

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
INTITULE

**Conception et réalisation d'un moule pour pièce brute en  
graphite destinée à la fabrication d'un composant de  
refroidissement d'un réacteur - Stratégies d'usinage.**

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : PRODUCTIQUE MECANIQUE

PRESENTE PAR : SAIDI ABDELKRIM

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. BOUCHELAGHEM ABDELAZIZ MAHMOUD

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Pr. BOUCHELAGHEM ABDELAZIZ MAHMOUD

EXAMINATEURS :

Dr. MEKHILEF SLIMANE

Dr. DIB Amar

M.A. LAISSAOUI Rachid

Année : 2016/2017

# Remerciements

**Premièrement je remercie Dieu notre créateur.**

**Je remercie tout particulièrement mon promoteur Pr. BOUCHELAGHM Abdelaziz Mahmoud, pour son aide précieuse, sa patience et ses encouragements. Mes remerciements lui sont encore renouvelés pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenances des mémoires des étudiants de "Master Productique 2016".**

**Mes remerciements vont également aux Dr. MEKHILEF Slimane, Dr. DIB Amar, M. A. LAISSAOUI Rachid, Enseignants-chercheurs du Département de Génie Mécanique, pour l'intérêt porté à ce travail et surtout pour avoir bien voulu nous honorer de leur présence à ce jury.**

**Mes remerciements s'adressent également au Doctorant CHEHAIDIA Seif Eddine du Département de Génie Mécanique pour son aide précieuse, MERDADI Bilel, mon camarade du groupe ; ainsi sans oublier évidemment toute ma famille.**

**Mes remerciements sont aussi destinés à la Direction et aux membres du Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI) qui m'ont aidé et m'ont permis de faire aboutir ce travail.**

# Dédicace

**À mes chers parents à qui je dois tous**

**À mes frères et sœurs et spécialement salah**

**À tous les membres de ma famille**

**À mes amis et tout ceux qui me sont chers**

***Karim.***



I.4. 2.2. Le modèle	11
I.4. 2.3. Réalisation du modèle	11
I.4. 2.4. Le sable de moulage	12
I.5. Graphite	13
I.5. 1. Structure du cristal graphite	13
I.5. 2. Propriétés physiques du graphite	14
I.5. 3. Propriétés thermiques du graphite	16
I.5. 4. Avantages du graphite	17
I.5. 5. Procédés d'obtention des moules du graphite artificielle et étapes de fabrication	17
I.5. 6. Techniques d'obtention des pièces en graphite	19
I.6. Usinage	20
I.6. 1. Trajectoire d'usinage	20
I.6. 2. Stratégies d'usinage	21
I.6. 2.1. Généralités sur la stratégie d'usinage en 3 axes et 5 axes	21
I.6. 2.2. Génération de la trajectoire par un logiciel de FAO	23
I.6. 2.3. Temps d'usinage	23
I.7. Usinage des matériaux réfractaires	24
I.7.1. Usinabilité	25
I.7.2. Régimes de coupes recommandés pour le fraisage, le tournage, la rectification et le sciage du graphite	28
I.8. Conclusion	28

## CHAPITRE II

II. 1. Problématique et objectifs	30
II. 2. Enjeux	33
II. 3. Pièces de formes complexes	34
II. 4. Ingénierie du moule	35
II. 4. 1. Conception de pièces moulées	35
II. 4. 2. Dimensionnement du moule	35
II. 4. 3. Comportement du moule à la pression du moulage	39
II.5. Conclusion	41

## CHAPITRE III

III.1. Gamme d'usinage	43
III.2. Conception de gammes d'usinage	44
III.3. Fraisage	47
III.4. Dessin de définition	48
III.5. Gamme d'usinage	52
III.6. Paramètres de coupe	56
III.7. Détermination des paramètres de coupe	
III.8. Conclusion	59

## CHAPITRE IV

IV. Détermination des stratégies d'usinage pour le moule	61
IV.1. Stratégie une « trajectoire parallèle en forme de serpent »	
IV.2. Stratégie deux « trajectoires parallèles en forme de zig zag »	62
IV.2. Détermination des longueurs et des temps d'usinage	63
IV.2.1. stratégie 1	
IV.2.1. stratégie 2	64
IV.3. Discussions	65
IV.4. Profils des temps des stratégies d'usinage simulés et calculés	
IV.5. Simulation de fabrication suivant les stratégies	67
IV.5.1. Concept Win CAM	
IV.5. 2. Capacités Win CAM	
IV.5. 3. Configuration de la pièce brute	
IV.5. 4. La partie FAO	70
IV.5. 5. Le programme	71
IV.5. 6. Conclusion	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	75
Annexes	77

# Liste des figures

## CHAPITRE I

- Fig. I.1: Le code G à programmer une trajectoireí í í í í í í í í í í í í í í í í .06
- Fig. I.2 : Le processus numérique de fabrication simplifiéí í í í í í í í ..í í í í í 08
- Fig. I.3: Schémas des structures cristallographiques du graphite montrant l'empilement ABA et les mailles élémentaires, cristaux hexagonaux AB et rhomboédriquesí í í í í .....14
- Fig. I.4 : Processus d'élaboration du graphiteí í í í í í í í í í í í í í í í í ..17
- Fig. I.5 : Ebauches de graphite pour extrusioní í í í í í í í í í í í í í í í í ..18
- Fig. I.6 : Schéma des techniques employées pour l'obtention des pièces en graphiteí í í ..19
- Fig. I.7 : Usinage par plans parallèles pour l'opération d'ébaucheí í í í í í í í í í ..22
- Fig. I.8 : Usinage trochoïdalí ..í í
- Fig. I.9 : Génération de trajectoireí 23
- Fig.I.10 : Procédure de calcul du temps d'usinageí í í í í í í í í í í í í í í í í ..24
- Fig. I.11 : Vue en coupe d'une plaquette en carbure cémenté usinant les aciers et alliages et répartition des températures dans pièce-outil-copeau en degrés Celsiusí í í í í í í í ..27

## CHAPITRE II

- Fig. II-1 Application utilisés dans de nombreux domaines environnement et énergieí í .í 30
- Fig. II.2 : Schéma des étapes à mener d'étude, de conception et de réalisation du mouleí ...32
- Fig. II.3 : Forme et dimensions de l'ébauche brute après démoulageí í í í í í í í í ...36
- Fig. II.4 : Forme et dimensions de l'ébauche après correction des cotes par usinageí .í í í .
- Fig. II.5 : Epaisseur des parois ó cas du moulageí í í í í í í í í í í í í í í í í ... 37
- Fig. II.6 Illustrations des rayons et des pentes de moulesí í í í í í í í í í í í í í í í ...í .38
- Fig. II.7 : Maillage du mouleí 39
- Fig. II.8 : déformation du mouleí ..í í .í 40
- Fig. II.9 : contrainte maximale (s max)í .í ..

## CHAPITRE III

- Fig. II.1 : Exemple de gamme - les faces supérieure et inférieure et l'alésage sont usinés 43
- Fig. II.2 : Processus de fabrication d'une pièce mécanique 46
- Fig. II.3 : opérations de fraisage; les surfaces usinées sont coloriées en jaune 47
- Fig. III.4 : types de fraises 48
- Fig. II.5 : forces de coupe en fraisage en bout (a) et épaisseur de coupe 48

## CHAPITRE IV

- Fig. IV.1 : Trajectoires parallèles en forme de serpent (trajectoire 1) 61
- Fig. IV.2 : Trajectoires parallèles en forme de zig zag (trajectoire 2) 62
- Fig. IV.3 Comparaison des temps d'usinage suivant les stratégies 1 et 2 65
- Fig. IV.4 : La longueur usinée en fonction du temps de la première stratégie 66
- Fig. IV.5 : La longueur usinée en fonction du temps de la deuxième stratégie 67
- Fig. IV.6 : Fenêtre de définition de la pièce brute "Wincam" 68
- Fig. IV.7 : Fenêtre de définition de la position de l'étau "Wincam" 69
- Fig. IV.8 : Géométrie du moule sur le plan (X, Z) "Wincam" 69
- Fig. IV.9 : Géométrie du moule sur le plan (X, Y) "Wincam" 70
- Fig. IV.10 : Bibliothèque des outils et introduction des conditions de coupe "Wincam" 70
- Fig. IV.11 : Fenêtres sélection outil et introduction des conditions de coupe "Wincam" 71
- Fig. IV.12 : Fenêtre de simulation de la stratégie d'usinage du moule "Wincam" 71

# Liste des tableaux

## CHAPITRE I

Tableau 1 : propriétés physiques du graphite	15
Tableau 2: Densité de certains matériaux réfractaires à 300 K, 1 Atm (en g/cm <sup>3</sup> )	16
Tableau 3 : Propriétés thermiques théoriques du graphite	.....
Tableau 4 : comparaison entre les différentes techniques de fab des pièces en graphite	20
Tableau 5 : Usinabilité des matériaux OMAX	27

## CHAPITRE III

Tableau de la gamme usinage	52
-----------------------------	----

## CHAPITRE IV

Tableaux de la stratge 1 longueur et temps	63
Tableaux de la stratge 2 longueur et temps	64

## Annexes

ANNEXE 1 fraiseuse banc fixe Correa Avec Les Caractéristiques Techniques	74
ANNEXE 2 La matière X8CrNi25-21	75
ANNEXE 3 Le Outil T-MAX145 et outil U-MAX	75
ANNEXE 4 Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes	77
ANNEXE 5 Programme de fabrication	78

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Désignation</b>
<b>Me</b>		Mouvement de coupe
<b>Mf</b>		Mouvement d'avance
<b>Vc</b>	<b>m/min</b>	Vitesse de coupe
<b>N</b>	<b>tr/min</b>	Vitesse de broche
<b>D</b>	<b>mm</b>	Diamètre de la pièce
<b>Vf</b>	<b>mm/min</b>	La vitesse d'avance
<b>F</b>	<b>mm/tour</b>	Avance par tour
<b>a</b>	<b>mm</b>	Profondeur de passe
<b>pa</b>	<b>mm</b>	Profondeur de coupe
<b>h</b>	<b>mm</b>	Épaisseur de coupe.
<b>B</b>	<b>mm</b>	Largeur de coupe.
<b>e</b>	<b>mm</b>	Distance de sécurité
<b>L</b>	<b>mm</b>	Longueur totale de déplacement de l'outil
<b>VB</b>	<b>mm</b>	L'usure en dépouille
<b>Cv</b>		Constante dépendant du couple outil/pièce
<b>K</b>	<b>mm</b>	Constant de durée de vie
<b>k , x , y</b>		Exposants dépendants de la nuance de l'outil
<b>Rmax</b>	<b>µm</b>	La rugosité maximale autorisée de surface

CAD/CAM      Computer aide Design/ Computer aide Manufacturions

CFAO      Conception Fabrication Assisté par Ordinateur

CAO      Conception Assisté par Ordinateur

FAO      Fabrication Assisté par Ordinateur

MOCN      Machine outil a commande numérique

CNC      Commande numérique avec calculateur

DAO      Dessin assisté par ordinateur

CSG	Constructive Solide Géométrique
3D	3Dimension
G1	Continuité de classe géométrique G1
G3	Continuité de classe géométrique G3
CATIA	Logiciel de CFAO
Code G	code de programmation iso de machine CNC

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'obtention des formes et des dimensions requises des pièces mécaniques ou "usinage" par enlèvement de matières est à ce jour le processus de fabrication le plus utilisé et le plus répétitif.

D'autres processus de fabrication de pièces mécaniques permettent aussi d'obtenir des formes et des dimensions tels le forgeage et le moulage.

Malgré leurs progrès, ces procédés nécessitent des opérations d'usinage afin de finir les pièces et les produits mécaniques.

Les processus de fabrication emploient de plus en plus des machines et des outils sophistiqués, modernes et performants avec des niveaux d'automatisation et de programmation élevés. Les machines et les technologies utilisées (CN, automatique,...) permettent d'augmenter la production et la productivité, réduisant ainsi les temps et les coûts de fabrication des pièces mécaniques.

La fabrication est une phase ultime de réalisation, elle est devancée par la phase conception, phase nécessaire à l'établissement des formes, des dimensions, ainsi que le choix des matières des pièces et produits mécaniques. Pour atteindre ces résultats de conception, souvent des calculs de dimensionnement, de résistance ainsi que des simulations de comportement doivent être menés. La phase réalisation ou fabrication des pièces est, quant à elle, caractérisée par la nécessité de bien choisir les machines et les outils de fabrication et surtout d'établir les gammes de fabrication adéquates avec les conditions et paramètres d'usinage optimaux.

Utilisant tous ces concepts, le travail proposé dans ce mémoire consiste à concevoir et à proposer une gamme et un programme de fabrication d'un moule en acier. Celui-ci est destiné à fabriquer une pièce brute en graphite pour l'usinage d'un composant du système de refroidissement d'un réacteur nucléaire. Dans la phase de fabrication et pour une opération importante de coupe, des stratégies d'usinage ont été développées avec une proposition d'une optimale.

Les dessins établis dans ce projet, celui du composant en graphite, de son ébauche et celui du moule en acier ont été réalisés au moyen du logiciel SolidWorks ; Le logiciel de fabrication WinCam a été utilisé pour l'établissement du programme de fabrication. La simulation du comportement du moule a été réalisée avec la méthode des éléments finis (MEF).

# **CHAPITRE I**

# **ETAT DE L'ART**

## I.1. Généralités sur la Conception-Fabrication Assistée par Ordinateur CFAO

Pour aider les métiers de la conception et de la fabrication de produits manufacturiers, de nombreux logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) ont été développés et commercialisés au cours de ces cinquante dernières années [1].

Le premier logiciel de Conception apparu est : la DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) en 1963 (Sketch pad développé par Ivan Sutherland à MIT).

Dans les années 1970 est apparue la modélisation solide 3D mettant en œuvre 2 techniques différentes : B-Rep (Boundary Représentation) et CSG (Constructive Solide Géométrie).

Plus tard, la modélisation s'appuyant sur les NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) a permis d'harmoniser la représentation de toutes les courbes et surfaces utilisées en CAO.

Le premier logiciel de FAO commercialisé est PRONTO qui fut développé par Patrick Hanratty en 1957.

Comme les logiciels de CAO, la FAO a également énormément évolué grâce à l'augmentation de la puissance de calcul, de mémorisation et de visualisation des ordinateurs. Cependant les systèmes de CAO et de FAO ont longtemps évolué en parallèle, posant ainsi des problèmes pour passer de l'un à l'autre.

La conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO ou CAO-FAO) sont souvent Présentées conjointement. En effet, ces deux champs d'application informatique en génie Mécanique ont plusieurs points en commun. Chacune des applications porte sur les mêmes pièces mécaniques et utilise une base informatique commune : les ressources graphiques d'édition et de gestion. [1]

## I.2. Conception assistée par ordinateur (CAO)

La conception d'un produit consiste à proposer des solutions ou reconcevoir des solutions existantes pour remplir des fonctions bien définies à l'intérieur d'un ensemble de contraintes. Généralement, l'obtention d'une solution n'est pas directe sauf pour des problèmes extrêmement simples.

Le processus est plutôt itératif au cours duquel un objet est conçu et modifié afin qu'il puisse remplir des fonctions bien définies et se conformer à un ensemble de contraintes [2]

### **I.2. 1. Fabrication assistée par ordinateur (FAO)**

Au sens strict, la fabrication assistée par ordinateur (FAO) désigne les logiciels d'assistance à la programmation des machines-outils à commande numérique. Un souci très actuel dans l'entreprise, où l'informatisation des tâches de préparation du travail apparaît comme la nouvelle étape à franchir pour améliorer les délais de mise en fabrication.

Mais, faute d'informations autres que commerciales, les décideurs se trouvent très démunis devant le choix pratique d'un système d'assistance à la programmation [2].

### **I. 2.2. L'assistance informatique à la programmation**

L'assistance informatisée touche à tous les niveaux de la préparation du travail. Il existe des logiciels de chiffrage de temps, d'optimisation des conditions de coupe, de publication assistée par ordinateur, des gestionnaires de bases de données, etc.

### **I. 2.3. Les logiciels de traitement de blocs**

Ce sont des outils de simulation d'usinage. Leur vocation : imiter une CN, c'est-à-dire se substituer à elle dans la fonction d'écriture et de mise au point des programmes. Pour cela, le programmeur dispose d'un éditeur de texte spécialisé, d'un module de vérification lexicale et syntaxique des blocs de programme, d'une simulation de trajectoire, éventuellement d'un gestionnaire de programmes (stockage et transfert des fichiers).

### **I. 2.4. Justification et choix d'un investissement en FAO**

Justifier un investissement pour améliorer les délais de mise en fabrication, c'est répondre aux questions suivantes : quels bénéfices va-t-on en tirer, combien va-t-il coûter, quelle est sa durée d'adaptation avant d'être pleinement opérationnel et rentable, quelle sera la durée de retour d'investissement, qu'en est-il de sa pérennité.[2]

## **I.3. Intégration CAO/FAO**

### **I.3.1. Objectif de l'intégration CAO/FAO**

En CFAO, l'intégration consiste à associer en un tout cohérent des applications hétérogènes (CAO, Calculs, FAO, etc.), avec l'objectif de favoriser au maximum l'action simultanée ou concourante de ces applications au cours du processus global et de minimiser la

traduction de données qui constituent le facteur principal de perte de temps et de sémantique.[2].

### I.3.2. Programmation des MOCN

#### I.3.2.1. La programmation actuelle des machines outils

La programmation actuelle des machines outils se fait par l'intermédiaire du langage G ou G-code dont les principes sont regroupés dans les normes ISO 6983.

#### I.3.2.2. La norme ISO 6983

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 (Électronique Industries Alliances) et a été normalisé sous la référence RS274D ou ISO 6983 en février 1980.

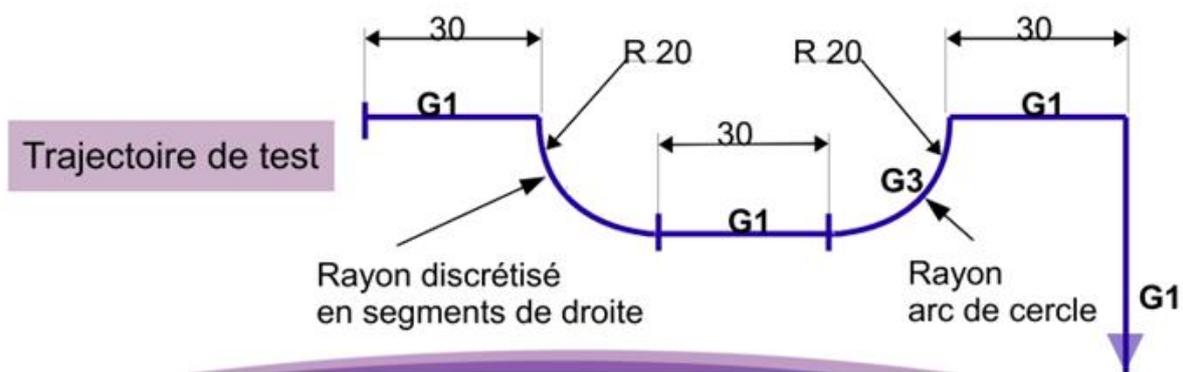


Fig. I.1: Le code G à programmer une trajectoire

#### I.3.2.3. Domaine d'utilisation Mécanique

Les logiciels modernes permettent une conception directe en trois dimensions et sont surtout intéressants pour les fonctionnalités proposées : aujourd'hui une pièce de tôlerie est modélisée directement en pliant virtuellement une tôle, un perçage est placé d'un simple clic sans avoir à réfléchir sur le choix des formes volumiques - au sens mathématique - à adopter pour modéliser son intention technologique. Si les premiers logiciels proposaient un historique figé (pas de retouche possible des formes déjà définies), les dernières versions utilisant la conception paramétrique autorisent toutes les modifications. .[3]

Ce qui a été pensé lors de la conception de la pièce est répercuté à la bonne cote lors de la mise en plan automatique. Ce travail est supplémentaire pour le technicien utilisant un outil de dessin assisté par ordinateur (DAO). Parmi les Logiciels de dessin, de simulation et de fabrication, on peut citer (par ordre alphabétique) :

- Auto CAD/MDT,
- Win CAM,
- 3D Turbo, distribué par iluac software,
- Auto CAD/MDT,
- ACIS, noyau géométrique de la société Dassault Systèmes,
- BRL-CAD, distribué sous licence GPL,
- CADAM, créé par la société américaine Lockheed,
- KEYCREATOR, édité par Kubotek USA et distribué par Kubotek France,
- Graphite One, de la société suisse Fast AG,
- One Space Designer de la société Co Create,
- Open CASCADE open source, de haut niveau,
- Solidworks, de la société Dassault Systèmes,
- Space Claim, distribué par Novacad,
- Studio Tools, de la société Alias,
- CATIA, édité par la société française Dassault Systèmes,
- Pro/Engineer, de la société américaine Parametric Technology Corporation (PTC),
- Solidworks, de la société Dassault Systèmes,
- í í ..etc .

#### **I.3.2.4. La forme complétée de la chaîne numérique**

Aujourd'hui, l'offre en matière d'outils numériques est riche et accessible techniquement et financièrement :

- modeleurs volumiques;
- calculs numériques;
- simulation numérique de comportement (mécanique, fluide, rhéologique, í );
- bases de données (relation produit-matériau-procédé; bibliothèques d'éléments standards; matériaux, procédés, conditions de travail, couple outil-matière, Comportement physico-chimiques; í );
- fabrication assistée par ordinateur;

- logiciels métiers spécifiques;
- commande numérique des moyens de production, de mesure et/ou de contrôle, de transfert ;
- implantation et gestion des moyens (l'usine numérique);

Pour raccourcir les boucles de conception-validation, il faut éviter les essais physiques longs et coûteux sur prototypes ou à partir de préséries.

Le développement des outils de simulation numérique permet de remplacer totalement certains essais dans une multitude de métiers.

Le schéma ci-dessous correspond à une forme complétée de la chaîne numérique intégrant ces outils et montrant l'évolution des données numériques au fur et à mesure des activités conduites dans les phases de conception, d'industrialisation et de production [3]

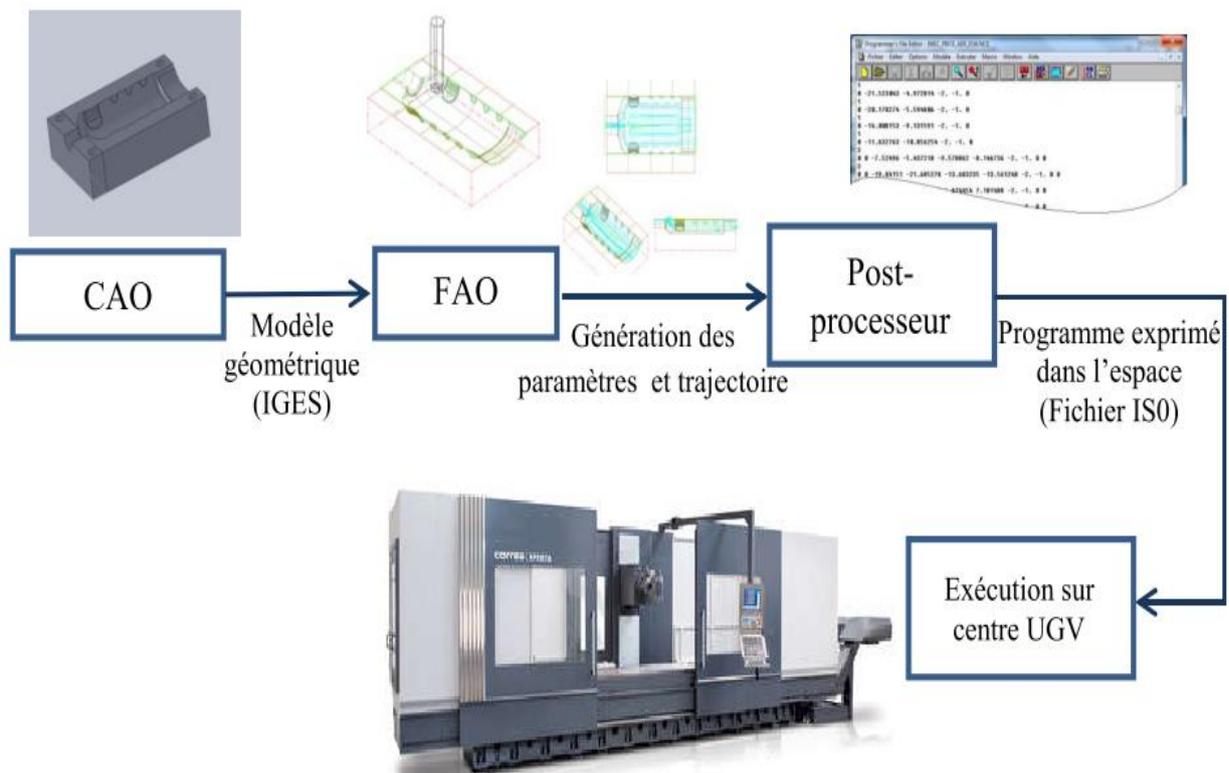


Fig. I.2 : Le processus numérique de fabrication simplifié

## I.4. Conception de pièces et des moules en acier

### I.4. 1. Le moulage

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à

obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

**a) Selon la nature des métaux et alliages - Fonderie de fonte**

- Fonderie d'acier.
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre, bronzes, laitons etc...

**b) Selon l'utilisation**

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

**c) Selon le procédé de moulage**

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.
- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

Dans ces procédés le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible). Le moule non permanent est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce, il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal. Le moule permanent peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante [4].

### **I.4. 2. Moulage en sable**

Le moulage en sable consiste à couler le métal en fusion dans l'empreinte du moule en sable, réalisée d'après un modèle ayant la forme de la pièce à obtenir.

Le moulage en sable est le procédé le plus ancien et convient presque pour tous les métaux et alliages de moulage. Il s'adapte bien aux petites séries de production et surtout pour les pièces de grandes dimensions. Un moule simple est constitué de deux parties :

- partie supérieure
- partie inférieure.

Le métal en fusion est coulé à travers le trou du système de coulée, en traversant les canaux jusqu'à remplissage de l'empreinte. Après refroidissement et solidification, la pièce est sortie pour subir les différentes opérations de finition.

#### **I.4. 2.1. Moulage en sable manuel**

Le moulage en sable manuel est utilisé surtout pour la fabrication des pièces unitaires et des pièces de grandes dimensions, qui ne peuvent pas être réalisées dans des machines de moulage, ses principaux éléments sont :

- Modèle et noyau,
- Châssis,
- Sable de moulage,
- Métal liquide,
- Aiguille (pour la confection de trous d'air),
- Truelle (pour rendre lisse la face de joint du moule),
- Palette, Fouloir (pour le compactage du sable),
- Spatule (pour rendre lisse les différentes surfaces du moule après démoulage),
- Mandrin de coulée (pour la confection du trou de coulée),
- Marbre (sur lequel s'effectue la préparation du mou).

#### **I.4. 2.2. Le modèle**

Le modèle est une représentation sous forme d'une pièce ou ensemble de pièces de l'objet à fabriquer et permettant la confection de l'empreinte du moule en sable. Il est exécuté en bois ou en métal d'après le dessin de fabrication, c'est à dire le matériau utilisé pour la confection du modèle dépend essentiellement du procédé de moulage (manuel ou mécanique). Un modèle doit posséder :

- Une bonne résistance contre les contraintes mécaniques.
- Une bonne résistance contre les contraintes chimiques (humidité, liant du sable, gaz etc.).
- Une bonne résistance contre les contraintes thermiques (échauffement du modèle dans les différents procédés de moulage). - Une précision de la forme et des dimensions.
- Bas prix de revient. Le bois reste depuis longtemps la matière essentielle pour la confection des modèles.

Pour chaque type de bois, les propriétés sont différentes. On utilise surtout des bois traités, sans fissures et sec (moins de 10% d'humidité) pour prévenir leur déformation au cours du séchage. La surface de travail doit être lisse et résistante à l'usure. Pour exécuter des pièces en grande série, les modèles sont métalliques. Ils sont usinés, polis et montés sur des plaques modèles métalliques. Ils sont conçus à partir de différents alliages tels que:

- ❖ Alliage d'aluminium.
- ❖ Alliage de magnésium.
- ❖ Alliage de zinc.
- ❖ Alliage de cuivre.
- ❖ Fontes et aciers.

Sur les surfaces des modèles sont appliqués des enduits destinés à améliorer leurs propriétés de surface.

La couche mince d'enduit ne doit pas avoir une influence sur la forme et les dimensions du modèle. Les enduits métalliques sont obtenus par galvanisation ou chromatisations et non par peinture.

#### **I.4. 2.3. Réalisation du modèle**

Lors de la réalisation du modèle, on doit tenir compte :

**a)** de l'usinage s'il y a lieu; dans ce cas, la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement, la grandeur de la surépaisseur d'usinage est calculée ou choisie dans des tableaux spéciaux, établis expérimentalement. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.

**b)** du retrait, car lors du refroidissement le métal se contracte, le retrait est la valeur de cette contraction. Donc on majore les dimensions du modèle de 1% pour la fonte et 2% pour l'acier.

**c)** de la dépouille, les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule.

La dépouille est absolument nécessaire. La dépouille peut se faire en augmentation à égalité de la pièce ou encore en diminuant les dimensions de la pièce, si le rôle de celle-ci n'est pas important.

En général, le modèle est souvent fabriqué en plusieurs parties démontables pour faciliter le démoulage et permettre la sortie des parties en contre dépouille. Lorsqu'une partie du

modèle fait saillie sur le modèle et a une direction autre que celle générale du moulage, il est bien évident que l'on ne peut démouler cette partie au même temps que le modèle sans arracher une portion du sable du moule. Pour éviter cet inconvénient on fait cette partie du moule démontable, au moment du démoulage est démoulé dans la direction générale du démoulage D, alors que la partie démontable P reste dans le moule, et elle est ensuite démoulée suivant la direction S dans la cavité du moule laissé par le corps C démoulé.

Les modèles peuvent être aussi creux ou pleins. Les modèles de petites dimensions sont massifs et au contraire ceux de grandes dimensions sont creux afin de diminuer le prix de revient, ainsi que leur poids.

Pour obtenir le contour intérieur de la pièce on emploie les noyaux, qui sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel. Le noyau est confectionné en sable auto-siccant, dans un moule appelé boîte à noyau en bois ou métallique et se compose de deux parties assemblées par des groupes de repérage. [5]

#### **I.4. 2.4. Le sable de moulage**

Le sable de moulage doit être infusible (résister à la température de coulée du métal), résistant (résister à l'érosion du métal liquide) et poreux (ne peut s'opposer au passage des gaz produits au moment de la coulée), il se compose en général :

- a) de sable quartzeux (86-96%) pratiquement infusible en contact avec le métal liquide,
- b) d'argile (bentonite) (3-10%) qui lie les grains de silice entre eux et empêche le moule de se détériorer après enlèvement du modèle. Dans certains cas, au lieu de l'argile, on utilise d'autres liants tels que : huiles végétales, verre soluble, dextrine, résine, bitumes, lessive sulfurique etc...
- c) de noir de fonderie, graphite pulvérisé ou noir végétal (2-6%) (charbon de bois pulvérisé) qui brûle en contact du métal en fusion et donne ainsi au moule la porosité et la perméabilité nécessaire à l'évacuation des gaz (eau, vapeur d'eau, oxyde de carbone) qui seraient emprisonnés dans l'empreinte.
- d) de l'eau, des résines tyranniques accompagnées d'un catalyseur dans la proportion globale de 1,5%. Les résines provoquent le durcissement assez rapide du moule à la température ambiante. [6]

## I.5. Graphite

La maîtrise des matériaux, leur élaboration, leur mise en forme et leurs caractéristiques sont aujourd'hui, plus que jamais, en cours de développement dans nos sociétés.

Dès lors, l'élaboration et la mise en forme des matériaux a pris de l'ampleur et représente aujourd'hui un secteur économique extrêmement important, de nos jours, l'utilisation de la mousse est devenue incontournable.

Les mousses de carbone présentent des propriétés multiples qui leur ouvrent des applications nombreuses et variées [7].

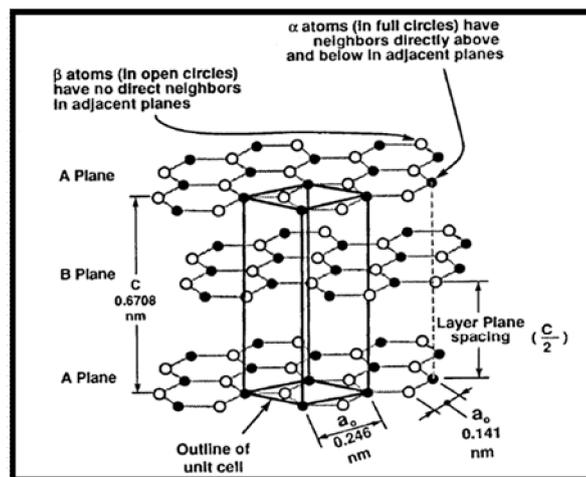
Les mousses de graphite et de carbone sont des matériaux légers, résistants à la température (donc aux incendies) et aux produits chimiques ils possèdent, également, des propriétés mécaniques remarquables, elles ont un faible coefficient d'expansion thermique et une conductivité thermique et électrique aisément adaptables.

De plus, cette propriété sert à orienter et favoriser les applications dans le thermal et les échangeurs de chaleur [7].

### I.5. 1. Structure du cristal graphite [7]

Le graphite est composé d'une série de plans parallèles empilés comme représenté schématiquement à la Figure 1, avec la liaison  $sp^2$  trigonale décrite précédemment.

Dans la figure 4, les cercles indiquant la position des atomes de carbone ne représentent pas la taille réelle de l'atome. Chaque atome, en effet, est au contact de ses voisins immédiats [8].



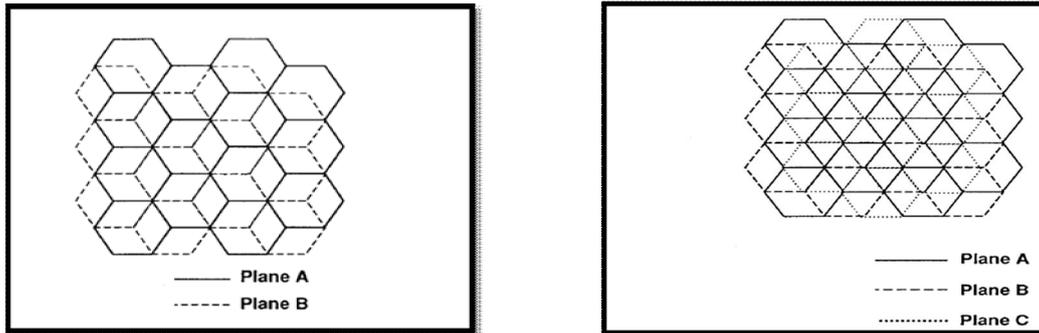


Fig. I.3: Schémas des structures cristallographiques du graphite montrant l'empilement ABA et les mailles élémentaires, cristaux hexagonaux AB et rhomboédriques [7].

Dans chaque plan de couche, l'atome de carbone est collé aux trois autres, formant une série d'hexagones continus dans ce qui peut être considéré en tant que molécule bidimensionnelle essentiellement infinie. On distingue :

- a) **Graphite hexagonal** : ordre d'empilement le plus commun des cristaux du graphite (alpha) avec - ABABAB- empilant l'ordre, dedans où les atomes de carbone dans chaque autre couche sont superposés au-dessus des autres.
- b) **Graphite rhomboédrique** : son ordre d'empilement est BCABCABC. Les atomes de carbone dans la troisième couche sont superposés.

## I.5. 2. Propriétés physiques du graphite [7]

Les propriétés du matériau graphite idéal, c.-à-d. un matériau qui se rapproche étroitement du cristal de graphite aux dimensions infiniment grandes, sont examinées dans cette section. Un tel matériau n'existe pas dans le monde réel et les propriétés données ci-dessous sont calculées ou fondées sur les propriétés réelles de cristaux de graphite approchant de près cette structure idéale.

Comme mentionné ci-dessus, une large gamme de matériaux fait partie de la famille du carbone et du graphite et ces matériaux ont des propriétés qui sont souvent très différentes de celles du cristal de graphite idéal. Évidemment, il est nécessaire de définir avec précision le matériau en parlant des propriétés du "carbone" ou de celle du "graphite".

### a) Anisotropie du cristal graphite

La structure cristalline particulière du graphite a pour conséquence une anisotropie considérable, c.-à-d. que les propriétés du matériau peuvent varier considérablement selon qu'elles sont mesurées suivant les directions ab (dans la couche/plan de base) ou suivant la direction c (perpendiculaire aux couches/sens de l'empilement). Cette anisotropie, en

particulier dans les propriétés électriques et thermiques, peut souvent être utilisée à bon escient [9].

### b) Sommaire des propriétés physiques du graphite

Les propriétés physiques du graphite sont résumées dans le Tableau 1. Il convient de souligner que, en général, obtenir des mesures précises des propriétés d'un matériau au-delà de 3000 K est assez malaisé. Dans le cas du graphite, nombre de ces mesures sont basées sur des expériences avec des arcs de carbone qui sont difficiles à réaliser et à interpréter.

**Tableau 1 : propriétés physiques du graphite**

<b>Forme cristalline:</b>	<b>Hexagonal</b>
<b>Paramètres de la maille</b>	<b>a = 0.246 nm; c = 0.671 nm</b>
<b>Couleur</b>	<b>Noir</b>
<b>Densité à 300 K, 1 Atm</b>	<b>2.26 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Volume Atomique</b>	<b>5.315 cm<sup>3</sup>/mol</b>
<b>Point de sublimation à 1 Atm (estimé)</b>	<b>4000K</b>
<b>Point Triple (estimé)</b>	<b>4200K</b>
<b>Point d'ébullition (estimé)</b>	<b>4560K</b>
<b>Enthalpie de fusion</b>	<b>46.84 kJ/mol</b>
<b>Chaleur de vaporisation du gaz monoatomique (estimée)</b>	<b>716.9 kJ/mol</b>
<b>Indice d'électronégativité Pauling</b>	<b>2.5</b>

### c) Densité

La densité du cristal parfait énumérée dans le Tableau 1 est la densité théorique. La plupart des matériaux de graphite ont une densité inférieure en raison de la présence d'imperfections structurales telles que la porosité, les lacunes dans la maille et les dislocations [10-11].

A l'exception du nitrure de bore, les matériaux de graphite ont une densité plus faible que tous les autres matériaux réfractaires, comme indiqué dans le Tableau 1. C'est une caractéristique particulièrement avantageuse dans les applications aérospatiales [11].

**Tableau 2: Densité de certains matériaux réfractaires à 300 K, 1 Atm (en g/cm<sup>3</sup>) [7]**

<b>Graphite</b>	2.26
<b>Molybdène</b>	10.22
<b>Rhénium</b>	21.04
<b>Tantale</b>	16.6
<b>Tungstène</b>	19.3
<b>Di borure de titane</b>	4.50
<b>Hafnium carbure</b>	12.20
<b>Tantale de carbure</b>	13.9
<b>Nitride de bore</b>	2.25
<b>L'oxyde d'aluminium</b>	3.97
<b>L'oxyde de zirconium</b>	5.89

### I.5. 3. Propriétés thermiques du graphite [7]

Les propriétés physiques examinées dans la section précédente sont essentiellement indépendantes de la taille et de l'orientation des cristallites dans l'échantillon (à l'exception de la densité). En conséquence, elles peuvent être considérées comme valables pour toutes les formes de graphite. Ce n'est plus vrai pour certaines des propriétés énumérées dans la présente section et les suivantes, et ces propriétés peuvent varier considérablement selon la taille et l'orientation des cristallites et d'autres facteurs liés aux conditions de fabrication.

**Tableau 3 : Propriétés thermiques théoriques du graphite [7]**

<b>Chaleur de combustion HCO à 25°C et à pression constante pour former du gaz CO<sub>2</sub>:</b>	<b>393.13 kJ/mol</b>
<b>Entropie Standard S° à 25 °C:</b>	5.697-5.743 J/mol. K
<b>Chaleur spécifique à 25°C:</b>	0.690-0.719kJ/kg. K
<b>Conductivité thermique à 25 °C:</b>	Directions ab 398 W/m. K Direction c 2.2W/m. K

### I.5. 4. Avantages du graphite

Le graphite présente de nombreux avantages qui en font le matériau le plus largement utilisé pour les électrodes d'électroérosion

- ✓ Il est facile à usiner.
- ✓ Il résiste bien aux chocs thermiques.
- ✓ Il a un coefficient de dilatation thermique faible (trois fois plus faible que celui du cuivre) qui garantit la stabilité de la géométrie de l'électrode pendant l'opération d'électroérosion.
- ✓ Il est disponible sous la forme de blocs de grandes dimensions.
- ✓ Il ne fond pas, mais passe directement de l'état solide à l'état gazeux à 3 400°C, ce qui réduit l'usure.
- ✓ Il a une densité cinq fois plus faible que le cuivre, ce qui permet d'obtenir des électrodes plus légères.
- ✓ Il assure une vitesse d'enlèvement du métal supérieure à celle du cuivre, avec une usure plus faible.
- ✓ Il présente la caractéristique exceptionnelle d'avoir un taux d'usure qui a tendance à décroître lorsque le courant de crête augmente.

### I.5.5. Procédés d'obtention des moules du graphite artificielle et étapes de fabrication

L'opération de base a été inventée par E.G. Acheson, qui a produit le premier graphite moulé en 1896. Les demandes initiales du graphite moulé étaient les électrodes pour les fours à arc électrique et les projecteurs de film. Beaucoup d'améliorations ont été apportées depuis cette date vis-à-vis des besoins et des domaines d'application.

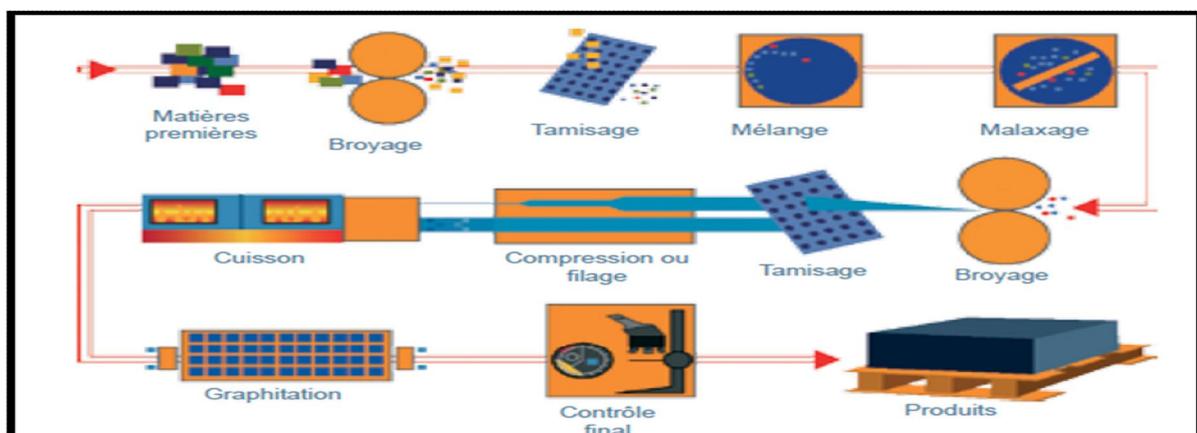


Fig. I.4 : Processus d'élaboration du graphite

Le graphite moulé peut être défini comme synthétique (ou artificiel) et les produits en graphite sont construits par un processus de tassement d'un mélange de carbone qui est plus tard carbonisé et graphité.

Des pièces de taille considérable, pesant plusieurs centaines de kilogrammes, telles que les électrodes montrées dans la figure 6, sont fabriquées en grande quantité.

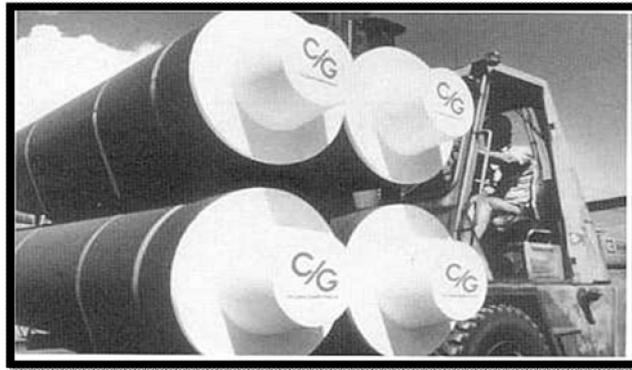


Fig. I.5 : Ebauches de graphite pour extrusion.

#### a) Sélection de matières premières

La sélection des matières premières appropriées est la première et la plus critique étape du processus de fabrication. Elle détermine de façon explicite, les propriétés et le coût du produit fini.

Les caractéristiques des matières premières telles que :

- La taille de la particule,
- La teneur en carbone,
- Le degré de carbonisation,
- Structure des particules,
- Impuretés inévitables rentrant dans la composition du graphite.

#### b) Remplisseurs

Le remplisseur est habituellement un matériaux de carbone assurant aisément un bonne graphitisation. Les matériaux sont généralement des cokéfies, également connus dans l'industrie en tant que « remplisseurs mous ». Ils graphitent rapidement en haute température 2700°C. Les autres remplisseurs importants sont le graphite synthétique des électrodes réutilisées, graphite naturel.

### c) Reliures

La reliure la plus commune est le lancement de goudron, de houille qui est un dur matériau fragile et vitreux. De 35 à 60 kilogrammes de lancement sont produits à partir de chaque tonne métrique de charbon.

### d) Tamisage

Le remplisseur et la reliure sont rectifiés ou filtrés par dimension de particules qui peut varier de 1  $\mu\text{m}$  (farine) à 1,25 cm. Ceci permet un meilleur contrôle des caractéristiques et offre une maîtrise de la densité du produit fini.

### e) Mélange

Le remplisseur et la reliure sont pesés, puis mélangés avec de grands mélangeurs donnant comme résultat un mélange homogène où chaque particule de remplisseur est enduite de la reliure. Le mélange est habituellement effectué à 160 - 170 °C; occasionnellement, les températures peuvent atteindre aussi 315°C. [12].

## I.5. 6. Techniques d'obtention des pièces en graphite

Trois techniques importantes sont employées pour obtenir des pièces en graphite :

- Extrusion,
- Compression (chargement uni axial),
- Pression isostatique.

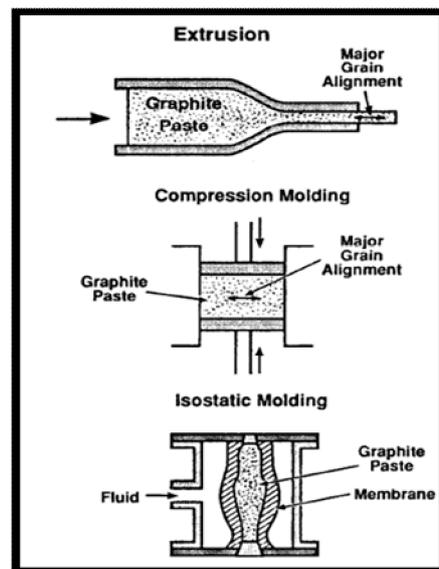


Fig. I.6 : Schéma des techniques employées pour l'obtention des pièces en graphite.

- a) **Extrusion** : technique recommandée pour les pièces à section unique, exemple l'électrode.
- chauffer à une température de 125°C pour faciliter l'étirement,
  - refroidir rapidement.
- b) **Pression isostatique** : 7Mpa (100psi)
- c) **Compression (chargement uni axial)** : les matériaux utilisés pour la compression du moule est le carbure de tungstène. [12]

**Tableau 4** : comparaison entre les différentes techniques de fabrication des pièces en graphite

<b>Extrusion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriété abiotrophique</li> <li>- Non uniforme</li> <li>- Présence de ligne de débit</li> <li>- Limité pour les pièces de section unique</li> <li>- Production de grandes pièces possible</li> <li>- Cout réduit</li> </ul>
<b>Pression isostatique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nom uniforme</li> <li>- Effet des arêtes</li> <li>- Présence de la ligne des débits</li> <li>- Coût élevé</li> </ul>
<b>Compression</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Propriété anis tropique</b></li> <li>- <b>uniforme</b></li> <li>- <b>Pas de ligne de débit</b></li> <li>- <b>Coût élevé</b></li> </ul>

## I.6. Usinage

### I.6. 1. Trajectoire d'usinage

Une bonne génération de la trajectoire de l'outil permet de minimiser son usure et par conséquent d'améliorer sa durée de vie. C'est la trajectoire d'une dent dans la matière. Les actions d'approche et de dégagement de l'outil correspondent à des trajectoires hors matière classiques, linéaires ou non. L'action d'usiner comporte une garde d'engagement, la coupe proprement dite et une garde de dégagement.

## I.6. 2. Stratégies d'usinage

### I.6.2.1 Généralités sur la stratégie d'usinage en 3 axes et 5 axes

La stratégie d'usinage est le choix des mouvements de l'outil nécessaires à la réalisation de la forme attendue.

Pour appliquer la stratégie d'usinage qui convient le mieux, il faut détecter la géométrie de la surface et son paramétrage : surface plane, surface réglée ou bien surface définie par des polynômes.

Généralement, les industriels utilisent les stratégies d'usinage proposées par les logiciels de FAO. Ces derniers disposent de l'usinage par plans parallèles (zigzag, concentrique), de l'usinage en spirale et de l'usinage par iso paramétriques. Ce dernier peut être réalisé en définissant la direction d'usinage à l'aide des courbes ISO.

La génération de la trajectoire d'usinage nécessite de pouvoir passer du point de contact outil/pièce au point du centre d'outil.

Toute stratégie d'usinage se fonde sur la génération automatique des trajectoires successives de l'outil. Les principaux objectifs qu'une stratégie d'usinage efficace doit remplir :

Le respect la productivité (débit et minimisation du temps d'usinage).

Le choix des hauteurs de crête (H) et du pas radial (P) dépend en fait d'un grand nombre de facteurs (entre autre la machine utilisée, l'outillage à réaliser, le matériau et les techniques de polissage). Le pas radial représente la distance entre deux plongées successives de l'outil dans la pièce. Le changement de ce pas produit un changement de la géométrie de copeau et de la hauteur de crête. Il est évident aussi que l'utilisation d'un pas radial important diminue la longueur totale de coupe.

En ébauche, le principal besoin dans le choix de la stratégie d'usinage est d'enlever le maximum de matière en un minimum de temps à partir d'une pièce brute et c'est là l'objectif principal de ce travail qui sera développé dans les chapitres qui vont suivre.

En usinage 3 axes, les stratégies d'ébauche seront traitées par balayage suivant des directions droites et dans des plans parallèles.

Cette technique enlève un volume de matière en couches représentant la descente par paliers de la fraise (ou autre outil) selon l'axe Z.

Chaque couche successive est retirée par des parcours de la fraise dans le plan X-Y dont la profondeur de passe Z reste constante.

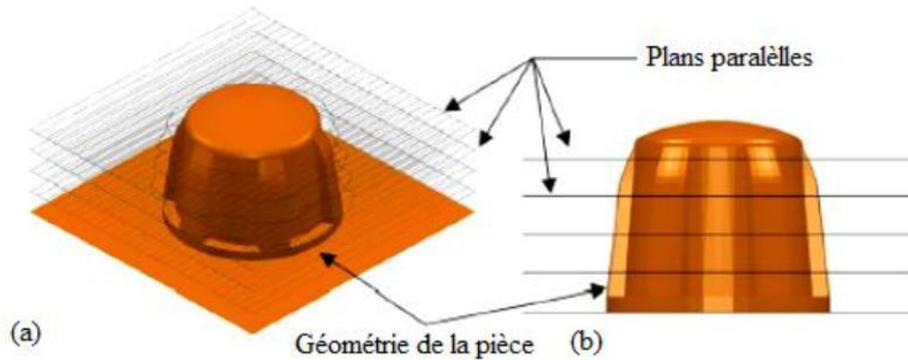


Fig. I.7 : Usinage par plans parallèles pour l'opération d'ébauche [13].

Une nouvelle technique en fraisage d'ébauche nouvellement utilisée, appelée fraisage trochoïdal [13], [14] et [15] et illustrée à la figure 8, est appliquée au fraisage des cavités étroites dans des métaux durs. Elle permet de bien maîtriser l'angle d'engagement de l'outil. En fait, l'outil effectue une série de boucles serrées durant un déplacement progressif. Ainsi, le diamètre total de l'outil n'est pas engagé en pleine matière et les prises de passes sont relativement constantes.

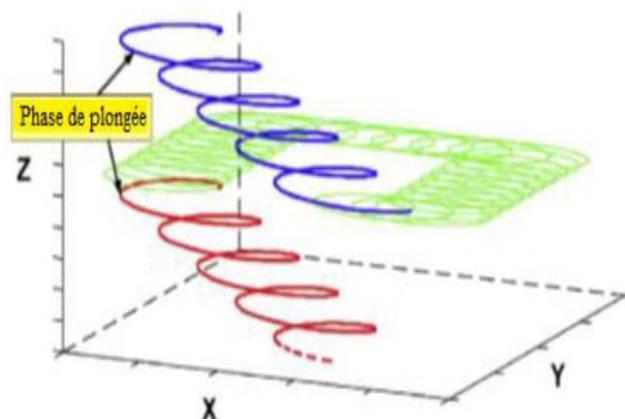


Fig. I.8 : Usinage trochoïdal [13].

Suite à une étude comparative, entre la stratégie trochoïdale et une stratégie conventionnelle (Exemple la stratégie zigzag), réalisée par Raucha et al [13], il a été mis en évidence que l'avantage majeur de l'usinage trochoïdal se situe au niveau de la continuité de la vitesse d'avance qui fournit également l'assurance de travailler avec les conditions de coupe programmées.

Les auteurs ont prouvé aussi que pour mieux bénéficier de cet avantage, il faut travailler sur une machine-outil à fortes capacités cinématiques. En effet, si la machine-outil utilisée ne dispose pas de valeurs suffisantes de vitesse, d'accélération et de jerk (mot anglais signifiant mouvements brusques ou secousses), l'utilisation de stratégies trochoïdales n'est pas

intéressante d'un point de vue technico-économique (efforts de coupe et productivité en particulier) [13]

### I.6. 2.1. Génération de la trajectoire par un logiciel de FAO

Générer une stratégie 3D d'usinage des pièces complexes en une seule étape est particulièrement facile avec la FAO. Cette dernière permet de rationaliser la programmation et de fournir un outil de vérification graphique des usinages.

Ceci permet d'éviter les tests coûteux de la programmation à vide sur la machine-outil. Des nouvelles générations des logiciels de FAO possèdent un module approprié au FGV avec amélioration des trajectoires et suppression des angles vifs.

Le calcul de la trajectoire de l'outil en FAO s'appuie sur un modèle CAO, une géométrie d'outil, une stratégie d'usinage (une direction d'usinage et des paramètres de discrétisation) et un format de description de la trajectoire. Pour les formats de trajectoire d'usinage actuellement utilisés, les interpolations linéaire et circulaire restent encore les modèles les plus utilisés. En usinage 3 axes, une stratégie d'usinage pourra se trouver discrétisée suivant deux directions : direction de balayage (pas transversal) et direction d'avance (pas longitudinal) (figure 9).

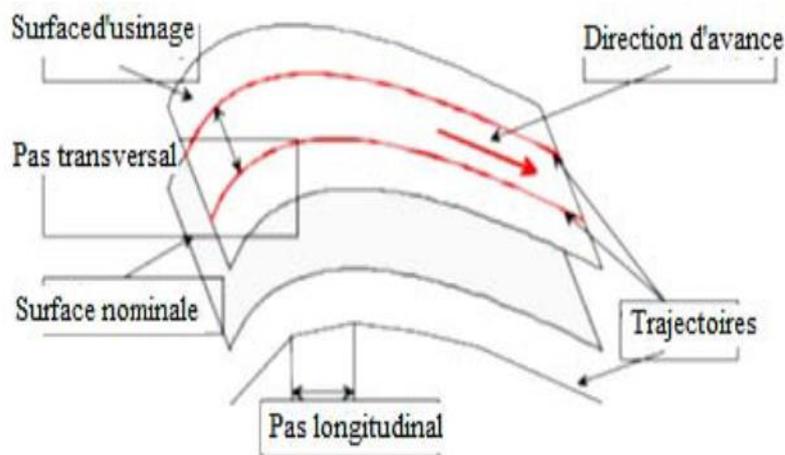


Fig. I.9 : Génération de trajectoire [14].

### I.6. 2.3. Temps d'usinage

Le cycle de fraisage est constitué de la plongée elle-même, du dégagement d'outil selon l'axe Z et du déplacement de l'outil hors matière. Le temps de cycle est déterminé par la relation suivante :

$T_c = \hat{U}$  (Temps manuels, de changement d'outil, de déplacements en vitesse rapide)  
 +  $\hat{U}$  (Temps approche, usinage, dégagement)  
 +  $\hat{U}$  (Temps répartis de remplacement des outils).

On peut résumer le temps d'usinage par le temps de coupe ( $t_c$ ) et le temps de mouvement d'outil hors matière ( $t_h$ ). Le temps de coupe pour ébaucher une cavité est calculé à partir de la longueur de coupe ( $L$ ) et la vitesse d'avance ( $V_f$ ) par l'équation où ( $n$ ) est le nombre de plongées, ( $l$ ) est la longueur de coupe lors de chaque plongée.

$$t_c = \frac{L}{V_f} \quad ; \quad L = n.l$$

Le temps de mouvement d'outil hors matière ( $t_h$ ) (Fig. 10) est calculé à partir de la longueur de trajet de l'outil hors matière ( $L'$ ) et la vitesse rapide ( $V_f'$ ) par l'équation

$$t_h = \frac{L'}{V_f'} \quad ; \quad L' = n.(l + B + \sqrt{P^2 + B^2})$$

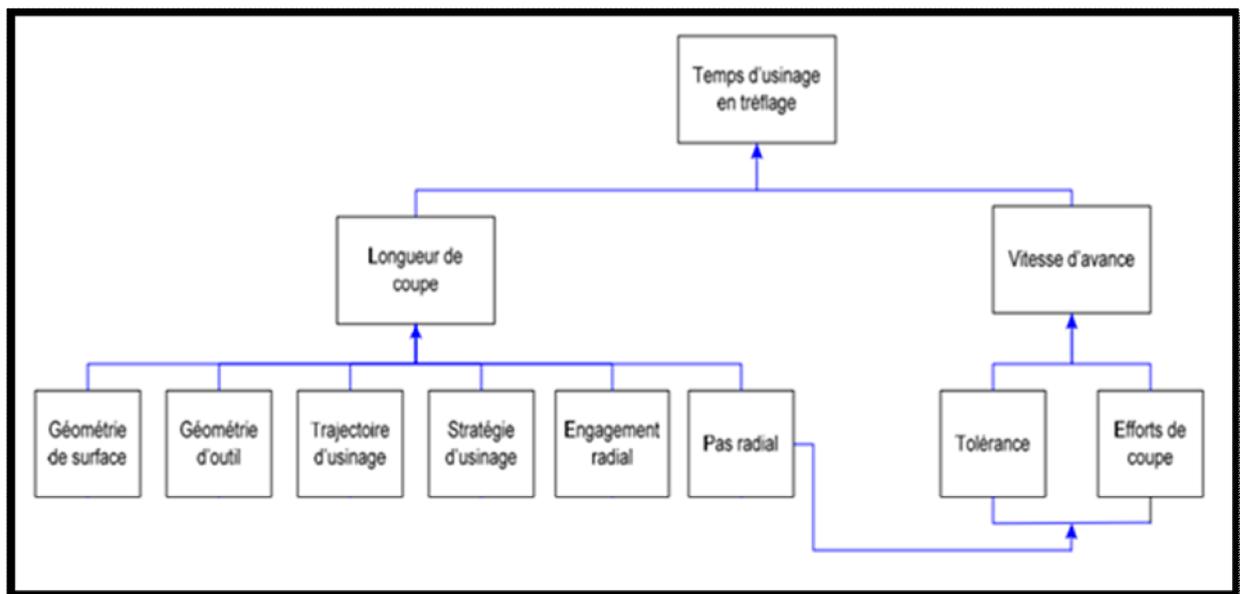


Fig. I.10 : Procédure de calcul du temps d'usinage.

### I.7. Usinage des matériaux réfractaires

L'usinage est le procédé de mise en forme par enlèvement de la matière le plus répandu dans les domaines de fabrication des pièces mécaniques.

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Elles n'ont cessé d'être remises en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, qu'elles soient économiques ou écologiques.

La productivité et la qualité des surfaces usinées ont toujours été des préoccupations majeures pour les fabricants.

A l'heure actuelle, l'obligation est de produire des pièces mécaniques, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles sont de plus en plus faibles.

Des progrès au niveau de l'ensemble Pièce - Outil - Machine ont été effectués, permettant l'amélioration de l'usinabilité de plusieurs matériaux.

Des nombreux travaux ont été menés pour trouver les outils et les conditions de coupe optimales permettant de surmonter les problèmes d'usinage de la plupart des matériaux.

Cependant, l'usinage des matériaux réfractaires reste encore l'objectif de plusieurs travaux. Ces matériaux possèdent des caractéristiques thermomécaniques particulières conduisant à une mauvaise usinabilité. L'objectif secondaire de ce travail est justement l'usinage d'un moule en graphite qui sera développé aussi dans les chapitres qui vont suivre.

Classiquement, les alliages à base de nickel, par exemple, possèdent des propriétés thermiques, mécaniques et physiques qui les positionnent parmi les matériaux les plus difficiles à usiner. Cette difficulté réside dans :

- Les variations exceptionnelles des propriétés mécaniques aux hautes températures lors de l'usinage. Les efforts de coupe peuvent atteindre des valeurs très élevées permettant d'agir sur la qualité macro et micro géométrique de la surface usinée ;
- La faible conductivité thermique qui cause une concentration de la chaleur dans la zone de coupe.
- L'existence d'une microstructure riche en particules de carbure jouant le rôle d'abrasifs lors de l'usinage.
- L'existence d'une affinité chimique avec le matériau d'outil de coupe qui permet d'activer l'usure par diffusion.
- L'adhésion des micros particules, surtout de l'Inconel, sur l'arête de coupe de l'outil lors de l'usinage. Ce phénomène engendre l'usure en entaille de la face de coupe.

### **I.7.1. Usinabilité**

Cette difficulté de traitement des matériaux a fait apparaître la notion d'usinabilité qui est donc une propriété spécifique des matériaux; d'après le Larousse, c'est l'aptitude d'un matériau solide à se laisser usiner. Autrement défini, c'est la qualité d'une matière qui la rend propre à être usinée à l'outil. Les sidérurgistes et les fabricants, définissant l'usinabilité, limitent la notion d'usinage au travail du métal avec formation de copeaux.

D'après Sandvik, pour déterminer l'usinabilité d'une matière, il faut généralement identifier trois paramètres principaux.

1. Classe de la matière du point de vue métallurgique et mécanique
2. Géométrie de l'arête de coupe à utiliser, niveau micro et macro
3. Matériau de coupe (nuance) et ses composants corrects, notamment carbure cémenté revêtu, céramique, CBN ou PCD, etc.

Les autres facteurs importants sont les conditions de coupe, les forces de coupe, les traitements thermiques que la matière a reçu, la présence d'une croûte superficielle, la présence d'inclusions métalliques, l'attachement des outils, les conditions générales d'usinage, etc.

Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier inoxydable austénitique. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers inoxydables. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. D'autres facteurs tels que la microstructure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. sont aussi pris en compte.

La normalisation ISO classe les aciers et alliages usinables et difficilement usinables comme il suit :

- ISO P - Aciers
- ISO M - Aciers inoxydables
- ISO K - Fontes
- ISO N - Matières non-ferreuses
- ISO S - Superalliages réfractaires et titane
- ISO H - Aciers trempés

Cette "difficulté d'usinage" ou usinabilité des aciers et alliages, selon Sandvik, est exprimée par la variation remarquable de la température dans la zone de coupe pièce-outil comme le montrent les cartes thermiques de la figure 10.

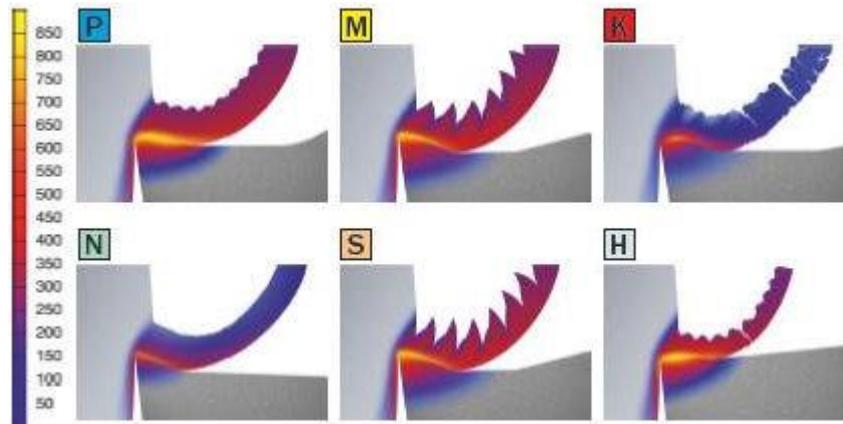
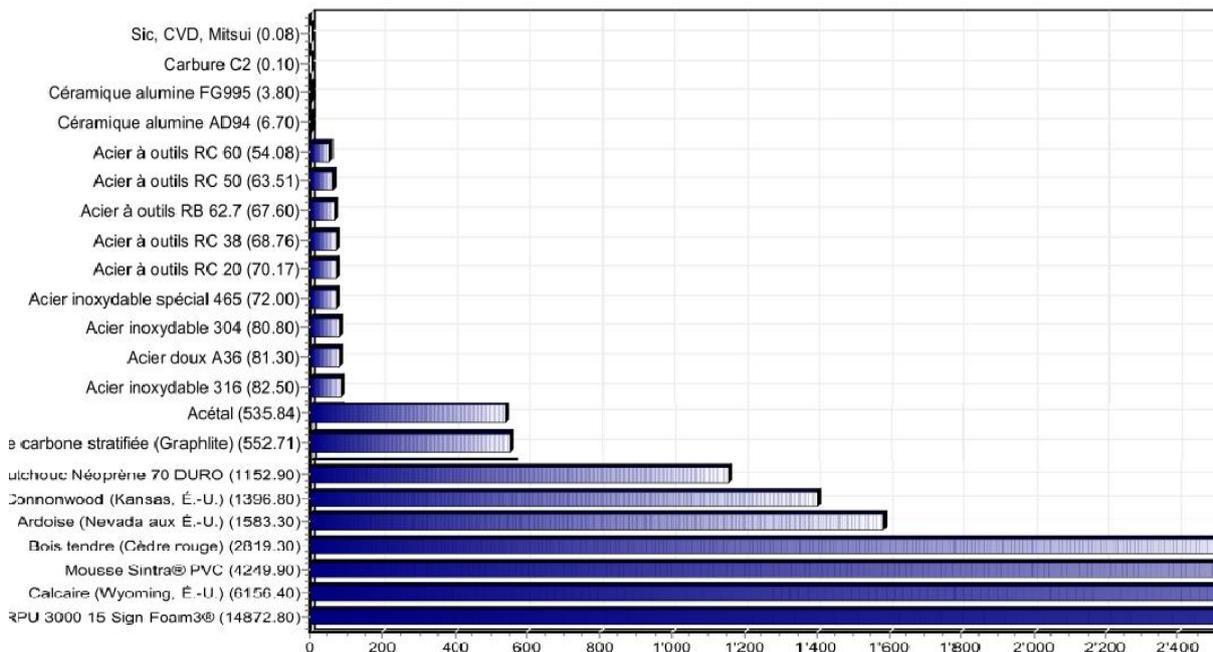


Fig. I.11 : Vue en coupe d'une plaquette en carbure cémenté usinant les aciers et alliages et répartition des températures dans pièce-outil-copeau en degrés Celsius.

Ci-après un tableau de classification de l'usinabilité des aciers et autres matériaux, de leur usinage très difficile au plus facile, respectivement selon des indices de 0,08 (SiC, CVD,...) à 14872,80.

Tableau 5 : Usinabilité des matériaux OMAX.



Le graphite est considéré comme facile à usiner, son indice d'usinabilité est autour de 552,71 (voir tableau 5).

### I.7.2. Régimes de coupe recommandés pour le fraisage, le tournage, la rectification et le sciage du graphite

FRAISAGE	Vitesse m/mn	Avance mm / dent	
<i>Ébauche</i>	800~1000	0,1~0,8	
<i>Finition</i>	1000	< 0,09	
TOURNAGE	Vitesse m/mn	Avance mm / tr	Profondeur passe mm
<i>Ébauche</i>	100~250	0,3~0,45	5~19
<i>Finition</i>	200~450	0,06~0,15	0,1~0,5
RECTIFICATION	Vitesse m/mn	Avance mm / mn	
	1000~2300	150~800	< 3
SCIAGE	Vitesse m/mn	Avance mm / mn	
	350~500	300~400	

Son usinage à sec est vivement conseillé avec utilisation d'un aspirateur pour la récupération de la poussière.

### I.8. Conclusion

Cette étude bibliographique permet de constater la nécessité d'adapter la géométrie de la Trajectoire au comportement cinématique et dynamique de la machine outil afin de travailler conception-fabrication assistée par ordinateur.

On a également traité le matériau « graphite », son exploitation et sa fabrication, et d'une manière générale, les matériaux réfractaires, ainsi que leurs élaborations, leurs mises en forme et leurs caractéristiques.

En phase réalisation, pour les pièces et les ébauches volumineuses et complexes, les industriels développent des stratégies d'usinage qui sont proposées par des logiciels de FAO (génération de trajectoires d'usinage) après leurs conceptions en 3D. Ces deux étapes peuvent être réalisées en une seule étape par des logiciels de FAO. Ces logiciels peuvent aussi nous aider aux calculs liés aux trajectoires de l'outil, aux temps ainsi qu'à la détermination des géométries et des formats de description des trajectoires. Ce qui offre un gain appréciable des temps d'étude, de réalisation et de durée de vie des outils, donc un gain économique important.

Les matériaux réfractaires qui ont des propriétés thermiques, mécaniques et physiques élevées, sont positionnés parmi les matériaux les plus difficiles à usiner.

**CHAPITRE II**  
**INGENIERIE DU**  
**MOULE**

## II.1. Problématique et objectifs

L'usinage qui présente des difficultés multiples est appelé communément "usinage complexe". Les multiples difficultés résident aussi, outre les propriétés d'usinabilité développées dans le chapitre précédent, dans la forme et les états de surfaces des pièces.

Dans les recherches bibliographiques entreprises dans le cadre de ce travail, pour répertorier les pièces et composants mécaniques **en graphite** qui présentent cette multiple complexité à l'usinage, j'ai relevé :

- Fabrication à grande échelle de cellules solaires et les panneaux,
- Réacteurs et la fusion nucléaire aux très hautes températures,
- Systèmes de refroidissement des réacteurs,
- Fours à arc électrique et le Fluor, développés sur la base des travaux d'Henri Moissan (1906).
- Piles à combustible qui sont en plein développement,
- ...etc.

Ces pièces et composants sont illustrés dans la figure II-1

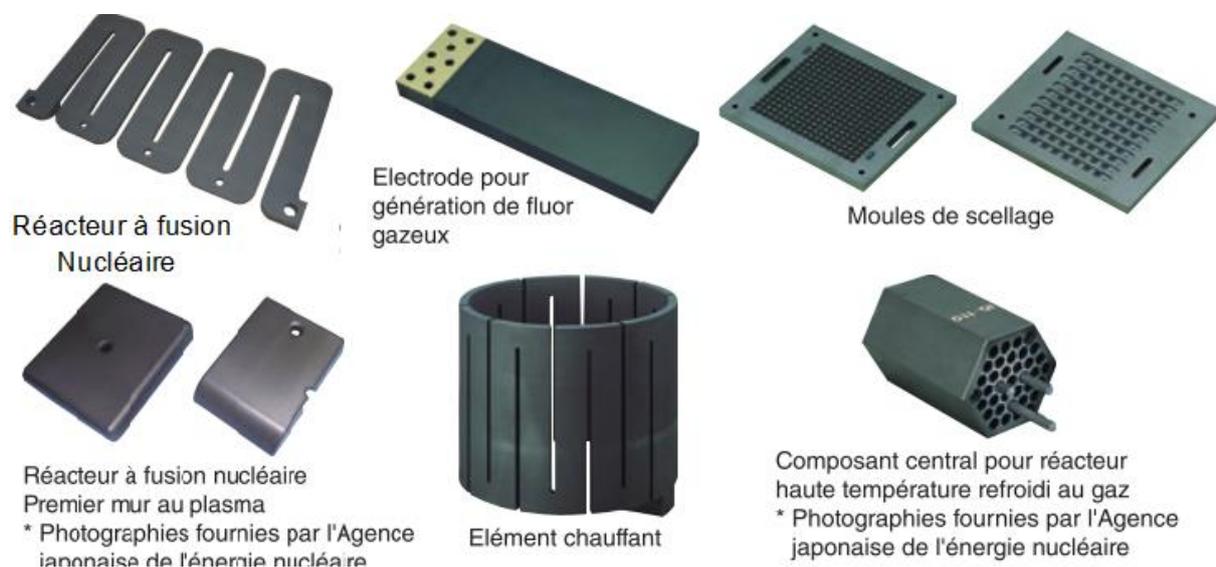


Fig. II-1 Application utilisés dans de nombreux domaines

Environnement et énergie

Augmenter la productivité et assurer des produits de meilleure qualité sont aussi les autres défis des fabricants et l'usinage à grande vitesse (UGV) leur permet de les relever. Aider en cela par le développement de logiciels de conception assistée par ordinateur (C.A.O) et ceux de fabrication assistée par ordinateur (F.A.O.).

Pour les spécialistes de la fabrication, il s'agit donc de bien adapter les nouvelles approches lors de la génération des lignes d'usinage et faire le bon choix des outils à utiliser pour arrêter la stratégie d'usinage et surtout atteindre les objectifs de l'usinage en terme de qualité de produit.

A mon sens, le principal problème vient de la diversité industrielle des paramètres proposés par les programmes F.A.O. Le travail proposé dans ce mémoire est basé sur un modèle stratégie d'usinage personnalisé, il ne prend pas en compte les programmes F.A.O existants.

Aussi les stratégies d'usinage doivent tenir compte des cinématiques d'actions des machines outils et les possibilités offertes dans leurs actions combinées. C'est ainsi que l'ingénierie de fabrication doit mettre tout en œuvre pour faire le bon choix de l'équipement nécessaire à toute fabrication de surfaces et pièces complexes.

L'utilisation de moyens de production et la tentative de maîtriser les outils du numérique spécifiques à la fabrication en notre possession que j'ai abordé la problématique de la fabrication d'un grand moule en acier spécial pour réaliser aussi des pièces en graphite destinées au refroidissement de réacteurs. Ce choix est motivé par la grandeur de la pièce ou moule et aussi par l'acier spécial, acier utilisé dans la fabrication des moules destinés à l'obtention des pièces par la métallurgie des poudres (frittage,...etc.).

Les moules sont généralement fabriqués en acier qui garde sa haute résistance mécanique à la haute température, leur fabrication exige l'emploi des outils de coupe de haute performance, de coût élevé et des machines outils à commande numérique adaptées.

Après avoir choisi la pièce en graphite à fabriquer, j'ai conçu son moule en acier spécial. La conception de ce dernier s'est déroulée suivant les étapes de constitution de la forme, de dimensionnement, de calculs et surtout de réflexion sur sa fabrication, son routage d'usinage et les moyens mis en œuvre pour sa réalisation.

Les objectifs recherchés à travers cette étude sont :

- la maîtrise des projets de conception et de réalisation de composants mécaniques,
- le bon choix et les bonnes cibles bibliographiques à étudier dans le cadre de projets (surfaces et pièces complexes, moulage issu de la métallurgie des poudres, matériaux durs à usiner, usinage et fraisage long, outils et machines spécifiques,...etc.).
- la réduction du temps de réalisation en gardant un œil sur la productivité et le respect de la qualité par l'élaboration de la meilleure stratégie d'usinage.

C'est ce dernier objectif qui constitue la principale étude dans ce travail. L'intérêt de cette recherche réside à optimiser le temps de coupe et par conséquent améliorer la productivité et le coût final de fabrication qui sont, de nos jours, des exigences technico-économiques importantes. La recherche de l'optimum technico-économique en fraisage des grandes ébauches doit passer par la recherche d'une bonne génération de la trajectoire de l'outil et d'une bonne stratégie d'usinage. Cette étape d'étude, dans notre cas, consiste donc à présenter différentes stratégies d'usinage, de calculer les temps de fabrication pour chacune d'elles tout en augmentant la durée de vie des outils utilisés et effectuer par la suite une comparaison technico-économique des temps d'usinage et d'en tirer l'optimal.

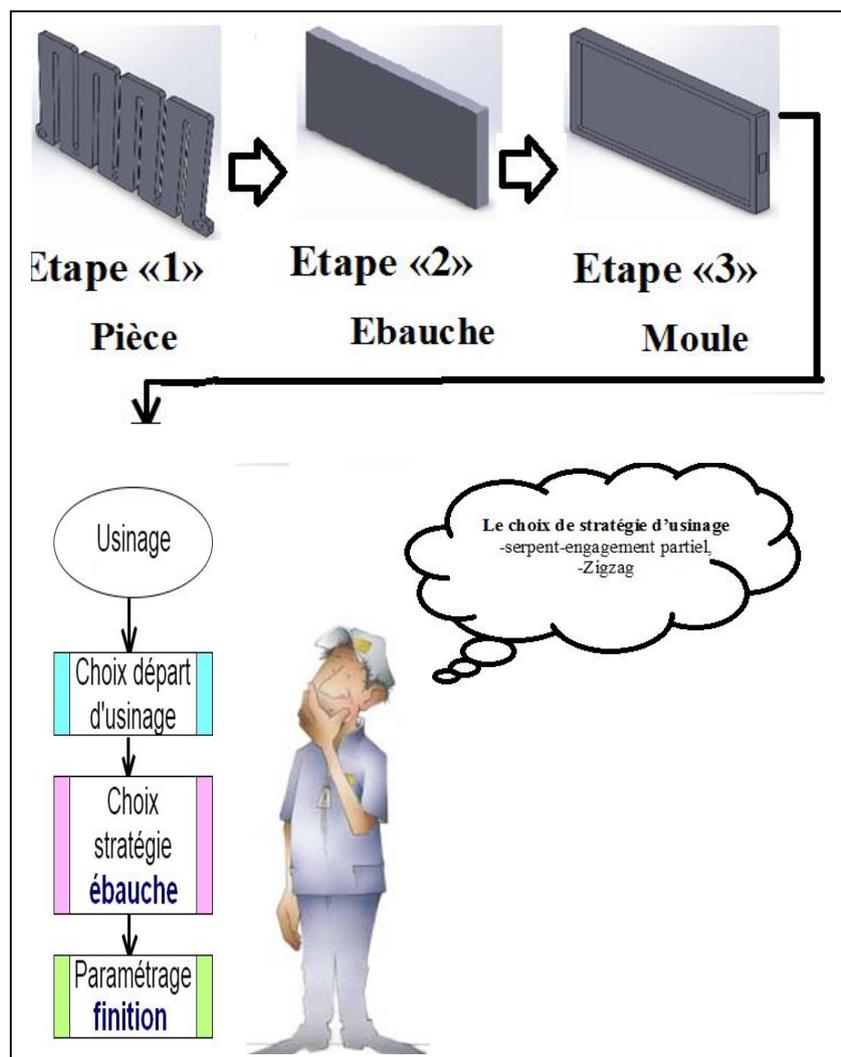


Fig. II.2 : Schéma des étapes à mener d'étude, de conception  
Et de réalisation du moule.

Comme on voit sur ce schéma, la première étape consiste à étudier la pièce en graphite utilisée pour le refroidissement des réacteurs nucléaires. La reconstitution de cette pièce, à partir d'images, nous a permis de la dessiner à l'aide du logiciel Solidworks et de la dimensionner.

La deuxième étape est réservée à l'étude de l'ébauche ou brut de moulage en graphite, à ses calculs de surépaisseurs à réserver à l'usinage, à la dépouille et à l'établissement de ses dimensions.

La troisième étape est la conception du moule en acier avec la détermination des surépaisseurs, la mise en place d'une dépouille pour l'extraction facile de la pièce brute après moulage et les moyens de sa manutention, ...etc.

Les étapes d'après sont destinées au façonnage et à la fabrication du grand moule en acier avec toutes les exigences technico-économiques. Ces ultimes étapes englobent le routage d'usinage, le choix des moyens d'usinage (outils de coupe et machine-outil), la mise en œuvre d'une stratégie d'usinage optimale qui représente un objectif primordial dans ce projet.

### II. 3. Enjeux

Dans un premier temps et en recherche bibliographique nous avons présenté les travaux réalisés autour de la thématique traitée en particulier sur les matériaux de la pièce et du moule (graphite et acier dur); sur les techniques de moulage et sur l'usinage dur.

La seconde partie, contenue dans ce chapitre, est réservée à la définition du processus d'élaboration, de la conception de pièces, de la technique de moulage, de l'ingénierie du moule. Un ensemble de définitions sont présentées ainsi qu'un ensemble de paramètres liés à cette démarche sont fixés et arrêtés aussi dans cette partie.

La troisième partie de ce mémoire se focalise sur la fabrication du moule et sa gamme d'usinage. Les travaux de cette partie s'appuient particulièrement sur l'intégration des performances cinématiques de l'ensemble machine-outil et aussi sur la simulation WinCAM.

Une quatrième partie est consacrée à la détermination de paramètres nécessaires à l'établissement d'une stratégie performante suivant un critère cinématique afin de minimiser le temps d'usinage tout en garantissant un niveau de qualité acceptable.

### II .3 . Pièces de formes complexes

Dans l'industrie, il existe des pièces de formes complexes possédant différentes fonctions. En effet nous avons tout d'abord les produits finis résultant d'opérations d'usinage tels que les aubes de turbine ou les pièces aéronautiques fabriquées avec des poches complexes.

Ensuite, le domaine de l'outillage est aussi un grand consommateur de formes complexes. Aussi, les matrices d'emboutissage, les moules d'injection, les poinçons à petites cavités et l'outillage peuvent être classés dans la catégorie des pièces de formes complexes.

Les matrices d'emboutissage sont considérées comme telles parce qu'elles sont composées de formes tendues décrites par des surfaces obtenues par modèle polynomiaux.

Les moules d'injection et les poinçons rentrent aussi dans cette catégorie non pas par le format de description de leur géométrie mais plutôt par la topologie de leur surface. Enfin l'outillage de forges possède tous des cavités de formes et de tailles différentes. Ainsi leur topologie est plutôt qualifiée de compliquée, c'est pourquoi ils font parties des pièces de formes complexes [16].

## II. 4. Ingénierie du moule

### II. 4. 1. Conception de pièces moulées [16]

**A. Principe du moulage :** Obtention des pièces par des coulées et solidification d'un métal ou d'un alliage, dans une empreinte appelée "moule".

Il existe 2 types de moule :

- ✓ Le moule non permanent ou moule destructible, typique au "moulage en sable".
- ✓ Le moule permanent, typique au "moulage en coquille" qui se réalise soit par gravité, soit sous pression.

**B. Choix d'un procédé de moulage.** Les critères de choix d'un procédé de moulage sont :

- Caractéristiques mécaniques exigées,
- Nombre de pièces à exécuter,
- Précision dimensionnelle imposée,
- Etat de surface exigée,
- Complexité des formes et poids,
- Délais de fabrication envisagés.

A titre indicatif, le tableau suivant montre les critères pour le choix d'un procédé de moulage.

Type de moulage	Série	IT	$R_a$
Sable	petite	$\pm 0,5$	12,5
Coquille par gravité	moyenne	$\pm 0,3$	3,2
Coquille sous pression	grande	$\leq 0,1$	1,6
Carapace ou Croning	grande	$\pm 0,3$	0,8
Cire perdue	très grande	$\pm 0,03$	1,6

**C. Le moulage en sable :** procédé destiné aux pièces de grandes dimensions

**D. Choix de l'alliage**

Tous les métaux et alliage ayant un point de fusion élevé sont aptes au moulage.

Outre ce critère d'aptitude au moulage, il y a aussi :

- Le prix de revient de la pièce
- Les propriétés spécifiques recherchées
- La caractéristique mécanique imposée

**II. 4. 2. Dimensionnement du moule**

**a) Calcul de l'épaisseur coupée h en fonction des conditions de coupe**

L'épaisseur coupée est la distance normale à la surface générée par l'arête de coupe entre deux dents successives. Parmi les différentes méthodes de calcul de l'épaisseur coupée, il y a la méthode qui se rapproche le plus de la définition et c'est cette méthode qui est utilisée dans notre cas. Les méthodes rapprochées ont l'avantage d'être plus rapides dans les calculs mais elles introduisent des approximations de calculs qui pourraient être de l'ordre des grandeurs des différences recherchées dans les configurations de finition.

Coefficients de sécurité  $C_s = 5$

Résistance à la compression perpendiculaire au grain = 70 Mpa

Force de compression varie entre [28 ó 280] Mpa

On a pris : F compression = 65 Mps

$$= 9.81$$

$$h = 940$$

$$[ ] \times x C_s$$

$$= F/S$$

$$F = F_p + F_{\text{compression}}$$

$$S = 940 \times L$$

$$70 \times 5 \times 126 / 126 \times h$$

$$350 \times 940 \times h \times 126$$

$$h = 126 / 131600$$

**b) Formes et dimensions de l'ébauche en graphite**

C'est l'ébauche qui sert à la fabrication de la pièce de refroidissement du réacteur.

Les croquis qui suivent montrent la forme et les dimensions du brut de moulage et celui corrigé par usinage.

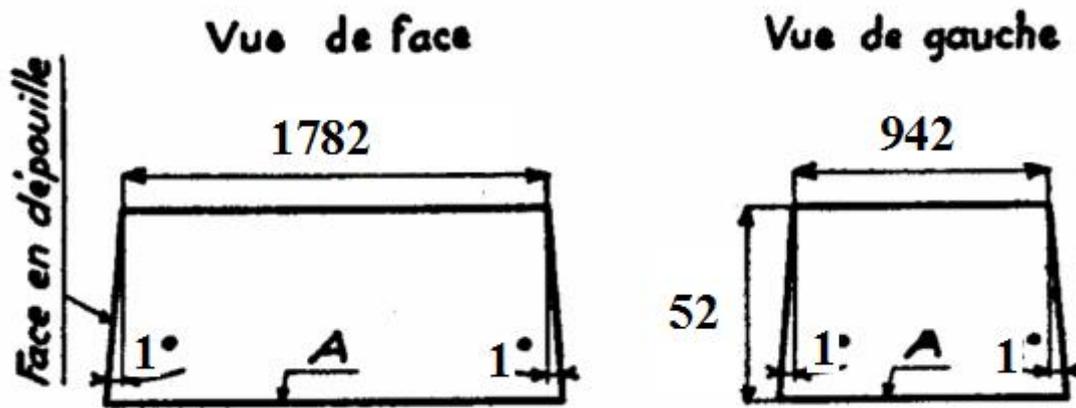


Fig. II.3 : Forme et dimensions de l'ébauche brute après démoulage [18]

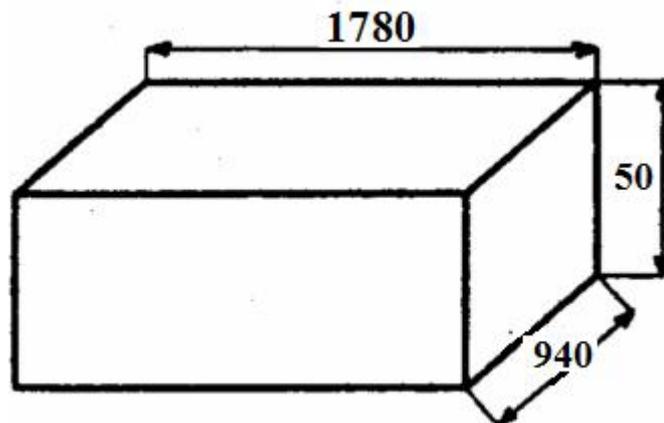


Fig. II.4 : Forme et dimensions de l'ébauche après correction

Des cotes par usinage [17]

**Surépaisseur d'usinage ou de correction de cotation :**

La pièce brute comporte des surépaisseurs de 2mm environ qui seront enlevées par usinage, avec 1 mm par face d'ébauche.

➤ Les dimensions de ces surépaisseurs sont donc :

Longueur :  $1780 + (0 \times 1) = 1780 \text{ mm}$

Largeur :  $940 + (0 \times 1) = 940 \text{ mm}$

Hauteur :  $120 = 120 \text{ mm}$

### c) Angle de dépouille

Afin de pouvoir dégager l'ébauche du moule, il est nécessaire de prévoir des dépouilles d'un angle de  $1^\circ$ .

Avant d'effectuer le tracé définitif de la pièce à mouler (ébauche en graphite), il est impératif de respecter quelques règles [17;18]:

- ⇒ La pièce doit présenter une épaisseur aussi uniforme que possible,
- ⇒ Si on ne peut éviter les différences d'épaisseurs, celles-ci doivent se faire aussi régulièrement que possible,
- ⇒ Eviter le raccordement en croix des épaisseurs ou creuset afin d'éliminer une masse de matière,
- ⇒ Eviter la déformation des grandes surfaces planes en les renforçant par des nervures,
- ⇒ Choisir d'assurer la rigidité et la résistance d'une pièce par l'emploi de nervures plutôt que par des sections importantes.

### d) Epaisseur des parois du moule (en acier)

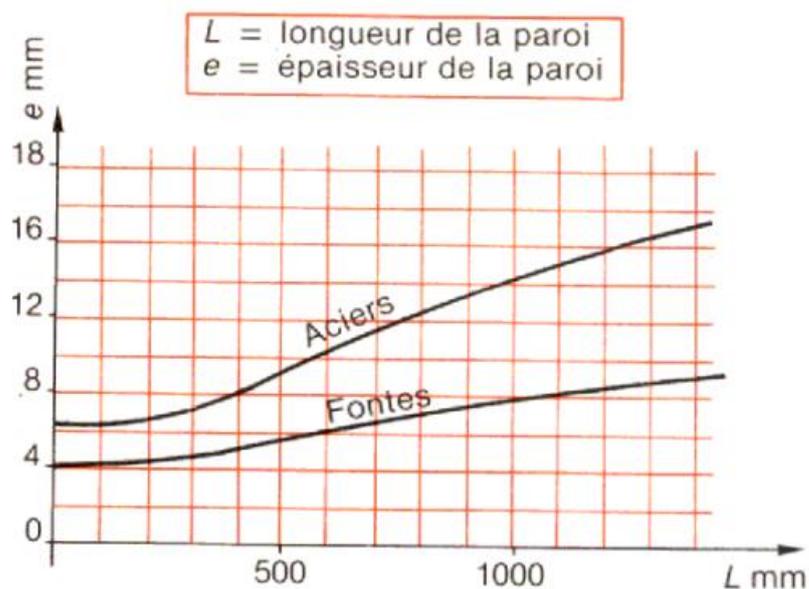


Fig. II.5 : Epaisseur des parois ó cas du moulage en sable [17]

L'épaisseur de la paroi du moule à concevoir, selon ce graphique, doit être  $\times$  à 18 mm.

e) Rayons du moule (en acier)

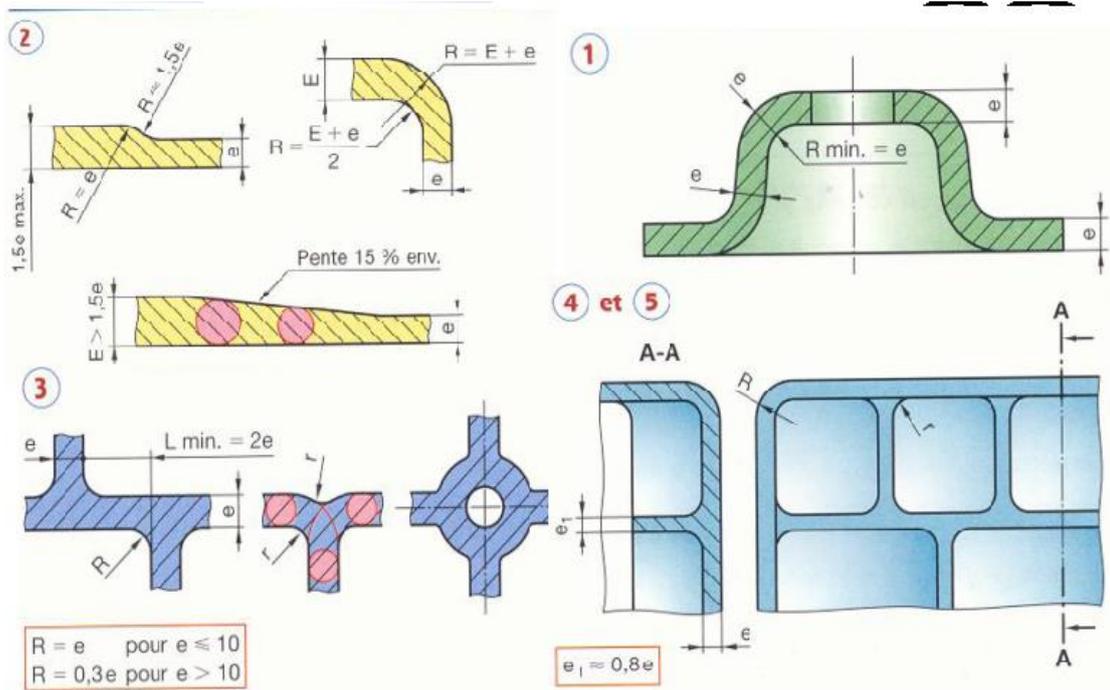


Fig. II.6 Illustrations des rayons et des pentes de moules [17]

Pour des raisons pratiques et surtout de résistance, l'épaisseur de la paroi du moule à

Concevoir doit être  $e = 70$  .

Selon la formule empirique, les rayons du moule doivent être :

$$R = 0.3 \times 70$$

$$R = 21 \text{ mm}$$

### II. 4. 3. Comportement du moule à la pression du moulage

Dans le but de valider la conception du moule on a décidé de simuler le comportement du moule et ses déformations lors de sa mise sous pression.

La charge considérée est la force appliquée qui est égale à la force de pression de moulage  $F_p$  augmentée du poids propre de l'ébauche P ou masse de graphite remplissant le vide.

Avec :  $F_p = 65 \text{ Mpa}$  .

$$V = L \times l \times e$$

$$m = V \times \rho_{\text{hou}}$$

$$m = 181.026 \text{ Kg}$$

$$F = m \times g$$

$$F = 1775.68 \text{ N}$$

$$= F / S$$

$$= 1775 / 1602000$$

$$= 0.01 \text{ Mpa}$$

Afin qu'ABAQUS maille correctement, il faut partager le modèle en plusieurs éléments et ce en raison des géométries complexes telles que la dépouille, les rayons, etc.

L'élément choisi est le tétraèdre quadratique C3D10 A10 et la taille de l'élément est 75 ;

La décomposition en éléments nous donne la configuration présentée à la figure II.7.

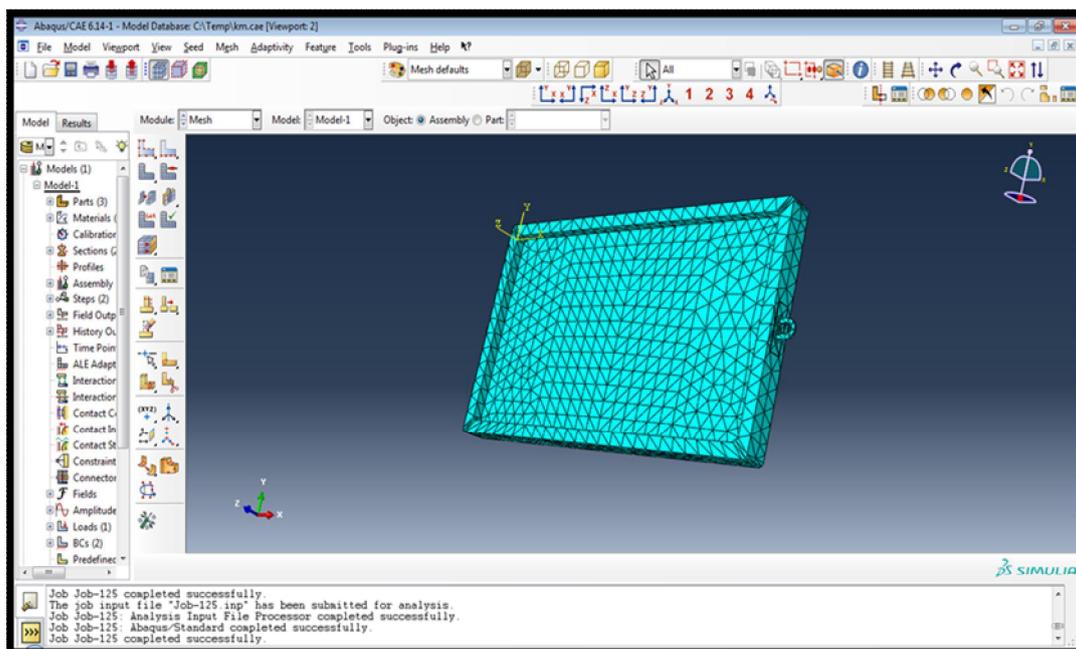


Fig. II.7 : Maillage du moule

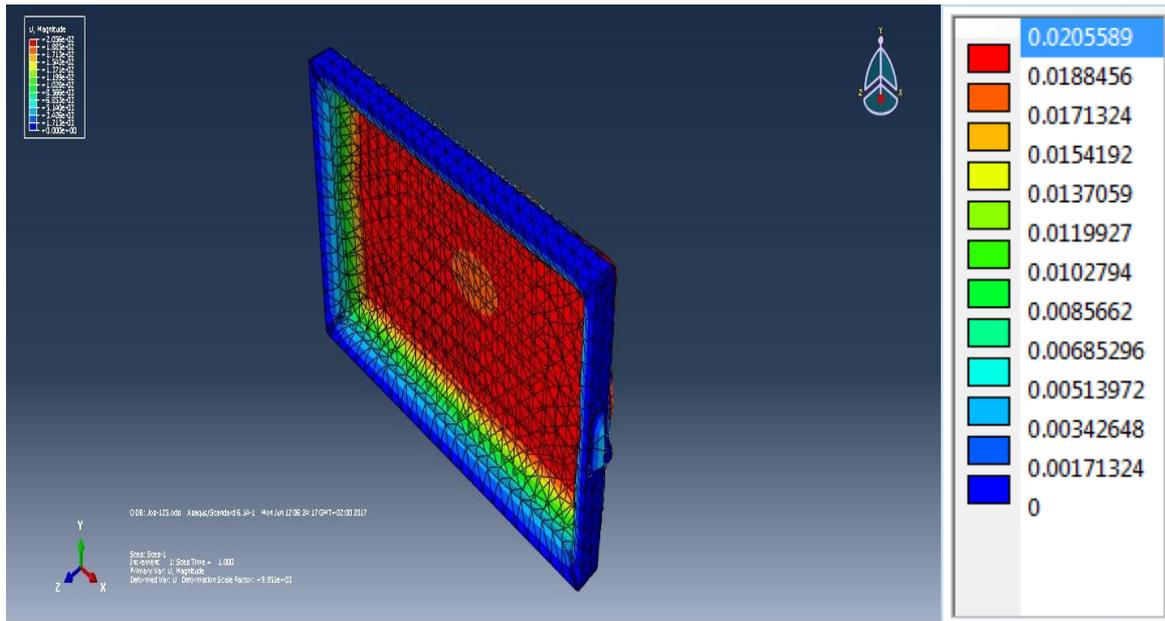


Fig. II.8 : déformation du moule

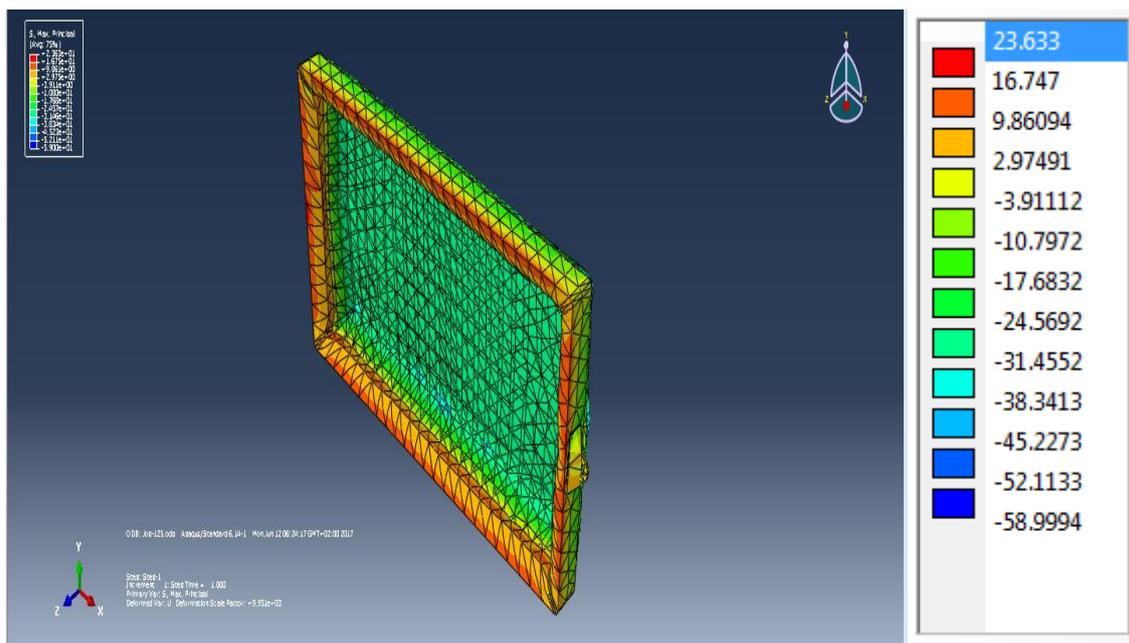


Fig. II.9 : contrainte maximale (s max)

Comme on voit sur les figures II.8 et II.9, après chargement du moule par la pression de moulage, celui-ci subit une déformation de 0.02 mm au centre de son fonds et des contraintes maximales de 23.6 Mpa sur ses bordures.

## II.5. Conclusion

La problématique autour duquel oscille notre travail est de façonner un moule en acier à haute résistance thermique pour l'élaboration d'une pièce brute en graphite destinée à la fabrication d'une pièce, toujours en graphite, composant un système de refroidissement d'un Réacteur nucléaire.

Pour sa fabrication, nous avons adopté l'usinage qui est une technique de fabrication par enlèvement de matière.

Dans ce chapitre, après étude de la pièce de refroidissement en graphite et son brut, on a présenté toute la conception du moule en acier.

Une simulation numérique a été aussi établie sur logiciel « Abaqus » afin de valider la conception et montrer la faisabilité du moule conçu.

# **CHAPITRE III**

## **GAMME D~~Ø~~USINAGE**

### III.1. Gamme d'usinage

La gamme d'usinage est la suite des opérations à réaliser pour passer de la pièce brute à la pièce finie. Dans le domaine automobile, beaucoup de pièces brutes sont quasiment toujours réalisées en fonderie afin de limiter le volume de matière à enlever. Une surface finie est rarement obtenue en une seule opération.

Généralement, on effectue trois, voire quatre passes pour l'obtenir. Par ordre chronologique, ces opérations sont :

- ❖ l'ébauche (appelée aussi dégrossissage),
- ❖ la semi-finition,
- ❖ la finition,
- ❖ la super-finition.

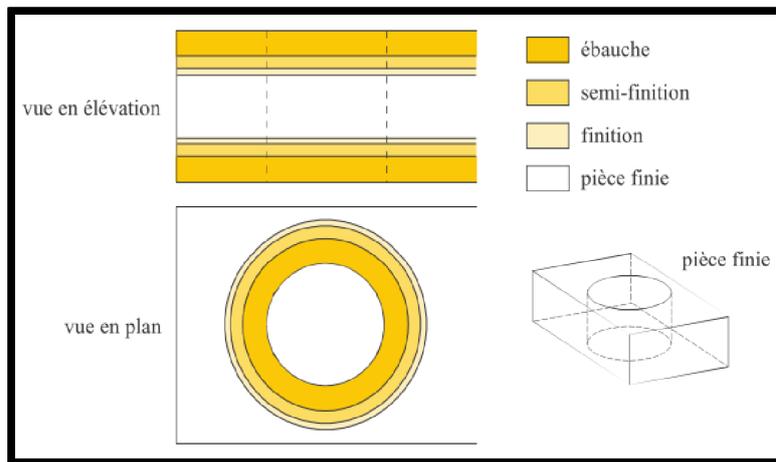


Fig. II.1 : Exemple de gamme - les faces supérieure et inférieure et l'alésage sont usinés

Pour définir les engagements pour chaque passe, on utilise la technique des chaînes de cotes. Elle consiste, à partir de la pièce finie, à considérer les opérations dans le sens anti-chronologique, en déterminant pour chaque opération l'engagement en fonction de certains critères bien définis (état de surface, type d'usinage, intervalle de tolérance,...etc).

Une pièce brute réalisée en fonderie présente une couche externe, appelée croûte de fonderie, qui est due à l'oxydation du métal et à la diffusion du matériau du moule dans le métal. L'épaisseur de cette couche de silice est très abrasive et use rapidement les outils et, d'autre part, le métal oxydé est difficile à usiner.

Lors de l'ébauche, on doit donc couper une épaisseur de matière telle que toute la matière polluée soit enlevée. Pour déterminer l'engagement en ébauche, il faut prendre en compte

l'épaisseur de matière polluée et les variations possibles du positionnement de la pièce, qui dépendent des incertitudes sur la forme de la pièce brute.

L'engagement est souvent très grand, entre 2 et 4 mm environ, de même que l'avance. Dès lors, les forces de coupe générées lors de l'ébauche sont très élevées, ce qui produit une surface de mauvaise qualité, tant du point de vue de la forme que du point de vue de l'état de surface.

Pour respecter les tolérances (forme et rugosité) imposées sur la surface finie, on doit, dans la plupart des cas, réaliser une ou deux passes supplémentaires pour obtenir la précision voulue, ce qui correspond aux passes de semi-finition et de finition.

Lorsqu'il faut obtenir un très bon état de surface, on doit effectuer une passe de superfinition. Pour exécuter celle-ci, on fait appel à des techniques d'usinage particulières comme le rodage ou la rectification. C'est le cas des fûts de cylindres dont la surface est obtenue par honage (action de rayer les parois afin de faire adhérer l'huile).

Outre la définition des engagements, la définition de la gamme inclut également, pour chaque opération, le choix :

- ❖ de la machine-outil et de l'outil,
- ❖ de la prise de pièce,
- ❖ des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance,  $f$  )
- ❖ de la trajectoire de l'outil.

### III.2. Conception de gammes d'usinage

- Outils d'aide à la conception :

Pour effectuer leur travail, les concepteurs de gammes d'usinage s'appuient sur des logiciels de CFAO comme CATIA/DELMIA ou PRO-ENGINEER.

Ces logiciels intègrent depuis quelques années des modules spécifiques à la fabrication. A partir d'une maquette numérique de la pièce, toutes les tâches classiques comme la création de chaînes de cotes ou l'écriture de programmes machines sont automatisées, ce qui allège considérablement le travail des fabricants.

Cependant, ces logiciels ne reflètent pas le comportement réel de l'usinage car ils sont limités à un concept très restrictif : le système pièce-outil-machine est infiniment rigide.

Or, la flexibilité du système est la cause de deux problèmes majeurs :

- les déviations géométriques des surfaces usinées par rapport aux surfaces nominales,
- les problèmes de vibration.

Concevoir une gamme sans intégrer ces deux problèmes représente toujours un risque. En pratique, les gammes sont toujours validées expérimentalement avant de lancer la production. Cette phase de test est réalisée sur des préséries.

Elle demande beaucoup d'investissements en temps et en moyens : réaliser les pièces brutes et les éléments du montage, usiner les pièces, contrôler les surfaces, etc. En cas de non-conformité, il faut alors modifier la gamme, voire même modifier la conception de la pièce, ce qui allonge énormément les temps de mise au point.

L'intégration des erreurs géométriques et des aspects dynamiques dans la chaîne de CFAO permet de limiter fortement le risque de mauvaises conceptions.

La prévision des erreurs géométriques et des problèmes d'instabilités dynamiques a pour but de régler au mieux les opérations et la conception de la pièce. Au niveau de la conception de la pièce, le bureau des méthodes peut proposer des modifications au bureau d'études afin d'améliorer les propriétés de la pièce d'un point de vue usinage : rigidifier certaines zones, modifier les zones de bridage, etc. Pour une opération d'usinage, les trois paramètres sur lesquels on peut jouer sont :

- la prise de pièce,
- l'outil et sa trajectoire,
- les conditions de coupe.

La prise de pièce est un des aspects les plus critiques dans la conception d'une gamme d'usinage les efforts de serrage doivent être suffisamment importants pour empêcher la pièce de bouger.

Par contre, il faut éviter au maximum de déformer la pièce pour ne pas engendrer un défaut de forme trop grand lors de l'usinage. Satisfaire ces deux exigences n'est pas toujours simple, surtout si la pièce est relativement souple.

Le rôle du bridage est aussi de limiter les déformations de la pièce durant l'usinage.

Théoriquement, plus les points d'appuis de la pièce sont nombreux, plus elle est rigide, ce qui est bénéfique tant pour les erreurs de la surface que pour les problèmes de vibrations. Cependant, en pratique, on doit limiter le nombre de supports car les surfaces d'appui ne sont jamais parfaites et la multiplication des supports risquerait de déformer la pièce lors du serrage. Il faut donc trouver les zones d'appuis les plus appropriées en testant plusieurs configurations du bridage.

Le choix de l'outil et de sa trajectoire est aussi un aspect très important, spécialement en fraisage où l'on a une grande latitude sur les paramètres : diamètre, nombre de plaquettes,

trajectoire centrée ou non, direction de déplacement, trajectoire complexe (plusieurs segments rectilignes et circulaires).

En tournage et en alésage par contre, il y a moins de choix possibles, notamment pour la trajectoire.

Enfin, le choix des conditions de coupe est fortement lié au choix de l'outil et on a donc moins de liberté sur ces paramètres.

Le problème des erreurs géométriques ne se limite pas aux opérations de finition.

Il arrive très souvent qu'une surface soit usinée afin de servir de surface d'appui pour une opération ultérieure.

En effet, pour les passes de finition, on évite généralement de s'appuyer sur des surfaces brutes car celles-ci ne permettent pas un positionnement précis et une fixation optimale de la pièce à cause de leur trop grandes déviations géométriques (cote, forme,...etc).

Pour obtenir un bon résultat, une surface d'appui doit aussi satisfaire des tolérances, même si ce n'est pas une surface finie de la pièce.

Dans ce cas, ce ne sont plus des tolérances imposées par le bureau d'études mais des tolérances de fabrication.

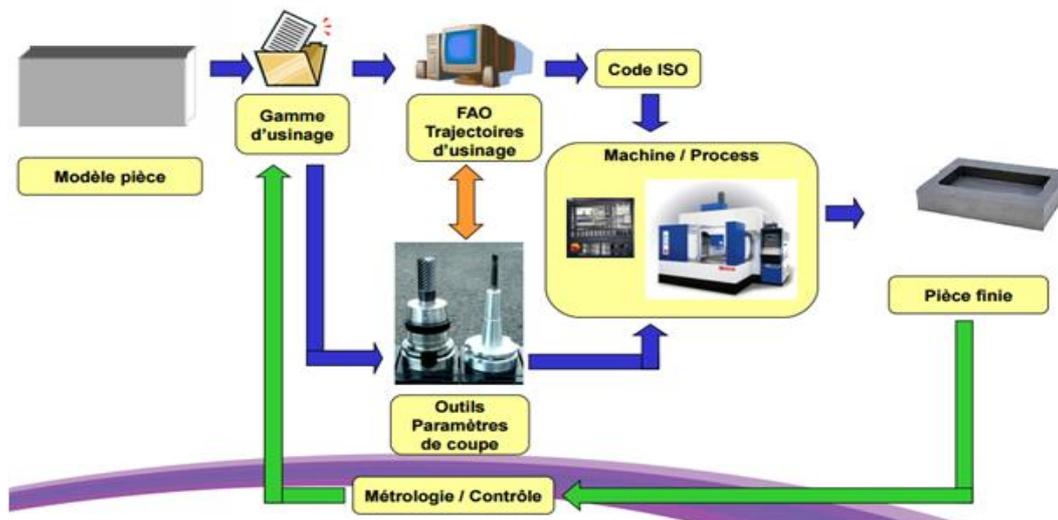


Fig. II.2 : Processus de fabrication d'une pièce mécanique

### III.3. Fraisage

Une fraise présente plusieurs dents ou plaquettes qui travaillent simultanément. Il existe une grande variété d'opérations de fraisage (figure III.3) et de types de fraises (figure III.4) [18].

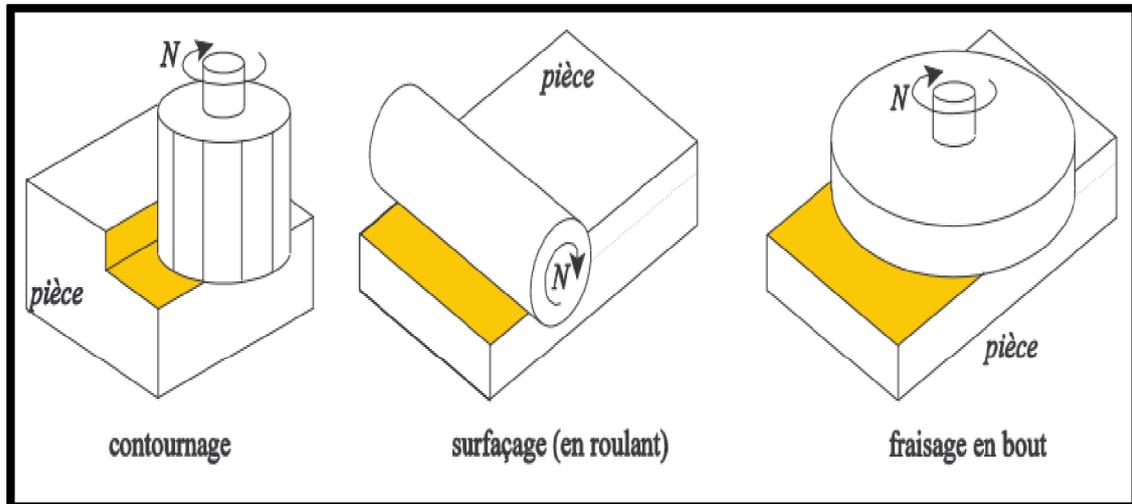


Fig. III.3 : opérations de fraisage; les surfaces usinées sont coloriées en jaune

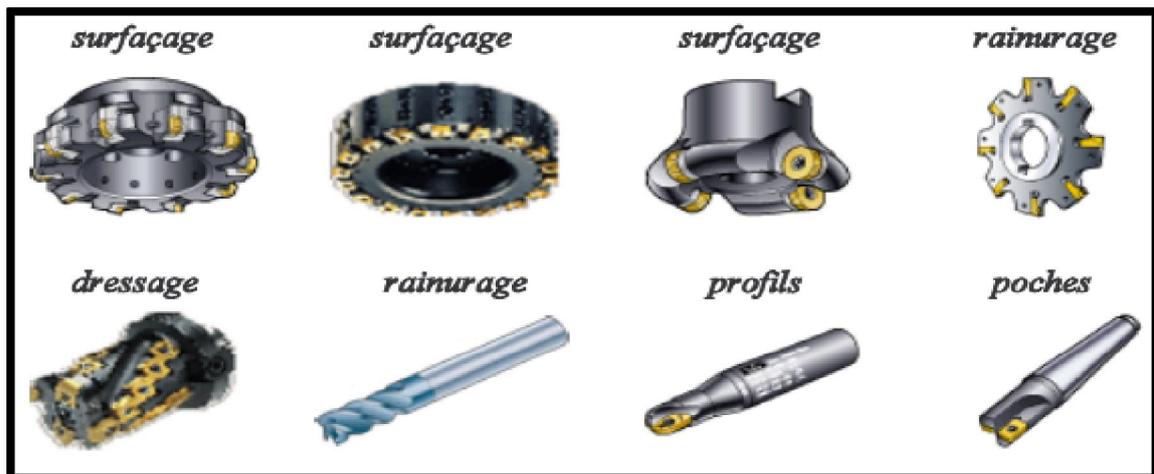


Fig. III.4 : types de fraises [18]

En fraisage, la rotation de l'outil est assurée par la broche de la machine-outil. La vitesse de coupe dépend de la fréquence de rotation de la broche  $N$  et du diamètre de la fraise  $D$

$$V = D \times N$$

La vitesse d'avance est liée à la fréquence de rotation, à l'avance par dent  $Fz$  et au nombre de dents de la fraise par  $Z$

$$V = Z \times Fz \times N$$

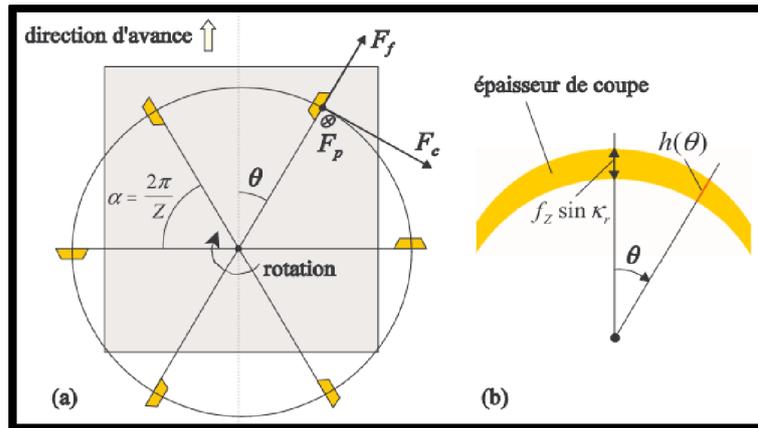
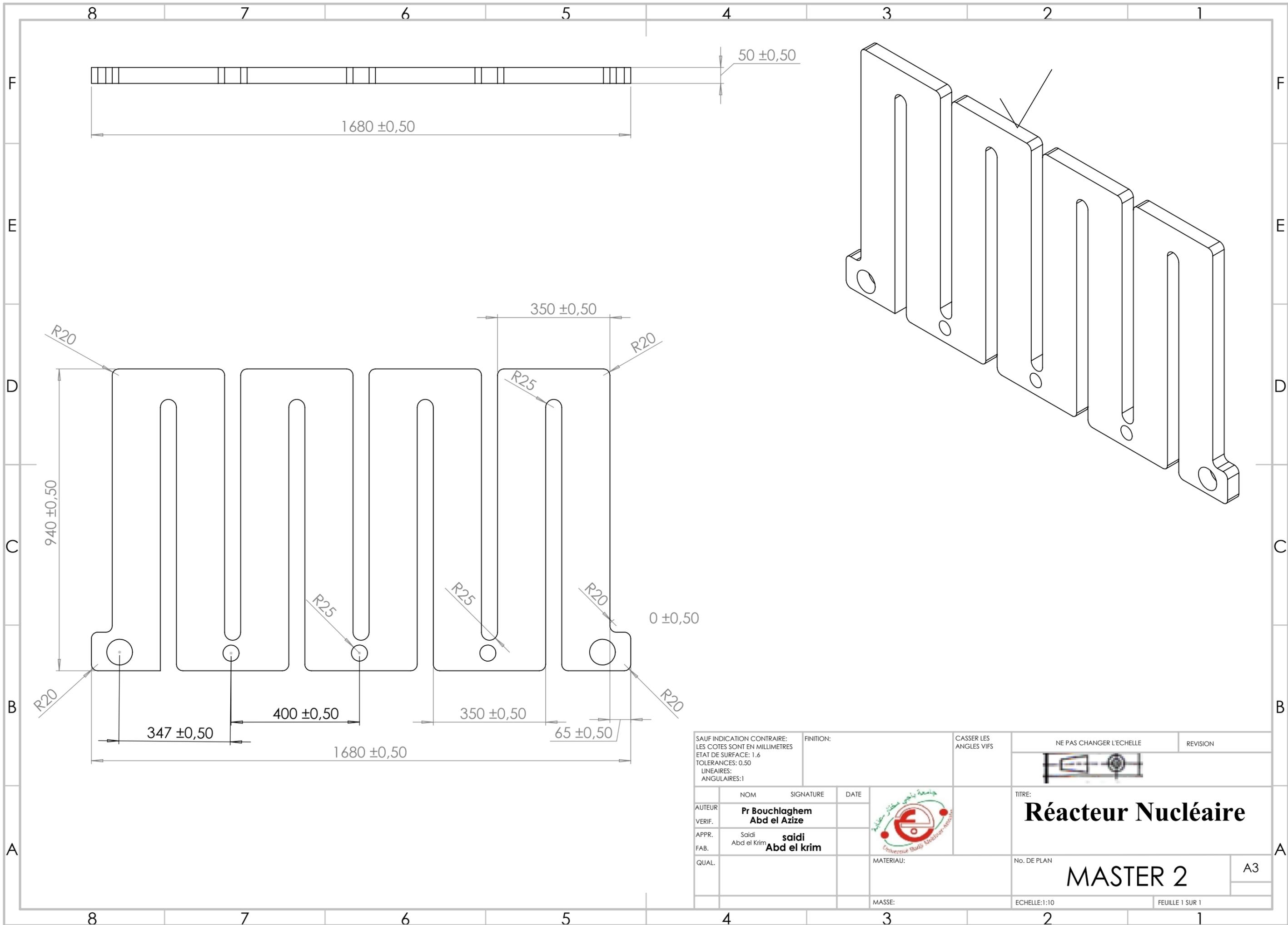
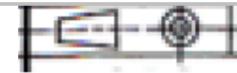
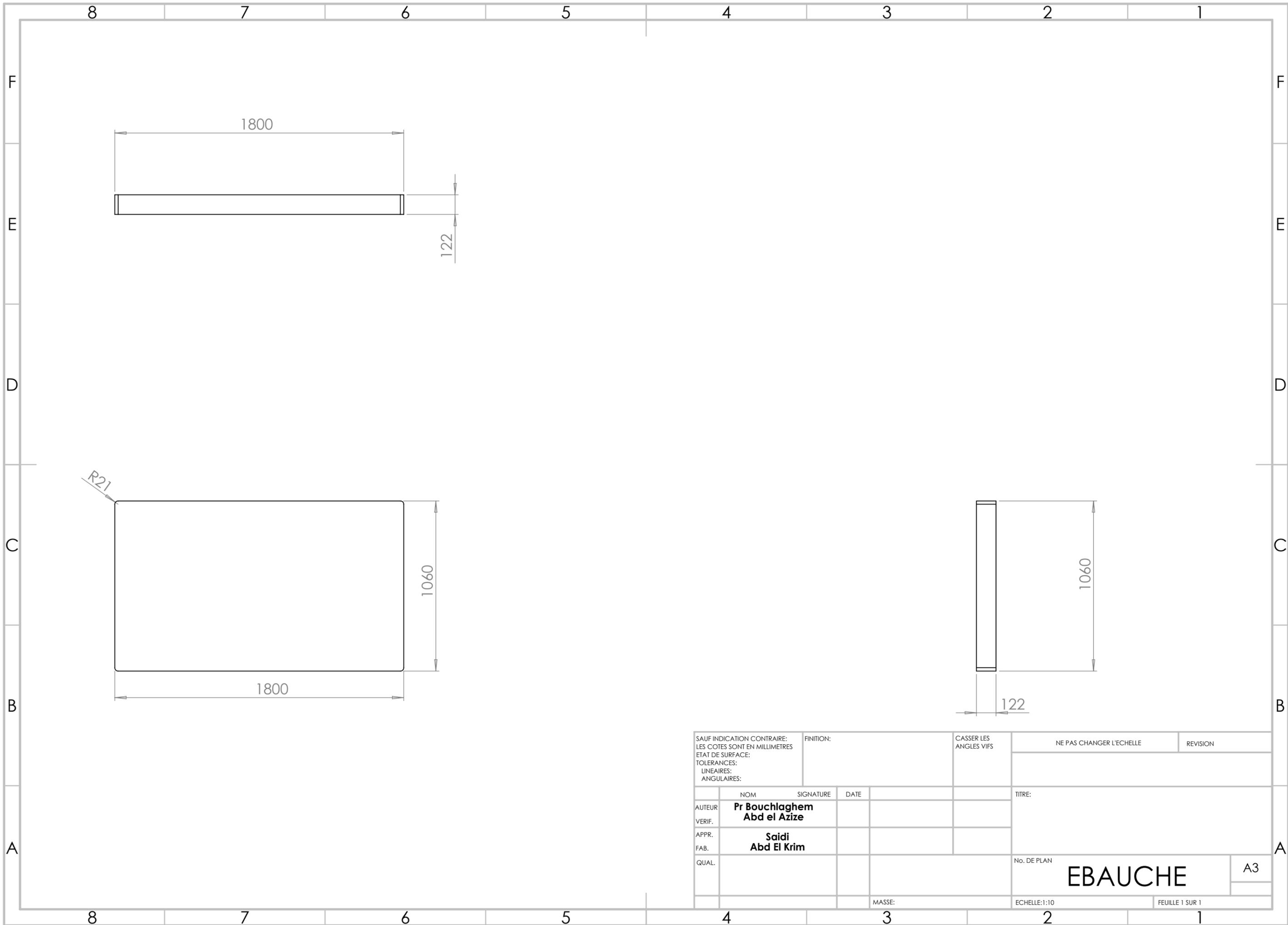


Fig. II.5 : forces de coupe en fraisage en bout (a) et épaisseur de coupe

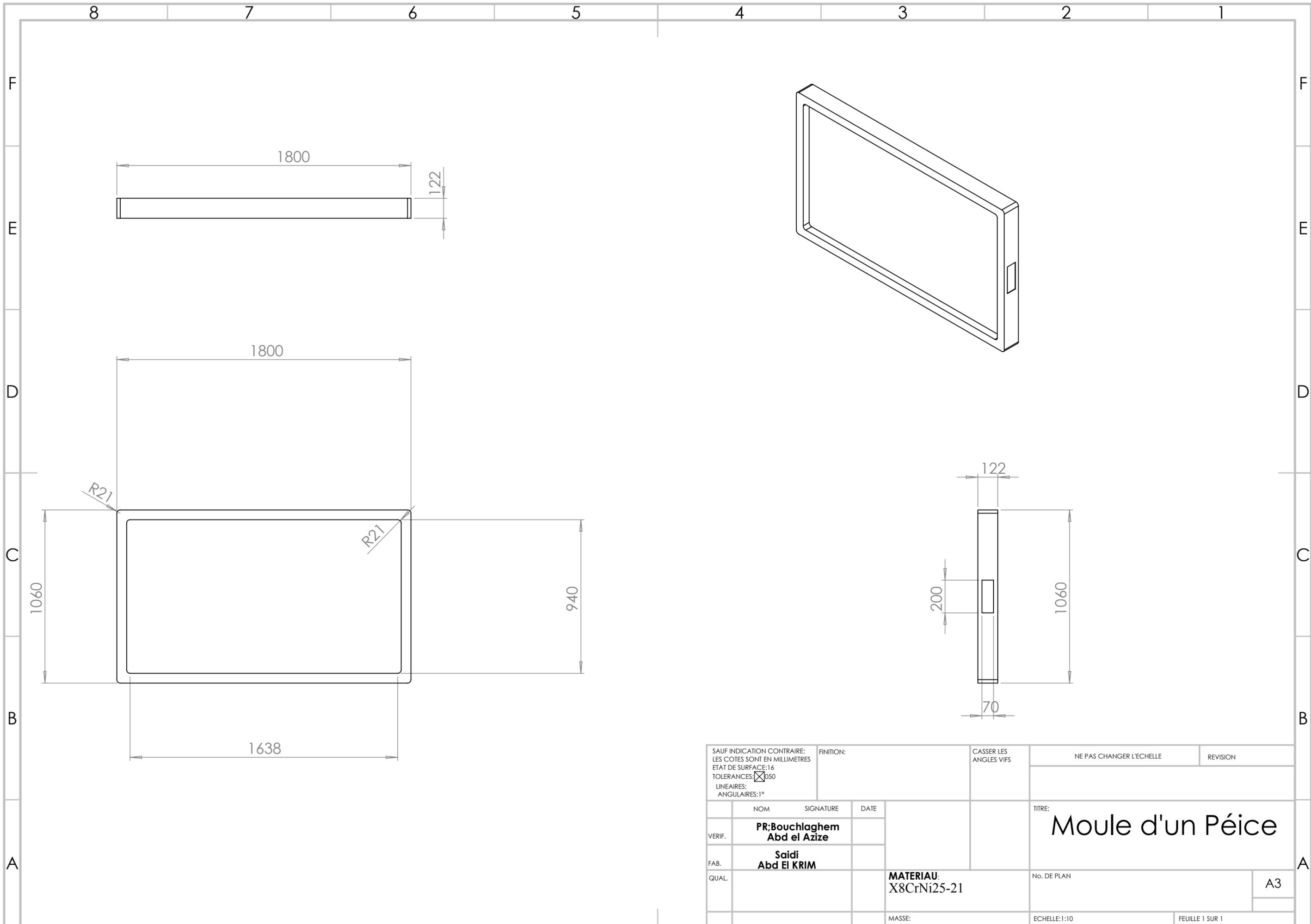
### III.4. Dessin de définition



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: 1.6 TOLERANCES: 0.50 LINEAIRES: ANGULAIRES:1		FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
AUTEUR VERIF.		NOM <b>Pr Bouchlaghem Abd el Azize</b>	SIGNATURE	 TITRE: <b>Réacteur Nucléaire</b>	
APPR. FAB.		Saidi Abd el Krim	<b>saidi Abd el krim</b>		
QUAL.	MATERIAU:		No. DE PLAN <b>MASTER 2</b>		A3
MASSE:		ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 SUR 1	

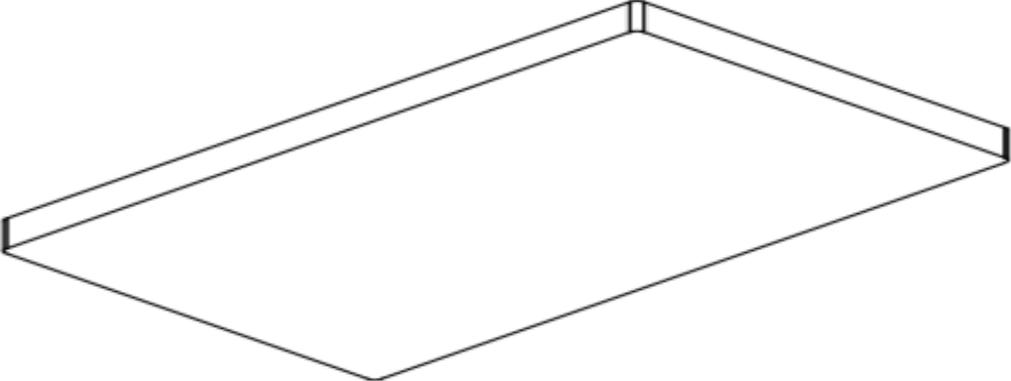


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR <b>Pr Bouchlaghem Abd el Azize</b>		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.		APPR. <b>Saidi Abd El Krim</b>		FAB.		No. DE PLAN		A3	
QUAL.		MASSE:		ECHELLE:1:10		EBAUCHE			
						FEUILLE 1 SUR 1			



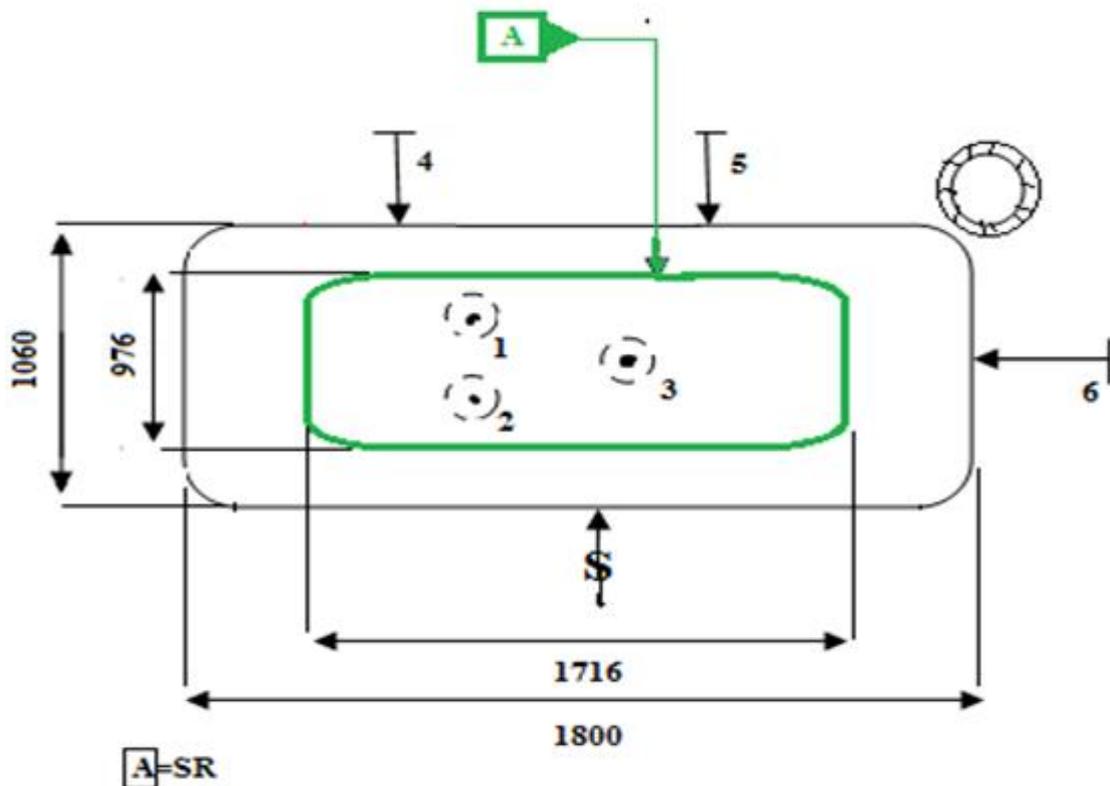
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: 16 TOLERANCES: $\pm 0.050$ LINEAIRES: ANGULAIRES: 1°		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
VERIF.		NOM <b>PR;Bouchlaghem Abd el Azize</b>		SIGNATURE		DATE		TITRE: <b>Moule d'un Péice</b>	
FAB.		Saidi <b>Abd El KRIM</b>		MATERIAU: <b>X8CrNi25-21</b>		No. DE PLAN		A3	
QUAL.		MASSE:		ECHELLE: 1:10		FEUILLE 1 SUR 1			

## III.5. Gamme d'usinage :

<b>Gamme usinage</b>  EBAUCHE	<b>Machine outil:</b>	FRAISEUSE BANC FIXE CORREA (voir Annexe 1).	
	<b>Pièce</b>	Moule	
	<b>Matière</b>	X8CrNi25 (voir Annexe2)	
<u>Sous phase 110</u> <u>Contrôle du brut</u> L=1800 l=1060 e=122	Atelier de contrôle Table vernier et pied à coulisse		
<b>Croquis de phase</b>			
			

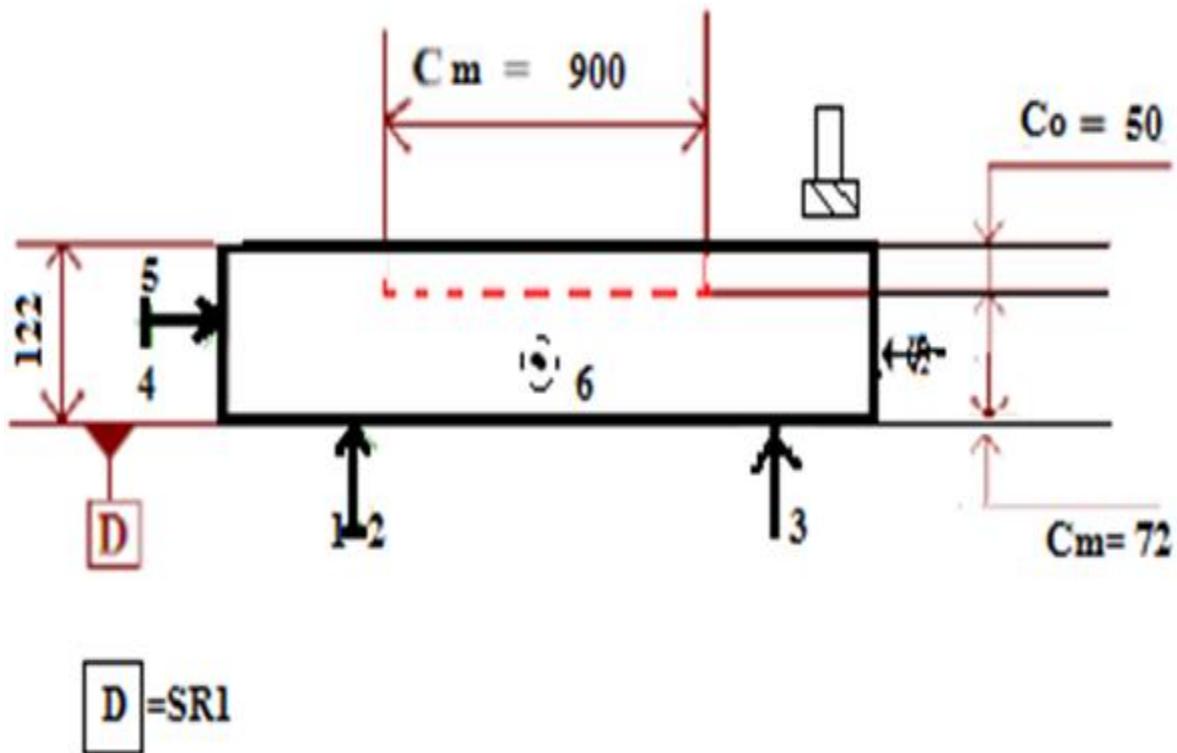
Phase	Opérations	Outils	V m/mi n	N t/min	f mm/t	f mm min	a mm	n
100	<p><u>Sous phase 120</u></p> <p><u>Surfaçage de toutes les surfaces A SR1</u></p> <p><u>Cotes de fabrications:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Cf1=1716 ± 0.50</li> <li>○ Cf2=976 ± 0.50</li> <li>○ Cf3=50 ± 0.50</li> </ul> <p><u>Référentiel de mise en position :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Appui plan SD1 point 1, 2,3</li> <li>-Appui linéaire SD2 point 4, 5,</li> <li>-Butée SD3 Point 6</li> </ul>	<p>Fraise 2</p> <p>Tailles</p> <p>T-MAX145</p> <p>Ø150</p> <p>(voir Annexe3)</p> <p>Jauge de prof</p> <p>Pied</p> <p>Coulisses</p>	200	424.62	0.125	0.2	6.4	6

croquis de la pièce



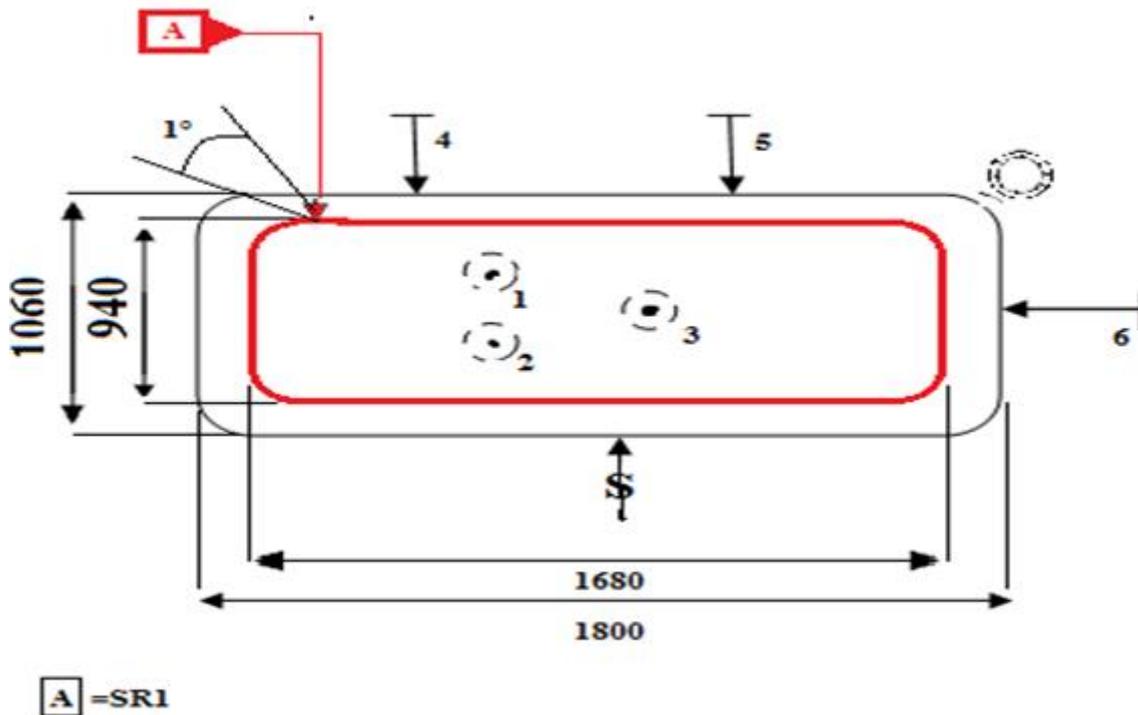
Phase	Opérations	Outils	V m/min	N t/min	f mm/t	f mm min	a mm	n
100	Sous-phase 130 en rainurage : fraisage <u>Cotes de                      fabrications:</u> ○ Cf4 = 1800 ± 0.50 ○ Cf5 = 900 ± 0.50 ○ Cf6 = 50 ± 0.50 <u>Référentiel de mise                      en position :</u> le même ablocage.	Fraise une Taille U-MAX Ø20 (voir Annexe3) Jauge de prof Pied Coulisses	100	1592.3 5	597.1 3	0.2	3.1	47

croquis de la pièce



Phase	Opérations	Outils	V m/mi n	N t/min	f mm/t	f mm min	a mm	n
100	<p><u>Sous-phase 140</u>  <u>surfaçage : (conique</u>  <u>peut du moule) des tous</u>  <u>les surfaces A SR1</u>  <u>Cotes de fabrications:</u>  <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Cf1=1680 ± 0.50</li> <li>○ Cf2=941 ± 0.50</li> <li>○ Cf3=51 ± 0.50</li> </ul> <u>Référentiel de mise en</u>  <u>position :</u>                      -Appui plan SD1 point                          1,2,3                      -Appui linéaire SD2                          point 4, 5                      -Butée SD3                          point 6</p>	Fraise Conique BOSCH Ø16 (voir Annexe3) Jauge de profondeur Pied Coulisses Equerre	100	1990	1592	0.1	3.1	57

croquis de la pièce



### III.6. Paramètres de coupe (voir Annexe3)

#### a) Fréquence rotation de la broche

$$n = ( 1000 \times V_c ) / ( 3.14 \times D )$$

#### b) Vitesse d'avance en Fraisage

$$V_f = n \times f_z \times Z$$

##### Avec

$V_c$  : Vitesse de coupe en m/min

$f$  : Avance par tour en mm/tr (tournage)

$f_z$  : Avance par tour en mm/dent (fraisage)

$V_f$  : Vitesse d'avance en mm/min

$n$  : Fréquence de rotation en tr/min (notée N dans certain livre)

$D$  : Diamètre de l'outil (fraisage)

$d$  : Diamètre de la pièce à usiner (fraisage)

$Z$  : Nombre de dent de la fraise

$a$  : Profondeur de passe

L'effort total appliqué par une dent est décomposé de la même manière qu'en tournage. La force de coupe  $F_c$  est tangentielle à la trajectoire de la dent, la force d'avance  $F_f$  est exercée selon la direction radiale et la force passive  $F_p$  est perpendiculaire aux deux autres et pointe vers la pièce. En fraisage en bout, l'épaisseur de coupe varie avec la position angulaire de la dent par rapport à l'axe d'avance, mesurée par l'angle.

### III.7. Détermination des paramètres de coupe

#### A. Choix des vitesses d'avance $f_z$ d'ébauchage et de finition pour un outil en carbure

$f_z$  ébauchage =  $0.25 \times K$

Opérations de surfacage  $K=0.8$

- $f_z = 0.25 \times 0.8 = 0.2$  mm/dent

Opérations de rainurage  $K=0.5$

- $f_z = 0.25 \times 0.5 = 0.125$  mm/dent

$f_z$  finition =  $f_z$  ébauche  $\times 0.4$

$$fz = 0.125 \times 0.4$$

- $fz = 0.05 \text{ mm/dent}$

### B. Profondeur de passe

$$ap \text{ maxi} = 0.1 \text{ mm} \times \text{ fraise}$$

- $ap \text{ maxi} = 0.1 \text{ mm} \times 150 = 15 \text{ mm}$

### C. Fréquence rotation de la broche

$$n = (1000 \times Vc) / (\pi \times D)$$

$$n = (1000 \times 200) / (\pi \times 150)$$

- $n = 424.62 \text{ tr/min}$

### D. Vitesse d'avance en Fraisage

$$Vf = n \times fz \times Z$$

$$Vf = 424.62 \times 0.2 \times 8$$

$$Vf = 679.39 \text{ mm/min}$$

### E. En Rainurage (mise en forme de coins)

$$ap \text{ maxi} = 0.3 \times \text{ fraise}$$

$$ap \text{ 6 maxi} = 0.3 \times 20$$

### F. Fréquence rotation de la broche

$$n = (1000 \times Vc) / (\pi \times D)$$

$$n = (1000 \times 100) / (\pi \times 20)$$

$$n = 1592.35 \text{ mm/min}$$

**G. Vitesse d'avance en Fraisage**

$$V_f = n \times f_z \times Z$$

$$V_f = 1592.35 \times 0.125 \times 3$$

$$V_f = 597.131 \text{ mm/min}$$

**H. Fréquence rotation de la broche**

$$n = (1000 \times V_c) / (\pi \times D)$$

$$n = (1000 \times 100) / (\pi \times 16)$$

$$n = 1990 \text{ tr/min}$$

**I. Vitesse d'avance en Fraisage**

$$V_f = n \times f_z \times Z$$

$$V_f = 1990 \times 0.2 \times 1$$

$$V_f = 1592 \text{ mm/min}$$

### III.8. Conclusion

L'optimisation de la gamme d'usinage en fabrication mécanique consiste à déterminer la suite ordonnée des opérations à exécuter sur les différentes machines en tenant compte de plusieurs paramètres, dont la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe.

Un choix optimal des outils conduit évidemment à de meilleurs résultats sur le plan technico-économique.

Dans ce chapitre la gamme d'usinage a été détaillée et ce pour utiliser les paramètres calculés dans le chapitre suivant et dans la partie « simulation de l'opération de fraisage » par WINCAM.

**CHAPITRE IV**  
**STRATEGIES**  
**D~~o~~USINAGE**

## IV. Détermination des stratégies d'usinage pour le moule

L'usinage des pièces de forme gauche comme les moules et les matrices est réalisé en fraisage par une succession de passes juxtaposées selon des critères de tolérance de flèche et de hauteur de crête.

L'objectif est de minimiser le temps d'usinage tout en garantissant un niveau de qualité attendu sur les pièces. Pour cela, il est nécessaire de choisir les stratégies d'usinage optimales vis à vis des performances et du comportement du moyen de fabrication.

Les dimensions indiquées sur les croquis des stratégies sont les longueurs d'usinage parcouru par la fraise de  $\phi 150$ .

Ces dimensions ont aidé à calculer les longueurs et les temps d'usinage pour chaque stratégie pour en déduire la meilleure.

### IV.1. Stratégie une « trajectoire parallèle en forme de serpent »

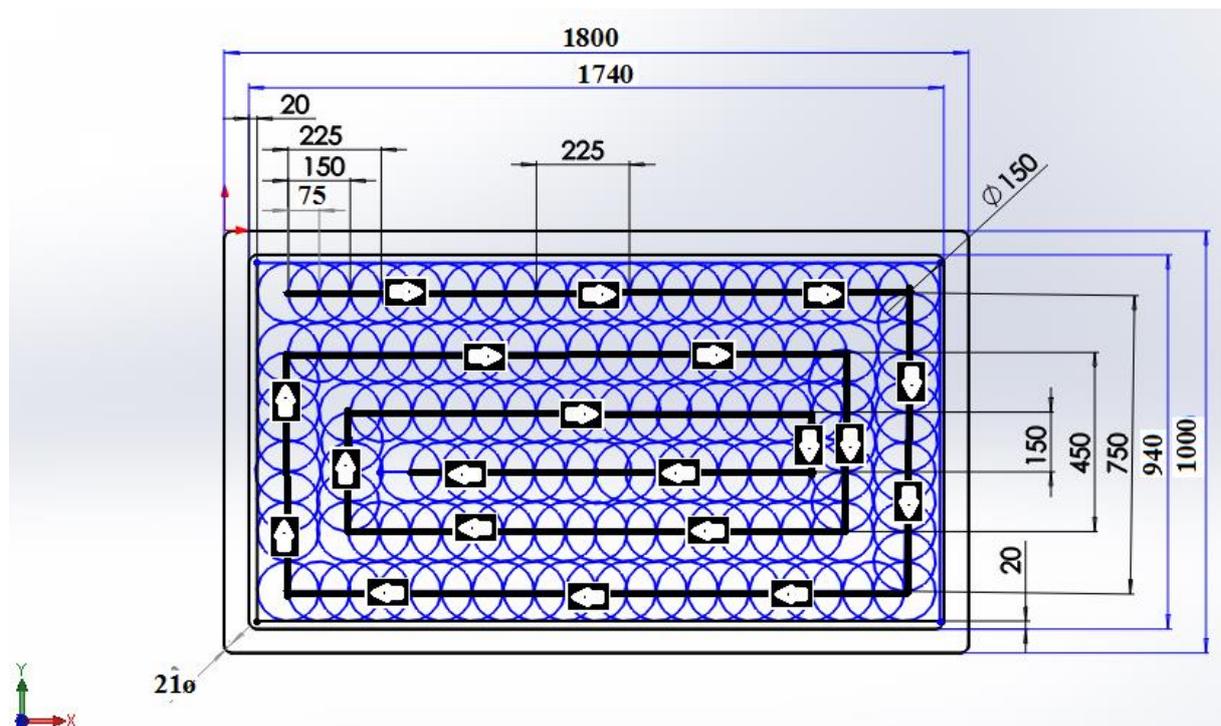


Fig. IV.1 : Trajectoires parallèles en forme de serpent (trajectoire 1)

Dans la stratégie d'évidement par trajectoires parallèles en forme de serpent, le paramétrage par défaut est celui qui consiste à faire démarrer l'usinage du côté de la poche et ensuite de suivre des trajectoires parallèles tout en réalisant la forme de serpent dans la poche.

A chaque tour l'outil se décale suivant l'axe Y selon un offset paramétré.

## IV.2. Stratégie deux « trajectoires parallèles en forme de zig zag »

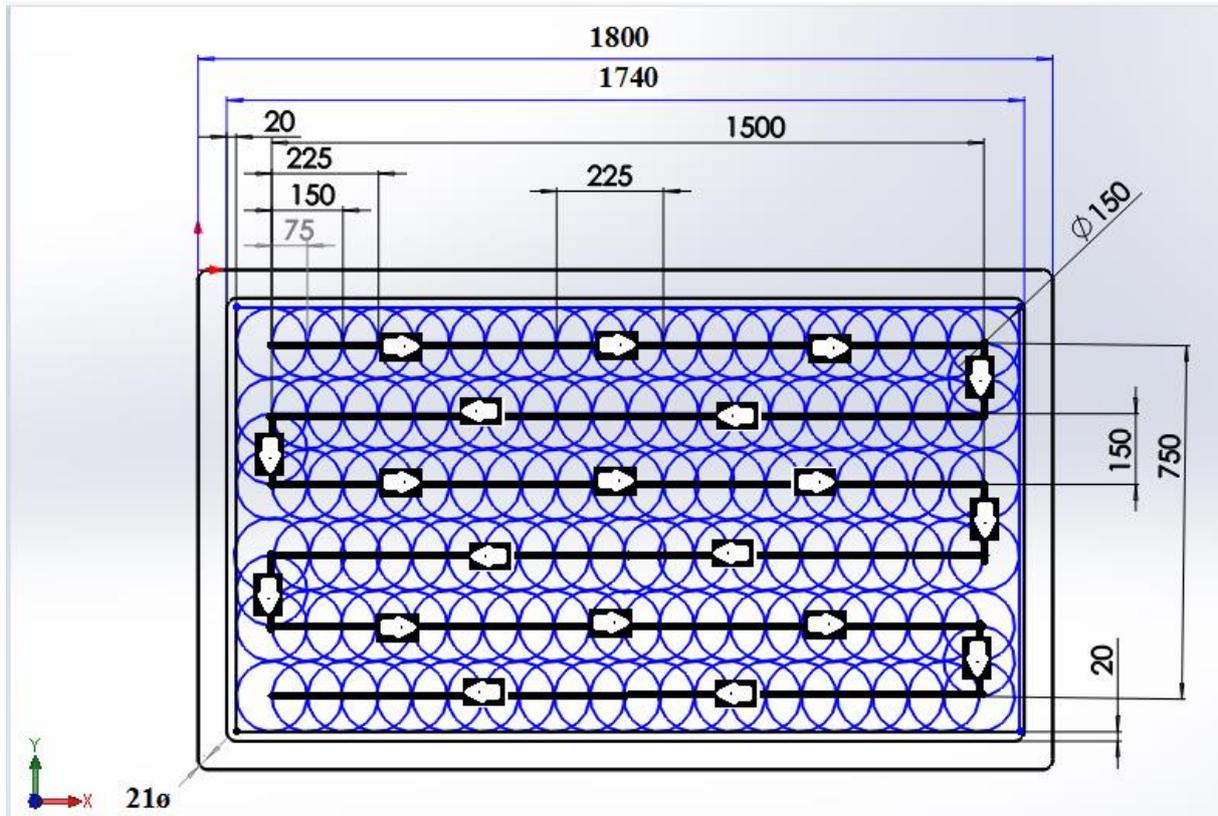


Fig. IV.2 : Trajectoires parallèles en forme de Zig Zag (trajectoire 2)

Dans la stratégie d'évidement par trajectoires parallèles en forme de zig zag, le paramétrage par défaut est celui qui consiste à faire démarrer l'usinage du côté de la poche et ensuite de suivre des trajectoires parallèles tout en suivant une ligne en Zig Zag à l'intérieur de la poche.

A chaque tour l'outil se décale vers l'intérieur selon un offset paramétré.

Le coup s'effectue plus difficilement en embout que sur la partie cylindrique de l'outil, c'est pour cela qu'on paramètre généralement des vitesses de plongée de l'outil en Z plus faibles que les vitesses d'avance, surtout si la matière est dure et dense.

Pour une poche profonde, il y aura plusieurs passes et à chaque passe il y aura une perte de temps pour la descente à la passe suivante à vitesse réduite.

IV.2. Détermination des longueurs et des temps d'usinage

IV.2.1. stratégie 1

L	distance a parcourir par l'outil	D	Vf	f	VC	nb de passe	L usinage(mm)	Tc (mn)	
150	0	150	679,36	0,2	200	6	70650	1,76625	
353,75	203,75	150	679,36	0,2	200	6	166616,25	4,165406	
557,5	407,5	150	679,36	0,2	200	6	262582,5	6,564563	
761,25	611,25	150	679,36	0,2	200	6	358548,75	8,963719	
965	815	150	679,36	0,2	200	6	454515	11,36288	
1168,75	1018,75	150	679,36	0,2	200	6	550481,25	13,76203	
1372,5	1222,5	150	679,36	0,2	200	6	646447,5	16,16119	
1576,25	1426,25	150	679,36	0,2	200	6	742413,75	18,56034	
1780	1630	150	679,36	0,2	200	6	838380	20,9595	temps de premiere
150	130	20	597,31	0,2	100	47	847800	21,4305	operation
353,75	333,75	20	597,31	0,2	100	47	860595,5	22,07028	
557,5	537,5	20	597,31	0,2	100	47	873391	23,18105	
761,25	741,25	20	597,31	0,2	100	47	886186,5	24,4606	
965	945	20	597,31	0,2	100	47	898982	26,21115	
1168,75	1148,75	20	597,31	0,2	100	47	911777,5	28,13048	
1372,5	1352,5	20	597,31	0,2	100	47	924573	30,5208	
1576,25	1556,25	20	597,31	0,2	100	47	937368,5	33,0799	
1780	1760	20	597,31	0,2	100	47	950164	36,11	temps de deuxieme
150	134	16	1690	0,1	100	58	957700	36,8636	operation
353,75	337,75	16	1690	0,1	100	58	975472,4	38,64084	
557,5	541,5	16	1690	0,1	100	58	1003481,2	41,44172	
761,25	745,25	16	1690	0,1	100	58	1041726,4	45,26624	
965	949	16	1690	0,1	100	58	1090208	50,1144	
1168,75	1152,75	16	1690	0,1	100	58	1148926	55,9862	
1372,5	1356,5	16	1690	0,1	100	58	1217880,4	62,88164	
1576,25	1560,25	16	1690	0,1	100	58	1297071,2	70,80072	
1780	1764	16	1690	0,1	100	58	1386498,4	79,74344	temps Totale operation

⇒ Premier temps A = 20.9595 min

⇒ Deuxieme temps B = 36.11 min

⇒ Totale temps C = 79.74344 min

IV.2.1. stratégie 2

L	distance a parcourir	D	Vf	f	VC	nb de p.	L usinage	Tc (mn)	
150	0	150	679,36	0,2	200	5	70650	1,76625	
353,75	203,75	150	679,36	0,2	200	5	166616,25	4,16540625	
557,5	407,5	150	679,36	0,2	200	5	262582,5	6,5645625	
761,25	611,25	150	679,36	0,2	200	5	358548,75	8,96371875	
965	815	150	679,36	0,2	200	5	454515	11,362875	
1168,75	1018,75	150	679,36	0,2	200	5	550481,25	13,7620313	
1372,5	1222,5	150	679,36	0,2	200	5	646447,5	16,1611875	
1576,25	1426,25	150	679,36	0,2	200	5	742413,75	18,5603438	
1780	1630	150	679,36	0,2	200	5	838380	20,9595	temps de premiere operation
150	110	20	597,31	0,2	100	46	847800	21,4305	
353,75	313,75	20	597,31	0,2	100	46	860595,5	22,541275	
557,5	517,5	20	597,31	0,2	100	46	873391	24,291825	
761,25	721,25	20	597,31	0,2	100	46	886186,5	26,68215	
965	925	20	597,31	0,2	100	46	898982	29,71225	
1168,75	1128,75	20	597,31	0,2	100	46	911777,5	33,382125	
1372,5	1332,5	20	597,31	0,2	100	46	924573	37,691775	
1576,25	1536,25	20	597,31	0,2	100	46	937368,5	42,6412	
1780	1740	20	597,31	0,2	100	46	1049152,5	48,2304	temps de deuxieme operation
150	118	16	1690	0,1	100	57	1056688,5	48,984	
353,75	321,75	16	1690	0,1	100	57	1074460,9	50,76124	
557,5	525,5	16	1690	0,1	100	57	1102469,7	53,56212	
761,25	729,25	16	1690	0,1	100	57	1140714,9	57,38664	
965	933	16	1690	0,1	100	57	1189196,5	62,2348	
1168,75	1136,75	16	1690	0,1	100	57	1247914,5	68,1066	
1372,5	1340,5	16	1690	0,1	100	57	1316868,9	75,00204	
1576,25	1544,25	16	1690	0,1	100	57	1396059,7	82,92112	
1780	1748	16	1690	0,1	100	57	1485486,9	91,86384	temps Totale operation

⇒ Premier temps A = 20.9595 min

⇒ Deuxieme temps B = 48.2304min

⇒ Totale temps C = 91.86384 min

Comparaison des temps d'usinage suivant les stratégies d'usinage en forme de serpent (stratégie 1) et la stratégie d'usinage en forme de Zig Zag (stratégie 2).

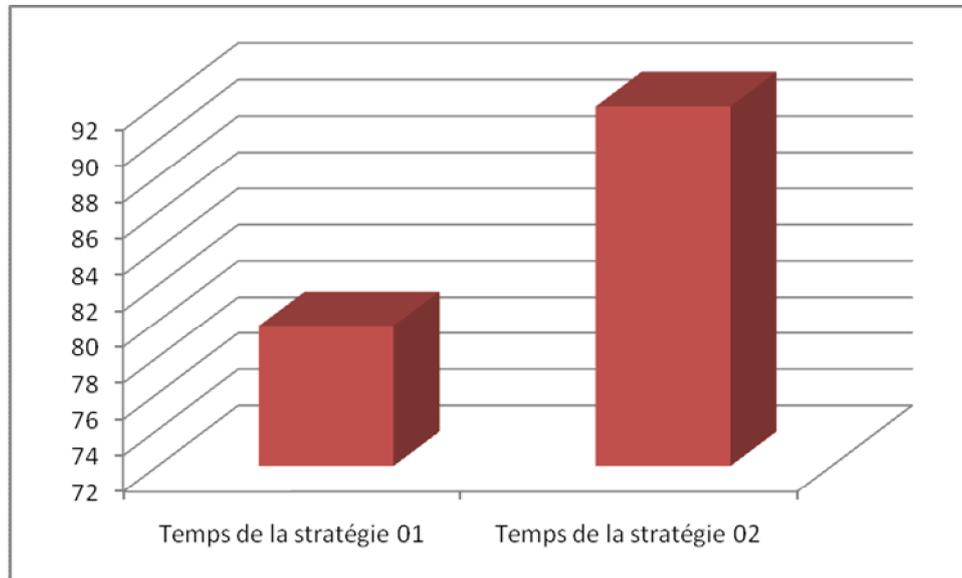


Fig. IV.3 Comparaison des temps d'usinage suivant les stratégies 1 et 2.

### IV.3. Discussions

D'après les résultats obtenus par calcul des longueurs et des temps d'usinage pour chaque stratégie, présentés précédemment, la stratégie d'usinage en forme de serpent (stratégie 1) apparaît meilleure, pour tous les outils utilisés que la stratégie d'usinage en forme de Zig Zag (stratégie 2), comme il est clairement indiqué sur la figure IV.3.

Ce travail porte aussi sur le mode d'interpolation en fonction de la forme de la surface à réaliser.

Dans notre cas, l'interpolation est linéaire. Aussi, l'optimisation passe par la recherche d'un compromis entre la longueur de la trajectoire fonction de la stratégie d'usinage et la vitesse moyenne de parcours tribulaire du format d'interpolation.

### IV.4. Profils des temps des stratégies d'usinage simulés et calculés

En continuité à ce travail sur les stratégies d'usinage, nous avons établi les profils de temps du cycle réel total, simulé et calculé en utilisant le logiciel de FAO

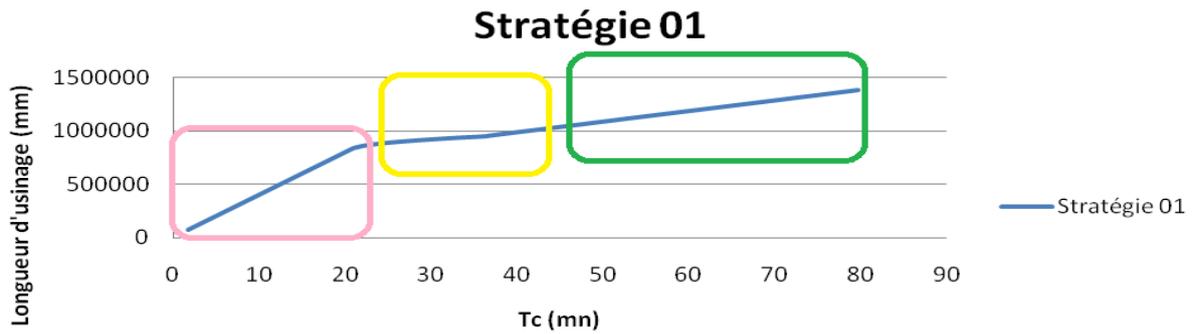


Fig. IV.4 : La longueur usinée en fonction du temps de la première stratégie

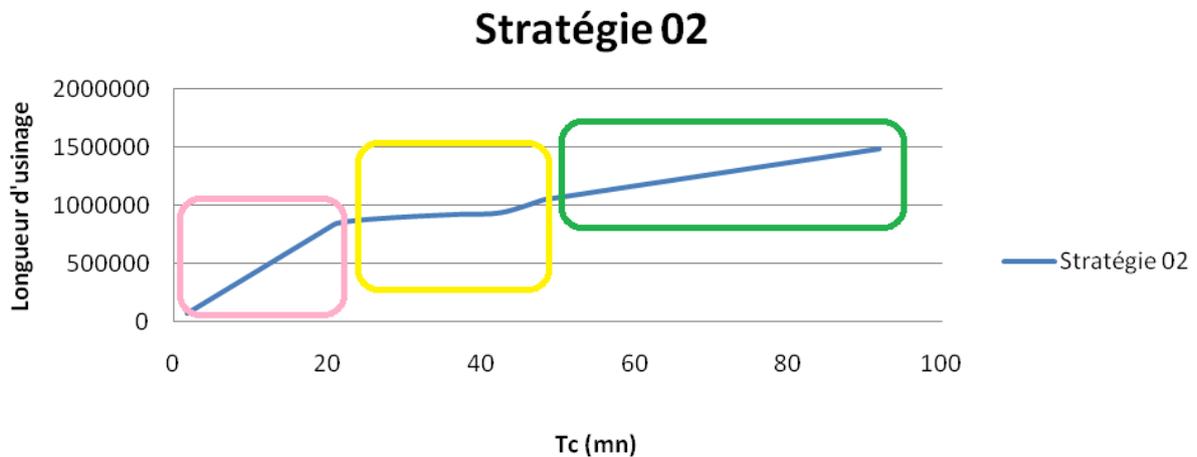


Fig. IV.5 : La longueur usinée en fonction du temps de la deuxième stratégie

Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre les essais simulations et le modèle théorique.

Il faut souligner que le temps calculé par le logiciel de FAO sous-estime le temps d'usinage réel avec un grand écart.

Cet écart est le résultat de la variation de la vitesse d'avance lors du processus d'usinage.

En effet, le temps d'usinage réel est notamment tributaire des ralentissements de la machine sur les trajets suivis à grande vitesse de déplacement.

Il faut signaler aussi l'importance de ce décalage en particulier lors du calcul du coût d'usinage et de l'établissement des devis.

Un coût de fabrication d'une pièce est composé de trois termes, le coût unitaire de fabrication, le coût de réglage par lot et le coût de préparation par pièce.

Le coût unitaire de fabrication dépend de plusieurs paramètres tels que le coût machine, le coût de l'outil...etc.

## IV.5. Simulation de fabrication suivant les stratégies

### IV.5.1. Concept Win CAM

La programmation de machines CN se fait aujourd'hui dans la pratique par l'intermédiaire de la programmation de contour automatique. La compréhension du programme CN généré automatiquement est toutefois nécessaire pour l'expert.

WinCAM propose un concept continu allant du réglage simple des contours de pièce en mode CAO jusqu'à l'exécution du programme CN sur une machine CN raccordée en passant par la création automatique interactive du programme CN en mode FAO.

### IV.5. 2. Capacités Win CAM

- Surface graphique simple
- Création de contours de pièce CAO
- Organe de serrage réglable et pièces brutes
- Programmation automatique du contour
- Support de cycles
- Editeur de programmes CN Online
- Affichage de l'état programmé de la machine
- Bibliothèque des outils
- Interfaces importation et exportation
- Mesure des organes de serrage et des outils
- Support de plusieurs types de commandes et de machines
- Fonctions de la machine CN Online
- Fonctions aide Online
- Simulation 3D de l'usinage

### IV.5. 3. Configuration de la pièce brute

#### a) Définition de la pièce brute

Avec cette fonction, la dimension de la pièce brute et de sa position dans l'étau est Définie.

Le point d'origine de coordonnées pour le mode CAO et FAO est également Défini automatiquement par WinCAM.

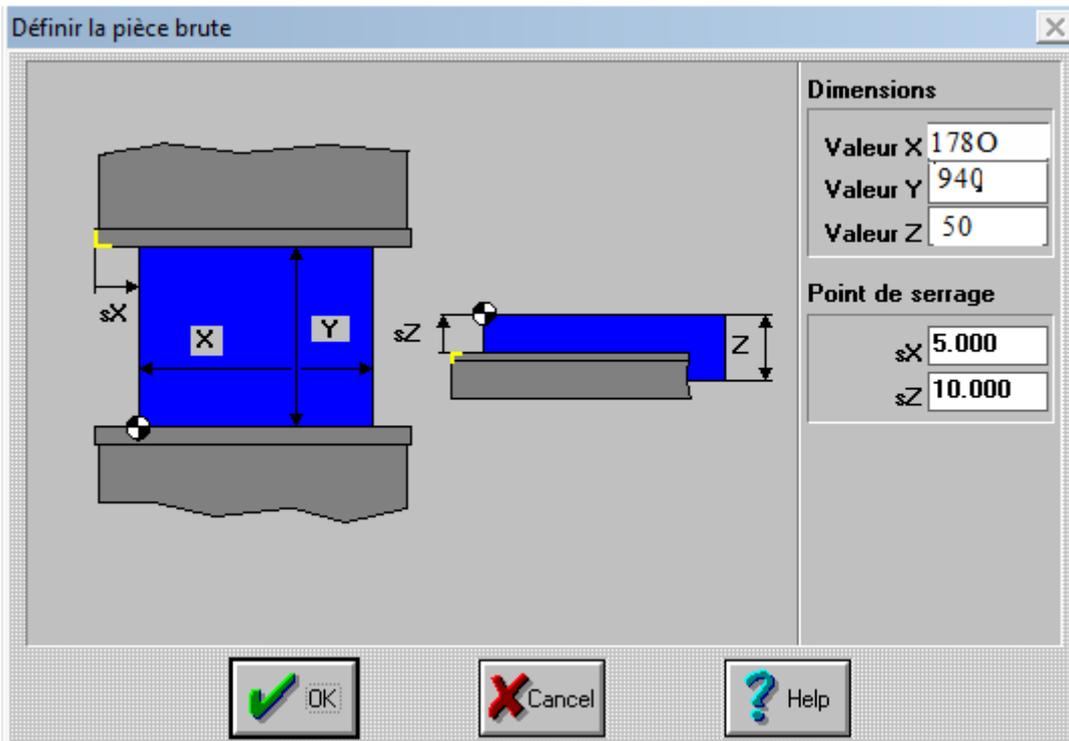


Fig. IV.6 : Fenêtre de définition de la pièce brute "Wincam"

### b) Définition de la position de l'étau

Cette partie sert à la mesure de la position de l'étau dans la machine CNC.

La mesure est effectuée sur l'arête au dos de l'étau gauche, frontal, supérieur. Les dimensions de décalage se réfèrent au point d'origine de la machine.

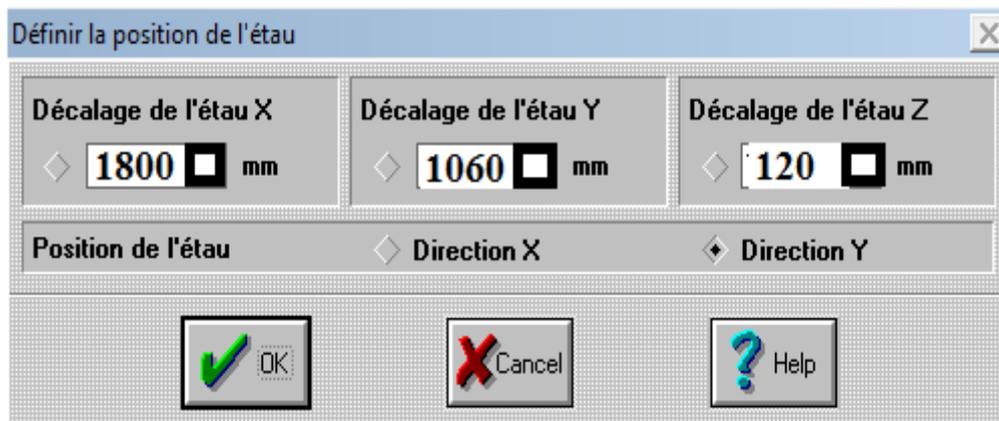


Fig. IV.7 : Fenêtre de définition de la position de l'étau "Wincam"

### c) La partie CAO

Cette partie consiste à déterminer le modèle géométrique de la pièce à façonner, Wincam offre un outil graphique pour insérer la géométrie sur deux plans (X, Y) et (X, Z) tout en tenant compte de l'origine programme, qui est mis a zéro par Wincam.

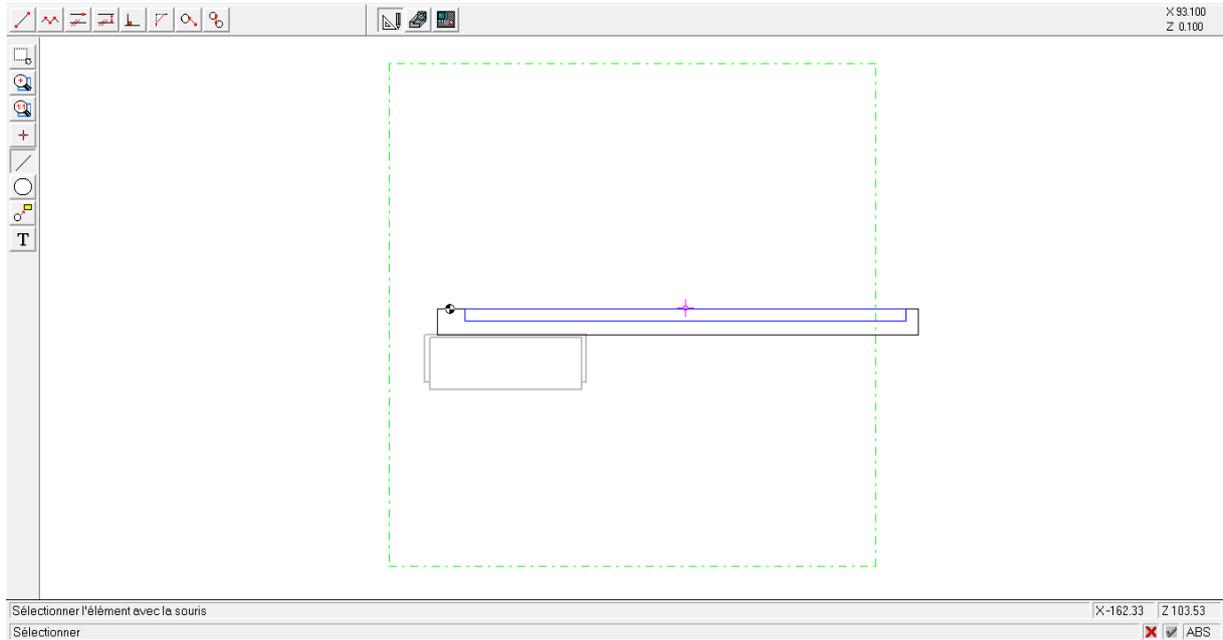


Fig. IV.8 : Géométrie du moule sur le plan (X, Z) "Wincam"

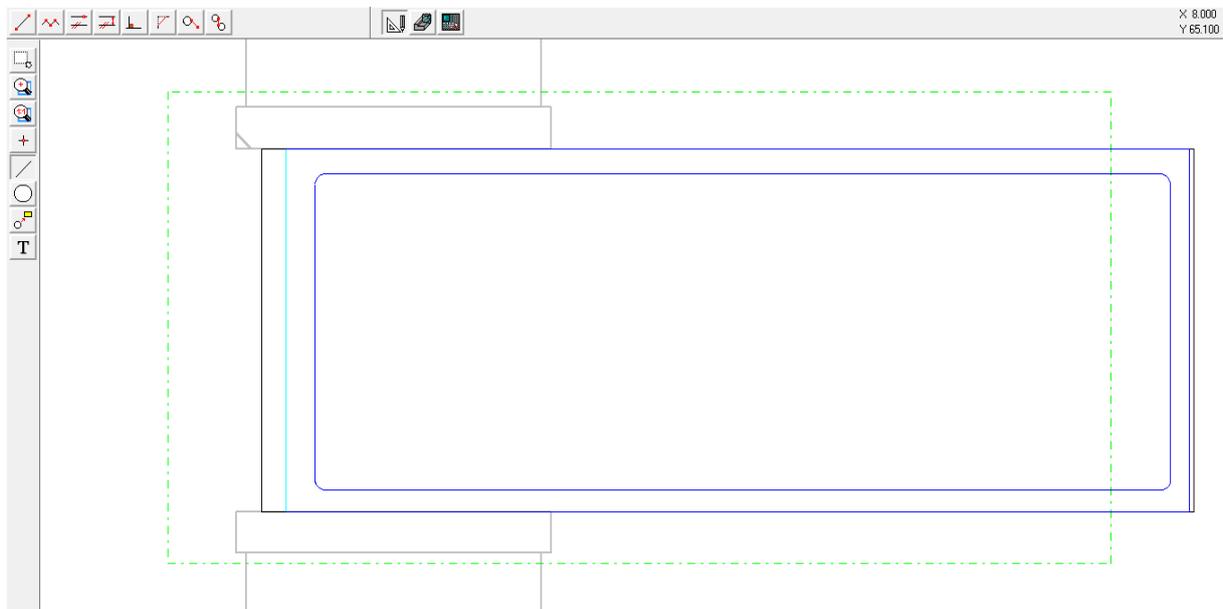


Fig. IV.9 : Géométrie du moule sur le plan (X, Y) "Wincam"

## IV.5. 4. La partie FAO

### A. Les outils

Cinquante (50) outils peuvent être stockés dans la bibliothèque. Chaque outil a un numéro compris entre 1 et 50. Dans la zone Bibliothèque des outils, un symbole indiquant le type d'outil et les outils choisis peuvent être sélectionnés (cochés) dans la zone de gauche.

Lorsqu'un outil se trouve dans le porte-outil, il est considéré comme "équipé" et ne peut donc pas être édité.

Des outils peuvent être équipés dans le porte-outil WinCAM comme pour la machine CN dans le changeur d'outil.

Un symbole de nature de l'outil, le numéro de place de l'outil, le numéro de l'outil ainsi que le nom de l'outil sont indiqués dans la zone.

L'outil sélectionné est ramené de la place du porte-outil à la bibliothèque des outils.

### B. Angle de l'outil angulaire

Pour la fraise angulaire, l'angle correspond à la dépouille du moule, soit 1 degré.

Le rayon de l'arête tranchante de la fraise (pas le diamètre). Cette valeur a été introduite pour la simulation dans le plan (X, Y) et le calcul de la compensation du rayon.

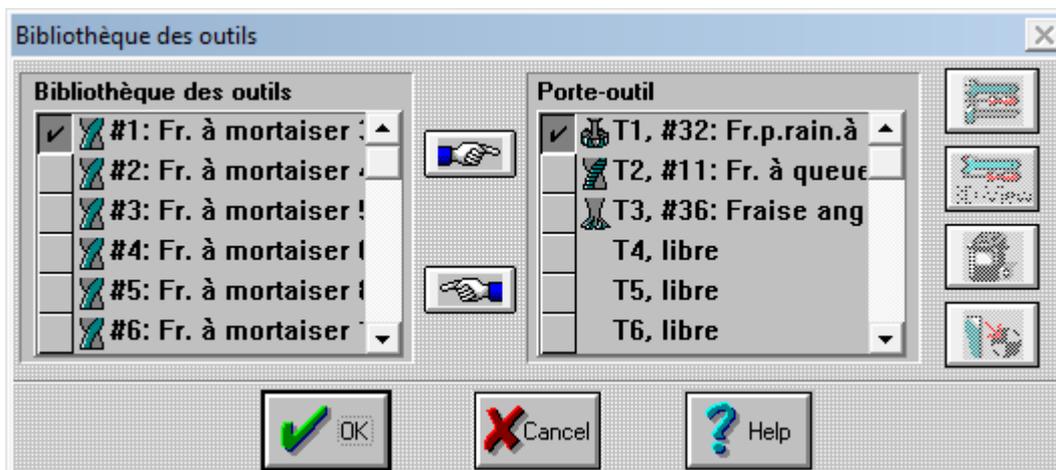


Fig. IV.10 : Bibliothèque des outils et introduction des conditions de coupe "Wincam"

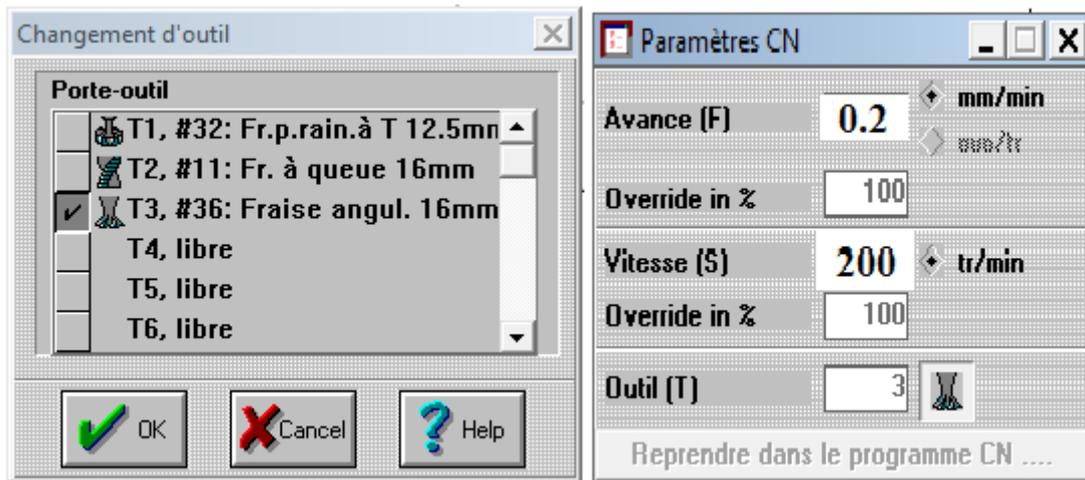


Fig. IV.11 : Fenêtres sélection outil et introduction des conditions de coupe "WinCam"

### C. Opération d'usinage

Cette ultime étape est réservée à l'exécution des opérations d'usinage selon les deux stratégies arrêtées précédemment.

Avant le lancement des simulations des stratégies d'usinage étudiées, il faut enclencher la broche puis ordonner une avance rapide vers (0 0) puis (900 500). Ces actions préliminaires sont valables aussi bien pour la première que pour la deuxième stratégie.

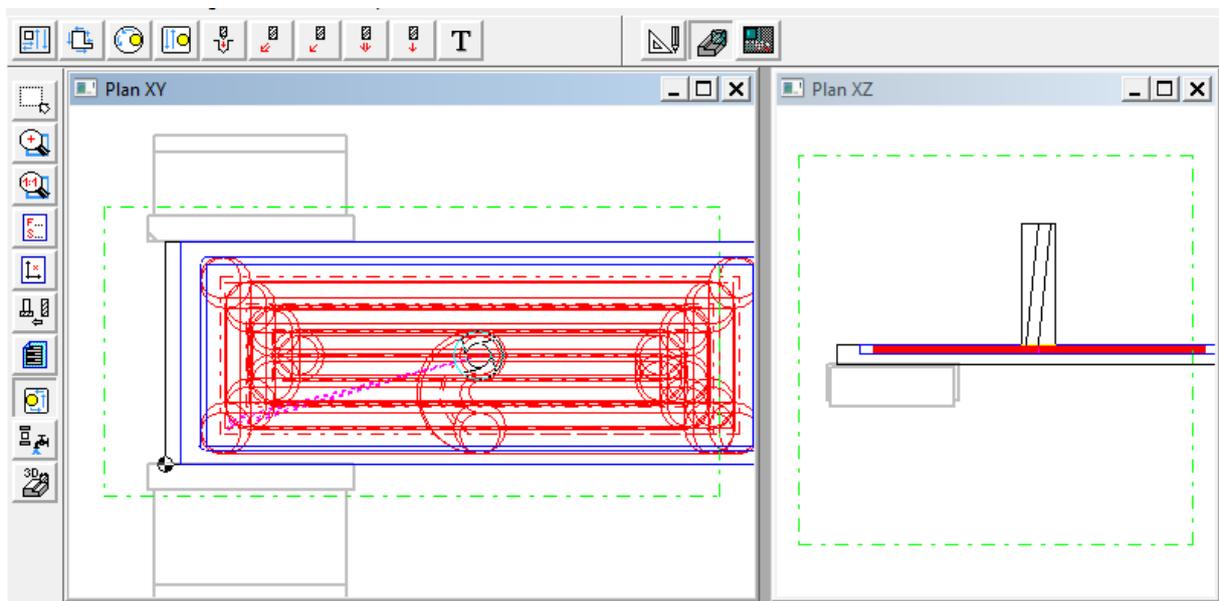


Fig. IV.12 : Fenêtre de simulation de la stratégie d'usinage du moule "WinCam"

Une fois la simulation terminée, l'outil simulation 3D permet de visualiser l'opération d'usinage en temps réel.

### IV.5. 5. Programme de fabrication (voir Annexe 4).

### IV.6. Conclusion

Dans le but de comparer les stratégies d'usinage en fraisage, des simulations sur « Wincam » ont été réalisées.

Deux stratégies ont été comparées à savoir : les stratégies des trajectoires parallèles en forme de serpent, et la stratégie des trajectoires en forme de Zig-Zig.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la première stratégie en matière de gain de temps et donc de gain de durée de vie des outils entraînant un gain économique considérable.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La réalisation de ce projet m'a permis de découvrir la phase conception, basée sur le dessin et les différents calculs ainsi que l'opération de simulation du comportement du moule pour la fabrication d'un brut en graphite.

La phase "fabrication" du moule s'est distinguée d'une part par l'étude de l'usinage de l'acier martensitique au Nickel-Chrome, matière choisie pour le moule et matière classée difficilement usinable et d'autre part par la complexité de la surface traduite par un très grand évidement à réaliser.

A cet effet, deux stratégies d'usinage pour l'opération d'ébauchage ont été développées, l'une avec des trajectoires parallèles en forme de serpent et l'autre toujours avec des trajectoires parallèles mais en forme de Zig-Zag.

Notre étude technico-économique nous a conduit à conclure que la première citée est l'optimale.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Modélisation CAO et Stratégies d'usinage pour la réalisation des à géométrie compliquée (Surfaces Libres), thèse de doctorat en science, ameddah hacène, université HADJ LAKHDAR BATNA, 2013.
- [2] N. Aifaoui, Intégration CAO/Calcul, une approche par les features de calcul, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Juillet 2003.
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception\\_assist%C3%A9e\\_par\\_ordinateur&usq=AFQjCNHfdLMfV51ubq3CefDEup6xNa\\_jkA](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception_assist%C3%A9e_par_ordinateur&usq=AFQjCNHfdLMfV51ubq3CefDEup6xNa_jkA)
- [4] J-C. LEON, Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO, Hermès, Paris, 1999.
- [5] COLLECTON H .LONGEOT L .JOURDAN . Livre-calcul-construction-industrielle-mécanique. Editons 4 trimestre.
- [6] Borhen LOUHICHI, thèse de doctorat en génie mécanique, Intégration CAO/Calcul par Reconstruction du modèle CAO à partir des résultats éléments finis, Soutenue le 19 Janvier 2008
- [7] Pierson H. Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. Park Ridge (NJ): Noyes Publications; 1993.
- [8] Moore PB, Volk HF. Graphite. Accessscience: mcgraw-Hill Companies 2008.
- [9] Zeller C, Foley GMT, Falardeau ER, Vogel FL. Measurement of electrical Conductivity under conditions of high anisotropy in graphite intercalation compounds. Materials Science and Engineering. 1977.
- [10] Gaier JR, Slabe ME. Density of intercalated graphite fibers. Carbon. 1990;28(5):669-74
- [11] Zweben C. Advanced composites for aerospace applications: A review of current Status and future prospects. Composites. 1981;12(4):235-40
- [12] HANDBOOK OF CARBON, GRAPHITE, DIAMOND AND FULLERENES, Properties, Processing and Applications, Hugh Pierson.
- [13] M. Rauch, E. Duc, J. Y. Hascöet, Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling,
- [14] Y. Tang, Optimization strategy in end milling process for high speed Machining of hardened die/mold steel, Journal of University of Science And Technology Beijing, 13 (3), 240, 2006

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [15] Y. Tang, Optimization strategy in end milling process for high speed Machining of hardened die/mold steel, Journal of University of Science And Technology Beijing, 13 (3), 240, 2006.
- [16] A.DUPONT ó A.CASTELL.TECHNOLOGIE PROFESSIONNELLE GENERALE professions de la mécanique éditeur 29,quai des Grande-Augustin-Paris1960.
- [17] ANDRE CHEVALIER. [CHEVALIER] Guide du dessinateur industriel ó Edition 2004 CHACHETTE .
- [18] Savvatimskiy AI. Measurements of the melting point of graphite and the Properties of liquid carbon (a review for 1963-2003). Carbone. 2005;43(6):1115-42.

# **ANNEXES**

## Fraiseuse à banc fixe Correa



### Caractéristiques Techniques

			XPERTA			
			XPERTA 20	XPERTA 25	XPERTA 35	XPERTA 45
Table	Surface	mm	2.300 x 1.000	2.800 x 1.000	3.800 x 1.000	4.800 x 1.000
	Max. poids sur la table	kg	4.500	6.500	9.000	10.500
Course	Longitudinale	mm	2.000	2.500	3.500	4.500
	Transversale	mm	1.000			
	Verticale	mm	1.000			
Avances	Avances rapides	x-y-z	m/min			
Broche	Nez de la broche		ISO-50/ HSK			
	Vitesses programmables	r.p.m.	3.000 / 4.000			
	Puissance maximum	kw	24			
	Couple maximum	Nm	840			
Poids	De la machine	Kg	15.200	16.400	18.600	22.400

## ❖ Matière du moule X8CrNi25-21

ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES AU MOLYBDÈNE						
X18CrNi23-13	1.4833				Résistance à l'oxydation à chaud jusqu'à 1050°C	Gaines de résistances
X8CrNi25-21	1.4845				Résiste à l'oxydation à chaud jusqu'à 1100°C	Équipements de fours

## ❖ Composition chimique de l'acier X8CrNi25-21

Appellations commerciales et compositions chimiques des aciers inoxydables									Caractéristiques mécaniques			Duretés obtenues à titre indicatif après trempé à l'huile sur pièces finies				
Désignation européenne Selon NF EN 10088-2 (nov. 95)		Ancienne désignation de la NF A 35573 (Annulation nov. 95)	Composition Chimique à titre indicatif						État recuit à titre indicatif (valeurs moyennes)			Traitement thermique			Dureté HRC	Rm
NOM	N°		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Autres	Rm	R <sub>p0.2</sub>					
<b>ACIERS INOXYDABLES MARTENSITIQUES</b>																
X20Cr13	1.4021	Z20C13	0,21	0,35	0,35	13,30				550	340	24	Trempe 1050 °C + revenu à 180° - 200 °C	≥ 45	1500	
X30Cr13	1.4028	Z33C13	0,33	0,20	0,30	13,70				600	340	24		≥ 50	1700	
X46Cr13	1.4034	Z44C14	0,46	0,35	0,30	13,80				650	400	23		≥ 52	1800	
<b>ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES</b>																
X2CrTi12	1.4512	Z3CT12	0,02	0,50	0,30	11,50			Ti = 0,180	410	250	32	Unités utilisées Rm : charge de rupture (MPa) R <sub>p0.2</sub> : limite élastique à 0,2% (MPa) A% : allongement % Éprouvette Lo = 80 mm (ép. < 3 mm) Lo = 5,65 √S <sub>0</sub> (ép. ≥ 3 mm) 1 Mpa = 1N/mm <sup>2</sup> = 145 PSI = 0,1 kg/mm <sup>2</sup>			
X8CrNiTi12	1.4516	Z8CNT12	0,06	0,30	0,80	11,00		0,80	Ti = 0,150	510	370	27				
										500	340	26				
<b>ACIERS INOXYDABLES AUSTÉNITIQUES AU MOLYBDÈNE</b>																
X9CrNiMo17-12-2	1.4401	Z7CND17-11-02	0,05	0,50	1,50	17,00	2,10	10,60		620	340	48				
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	Z3CND17-11-02	< 0,03	0,50	1,50	17,50	2,25	11,20		610	320	48				
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	Z3CND17-12-03	< 0,03	0,50	1,50	17,80	2,60	12,70		610	310	45				
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	Z6CNDT17-12	0,04	0,50	1,50	17,00	2,10	10,70	Ti = 0,350	610	310	47				
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	Z2NCDU25-20	0,015	0,20	1,50	20,20	4,35	25,20	Cu = 1,50	650	340	40				
<b>ACIERS INOXYDABLES RÉFRACTAIRES</b>																
X18CrNi23-13	1.4833	Z20CN24-13	0,06	0,35	1,50	22,50		13,50		630	330	45				
X8CrNi25-21	1.4845	Z8CN25-20	0,05	0,50	1,70	25,00		19,80		600	300	42				

Outils de fraisage et leurs paramètres de coupe.

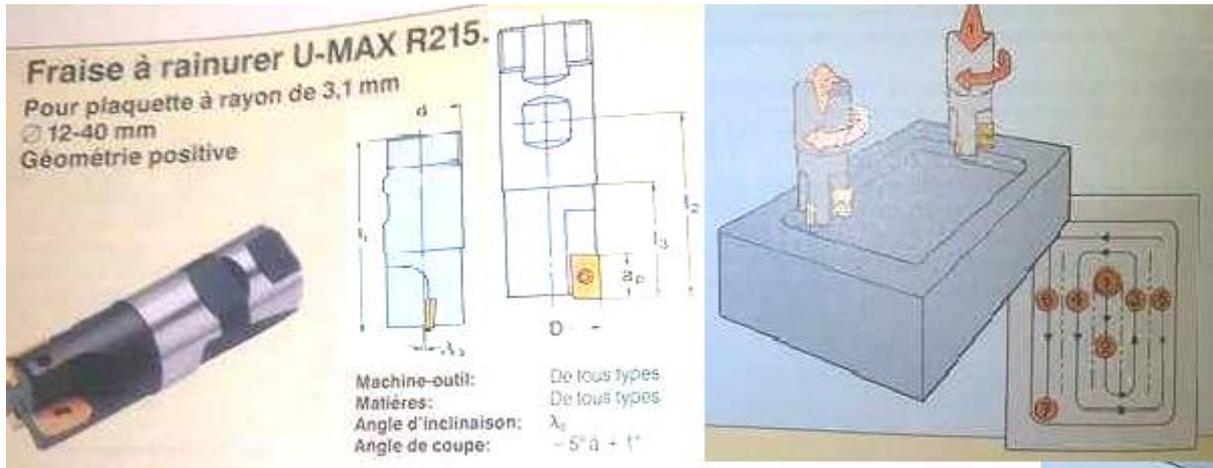
1.2 : Fraise en carbure à plaquettes rapportées de la S/Phase 120 : T-MAX145



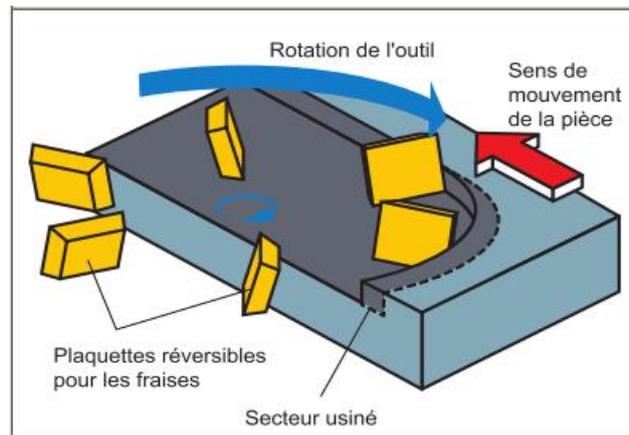
1.2 : Paramètres de coupe

Conditions de coupe pour					GC-A	GC235	CT520	H13A	H10F					
Vitesses de coupe et avances nominales					Avance mm/dent									
ISO	Matière	Description	CMC <sup>(1)</sup> N°	Etat	HB	0,3-0,2-0,1	0,2-0,1-0,05	0,2-0,1	0,4-0,2-0,1					
						Vitesse de coupe m/min								
P	Acier non allié	01.1	C < 0,25%	110	250-300-390	150-200-250	250-350-450	180-250-310						
		01.3	C < 0,8%	150	155-180-255	100-120-165	250-350-450	120-145-205						
		01.5	C < 1,4%	310	135-165-210	75-110-135		95-130-170						
	Acier faibl. allié	02.1	Recuit	125-225	170-200-250	100-120-165	200-300-400	120-160-200						
		02.2	Trempé	220-450	110-130-150	55-75-95	150-200-250	70-100-125						
	Acier fort. allié	03.11	Recuit	150-250	140-170-225	90-115-150		110-140-180						
		03.22	Trempé	250-300	90-110-150	60-75-90		65-90-120						
	Acier fort. allié	03.13	Recuit acier rapide	150-250	130-160-195	75-105-130		90-125-155						
		03.21	Acier à outils trempé	250-350				70-95-120						
	Acier inoxydable	05.1	Ferritique, martensitique	150-270	155-180-250	110-150-190	200-300-400	120-165-210						
Acier coulé	06.1	Non allié	150	140-180-225	80-120-150		100-145-180							
	06.2	Faibl. allié	150-250	125-150-190	70-100-120		80-120-150							
	06.3	Fort. allié	160-200	90-110-130	55-70-80		65-90-100							
Acier coulé	06.31	Inoxydable, ferritique, martensitique	150-250		50-80		50-70-80							
M	Matière	Description	CMC <sup>(1)</sup> N°	Etat	HB	GC235	CT520	H13A	H10F					
						Avance mm/dent								
						0,3-0,2-0,1	0,2-0,1-0,05	0,2-0,1	0,2-0,1					
						Vitesse de coupe m/min								
						Acier inoxydable, recuit	05.2	Austénitique	150-220	80-150-220	200-300-400			
						Acier coulé	06.32	Inoxydable austénitique	200	40-70				
						Alliages à base Fe	20.1		180-300					
Alliages à base Ni	20.2		220-300	40-100										
Alliages à base Co	20.3		220-300			25-50	20-50	20-50						
Alliages de Ti	23.4		300-400			10-20	10-20	10-20						
Matière						20-80	20-80	20-80						

2.1: Outil de fraisage de la S/Phase 130, fraise : U-MAX



2.2 : Paramètres de coupe



**Conditions de coupe pour fraises à rainurer U-MAX**

ISO	Matériau	Description	CNC: N°	Etat	Diamètre nominal (mm)	Diamètre de fraise (mm)	Axe de rotation (mm)	Vitesse de coupe (m/min)					
								CC-A	CCZ35	CCZ25	EM35	HT3A	HTSF
P	Acier non allié	20.1 21.2	AISI 1045 AISI 1020	Normal Normal	110 250	110-130 110-130	110-130 110-130	100-200	100-200	-	100-200	-	-
								100-130	100-130	-	100-130	-	-
	Acier ferril. allié	22.1 22.2	AISI 4140 AISI 4140	Normal Normal	120-220 200-400	120-220 120-220	120-220 120-220	100-130	100-130	-	100-130	-	-
								100-130	100-130	-	100-130	-	-
	Acier ferril. allié	23.11 23.12	AISI 4140 AISI 4140	Normal Normal	180-280 250-450	180-280 180-280	180-280 180-280	110-130	110-130	-	110-130	-	-
								110-130	110-130	-	110-130	-	-
	Acier inoxydable	28.1	AISI 304 AISI 304	Normal Normal	180-270	180-270 180-270	180-270 180-270	100-130	100-130	-	100-130	-	-
								100-130	100-130	-	100-130	-	-
								100-130	100-130	-	100-130	-	-
	Acier coulé	29.1 29.2	AISI 150 AISI 150	Normal Normal	180 180-220	180 180-220	180 180-220	100-130	100-130	-	100-130	-	-
100-130								100-130	-	100-130	-	-	
Acier inoxydable duplex	28.2	AISI 2205 AISI 2205	Normal Normal	180	180 180	180 180	100-130	100-130	-	100-130	-	-	
							100-130	100-130	-	100-130	-	-	
M	Acier inoxydable	28.2	AISI 316 AISI 316	Normal Normal	180-220	180-220 180-220	180-220 180-220	100-130	100-130	-	100-130	-	-
								100-130	100-130	-	100-130	-	-
	Acier inoxydable coulé	28.22	AISI 316 AISI 316	Normal Normal	200	200 200	200 200	100-130	100-130	-	100-130	-	-
100-130								100-130	-	100-130	-	-	
Alliages réfractaires à base Ni-Co	29.21-32 29.21-32	AISI 600 AISI 600	Normal Normal	140-200 200-475	140-200 140-200	140-200 140-200	100-130	100-130	-	100-130	-	-	
							100-130	100-130	-	100-130	-	-	

## 2.1:Outil de fraisage de la S/Phase 140, fraise : conique BOSCH



## Vitesse de coupe : Tableau de valeurs indicatives moyennes (en m/min)

Nuance ISO	Matériaux à usiner Avance f en mm/dent/tour	Fraisage				Fraisage filetage
		Acier Rapide		Carbure		Carbure
		0.03 à 0.1	0.1 à 0.2	0.05 à 0.2	0.2 à 03	f = pas du filet
P	Acier Non Allié	50	40	140	120	150
	Acier Faiblement Allié	30	25	100	80	130
	Acier Fortement Allié	20	15	80	70	100
	Acier Moulé Faiblement Allié	25	20	90	80	120
M	Acier inoxydable	20	15	100	90	150
K	Fonte lamellaire (EN-GJL...)	35	30	100	90	120
	Fonte Modulaire (EN-GJM...)	30	25	80	70	100
	Fonte Sphéroïdale (EN-GJS...)	40	35	100	90	120
K-N	Alliages d'aluminium de faible dureté sans silicium (AW 2030 ...)	250	200	500	400	300
	Alliages d'aluminium durs sans silicium ou %Si moyen (AW2017, AW 6060 ...)	120	80	300	200	250
	Alliages d'aluminium à haute teneur en silicium > 12%	80	40	120	80	100
Vitesse de coupe Vc en m/min						

## Programme de fabrication

N0005 G54	N0180 G1 X154.485 Y26.747	N0355 G1 X98.1 Y11.57
N0010 G97 G94	N0185 X34.127 Y26.747	N0360 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N0015 G58 X0. Y0. Z0.	N0190 X34.127 Y41.923	N0365 G1 X41.715 Y34.335
N0020 F420	N0195 X162.073 Y41.923	N0370 G1 Z-2. F1
N0025 S670	N0200 X162.073 Y26.747	N0375 X154.485 Y34.335 F420
N0030 T2 D3 M0 (* Fr. à queue 16mm *)	N0205 G1 X162.073 Y19.158	N0380 G1 X154.485 Y26.747
N0035 M5	N0210 X26.538 Y19.158	N0385 X34.127 Y26.747
N0040 G0 X21.368 Y13.867	N0215 X26.538 Y49.512	N0390 X34.127 Y41.923
N0045 M4 (**#00004 Poche rectangulaire, DIN 66025 **)	N0220 X169.662 Y49.512	N0395 X162.073 Y41.923
N0050 G94 F420 G97 S670	N0225 X169.662 Y19.158	N0400 X162.073 Y26.747
N0055 G0 X98.1 Y34.335 M4	N0230 G1 X169.662 Y11.57	N0405 G1 X162.073 Y19.158
N0060 G1 Z0.	N0235 X18.95 Y11.57	N0410 X26.538 Y19.158
N0065 G1 X41.715 Y34.335	N0240 X18.95 Y57.1	N0415 X26.538 Y49.512
N0070 G1 Z-0.5 F1	N0245 X177.25 Y57.1	N0420 X169.662 Y49.512
N0075 X154.485 Y34.335 F420	N0250 X177.25 Y11.57	N0425 X169.662 Y19.158
N0080 G1 X154.485 Y26.747	N0255 G1 X98.1 Y11.57	N0430 G1 X169.662 Y11.57
N0085 X34.127 Y26.747	N0260 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N0435 X18.95 Y11.57
N0090 X34.127 Y41.923	N0265 G1 X41.715 Y34.335	N0440 X18.95 Y57.1
N0095 X162.073 Y41.923	N0270 G1 Z-1.5 F1	N0445 X177.25 Y57.1
N0100 X162.073 Y26.747	N0275 X154.485 Y34.335 F420	N0450 X177.25 Y11.57
N0105 G1 X162.073 Y19.158	N0280 G1 X154.485 Y26.747	N0455 G1 X98.1 Y11.57
N0110 X26.538 Y19.158	N0285 X34.127 Y26.747	N0460 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N0115 X26.538 Y49.512	N0290 X34.127 Y41.923	N0465 G1 X41.715 Y34.335
N0120 X169.662 Y49.512	N0295 X162.073 Y41.923	N0470 G1 Z-2.5 F1
N0125 X169.662 Y19.158	N0300 X162.073 Y26.747	N0475 X154.485 Y34.335 F420
N0130 G1 X169.662 Y11.57	N0305 G1 X162.073 Y19.158	N0480 G1 X154.485 Y26.747
N0135 X18.95 Y11.57	N0310 X26.538 Y19.158	N0485 X34.127 Y26.747
N0140 X18.95 Y57.1	zN0315 X26.538 Y49.512	N0490 X34.127 Y41.923
N0145 X177.25 Y57.1	N0320 X169.662 Y49.512	N0495 X162.073 Y41.923
N0150 X177.25 Y11.57	N0325 X169.662 Y19.158	N0500 X162.073 Y26.747
N0155 G1 X98.1 Y11.57	N0330 G1 X169.662 Y11.57	N0505 G1 X162.073 Y19.158
N0160 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N0335 X18.95 Y11.57	N0510 X26.538 Y19.158
N0165 G1 X41.715 Y34.335	N0340 X18.95 Y57.1	N0515 X26.538 Y49.512
N0170 G1 Z-1. F1	N0345 X177.25 Y57.1	N0520 X169.662 Y49.512
N0175 X154.485 Y34.335 F420	N0350 X177.25 Y11.57	N0525 X169.662 Y19.158

N0530 G1 X169.662 Y11.57	N0725 X169.662 Y19.158	N0920 X169.662 Y49.512
N0535 X18.95 Y11.57	N0730 G1 X169.662 Y11.57	N0925 X169.662 Y19.158
N0540 X18.95 Y57.1	N0735 X18.95 Y11.57	N0930 G1 X169.662 Y11.57
N0545 X177.25 Y57.1	N0740 X18.95 Y57.1	N0935 X18.95 Y11.57
N0550 X177.25 Y11.57	N0745 X177.25 Y57.1	N0940 X18.95 Y57.1
N0555 G1 X98.1 Y11.57	N0750 X177.25 Y11.57	N0945 X177.25 Y57.1
N0560 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N0755 G1 X98.1 Y11.57	N0950 X177.25 Y11.57
N0565 G1 X41.715 Y34.335	N0760 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N0955 G1 X98.1 Y11.57
N0570 G1 Z-3. F1	N0765 G1 X41.715 Y34.335	N0960 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N0575 X154.485 Y34.335 F420	N0770 G1 Z-4. F1	N0965 G0 X98.1 Y34.335 Z0.1
N0580 G1 X154.485 Y26.747	N0775 X154.485 Y34.335 F420	(**#00004 Fin **)
N0585 X34.127 Y26.747	N0780 G1 X154.485 Y26.747	N0970 T1 D1 M0 (* Fr.rain.à T 12.5mm *)
N0590 X34.127 Y41.923	N0785 X34.127 Y26.747	N0975 M4
N0595 X162.073 Y41.923	N0790 X34.127 Y41.923	N0980 F590
N0600 X162.073 Y26.747	N0795 X162.073 Y41.923	N0985 S1500
N0605 G1 X162.073 Y19.158	N0800 X162.073 Y26.747	N0990 G0 X19.599 Y11.212
N0610 X26.538 Y19.158	N0805 G1 X162.073 Y19.158	N0995 G0 X20.041 Y14.309
N0615 X26.538 Y49.512	N0810 X26.538 Y19.158	N1000 G0 X20.484 Y12.097
N0620 X169.662 Y49.512	N0815 X26.538 Y49.512	N1005 G0 X19.599 Y11.212
N0625 X169.662 Y19.158	N0820 X169.662 Y49.512	N1010 G0 X20.041 Y11.655
N0630 G1 X169.662 Y11.57	N0825 X169.662 Y19.158	(**#00004 Poche rectangulaire, DIN 66025 **)
N0635 X18.95 Y11.57	N0830 G1 X169.662 Y11.57	N1015 G94 F590 G97 S1500
N0640 X18.95 Y57.1	N0835 X18.95 Y11.57	N1020 G0 X98.1 Y34.335 M4
N0645 X177.25 Y57.1	N0840 X18.95 Y57.1	N1025 G1 Z0.
N0650 X177.25 Y11.57	N0845 X177.25 Y57.1	N1030 G1 X41.715 Y34.335
N0655 G1 X98.1 Y11.57	N0850 X177.25 Y11.57	N1035 G1 Z-0.5 F1
N0660 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N0855 G1 X98.1 Y11.57	N1040 X154.485 Y34.335 F590
N0665 G1 X41.715 Y34.335	N0860 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N1045 G1 X154.485 Y26.163
N0670 G1 Z-3.5 F1	N0865 G1 X41.715 Y34.335	N1050 X33.543 Y26.163
N0675 X154.485 Y34.335 F420	N0870 G1 Z-4.19 F1	N1055 X33.543 Y42.507
N0680 G1 X154.485 Y26.747	N0875 X154.485 Y34.335 F420	N1060 X162.657 Y42.507
N0685 X34.127 Y26.747	N0880 G1 X154.485 Y26.747	N1065 X162.657 Y26.163
N0690 X34.127 Y41.923	N0885 X34.127 Y26.747	N1070 G1 X162.657 Y17.992
N0695 X162.073 Y41.923	N0890 X34.127 Y41.923	N1075 X25.372 Y17.992
N0700 X162.073 Y26.747	N0895 X162.073 Y41.923	N1080 X25.372 Y50.678
N0705 G1 X162.073 Y19.158	N0900 X162.073 Y26.747	N1085 X170.828 Y50.678
N0710 X26.538 Y19.158	N0905 G1 X162.073 Y19.158	N1090 X170.828 Y17.992
N0715 X26.538 Y49.512	N0910 X26.538 Y19.158	N1095 G1 X170.828 Y9.82
N0720 X169.662 Y49.512	N0915 X26.538 Y49.512	N1100 X17.2 Y9.82

N1105 X17.2 Y58.85	N1300 X17.2 Y9.82	N1490 X170.828 Y17.992
N1110 X179. Y58.85	N1305 X17.2 Y58.85	N1495 G1 X170.828 Y9.82
N1115 X179. Y9.82	N1310 X179. Y58.85	N1500 X17.2 Y9.82
N1120 G1 X98.1 Y9.82	N1315 X179. Y9.82	N1505 X17.2 Y58.85
N1125 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N1320 G1 X98.1 Y9.82	N1510 X179. Y58.85
N1130 G1 X41.715 Y34.335	N1325 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N1515 X179. Y9.82
N1135 G1 Z-1. F1	N1330 G1 X41.715 Y34.335	N1520 G1 X98.1 Y9.82
N1140 X154.485 Y34.335 F590	N1335 G1 Z-2. F1	N1525 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258
N1145 G1 X154.485 Y26.163	N1340 X154.485 Y34.335 F590	N1530 G1 X41.715 Y34.335
N1150 X33.543 Y26.163	N1345 G1 X154.485 Y26.163	N1535 G1 Z-3. F1
N1155 X33.543 Y42.507	N1350 X33.543 Y26.163	N1540 X154.485 Y34.335 F590
N1160 X162.657 Y42.507	N1355 X33.543 Y42.507	N1545 G1 X154.485 Y26.163
N1165 X162.657 Y26.163	N1360 X162.657 Y42.507	N1550 X33.543 Y26.163
N1170 G1 X162.657 Y17.992	N1365 X162.657 Y26.163	N1555 X33.543 Y42.507
N1175 X25.372 Y17.992	N1370 G1 X162.657 Y17.992	N1560 X162.657 Y42.507
N1180 X25.372 Y50.678	N1375 X25.372 Y17.992	N1565 X162.657 Y26.163
N1185 X170.828 Y50.678	N1380 X25.372 Y50.678	N1570 G1 X162.657 Y17.992
N1190 X170.828 Y17.992		N1575 X25.372 Y17.992
N1195 G1 X170.828 Y9.82	N1385 X170.828 Y50.678	N1580 X25.372 Y50.678
N1200 X17.2 Y9.82	N1390 X170.828 Y17.992	N1585 X170.828 Y50.678
N1205 X17.2 Y58.85	1395 G1 X170.828 Y9.82	N1590 X170.828 Y17.992
N1210 X179. Y58.85	N1400 X17.2 Y9.82	N1595 G1 X170.828 Y9.82
N1215 X179. Y9.82	N1405 X17.2 Y58.85	N1600 X17.2 Y9.82
N1220 G1 X98.1 Y9.82	N1410 X179. Y58.85	N1605 X17.2 Y58.85
N1225 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N1415 X179. Y9.82	N1610 X179. Y58.85
N1230 G1 X41.715 Y34.335	N1420 G1 X98.1 Y9.82	N1615 X179. Y9.82
N1235 G1 Z-1.5 F1	N1425 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N1620 G1 X98.1 Y9.82
N1240 X154.485 Y34.335 F590	N1430 G1 X41.715 Y34.335	N1625 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258
N1245 G1 X154.485 Y26.163	N1435 G1 Z-2.5 F1	N1630 G1 X41.715 Y34.335
N1250 X33.543 Y26.163	N1440 X154.485 Y34.335 F590	N1635 G1 Z-3.5 F1
N1255 X33.543 Y42.507	N1445 G1 X154.485 Y26.163	N1640 X154.485 Y34.335 F590
N1260 X162.657 Y42.507	N1450 X33.543 Y26.163	N1645 G1 X154.485 Y26.163
N1265 X162.657 Y26.163	N1455 X33.543 Y42.507	N1650 X33.543 Y26.163
N1270 G1 X162.657 Y17.992	N1460 X162.657 Y42.507	N1655 X33.543 Y42.507
N1275 X25.372 Y17.992	N1465 X162.657 Y26.163	N1660 X162.657 Y42.507
N1280 X25.372 Y50.678	N1470 G1 X162.657 Y17.992	N1665 X162.657 Y26.163
N1285 X170.828 Y50.678	N1475 X25.372 Y17.992	N1670 G1 X162.657 Y17.992
N1290 X170.828 Y17.992	N1480 X25.372 Y50.678	N1675 X25.372 Y17.992
N1295 G1 X170.828 Y9.82	N1485 X170.828 Y50.678	N1680 X25.372 Y50.678

N1685 X170.828 Y50.678	N1880 X25.372 Y50.678	N2060 X18.95 Y57.1
N1690 X170.828 Y17.992	N1885 X170.828 Y50.678	N2065 X177.25 Y57.1
N1695 G1 X170.828 Y9.82	N1890 X170.828 Y17.992	N2070 X177.25 Y11.57
N1700 X17.2 Y9.82	N1895 G1 X170.828 Y9.82	N2075 G1 X98.1 Y11.57
N1705 X17.2 Y58.85	N1900 X17.2 Y9.82	N2080 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N1710 X179. Y58.85	N1905 X17.2 Y58.85	N2085 G1 X41.715 Y34.335
N1715 X179. Y9.82	N1910 X179. Y58.85	N2090 G1 Z-0.2 F1
N1720 G1 X98.1 Y9.82	N1915 X179. Y9.82	N2095 X154.485 Y34.335 F160
N1725 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N1920 G1 X98.1 Y9.82	N2100 G1 X154.485 Y26.747
N1730 G1 X41.715 Y34.335	N1925 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N2105 X34.127 Y26.747
N1735 G1 Z-4. F1	N1930 G0 X98.1 Y34.335 Z0.1	N2110 X34.127 Y41.923
N1740 X154.485 Y34.335 F590	(**#00004 Fin **)	N2115 X162.073 Y41.923
N1745 G1 X154.485 Y26.163	N1935 T3 D5 M0 (* Fraise angl. 16mm *)	N2120 X162.073 Y26.747
N1750 X33.543 Y26.163	N1940 M4	N2125 G1 X162.073 Y19.158
N1755 X33.543 Y42.507	N1945 G0 X22.253 Y12.982	N2130 X26.538 Y19.158
N1760 X162.657 Y42.507	N1950 G0 X20.926 Y12.097	N2135 X26.538 Y49.512
N1765 X162.657 Y26.163	N1955 G0 X20.484 Y13.867	N2140 X169.662 Y49.512
N1770 G1 X162.657 Y17.992	N1960 G0 X24.023 Y15.194	N2145 X169.662 Y19.158
N1775 X25.372 Y17.992	N1965 F160	N2150 G1 X169.662 Y11.57
N1780 X25.372 Y50.678		N2155 X18.95 Y11.57
N1785 X170.828 Y50.678	(**#00004 Poche rectangulaire, DIN 66025 **)	N2160 X18.95 Y57.1
N1790 X170.828 Y17.992	N1970 G94 F160 G97 S1500	N2165 X177.25 Y57.1
N1795 G1 X170.828 Y9.82	1975 G0 X98.1 Y34.335 M4	N2170 X177.25 Y11.57
N1800 X17.2 Y9.82	N1980 G1 Z0.	N2175 G1 X98.1 Y11.57
N1805 X17.2 Y58.85	N1985 G1 X41.715 Y34.335	N2180 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N1810 X179. Y58.85	N1990 G1 Z-0.1 F1	N2185 G1 X41.715 Y34.335
N1815 X179. Y9.82	N1995 X154.485 Y34.335 F160	N2190 G1 Z-0.3 F1
N1820 G1 X98.1 Y9.82	N2000 G1 X154.485 Y26.747	N2195 X154.485 Y34.335 F160
N1825 G2 X98.1 Y34.335 I0. J12.258	N2005 X34.127 Y26.747	N2200 G1 X154.485 Y26.747
N1830 G1 X41.715 Y34.335	N2010 X34.127 Y41.923	N2205 X34.127 Y26.747
N1835 G1 Z-4.19 F1	N2015 X162.073 Y41.923	N2210 X34.127 Y41.923
N1840 X154.485 Y34.335 F590	N2020 X162.073 Y26.747	N2215 X162.073 Y41.923
N1845 G1 X154.485 Y26.163	N2025 G1 X162.073 Y19.158	N2220 X162.073 Y26.747
N1850 X33.543 Y26.163	N2030 X26.538 Y19.158	N2225 G1 X162.073 Y19.158
N1855 X33.543 Y42.507	N2035 X26.538 Y49.512	N2230 X26.538 Y19.158
N1860 X162.657 Y42.507	N2040 X169.662 Y49.512	N2235 X26.538 Y49.512
N1865 X162.657 Y26.163	N2045 X169.662 Y19.158	N2240 X169.662 Y49.512
N1870 G1 X162.657 Y17.992	N2050 G1 X169.662 Y11.57	N2245 X169.662 Y19.158
N1875 X25.372 Y17.992	N2055 X18.95 Y11.57	N2250 G1 X169.662 Y11.57

N2255 X18.95 Y11.57	N2450 G1 X169.662 Y11.57	N2645 X169.662 Y19.158
N2260 X18.95 Y57.1	N2455 X18.95 Y11.57	N2650 G1 X169.662 Y11.57
N2265 X177.25 Y57.1	N2460 X18.95 Y57.1	N2655 X18.95 Y11.57
N2270 X177.25 Y11.57	N2465 X177.25 Y57.1	N2660 X18.95 Y57.1
N2275 G1 X98.1 Y11.57	N2470 X177.25 Y11.57	N2665 X177.25 Y57.1
N2280 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N2475 G1 X98.1 Y11.57	N2670 X177.25 Y11.57
N2285 G1 X41.715 Y34.335	N2480 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N2675 G1 X98.1 Y11.57
N2290 G1 Z-0.4 F1	N2485 G1 X41.715 Y34.335	N2680 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N2295 X154.485 Y34.335 F160	N2490 G1 Z-0.6 F1	N2685 G1 X41.715 Y34.335
N2300 G1 X154.485 Y26.747	N2495 X154.485 Y34.335 F160	N2690 G1 Z-0.8 F1
N2305 X34.127 Y26.747	N2500 G1 X154.485 Y26.747	N2695 X154.485 Y34.335 F160
N2310 X34.127 Y41.923	N2505 X34.127 Y26.747	N2700 G1 X154.485 Y26.747
N2315 X162.073 Y41.923	N2510 X34.127 Y41.923	N2705 X34.127 Y26.747
N2320 X162.073 Y26.747	N2515 X162.073 Y41.923	N2710 X34.127 Y41.923
N2325 G1 X162.073 Y19.158	N2520 X162.073 Y26.747	N2715 X162.073 Y41.923
N2330 X26.538 Y19.158	N2525 G1 X162.073 Y19.158	N2720 X162.073 Y26.747
N2335 X26.538 Y49.512	N2530 X26.538 Y19.158	N2725 G1 X162.073 Y19.158
N2340 X169.662 Y49.512	N2535 X26.538 Y49.512	N2730 X26.538 Y19.158
N2345 X169.662 Y19.158	N2540 X169.662 Y49.512	N2735 X26.538 Y49.512
N2350 G1 X169.662 Y11.57	N2545 X169.662 Y19.158	N2740 X169.662 Y49.512
N2355 X18.95 Y11.57	N2550 G1 X169.662 Y11.57	N2745 X169.662 Y19.158
N2360 X18.95 Y57.1	N2555 X18.95 Y11.57	N2750 G1 X169.662 Y11.57
N2365 X177.25 Y57.1	N2560 X18.95 Y57.1	N2755 X18.95 Y11.57
N2370 X177.25 Y11.57	N2565 X177.25 Y57.1	N2760 X18.95 Y57.1
N2375 G1 X98.1 Y11.57	N2570 X177.25 Y11.57	N2765 X177.25 Y57.1
N2380 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N2575 G1 X98.1 Y11.57	N2770 X177.25 Y11.57
N2385 G1 X41.715 Y34.335	N2580 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N2775 G1 X98.1 Y11.57
N2390 G1 Z-0.5 F1	N2585 G1 X41.715 Y34.335	N2780 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N2395 X154.485 Y34.335 F160	N2590 G1 Z-0.7 F1	N2785 G1 X41.715 Y34.335
N2400 G1 X154.485 Y26.747	N2595 X154.485 Y34.335 F160	N2790 G1 Z-0.9 F1
N2405 X34.127 Y26.747	N2600 G1 X154.485 Y26.747	N2795 X154.485 Y34.335 F160
N2410 X34.127 Y41.923	N2605 X34.127 Y26.747	N2800 G1 X154.485 Y26.747
N2415 X162.073 Y41.923	N2610 X34.127 Y41.923	N2805 X34.127 Y26.747
N2420 X162.073 Y26.747	N2615 X162.073 Y41.923	N2810 X34.127 Y41.923
N2425 G1 X162.073 Y19.158	N2620 X162.073 Y26.747	N2815 X162.073 Y41.923
N2430 X26.538 Y19.158	N2625 G1 X162.073 Y19.158	N2820 X162.073 Y26.747
N2435 X26.538 Y49.512	N2630 X26.538 Y19.158	N2825 G1 X162.073 Y19.158
N2440 X169.662 Y49.512	N2635 X26.538 Y49.512	N2830 X26.538 Y19.158
N2445 X169.662 Y19.158	N2640 X169.662 Y49.512	N2835 X26.538 Y49.512

N2840 X169.662 Y49.512	N3035 X26.538 Y49.512	N3230 X26.538 Y19.158
N2845 X169.662 Y19.158	N3040 X169.662 Y49.512	N3235 X26.538 Y49.512
N2850 G1 X169.662 Y11.57	N3045 X169.662 Y19.158	N3240 X169.662 Y49.512
N2855 X18.95 Y11.57	N3050 G1 X169.662 Y11.57	N3245 X169.662 Y19.158
N2860 X18.95 Y57.1	N3055 X18.95 Y11.57	N3250 G1 X169.662 Y11.57
N2865 X177.25 Y57.1	N3060 X18.95 Y57.1	N3255 X18.95 Y11.57
N2870 X177.25 Y11.57	N3065 X177.25 Y57.1	N3260 X18.95 Y57.1
N2875 G1 X98.1 Y11.57	N3070 X177.25 Y11.57	N3265 X177.25 Y57.1
N2880 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3075 G1 X98.1 Y11.57	N3270 X177.25 Y11.57
N2885 G1 X41.715 Y34.335	N3080 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3275 G1 X98.1 Y11.57
N2890 G1 Z-1. F1	N3085 G1 X41.715 Y34.335	N3280 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N2895 X154.485 Y34.335 F160	N3090 G1 Z-1.2 F1	N3285 G1 X41.715 Y34.335
N2900 G1 X154.485 Y26.747	N3095 X154.485 Y34.335 F160	N3290 G1 Z-1.4 F1
N2905 X34.127 Y26.747	N3100 G1 X154.485 Y26.747	N3295 X154.485 Y34.335 F160
N2910 X34.127 Y41.923	N3105 X34.127 Y26.747	N3300 G1 X154.485 Y26.747
N2915 X162.073 Y41.923	N3110 X34.127 Y41.923	N3305 X34.127 Y26.747
N2920 X162.073 Y26.747	N3115 X162.073 Y41.923	N3310 X34.127 Y41.923
N2925 G1 X162.073 Y19.158	N3120 X162.073 Y26.747	N3315 X162.073 Y41.923
N2930 X26.538 Y19.158	N3125 G1 X162.073 Y19.158	N3320 X162.073 Y26.747
N2935 X26.538 Y49.512	N3130 X26.538 Y19.158	N3325 G1 X162.073 Y19.158
N2940 X169.662 Y49.512	N3135 X26.538 Y49.512	N3330 X26.538 Y19.158
N2945 X169.662 Y19.158	N3140 X169.662 Y49.512	N3335 X26.538 Y49.512
N2950 G1 X169.662 Y11.57	N3145 X169.662 Y19.158	N3340 X169.662 Y49.512
N2955 X18.95 Y11.57	N3150 G1 X169.662 Y11.57	N3345 X169.662 Y19.158
N2960 X18.95 Y57.1	N3155 X18.95 Y11.57	N3350 G1 X169.662 Y11.57
N2965 X177.25 Y57.1	N3160 X18.95 Y57.1	N3355 X18.95 Y11.57
N2970 X177.25 Y11.57	N3165 X177.25 Y57.1	N3360 X18.95 Y57.1
N2975 G1 X98.1 Y11.57	N3170 X177.25 Y11.57	N3365 X177.25 Y57.1
N2980 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3175 G1 X98.1 Y11.57	N3370 X177.25 Y11.57
N2985 G1 X41.715 Y34.335	N3180 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3375 G1 X98.1 Y11.57
N2990 G1 Z-1.1 F1	N3185 G1 X41.715 Y34.335	N3380 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N2995 X154.485 Y34.335 F160	N3190 G1 Z-1.3 F1	N3385 G1 X41.715 Y34.335
N3000 G1 X154.485 Y26.747	N3195 X154.485 Y34.335 F160	N3390 G1 Z-1.5 F1
N3005 X34.127 Y26.747	N3200 G1 X154.485 Y26.747	N3395 X154.485 Y34.335 F160
N3010 X34.127 Y41.923	N3205 X34.127 Y26.747	N3400 G1 X154.485 Y26.747
N3015 X162.073 Y41.923	N3210 X34.127 Y41.923	N3405 X34.127 Y26.747
N3020 X162.073 Y26.747	N3215 X162.073 Y41.923	N3410 X34.127 Y41.923
N3025 G1 X162.073 Y19.158	N3220 X162.073 Y26.747	N3415 X162.073 Y41.923
N3030 X26.538 Y19.158	N3225 G1 X162.073 Y19.158	N3420 X162.073 Y26.747

N3425 G1 X162.073 Y19.158	N3620 X162.073 Y26.747	N3815 X162.073 Y41.923
N3430 X26.538 Y19.158	N3625 G1 X162.073 Y19.158	N3820 X162.073 Y26.747
N3435 X26.538 Y49.512	N3630 X26.538 Y19.158	N3825 G1 X162.073 Y19.158
N3440 X169.662 Y49.512	N3635 X26.538 Y49.512	N3830 X26.538 Y19.158
N3445 X169.662 Y19.158	N3640 X169.662 Y49.512	N3835 X26.538 Y49.512
N3450 G1 X169.662 Y11.57	N3645 X169.662 Y19.158	N3840 X169.662 Y49.512
N3455 X18.95 Y11.57	N3650 G1 X169.662 Y11.57	N3845 X169.662 Y19.158
N3460 X18.95 Y57.1	N3655 X18.95 Y11.57	N3850 G1 X169.662 Y11.57
N3465 X177.25 Y57.1	N3660 X18.95 Y57.1	N3855 X18.95 Y11.57
N3470 X177.25 Y11.57	N3665 X177.25 Y57.1	N3860 X18.95 Y57.1
N3475 G1 X98.1 Y11.57	N3670 X177.25 Y11.57	N3865 X177.25 Y57.1
N3480 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3675 G1 X98.1 Y11.57	N3870 X177.25 Y11.57
N3485 G1 X41.715 Y34.335	N3680 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3875 G1 X98.1 Y11.57
N3490 G1 Z-1.6 F1	N3685 G1 X41.715 Y34.335	N3880 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N3495 X154.485 Y34.335 F160	N3690 G1 Z-1.8 F1	N3885 G1 X41.715 Y34.335
N3500 G1 X154.485 Y26.747	N3695 X154.485 Y34.335 F160	N3890 G1 Z-2. F1
N3505 X34.127 Y26.747	N3700 G1 X154.485 Y26.747	N3895 X154.485 Y34.335 F160
N3510 X34.127 Y41.923	N3705 X34.127 Y26.747	N3900 G1 X154.485 Y26.747
N3515 X162.073 Y41.923	N3710 X34.127 Y41.923	N3905 X34.127 Y26.747
N3520 X162.073 Y26.747	N3715 X162.073 Y41.923	N3910 X34.127 Y41.923
N3525 G1 X162.073 Y19.158	N3720 X162.073 Y26.747	N3915 X162.073 Y41.923
N3530 X26.538 Y19.158	N3725 G1 X162.073 Y19.158	N3920 X162.073 Y26.747
N3535 X26.538 Y49.512	N3730 X26.538 Y19.158	N3925 G1 X162.073 Y19.158
N3540 X169.662 Y49.512	N3735 X26.538 Y49.512	N3930 X26.538 Y19.158
N3545 X169.662 Y19.158	N3740 X169.662 Y49.512	N3935 X26.538 Y49.512
N3550 G1 X169.662 Y11.57	N3745 X169.662 Y19.158	N3940 X169.662 Y49.512
N3555 X18.95 Y11.57	N3750 G1 X169.662 Y11.57	N3945 X169.662 Y19.158
N3560 X18.95 Y57.1	N3755 X18.95 Y11.57	N3950 G1 X169.662 Y11.57
N3565 X177.25 Y57.1	N3760 X18.95 Y57.1	N3955 X18.95 Y11.57
N3570 X177.25 Y11.57	N3765 X177.25 Y57.1	N3960 X18.95 Y57.1
N3575 G1 X98.1 Y11.57	N3770 X177.25 Y11.57	N3965 X177.25 Y57.1
N3580 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3775 G1 X98.1 Y11.57	N3970 X177.25 Y11.57
N3585 G1 X41.715 Y34.335	N3780 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N3975 G1 X98.1 Y11.57
N3590 G1 Z-1.7 F1	N3785 G1 X41.715 Y34.335	N3980 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N3595 X154.485 Y34.335 F160	N3790 G1 Z-1.9 F1	N3985 G1 X41.715 Y34.335
N3600 G1 X154.485 Y26.747	N3795 X154.485 Y34.335 F160	N3990 G1 Z-2.1 F1
N3605 X34.127 Y26.747	N3800 G1 X154.485 Y26.747	N3995 X154.485 Y34.335 F160
N3610 X34.127 Y41.923	N3805 X34.127 Y26.747	N4000 G1 X154.485 Y26.747
N3615 X162.073 Y41.923	N3810 X34.127 Y41.923	N4005 X34.127 Y26.747

N4010 X34.127 Y41.923	N4205 X34.127 Y26.747	N4400 G1 X154.485 Y26.747
N4015 X162.073 Y41.923	N4210 X34.127 Y41.923	N4405 X34.127 Y26.747
N4020 X162.073 Y26.747	N4215 X162.073 Y41.923	N4410 X34.127 Y41.923
N4025 G1 X162.073 Y19.158	N4220 X162.073 Y26.747	N4415 X162.073 Y41.923
N4030 X26.538 Y19.158	N4225 G1 X162.073 Y19.158	N4420 X162.073 Y26.747
N4035 X26.538 Y49.512	N4230 X26.538 Y19.158	N4425 G1 X162.073 Y19.158
N4040 X169.662 Y49.512	N4235 X26.538 Y49.512	N4430 X26.538 Y19.158
N4045 X169.662 Y19.158	N4240 X169.662 Y49.512	N4435 X26.538 Y49.512
N4050 G1 X169.662 Y11.57	N4245 X169.662 Y19.158	N4440 X169.662 Y49.512
N4055 X18.95 Y11.57	N4250 G1 X169.662 Y11.57	N4445 X169.662 Y19.158
N4060 X18.95 Y57.1	N4255 X18.95 Y11.57	N4450 G1 X169.662 Y11.57
N4065 X177.25 Y57.1	N4260 X18.95 Y57.1	N4455 X18.95 Y11.57
N4070 X177.25 Y11.57	N4265 X177.25 Y57.1	N4460 X18.95 Y57.1
N4075 G1 X98.1 Y11.57	N4270 X177.25 Y11.57	N4465 X177.25 Y57.1
N4080 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4275 G1 X98.1 Y11.57	N4470 X177.25 Y11.57
N4085 G1 X41.715 Y34.335	N4280 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4475 G1 X98.1 Y11.57
N4090 G1 Z-2.2 F1	N4285 G1 X41.715 Y34.335	N4480 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N4095 X154.485 Y34.335 F160	N4290 G1 Z-2.4 F1	N4485 G1 X41.715 Y34.335
N4100 G1 X154.485 Y26.747	N4295 X154.485 Y34.335 F160	N4490 G1 Z-2.6 F1
N4105 X34.127 Y26.747	N4300 G1 X154.485 Y26.747	N4495 X154.485 Y34.335 F160
N4110 X34.127 Y41.923	N4305 X34.127 Y26.747	N4500 G1 X154.485 Y26.747
N4115 X162.073 Y41.923	N4310 X34.127 Y41.923	N4505 X34.127 Y26.747
N4120 X162.073 Y26.747	N4315 X162.073 Y41.923	N4510 X34.127 Y41.923
N4125 G1 X162.073 Y19.158	N4320 X162.073 Y26.747	N4515 X162.073 Y41.923
N4130 X26.538 Y19.158	N4325 G1 X162.073 Y19.158	N4520 X162.073 Y26.747
N4135 X26.538 Y49.512	N4330 X26.538 Y19.158	N4525 G1 X162.073 Y19.158
N4140 X169.662 Y49.512	N4335 X26.538 Y49.512	N4530 X26.538 Y19.158
N4145 X169.662 Y19.158	N4340 X169.662 Y49.512	N4535 X26.538 Y49.512
N4150 G1 X169.662 Y11.57	N4345 X169.662 Y19.158	N4540 X169.662 Y49.512
N4155 X18.95 Y11.57	N4350 G1 X169.662 Y11.57	N4545 X169.662 Y19.158
N4160 X18.95 Y57.1	N4355 X18.95 Y11.57	N4550 G1 X169.662 Y11.57
N4165 X177.25 Y57.1	N4360 X18.95 Y57.1	N4555 X18.95 Y11.57
N4170 X177.25 Y11.57	N4365 X177.25 Y57.1	N4560 X18.95 Y57.1
N4175 G1 X98.1 Y11.57	N4370 X177.25 Y11.57	N4565 X177.25 Y57.1
N4180 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4375 G1 X98.1 Y11.57	N4570 X177.25 Y11.57
N4185 G1 X41.715 Y34.335	N4380 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4575 G1 X98.1 Y11.57
N4190 G1 Z-2.3 F1	N4385 G1 X41.715 Y34.335	N4580 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N4195 X154.485 Y34.335 F160	N4390 G1 Z-2.5 F1	N4585 G1 X41.715 Y34.335
N4200 G1 X154.485 Y26.747	N4395 X154.485 Y34.335 F160	N4590 G1 Z-2.7 F1

N4595 X154.485 Y34.335 F160	N4790 G1 Z-2.9 F1	N4985 G1 X41.715 Y34.335
N4600 G1 X154.485 Y26.747	N4795 X154.485 Y34.335 F160	N4990 G1 Z-3.1 F1
N4605 X34.127 Y26.747	N4800 G1 X154.485 Y26.747	N4995 X154.485 Y34.335 F160
N4610 X34.127 Y41.923	N4805 X34.127 Y26.747	N5000 G1 X154.485 Y26.747
N4615 X162.073 Y41.923	N4810 X34.127 Y41.923	N5005 X34.127 Y26.747
N4620 X162.073 Y26.747	N4815 X162.073 Y41.923	N5010 X34.127 Y41.923
N4625 G1 X162.073 Y19.158	N4820 X162.073 Y26.747	N5015 X162.073 Y41.923
N4630 X26.538 Y19.158	N4825 G1 X162.073 Y19.158	N5020 X162.073 Y26.747
N4635 X26.538 Y49.512	N4830 X26.538 Y19.158	N5025 G1 X162.073 Y19.158
N4640 X169.662 Y49.512	N4835 X26.538 Y49.512	N5030 X26.538 Y19.158
N4645 X169.662 Y19.158	N4840 X169.662 Y49.512	N5035 X26.538 Y49.512
N4650 G1 X169.662 Y11.57	N4845 X169.662 Y19.158	N5040 X169.662 Y49.512
N4655 X18.95 Y11.57	N4850 G1 X169.662 Y11.57	N5045 X169.662 Y19.158
N4660 X18.95 Y57.1	N4855 X18.95 Y11.57	N5050 G1 X169.662 Y11.57
N4665 X177.25 Y57.1	N4860 X18.95 Y57.1	N5055 X18.95 Y11.57
N4670 X177.25 Y11.57	N4865 X177.25 Y57.1	N5060 X18.95 Y57.1
N4675 G1 X98.1 Y11.57	N4870 X177.25 Y11.57	N5065 X177.25 Y57.1
N4680 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4875 G1 X98.1 Y11.57	N5070 X177.25 Y11.57
N4685 G1 X41.715 Y34.335	N4880 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5075 G1 X98.1 Y11.57
N4690 G1 Z-2.8 F1	N4885 G1 X41.715 Y34.335	N5080 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N4695 X154.485 Y34.335 F160	N4890 G1 Z-3. F1	N5085 G1 X41.715 Y34.335
N4700 G1 X154.485 Y26.747	N4895 X154.485 Y34.335 F160	N5090 G1 Z-3.2 F1
N4705 X34.127 Y26.747	N4900 G1 X154.485 Y26.747	N5095 X154.485 Y34.335 F160
N4710 X34.127 Y41.923	N4905 X34.127 Y26.747	N5100 G1 X154.485 Y26.747
N4715 X162.073 Y41.923	N4910 X34.127 Y41.923	N5105 X34.127 Y26.747
N4720 X162.073 Y26.747	N4915 X162.073 Y41.923	N5110 X34.127 Y41.923
N4725 G1 X162.073 Y19.158	N4920 X162.073 Y26.747	N5115 X162.073 Y41.923
N4730 X26.538 Y19.158	N4925 G1 X162.073 Y19.158	N5120 X162.073 Y26.747
N4735 X26.538 Y49.512	N4930 X26.538 Y19.158	N5125 G1 X162.073 Y19.158
N4740 X169.662 Y49.512	N4935 X26.538 Y49.512	N5130 X26.538 Y19.158
N4745 X169.662 Y19.158	N4940 X169.662 Y49.512	N5135 X26.538 Y49.512
N4750 G1 X169.662 Y11.57	N4945 X169.662 Y19.158	N5140 X169.662 Y49.512
N4755 X18.95 Y11.57	N4950 G1 X169.662 Y11.57	N5145 X169.662 Y19.158
N4760 X18.95 Y57.1	N4955 X18.95 Y11.57	N5150 G1 X169.662 Y11.57
N4765 X177.25 Y57.1	N4960 X18.95 Y57.1	N5155 X18.95 Y11.57
N4770 X177.25 Y11.57	N4965 X177.25 Y57.1	N5160 X18.95 Y57.1
N4775 G1 X98.1 Y11.57	N4970 X177.25 Y11.57	N5165 X177.25 Y57.1
N4780 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N4975 G1 X98.1 Y11.57	N5170 X177.25 Y11.57
N4785 G1 X41.715 Y34.335	N4980 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5175 G1 X98.1 Y11.57

N5180 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5375 G1 X98.1 Y11.57	N5570 X177.25 Y11.57
N5185 G1 X41.715 Y34.335	N5380 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5575 G1 X98.1 Y11.57
N5190 G1 Z-3.3 F1	N5385 G1 X41.715 Y34.335	N5580 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N5195 X154.485 Y34.335 F160	N5390 G1 Z-3.5 F1	N5585 G1 X41.715 Y34.335
N5200 G1 X154.485 Y26.747	N5395 X154.485 Y34.335 F160	N5590 G1 Z-3.7 F1
N5205 X34.127 Y26.747	N5400 G1 X154.485 Y26.747	N5595 X154.485 Y34.335 F160
N5210 X34.127 Y41.923	N5405 X34.127 Y26.747	N5600 G1 X154.485 Y26.747
N5215 X162.073 Y41.923	N5410 X34.127 Y41.923	N5605 X34.127 Y26.747
N5220 X162.073 Y26.747	N5415 X162.073 Y41.923	N5610 X34.127 Y41.923
N5225 G1 X162.073 Y19.158	N5420 X162.073 Y26.747	N5615 X162.073 Y41.923
N5230 X26.538 Y19.158	N5425 G1 X162.073 Y19.158	N5620 X162.073 Y26.747
N5235 X26.538 Y49.512	N5430 X26.538 Y19.158	N5625 G1 X162.073 Y19.158
N5240 X169.662 Y49.512	N5435 X26.538 Y49.512	N5630 X26.538 Y19.158
N5245 X169.662 Y19.158	N5440 X169.662 Y49.512	N5635 X26.538 Y49.512
N5250 G1 X169.662 Y11.57	N5445 X169.662 Y19.158	N5640 X169.662 Y49.512
N5255 X18.95 Y11.57	N5450 G1 X169.662 Y11.57	N5645 X169.662 Y19.158
N5260 X18.95 Y57.1	N5455 X18.95 Y11.57	N5650 G1 X169.662 Y11.57
N5265 X177.25 Y57.1	N5460 X18.95 Y57.1	N5655 X18.95 Y11.57
N5270 X177.25 Y11.57	N5465 X177.25 Y57.1	N5660 X18.95 Y57.1
N5275 G1 X98.1 Y11.57	N5470 X177.25 Y11.57	N5665 X177.25 Y57.1
N5280 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5475 G1 X98.1 Y11.57	N5670 X177.25 Y11.57
N5285 G1 X41.715 Y34.335	N5480 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5675 G1 X98.1 Y11.57
N5290 G1 Z-3.4 F1	N5485 G1 X41.715 Y34.335	N5680 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N5295 X154.485 Y34.335 F160	N5490 G1 Z-3.6 F1	N5685 G1 X41.715 Y34.335
N5300 G1 X154.485 Y26.747	N5495 X154.485 Y34.335 F160	N5690 G1 Z-3.8 F1
N5305 X34.127 Y26.747	N5500 G1 X154.485 Y26.747	N5695 X154.485 Y34.335 F160
N5310 X34.127 Y41.923	N5505 X34.127 Y26.747	N5700 G1 X154.485 Y26.747
N5315 X162.073 Y41.923	N5510 X34.127 Y41.923	N5705 X34.127 Y26.747
N5320 X162.073 Y26.747	N5515 X162.073 Y41.923	N5710 X34.127 Y41.923
N5325 G1 X162.073 Y19.158	N5520 X162.073 Y26.747	N5715 X162.073 Y41.923
N5330 X26.538 Y19.158	N5525 G1 X162.073 Y19.158	N5720 X162.073 Y26.747
N5335 X26.538 Y49.512	N5530 X26.538 Y19.158	N5725 G1 X162.073 Y19.158
N5340 X169.662 Y49.512	N5535 X26.538 Y49.512	N5730 X26.538 Y19.158
N5345 X169.662 Y19.158	N5540 X169.662 Y49.512	N5735 X26.538 Y49.512
N5350 G1 X169.662 Y11.57	N5545 X169.662 Y19.158	N5740 X169.662 Y49.512
N5355 X18.95 Y11.57	N5550 G1 X169.662 Y11.57	N5745 X169.662 Y19.158
N5360 X18.95 Y57.1	N5555 X18.95 Y11.57	N5750 G1 X169.662 Y11.57
N5365 X177.25 Y57.1	N5560 X18.95 Y57.1	N5755 X18.95 Y11.57
N5370 X177.25 Y11.57	N5565 X177.25 Y57.1	N5760 X18.95 Y57.1

N5765 X177.25 Y57.1	N5910 X34.127 Y41.923	N6055 X18.95 Y11.57
N5770 X177.25 Y11.57	N5915 X162.073 Y41.923	N6060 X18.95 Y57.1
N5775 G1 X98.1 Y11.57	N5920 X162.073 Y26.747	N6065 X177.25 Y57.1
N5780 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N5925 G1 X162.073 Y19.158	N6070 X177.25 Y11.57
N5785 G1 X41.715 Y34.335	N5930 X26.538 Y19.158	N6075 G1 X98.1 Y11.57
N5790 G1 Z-3.9 F1	N5935 X26.538 Y49.512	N6080 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N5795 X154.485 Y34.335 F160	N5940 X169.662 Y49.512	N6085 G1 X41.715 Y34.335
N5800 G1 X154.485 Y26.747	N5945 X169.662 Y19.158	N6090 G1 Z-4.19 F1
N5805 X34.127 Y26.747	N5950 G1 X169.662 Y11.57	N6095 X154.485 Y34.335 F160
N5810 X34.127 Y41.923	N5955 X18.95 Y11.57	N6100 G1 X154.485 Y26.747
N5815 X162.073 Y41.923	N5960 X18.95 Y57.1	N6105 X34.127 Y26.747
N5820 X162.073 Y26.747	N5965 X177.25 Y57.1	N6110 X34.127 Y41.923
N5825 G1 X162.073 Y19.158	N5970 X177.25 Y11.57	N6115 X162.073 Y41.923
N5830 X26.538 Y19.158	N5975 G1 X98.1 Y11.57	N6120 X162.073 Y26.747
N5835 X26.538 Y49.512	N5980 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N6125 G1 X162.073 Y19.158
N5840 X169.662 Y49.512	N5985 G1 X41.715 Y34.335	N6130 X26.538 Y19.158
N5845 X169.662 Y19.158	N5990 G1 Z-4.1 F1	N6135 X26.538 Y49.512
N5850 G1 X169.662 Y11.57	N5995 X154.485 Y34.335 F160	N6140 X169.662 Y49.512
N5855 X18.95 Y11.57	N6000 G1 X154.485 Y26.747	N6145 X169.662 Y19.158
N5860 X18.95 Y57.1	N6005 X34.127 Y26.747	N6150 G1 X169.662 Y11.57
N5865 X177.25 Y57.1	N6010 X34.127 Y41.923	N6155 X18.95 Y11.57
N5870 X177.25 Y11.57	N6015 X162.073 Y41.923	N6160 X18.95 Y57.1
N5875 G1 X98.1 Y11.57	N6020 X162.073 Y26.747	N6165 X177.25 Y57.1
N5880 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382	N6025 G1 X162.073 Y19.158	N6170 X177.25 Y11.57
N5885 G1 X41.715 Y34.335	N6030 X26.538 Y19.158	N6175 G1 X98.1 Y11.57
N5890 G1 Z-4. F1	N6035 X26.538 Y49.512	N6180 G2 X98.1 Y34.335 I0. J11.382
N5895 X154.485 Y34.335 F160	N6040 X169.662 Y49.512	N6185 G0 X98.1 Y34.335 Z0.1
N5900 G1 X154.485 Y26.747	N6045 X169.662 Y19.158	(**#00004 Fin **)
N5905 X34.127 Y26.747	N6050 G1 X169.662 Y11.57	N6190 M30