coupe et de la prédiction des états des surfaces usinées laissent entrevoir des pistes prometteuses pour la maîtrise de la fabrication de prototypes et d'outillages rapides.

L'objectif de mon travail de thèse est de mettre en avant la faisabilité de l'implantation de l'usinage trochoïdal dans le format Step-NC.

Tout d'abord, notre démarche a consisté à nous appuyer sur une construction simple et efficace des trajectoires avec l'utilisation des courbes à motifs. Pour cela, nous répétons un motif (une trochoïde) le long d'une courbe guide. L'ensemble des paramètres et attributs nécessaires à la construction des courbes à motifs a pu être défini dans le but d'être intégré au fichier Step-NC.

Dans ce mémoire, en se basant sur les équations de l'usinage trochoïdal, nous avons développé un programme MATLAB pour construire les trajectoires.

La simulation d'usinage a été faite sous CATIA.

Ce travail a permis d'identifier les caractéristiques de l'usinage trochoïdal et ses avantages en terme d'usinage à grande vitesse.

# Références Bibliographiques

---

- [1] Bonnefoy H., El Mansori M., “Optimisation des stratégies d’usinage en grande vitesse à partir de simulation sur le logiciel CUTPRO“, Laboratoire de Mécaniques et Procédés de Fabrication, Chalons en champagne, 10èmes Assises Européennes de Prototypage Rapide, 2004
- [2] : Bousset M., « Usinage grande vitesse », Paris
- [3] : Alexandre M., “usinage a grande vitesse, Universitaires Notre-Dame de la Paix
- [4] : Rauch, M. “Optimisation de la programmation des MOCN - Application aux machines a structure parallèle“, Thèse De Doctorat, Université de Nantes, France, 2007
- [5] : « chapitre 1 : Modélisation cinématique des machines outils classiques et nécessités des structures parallèles en U.G.V »
- [6] : Baehrel M., “Les machines-outils“, Strasbourg, 2007
- [7] : Nadji A., Redjainia M., Yellou A., “Etude de la connexion RS232 de la fraiseuse Emco F1 CNC et le tour Emco compact 5CNC avec un PC“, université Mohamed Kheider, 2007
- [8] : Company O., “Machines-outils rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts“, thèse doctorat, Université Montpellier II, 2000
- [9] : Laguionie R., “programmation avancée des machines outils : implémentation de l’usinage trochoïdal et du tréflage dans la chaine numérique STEP-NC“, thèse de master, Ecole Centrale de Nantes / Université de Nantes. 2007
- [10] : Rauch M., “Optimisation De La Programmation Des MOCN - Application Aux Machines A Structure Parallèle“ ; Thèse De Doctorat, École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2007
- [11] : Mansouri K., “Modélisation et optimisation multi-objectif d’une structure mécanique poly-articulée dédiée au machine a commande numérique multiaxiales“, these magister, université M’hamed Bougara, Boumerdes, 2010
- [12] Benmohammed B., “Cours Fabrication Mécanique“, EDNMC, Université de Batna, 2008

# Références Bibliographiques

---

- [13] : Hamadi B., “Etude des revêtements durs et applications sur outil de coupe“, Université MENTOURI Constantine, 2010
- [14] : Dendouga F., “Modélisation Et Simulation Du Fraisage De Profil En Utilisant Simulink“, Thèse Magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2009
- [15] : Urso J.P., “Mémotech : commande numérique programmation“, 2eme édition
- [16] : « Utilisation de l’UGV pour la fabrication des pièces mécaniques »
- [17] Dib M., Ighilaza A., “usinage de poches dans un contexte U.G.V“. thèse de magister, Université Mentouri, 2002
- [18] Mawussi K., Lavarne S., Lartigue C., “Usinage de poches en UGV – Aide au choix de stratégies“, Article sélectionné à l’issue de la conférence CPI’2003, Laboratoire universitaire de recherche en production automatique, Université Paris Sud (Paris XI), 2002
- [19] : Geiskopf F., “Formalisation et exploitation des contraintes Produit/Process pour la conception de systèmes de production ; application à l’Usinage Grande Vitesse“, Thèse Doctorat, Université de Louis pasteur, Strasbourg, France, 2004
- [20] J. Richard, V. K. Nguyen, STEP-NC : une interface intelligente pour l’intégration CAO-FAO-MOCN, Ecole d’Ingénieur de Genève, Genève.
- [21] : Laguionie R., Rauch M., Hascoet J.Y., “une plateforme STEP-NC pour la programmation avancée et intelligente des machines outils“, 11eme Colloque National AIP PRIMECA, la plagne, France, 2009.
- [22] : El hadj mimoune M., « Contribution à la modélisation explicite et à la représentation des données de composants industriels : application au modèle PLIB », Thèse De Doctorat, Ecole Doctorale des Sciences Pour l’Ingénieur, Université de Poitiers, 2004
- [23] : Laguionie R., Rauch M., Hascoet J.Y., “intégration de stratégies a motifs dans le standard STEP-NC : application a l’usinage trochoïdal. Assises Machines et Usinage Grande Vitesse“, Nantes, 2008.
- [24] STEP NC : fin des codes G pour la programmation à commande numérique, [www.trametal.com/PDF/Articles/27\\_259\\_1](http://www.trametal.com/PDF/Articles/27_259_1)

# Références Bibliographiques

---

- [25] : Galanis N. I., S. L. Afsaridis S. L., Vlachostathopoulos S. N., Manolakos D. E., “ Manufacturing Process With The Use Of Protocol STEP-NC“, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Greece.
- [26] X.W. Xu, “Realization of STEP-NC enabled machining, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing”, 2006.
- [27] Yusri. Yusof, “STEP-NC Compliant Systems for the Manufacturing”
- [28] : Aladad H., “Conception du système de fabrication de pièces mécaniques en grande série: formalisation de la configuration géométrique (enveloppe) et cinématique de machine-outil reconfigurable (MOR) “, Thèse doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Metz, 2009
- [29] : Alireza M., Houshmand M., “Approaches And Challenges In Machining Feature-Based Process Planning“, 4th International Conference on Digital Enterprise Technology, Bath, United Kingdom
- [30] : Raucha M., Hascoet J.Y., “Génération de trajectoires de tréflage et d’usinage trochoïdal pour le vidage de poche“, École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [31]: Hamza I., Bouaziz Z., Haddar M., “Optimisation du choix des outils de coupe pour l’usinage des poches quadrilatères en 2D½“, Laboratory of mechanics, solids, Structures and technological development, Ecole Supérieure des Sciences et Techniques, Tunisia
- [32] : Behloul E., “optimisation du choix des outils de coupe pour l’évidement des poches quadrilatères en 3D“, Thèse D’ingénieur, Université De Batna, 2009
- [33] : Blancharda N., Rabany T., Duc E., “Lobes de stabilité en UGV approche expérimentale en usinage de poches“, IFMA, BP 265, 63175 Aubière Cedex, France, 2005.
- [34] : Laguionie R., “ intégration de stratégies à motif dans le standard STEP-NC : application a l’usinage trochoïdal“
- [« 5] : CATIA Solution version 5, édition 7, documentation atelier.

# Références Bibliographiques

---

- [36] : Cour de base CATIA V5, centre de la recherche scientifique (CNRS).
- [37] : Marken P., Utilisation du module Usinage de CATIA V5 Section Surface Machining.
- [38] : Bonnemains T., “Etude du comportement mécanique des machines outils a structure parallèle en Usinage Grande Vitesse“, Thèse doctorat, Université BLAISE PASCAL - Clermont II, 2009
- [39] : Seguy S., “ De l’adaptation a la variation continue de la vitesse de broche afin de contrôler le broutement en fraisage de parois minces : modélisation et études expérimentales“, Thèse doctorat, Université de Toulouse, 2008
- [40] : Merarda H., “Etude comparative des différentes stratégies d’usinage 3axes analyse des performances des trajectoires d’outils par les méthodes d’usinage (iso-paramétrique, parallèle) “, Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, 2009