



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

**KIROUANE, Kafia**

**MARTINHO, Martinho Francisco J. A**

Thème

---

**Conception et fabrication assistée par ordinateur d'un  
galet d'une profileuse**

---

**Membre de jury :**

Mr. HADJOU M.

Mlle. HIMED L.

**Encadreur :**

Mr. BOUTAANI S.

Année Universitaire 2020/2021

## Remerciements

*Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant qui nous a accordé la santé et le courage pour mener ce travail jusqu'au bout.*

*A Mr BOUTAANI notre promoteur, nous tenons à le remercier tout d'abord d'avoir accepté de nous encadrer et aussi pour toutes ses orientations et ses conseils et de nous avoir accompagné tout au long de la réalisation de notre travail.*

*A Mr BEKKA Djamel qui nous a vraiment aider avec tous ses conseils et de nous avoir répondu à tout moment nous le remerciant infiniment.*

*Nous tenons aussi à remercier Mlle Himed et Mr Hadjou d'avoir acceptés d'être membre de notre jury et d'avoir pris le temps de participer à ce moment et d'ajouter de la valeur à nos connaissances par leurs critiques et observations.*

*A nos familles, amis, et tous ceux qui ont porté une aide de près ou de loin on les remercie.*

## Résumé

Le développement rapide et constant des technologies de fabrication, ainsi que l'intérêt pour la sauvegarde des ressources utilisées comme matière première, ont permis à l'industrie manufacturière de développer des procédés visant à augmenter la productivité sans mettre en péril la satisfaction de la demande croissante.

Parmi les différents procédés de fabrication, le procédé de profilage offre un bon rapport coût/bénéfice et est donc considéré comme l'un des procédés les plus productifs malgré le peu de documentation disponible sur le sujet. Ce procédé s'est amélioré au fil des années et il permet aujourd'hui la fabrication de pièces aux profils complexes sans gaspillage majeur de matière première.

Cependant, la compétitivité sur le marché d'aujourd'hui exige un contrôle périodique et méticuleux, en particulier lorsque l'on travaille avec des profils avec des intervalles de tolérance étroites.

Certaines imperfections dans les composants de la machine responsable du processus, notamment le galet de la profileuse peuvent rendre une pièce ou même plusieurs lots inutilisables, ce qui peut coûter cher à l'entreprise fabricante.

Dans ce travail, nous avons l'intention de montrer le processus de fabrication d'un rouleau d'une profileuse à partir d'un rouleau endommagé qui ne dispose pas d'informations techniques à jour. Pour cela nous utiliserons la rétro-conception, qui est une technique qui permet à partir d'un modèle physique existant, de développer des modèles virtuels permettant de modifier ou d'ajouter des composants ou encore de récupérer des informations techniques perdues lors de l'utilisation de la pièce. C'est ce dernier le cas traiter dans ce travail.

## **Abstract**

The rapid and constant development of manufacturing technologies, as well as the interest in saving the resources used as raw material, have enabled the manufacturing industry to develop processes aimed at increasing productivity without jeopardizing the satisfaction of the growing demand.

Among the various manufacturing processes, the profiling process offers a good cost / benefit ratio and is therefore considered to be one of the most productive processes despite the little documentation available on the subject. This process has improved over the years and today allows the manufacture of parts with complex profiles without major waste of raw material.

However, competitiveness in today's market requires periodic and meticulous control, especially when working with profiles with narrow tolerance intervals.

Certain imperfections in the components of the machine responsible for the process, notably the roll of the roll forming machine, can render a part or even several batches unusable, which can be costly to the manufacturing company.

In this work, we intend to show the process of making a roll of a roll forming machine from a damaged roll that does not have up-to-date technical information. For this, we will use reverse engineering, which is a technique that allows, from an existing physical model, to develop virtual models, allowing to modify or add components or to recover technical information lost during use of a part. The latter case is the one treated in this work.

# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PROFILAGE DES TOLES**

I.1. Introduction .....	3
I.2. Profilage .....	3
I.2.1. Historique du profilage .....	3
I.2.2. Définition .....	5
I.2.3. Méthodes du profilage .....	5
a) Cintrage .....	5
b) Laminage .....	6
c) Laminage circulaire .....	6
d) Profilage de tôles .....	7
I.2.4. Le procédé de profilage des tôles .....	7
I.2.5. La profileuse .....	8
I.2.5.1 Composants dans l'étape de formage .....	9
I.2.6. Galet d'une profileuse .....	11
I.2.6.1. Formes des galets .....	13
I.2.6.2. Nombre et disposition des têtes .....	14
I.2.6.3. Matériau de fabrication .....	14
I.2.7. Mise en forme de tôles à froid .....	15
I.2.7.1. Avantages et inconvénients du profilage à froid .....	16
I.3. Conclusion .....	17

## **CHAPITRE II : RÉTRO-CONCEPTION**

II.1. Introduction .....	18
II.2. Rétro-Conception .....	18
III.4.2. Définition .....	18
II.2.2. Principe de la rétro-conception .....	19
II.2.3. Applications .....	20

II.2.4.	Étapes de la rétro-conception.....	21
II.2.5.	Les logiciels utilisés pour la rétro-conception: .....	28
II.2.6.	L'étude du cas .....	28
II.2.6.1.	Solutions proposées .....	29
II.2.7.	Conclusion .....	30

### CHAPITRE III : FABRICATION ASSISTÉ PAR ORDINATEUR

III.1.	Introduction .....	31
III.2.	Historique .....	32
III.5.2.	Rôle des ingénieurs de fabrication .....	32
III.3.	Définition FAO.....	33
III.3.1.	Objectif de la FAO .....	33
III.4.	Tour à commande numérique .....	34
III.4.1.	Les opérations de tournage.....	35
III.4.2.	Maintien en position de la pièce.....	36
III.5.	Outil de coupe.....	38
III.5.1.	Forme et géométrie des outils de coupe .....	41
III.5.2.	Influence des angles sur la coupe .....	42
III.6.	Choix d'outil.....	42
III.6.1.	Étapes pour le choix d'outil de coupe .....	43
III.7.	Fabrication du galet .....	46
III.4.2.	Étapes de fabrication .....	46
III.7.2.	Coût de fabrication .....	60
	<b>Conclusion.....</b>	<b>61</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>62</b>

## Liste des figures

Figure I.01. Processus de cintrage.....	5
Figure I.02. Processus de laminage .....	6
Figure I.03. Processus de laminage circulaire.....	6
Figure I.04. Processus de profilage de tôles .....	7
Figure I.05. Plan générale d'une profileuse .....	8
Figure I.06. Arbres montés sur un support sans les rouleaux .....	9
Figure I.07. Support des arbres .....	10
Figure I.08. Logement des paliers .....	10
Figure I.09. Arbre de transmission entraîné par chaînes.....	10
Figure I.10. Arbre de transmission par engrenages.....	11
Figure I.11. Galets horizontaux.....	11
Figure I.12. Galets verticaux .....	12
Figure I.13. Galets diagonaux .....	12
Figure I.14. Un galet de forme complexe divisé en sections .....	13
Figure I.15. Sections transversales de différentes complexités.....	13
Figure II.01. Synthèse des différentes technologies de digitalisation d'objets .....	19
Figure II.02. La rétro conception d'une aube de turbine usée .....	20
Figure II.03. Instrumentes conventionnels de mesure.....	21
Figure II.04. Rétro-construction par scanner .....	22
Figure II.05. Palpeur.....	23
Figure II.06. Profilomètre de surfaces.....	24
Figure II.07. Numérisation par laser .....	24
Figure II.08. Les étapes de la méthode de retro conception.....	25
Figure II.09. Dispositif utilisé dans la stéréovision.....	25

Figure II.10. Reconstruction d'une souris .....	27
Figure II.11. Un galet. ....	28
Figure II.12. Galets cassés d'une profileuse .....	29
Figure III.01. La chaîne de production d'une pièce mécanique.....	33
Figure III.02. Un tour à commande numérique.....	35
Figure III.03. Les opérations de tournage .....	36
Figure III.04. Mise en position de la pièce (brut).....	36
Figure III.05. Définitions préliminaires .....	37
Figure III.06. Paramétrage de la coupe .....	38
Figure III.07. Outil à charioter à plaquettes amovibles .....	39
Figure III.08. Faces limitant la partie active de l'outil.....	39
Figure III.09. Vitesses de coupe et d'avances pour les principaux matériaux à outil de coupe .....	40
Figure III.10.Plans sur un outil en main.....	41
Figure III.11. Angles de l'outil de coupe .....	42
Figure III.12. Différents types de fixation de la plaquette. ....	43
Figure III.13. Direction de l'outil de coupe .....	44
Figure III.14. Forme des plaquettes.....	44
Figure III.15. Rayons de bec d'outil de coupe .....	45
Figure III.16. Mise en position (approche 1).....	48
Figure III.17. Mise en position (approche 2).....	48
Figure III.18. Mise en position (approche 3).....	49
Figure III.19. Une pièce en tournage (interface MASTERCAM).....	55
Figure III.20. Cycle de tournage intérieure (alésage).....	57
Figure III.21. Four de traitement thermique .....	58
Figure III.22. Dureté suivant la température de revenu .....	59

## Liste des tableaux

Tableau I.01. Composition de l'acier X160CrMoV12.....	14
Tableau I.02. Propriétés physiques de l'acier X160CrMoV12. ....	15
Tableau III.01. Choix d'outil de dressage/charriotage extérieure.....	50
Tableau III.02. Choix d'outil de mortaisage.....	50
Tableau III.03. Choix d'outil à percer.....	50
Tableau III.04. Choix d'outil à aléser.....	51
Tableau III.05. Choix d'outil à charrioter (profil de la pièce).....	52
Tableau III.06. Conditions de coupe .....	54

# Nomenclatures

**PLC** : Programable Logic Computer (Ordinateur Logique Programmable)

**FAO** : Fabrication assistée par ordinateur

**RC** : Rétro- Conception

**CAO** : Conception assistée par ordinateur

**BE** : Bureau d'études

**IAO** : Ingénierie Assistée par Ordinateur

**MMT** : Machine à mesurer tridimensionnelles

**CNC** : Commande numérique par ordinateur

**BM** : Bureau de méthodes

**DAO** : Dessin assistée par ordinateur

**MONC** : Machine-outil à commande numérique

**ARS** : Acier rapide supérieur

**CIM** : Computer Integrated Manufacturing (Fabrication Intégrée par Ordinateur)

## Introduction général

De nos jours on connaît plusieurs machines de fabrication qui aident l'homme dans le milieu industriel. Parmi celles-ci on trouve la profileuse, qui est une machine qui sert à réaliser divers types de profils. Et aussi à plier le feuillard qui passe dans les têtes de la machine à profiler pour obtenir la forme de profil souhaité. La matière utilisée peut être en acier, inox, aluminium...

La profileuse se compose de plusieurs organes dont essentiellement les galets qui sont des éléments qui se montent sur une ligne de profilage à froid. Ils sont soit monobloc, soit assemblés par vis, et les galets peuvent être en parti. De plus, à mesure que les techniques modernes de fabrication CNC progressent, elles sont séparées pour faciliter l'utilisation des outils

Dans notre mémoire on a fait l'étude de la conception et de la fabrication d'un galet à partir d'un autre qui a une cassure ou le concept initial n'est pas étayé par une documentation adéquate ou suffisante pour nous permettre de fabriquer ce dernier. Afin de savoir la méthode de fabrication de cette pièce on a conçu ce mémoire intitulé «Conception et Fabrication d'un galet d'une profileuse ».

Et pour ce faire on a établi un plan pour montrer la démarche à suivre qui illustre le processus et technique pour la conception et la fabrication qui se subdivisera comme suit en deux parties théorique et pratique:

La première partie qui est théorique consiste à parler sur le premier chapitre qui s'intéresse à la bibliographie et les généralités sur la profileuse et le procédé de profilage ainsi que le matériau utilisé pour fabriquer le galet.

La deuxième partie quant à elle est une partie pratique qui se compose de deux chapitres qui sont :

- Le deuxième chapitre se consacrera à l'étude de la conception du galet en utilisant la méthode de rétro-conception.
- Le troisième chapitre quant à lui parlera de la fabrication (FAO) du galet sur un tour à commande numérique (MOCN).

Et on conclura notre étude par une conclusion générale qui résumera notre travail.



## **I.1. Introduction**

Le profilage a une particularité importante et intrigante. L'aspect significatif est que lors du demi-siècle dernier, le profilage est devenu la technologie de formage des métaux la plus productive. L'aspect intrigant du profilage est que, malgré le fait que de nombreuses personnes ont déjà vu et utilisé plusieurs produits artisanaux, automobiles, agricoles, du mobilier de bureau, des entrepôts et d'autres produits fabriqués à partir de ce processus, peu de gens ont entendu parler du processus lui-même dit. La plupart des gens ont une certaine perception ou image du forgeage, du moulage et soudage, mais pas du profilage et il y a peu de livres qui traitent ce sujet en profondeur.

## **I.2. Profilage**

### **I.2.1. Historique du profilage**

Nos ancêtres ont utilisé des outils en bois et en pierre pendant plus de 1,7 million d'années, soit quelques centaines de milliers d'années, avant de se tourner vers les métaux. Ce n'était pas jusqu'à environ 6000 av. J.-C. lorsque l'or naturel et plus tard le cuivre, le fer météoritique, et quelques autres métaux ont été façonnés par la mer pour faire des ornements, des outils et des armes. Par la suite, nos ancêtres ont découvert comment fabriquer des minéraux, des métaux fondus et alliés, et les utiliser dans des produits plus sophistiqués. [6]

La fabrication d'objets complexes, tels que des balles et des gilets pare-balles d'assemblées à partir de centaines de pièces assorties de plaques et de martelés, nécessitait des compétences et une expérience considérable. La technique était assez exigeante, nécessitant beaucoup d'efforts en raison des longues heures de martelage requises. [6]

En effet, jusqu'au XIXe siècle à l'aube de la révolution industrielle, tous les éléments non coulés de l'ornement à l'utilité étaient fabriqués à la main, en forgeant avec une forte demande de travail manuel. [6]

Au cours de la révolution industrielle des XVIIIème et XIXème siècle, de nombreux outils à main utilisés dans la fabrication des métaux ont été progressivement remplacés par des machines motorisées. [6]

En 1855, Bessemer a reçu un brevet pour la première méthode moderne de production d'acier en Angleterre, un procédé qui a produit de grandes quantités d'acier de haute qualité.

L'une des réalisations les plus importantes et les moins médiatisées de la révolution industrielle a été le remplacement de l'art ancien du martelage par une paire de rouleaux rotatifs pour changer la forme ou l'épaisseur des métaux. Sur la base de l'expérience de forgeage et du fait que l'aluminium est plus malléable à chaud, le processus de profilage a été effectué à des températures élevées. Le procédé a réduit l'épaisseur tout en augmentant la surface en contact avec l'air. Cependant, à mesure que le métal devient plus petit, la surface augmente et le taux de refroidissement augmente. En conséquence et grâce aux progrès technologiques, le profilage à froid a gagné du terrain dans les industries et il est maintenant la principale méthode de déformation des métaux à paroi mince. En conséquence, même avec l'équipement le plus moderne, l'épaisseur minimale d'aluminium stratifié disponible sur le marché se situe toujours entre 1,2 et 1,8 mm. [6]

Selon Halmos, bien que le profilage soit déjà utilisé au début des années 1900, ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale qu'il a repris un pourcentage important de la fabrication de produits en tôle à partir de presses plieuses et autres types de formage. En raison de la haute efficacité du profilage, le contenu de main-d'œuvre de nombreux produits a été considérablement réduit. [6]

Entre 1950 et 1960, des codeurs rotatifs ont été introduits et les applications des presses pneumatiques, du ponçage en ligne, du pré-poinçonnage des métaux pré peints se sont considérablement développées. [6]

Le pré-poinçonnage est devenu plus sophistiqué dans les années 1970 et 1980 à la suite de l'utilisation de divers contrôles et coups de poing bâillonnés. Des innovations ont été introduites pour réduire le temps de changement d'outil en utilisant des radeaux de construction, des galets côte à côte et d'autres dispositifs. [6]

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, la conception assistée par ordinateur des galets et d'autres systèmes a été introduite. [6]

Et en conséquence, le produit ainsi que les tolérances des matériaux sont devenus plus stricts et la demande de flexibilité de fabrication a considérablement augmenté. [6]

### I.2.2. Définition

Le profilage est un procédé de fabrication à haute productivité qui consiste à « former une bande de tôle le long de lignes de pliage droites, longitudinales et parallèles avec plusieurs paires de rouleaux profilés, sans changer l'épaisseur du matériau, et généralement à température ambiante» [6].

Le profilage permet la création de pièces avec un large éventail de sections. Ces profils peuvent être divisés en trois différentes familles ;

- **Les profilés larges** : Ce sont des articles avec une grande taille (600 à 1500mm) et plusieurs ondes de forme identique ou similaire. Dans cette catégorie, on peut trouver, par exemple, des profils de couverture [1].
- **Les tubes** : ce sont des produits à section fermée fabriqués par profilage avec une soudure continue [1].
- **Les profilés étroits** : Ce sont des produits de section ouverte ou fermée obtenus par profilage sans soudure et ne contiennent pas de répétition d'une forme d'onde. Cette catégorie comprend, entre autres, les profils structurels, les chemins de câbles et les diapositives de sécurité [1].

### I.2.3. Méthodes du profilage

#### a) Cintrage

Le cintrage peut être utilisé pour les grandes plaques métalliques épaisses. Trois rouleaux plient la plaque pour produire la courbe souhaitée. Le placement des rouleaux détermine la courbure et l'angle exacts, qui sont contrôlés par la distance entre les rouleaux [2].



Figure I.01. Processus de cintrage [inoxdesign.fr].

**b) Laminage**

En laminage, deux rouleaux tournent dans des directions opposées. L'écart entre les deux rouleaux est légèrement inférieur à l'épaisseur du matériau, qui est poussé par le frottement entre le matériau et les rouleaux, ce qui allonge le matériau en raison de la diminution de son épaisseur. Le frottement limite la quantité de déformation en une seule passe, ce qui nécessite plusieurs passes [2].

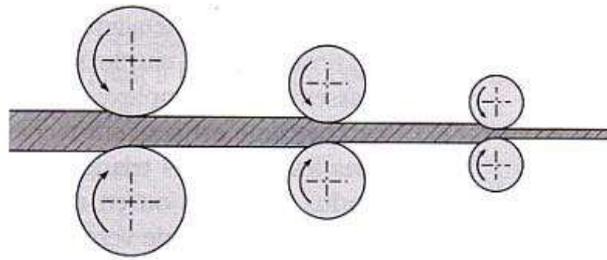


Figure I.02. Processus de laminage [notech.francesev.com].

**c) Laminage circulaire**

Lors du laminage circulaire, un anneau de pièce de petit diamètre est enroulé entre deux rouleaux pour former un anneau de plus grand diamètre. Un rouleau est le rouleau d'entraînement, tandis que l'autre rouleau est inactif. Un rouleau de bordure garantit que le métal aura une largeur constante. La réduction de largeur de la bague est compensée par le diamètre de la bague. Le processus est utilisé pour créer de grands anneaux sans soudure [2].

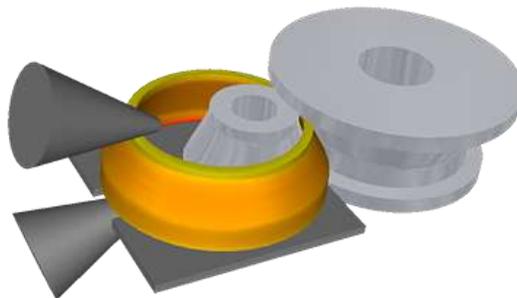


Figure I.03. Processus de laminage circulaire [ringmills.com].

#### d) Profilage de tôles

Le laminage de formes différentes formes dans la pièce et n'implique aucun changement dans l'épaisseur du métal. Il produit des sections moulées telles que des canaux et des garnitures de forme irrégulière. Les formes formées comprennent des poutres en I, des poutres en L, des profilés en U et des rails pour voies ferrées [2].



Figure I.04. Processus de profilage de tôles [techniques-ingenieur.fr].

#### I.2.4. Le procédé de profilage des tôles

Selon Bhattacharyya (2000), le profilage de tôles est une opération de traitement rapide utilisée pour transformer la tôle en un profil avec une section déterminée en fonction d'un processus ou d'un produit. Le procédé de formage par galets utilise la formation progressive des sections de tôle jusqu'à la forme souhaitée.

Le processus est continu, dans lequel une feuille de métal à température ambiante est tirée par des paires de rouleaux de moulage (galets) montés séquentiellement sur la structure. Chaque paire de rouleaux a pour fonction de modifier mécaniquement la forme géométrique de la feuille, tandis que des supports supportent les rouleaux de moulage [4].

L'ensemble de rouleaux de moulage plie initialement une plaque métallique plate, qui est progressivement mise en forme par l'action des rouleaux au profil souhaité [4].

Il permet la réalisation de pièces dont les sections sont très variées (forme en U, C, Z, L, W, glissières de siège, pare-chocs automobiles, supports de faux plafonds, luminaires, ...). C'est un procédé utilisé par tous les secteurs de l'industrie (automobile, électroménager, bâtiment, ...) [4].

### I.2.5. La profileuse

La profileuse est une machine utilisée dans le processus de formage, c'est-à-dire un pressage avec des outils rotatifs utilisé pour créer des formes et des profils de section transversale uniforme.

La profileuse de tôles est principalement composée d'un **dérouleur**, d'une **machine de formage de rouleaux**, d'une **découpeuse**, d'un **ordinateur PLC** (ordinateur logique programmable), d'un **système hydraulique** et d'une **table de sortie**.

Cette machine de formage de rouleaux est-elle même composée de quelques éléments, parmi eux on trouve des **galets**, qui sont responsables de la déformation des tôles jusqu'à la forme désirée. C'est, donc, ces éléments en quoi notre étude se base [4].

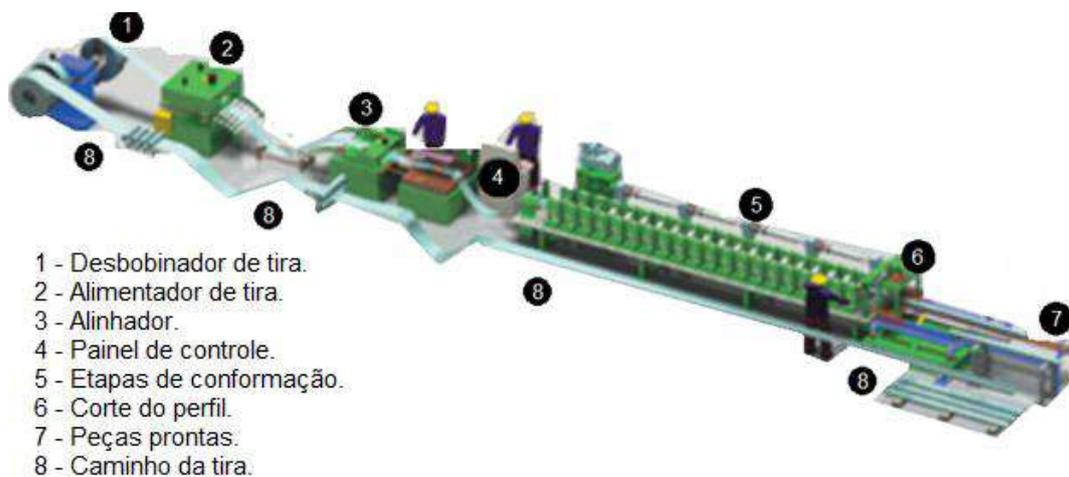


Figure I.05. Plan générale d'une profileuse [19].

1. **Bobine et dérouleur** - décrit comme sliter, bobine d'acier, déjà dans l'épaisseur du profilé, et sa taille est exactement la dimension développée par la section du profilé ; la longueur peut varier, mais elle est proche de 300 m.
2. **Chargeur de rouleaux** - chargé d'introduire les rouleaux le long du chemin de conformation.
3. **Aligneur** - dirige le rouleau tout en l'empêchant de se déplacer vers les bords.
4. **Tableau de commande** - en charge de toutes les commandes de la machine électrique, les quantités, les longueurs de pièces, les vitesses de formage, les arrêts d'urgence, etc.
5. **Étapes de formage** - À ce stade, le matériau est progressivement façonné. Une machine de formage rouleaux typique peut être composée de 10 à 24 paires de

supports matriciels rouleaux. Individuellement ou en groupe, la machine est activée pour forcer le ruban métallique à travers le rouleau, qui le façonne progressivement aux dimensions et aux formes souhaitées.

6. **Découpage des pièces** - Lorsque les pièces sont en mouvement, elles sont coupées à la longueur programmée, ce qui augmente l'efficacité et la vitesse du processus de profilage. Ils sont déchargés sur une table de libération après avoir été coupés.
7. **Pièces affinées**- Le profil formé est prêt à être placé pour l'expédition ou le traitement ultérieur.
8. **Chemin parcouru par le métal.**

Dans le processus de profilage en continu, la vitesse de production, en moyenne, est de 30 m/min, et est largement utilisée pour la production de profils peu complexes, mais de manière variable elle comprend des vitesses de 0,5 à 240 m/min [19].

### I.2.5.1 Composants dans l'étape de formage

Comme à bien précisé Halmos (2006), dans l'étape de formage des tôles, la profileuse est constituée des composants suivants :

- a) **Arbres** : les arbres sur une ligne de formage de rouleaux, qui soutiennent les rouleaux et les relient aux béquilles latérales, doivent être très rigides afin d'assurer une bonne stabilité dimensionnelle d'écart des rouleaux [6].

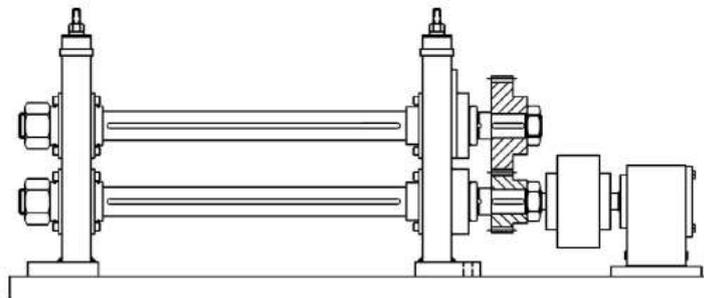


Figure I.06. Arbres montés sur un support sans les rouleaux [6].

- b) **Support** : Chaque support latéral (figure I.07) est constitué de deux paliers qui sont maintenus ensemble par des attaches avec leurs circuits fixés à des barres transversales. Chaque logement de palier a généralement deux paliers coniques qui

soutiennent l'arbre (figure I.08). La hauteur de chaque arbre est ajustée à l'aide d'un étau au-dessus et de barres transversales inférieures [6].



Figure I.07. Support des arbres [16]

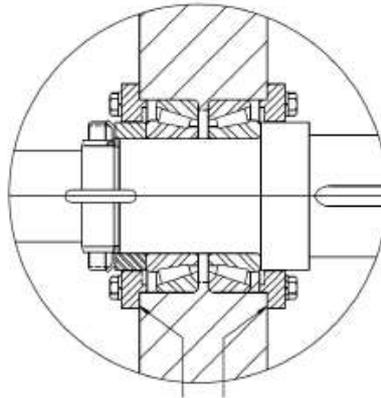


Figure I.08. Logement des paliers [6]

- c) **Arbre de transmission** : plusieurs méthodes d'entraînement peuvent être utilisées pour connecter le moteur électrique aux arbres. Les entraînements par chaînes sont habituels mais les entraînements par engrenages sont une option [6].



Figure I.09. Arbre de transmission entraîné par chaînes [19].

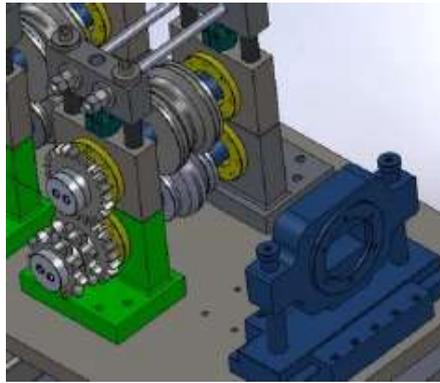


Figure I.10. Arbre de transmission par engrenages [19].

- d) **Galet de la profileuse** : est l'élément le plus important de le profileuse et sera discuté en détail ci-dessous [6].

### I.2.6. Galet d'une profileuse

Un galet d'une profileuse est une pièce mécanique de forme cylindrique avec plusieurs cavités sur sa longueur, qui a pour fonction de changer la géométrie de la tôle durant le passage de celle-ci. Ils sont fixés sur l'arbre de transmission, verrouillés par des clavettes (dispositif utilisé en mécanique avec la fonction de verrouillage des axes), afin d'obéir à la séquence nécessaire à la mise en forme progressive de la plaque et à la création du profil [3].

Les rouleaux peuvent être distingués dans trois sens de rotation, variant en fonction de l'exigence de profil :

- **Les galets horizontaux** - sont les plus courants, couplés à l'axe en position horizontale.



Figure I.11. Galets horizontaux [3].

- **Les galets verticaux** - sont utilisés dans les géométries où une meilleure tolérance dimensionnelle est souhaitée sur les faces verticales du profil [3].



*Figure I.12. Galets verticaux [3].*

- **Les galets diagonaux** - sont utilisés dans les profils de section complexes, leur utilisation doit être soigneusement analysée [3].



*Figure I.13. Galets diagonaux [3].*

La masse des galets peut varier de quelques kilogrammes à des centaines de kilogrammes, et leur forme est déterminée par le produit fabriqué [3].

Actuellement, les galets sont généralement fabriqués lors d'un tour mécanique (soit une tour parallèle ou, plus communément, une tour contrôlée numériquement). Dans la première phase, ils sont construits puis envoyés à trempe; ils seront ensuite reusinés à la fin après trempe.

En effet, la fabrication du galet doit être extrêmement précise car des erreurs d'arrondi ou des excentricités du plus petit ordre peuvent avoir un impact significatif sur la qualité des

pièces. Pour faciliter la fabrication, les galets sont parfois divisés en plusieurs sections (figure I.14) ; en fait, c'est parfois la seule option. Cela permet également une installation plus facile [6].



Figure I.14. Un galet de forme complexe divisé en sections [6].

### I.2.6.1. Formes des galets

La forme du galet dépend de la forme de la section transversale du produit à être fabriqué ainsi que sa profondeur. Conséquemment, la section transversale du produit laminé est le facteur le plus important dans la conception du rouleau.

La variété des formes est illimitée. Les formes peuvent être arbitrairement classées comme **simples** (ouvertes), **fermées**, **moyennement complexe**, **très complexe** et **panneau** (figure I15) [4].

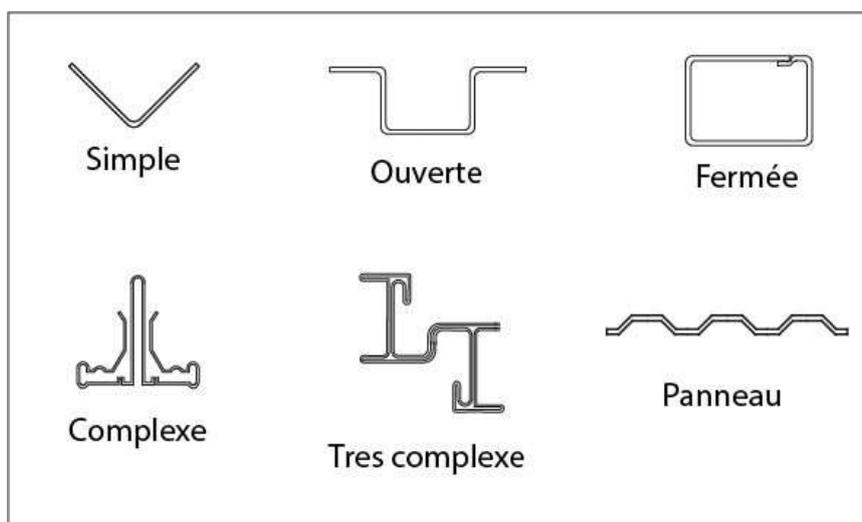


Figure I.15. Sections transversales de différentes complexités

Dans certains cas les galets peuvent être réusinés, pour la réalisation d'une nouvelle forme afin de réduire le coût de revient de l'outillage de profilage, qui va produire le nouveau profilé sur la ligne de profilage. Selon la machine, il est également possible de changer les rouleaux pour fabriquer une autre pièce avec un profil différent [4].

### I.2.6.2. Nombre et disposition des têtes

Les machines à profiler comportent un nombre plus ou moins important de têtes. Les plus simples en comportent 4, les plus complexes en comportent 30 ou davantage [4].

La distance qui sépare deux têtes consécutives est différente suivant la puissance de la machine pour des raisons de construction, mais cette distance est aussi fonction de la hauteur maximale du profil que la machine considérée peut fabriquer. Plus cette hauteur est importante plus la distance entre deux têtes est grande. Il n'y a pas de règle absolue dans ce domaine. Il est rare que cette distance soit ajustable [4].

### I.2.6.3. Matériau de fabrication

Les galets de profilage peuvent être soit en acier **X160CrMoV12**, **Ampco Métal** ou en **acier prétraité**.

La pièce avec quoi on travaille est en acier **X160CrMoV12**, auparavant appelé **Z160CDV12** (AFNOR). Est un acier fortement allié que est utilisé dans plusieurs domaines d'applications tel que: outils de découpage à rendement très élevé pour la découpe de tôles au silicium, et de tôles douces ou encore comme outil d'ébavurage ou de refendage...etc.

Tableau I.01. Composition de l'acier X160CrMoV12 [5].

Composition	Carbone	Chrome	Molybdène	Vanadium
Pourcentage	1.55%	12%	0.7 %	0.25%

Il possède plusieurs propriétés physiques qui sont:

-

Tableau I.02. Propriétés physiques de l'acier X160CrMoV12 [5].

Propriétés physiques	NÉCESSAIRE
Densité	7.7
Module d'élasticité	210000 Mpa
Conductibilité thermique	20 W/m/°C
Coefficient moyen de dilatation en (m/m°C)	Entre 20°C et 100°C : 10,5*10-6 Entre 20°C et 300°C : 11,0*10-6 Entre 20°C et 500°C : 12,0*10-6
Résistance électrique	0,65 Ωmm 2 m
Forgeage	1050-850°C
Recuit	800-850°C
Refroidissement	est lent au four
Dureté HB maxi	250
Stabilisation	varie entre 650-700°

Parmi les caractéristiques qui rendent ce matériau adapté à la fabrication de galets, se distinguent : une **dureté élevée, grande ténacité, bonne résistance à l'usure, bonne résistance aux chocs thermiques et grande aptitude au polissage** [5].

### I.2.7. Mise en forme de tôles à froid

Nous discutons de la formation de flans à partir de produits plats et de petite taille par déformation plastique de pièces à température ambiante. Les principaux avantages de ce type de processus sont une faible perte de matériau, la capacité de créer des formes complexes et de bonnes propriétés mécaniques.

Les difficultés sont liées à la prise en compte du retour élastique au cours de la phase de mise en forme, ainsi qu'à la prédiction de l'apparition de défauts tels que le pli, la restriction et la rupture.

Tous les métaux ferreux et non ferreux, ainsi que leurs alliages, peuvent être façonnés par profilage. Les types de métaux utilisés par les fabricants déterminent les ajustements qui doivent être effectués à chaque étape du processus de pliage. Les facteurs clés sont l'épaisseur

et la ductilité, ainsi que la contrainte d'évaporation, qui détermine la quantité de force requise pour façonner le métal.

Les tuiles métallisées peuvent être trouvées dans différents matériaux métalliques, tels que l'**acier**, l'**aluminium**, le **laiton**, le **cuivre** et le **zinc** [4].

### **I.2.7.1. Avantages et inconvénients du profilage à froid**

#### *a) Avantages*

- **Efficacité** : La vitesse de profilage est due aux longues bobines métalliques qu'il utilise et qui sont rapidement introduites dans la machine à former. Parce que la machine s'autoalimente, il y a peu besoin de supervision humaine, ce qui réduit le coût de la main-d'œuvre. L'utilisation de poinçonnage et d'entaillage pendant la pré-alimentation élimine le besoin d'opérations secondaires.
- **Flexibilité** : les sections transversales complexes peuvent être facilement produites en utilisant des métaux ferreux et non ferreux. Certains procédés rendent impossible la façon de façonner un métal peint, plaqué ou soudé. Quel que soit le type de finition, le laminage peut facilement les façonner.
- **Qualité** : les produits sont plus uniformes et cohérents sur l'ensemble de la série. Les tolérances sont extrêmement serrées, avec des dimensions extrêmement précises. En l'absence de matrice ou de marques de déformation, les contours nets et propres sont préservés.
- **Longueur des pièces** : vu que le métal est introduit dans la machine, n'importe quelle longueur peut être produite en utilisant le même outillage pour n'importe quelle pièce.
- **Moins de ferraille**: le profilage par laminage produit une à trois pour cent de réfutation pour chaque cycle de production, ce qui est beaucoup moins que tout autre procédé de travail des métaux. L'utilisation de moins de ferraille réduit le coût de travail avec des métaux coûteux.
- **Répétabilité** : Le traitement de profilage rapide permet aux métaux de conserver leur contrainte résiduelle ainsi que toute perte de contrôle sur les cordons de soudure.

- **Économies de coûts** : parce que les métaux n'ont pas besoin d'être chauffés pour le profilage, les coûts énergétiques sont considérablement réduits. L'inspection et la lubrification minutieuses des pièces mobiles réduisent l'usure des outils et le coût de remplacement des composants. Les finitions lisses des pièces finies éliminent le besoin de processus secondaires tels que l'ébavurage. Les pièces sont fabriquées en grande quantité, ce qui réduit le coût global du produit.

*b) Inconvénients*

- **Le temps d'installation** - il peut varier de quelques heures à quelques jours ;
- **Coût d'outillage très élevé.**

### **I.3. Conclusion**

Dans ce chapitre on a revus ce que c'était le procédé de profilage, la profileuse et ses constituants, ainsi que les méthodes et le procédé de profilage des tôles. Comme on a parlé aussi sur le matériau utilisé pour fabriquer le galet sur lequel notre étude est basée qui est l'acier X160CrMoV12. Ce dernier est de forme cylindrique et qui a pour fonction de changer la géométrie de la tôle durant le passage de celle-ci.

## II.1. Introduction

Les progrès de la compétitivité et de l'économie mondialisée obligent actuellement les organisations à rechercher de nouvelles technologies et alternatives, à améliorer et à réduire le temps de développement de leurs produits. C'est ainsi qu'est née la technique de Rétro-conception (Reverse Engineering en anglais), qui consiste essentiellement à reproduire de nouvelles pièces, produits ou outils à partir de modèles ou de composants existants.

Il est également utilisé dans les situations où il existe une demande de remplacements et d'ajustements d'outils ou de composants d'outils très anciens et sans documentation, où l'application de la technologie ER est extrêmement importante, car normalement ces types de services nécessitent également l'urgence du client. Avec la technologie, il est possible de développer des modèles 3D équivalents permettant plus rapidement de concevoir des changements et d'ajouter de nouvelles pièces aux modèles actuels, de générer et de mettre à jour des bases de données de projets CAO et de mettre à jour des données sur les outils existants.

Les professionnels de BE sont chargés de mener à bien cette phase de conception d'un produit.

**Bureau d'Etude** est un ensemble de professionnels destiné à l'étude de différentes données, fournies par un client ou un autre professionnel, afin de mesurer la faisabilité d'un projet dans le domaine de la construction, mais aussi dans le domaine de l'informatique, l'environnement ou encore l'organisation du travail. Il va de l'étude du projet au contrôle des travaux une fois finis [17].

## II.2. Rétro-Conception

### III.4.2. Définition

La Rétro-Conception, parfois appelée ingénierie inverse, est un processus dans lequel des logiciels, des machines, des avions, des structures architecturales et d'autres produits sont déconstruits pour en extraire des informations de conception. Souvent, l'ingénierie inverse implique la déconstruction de composants individuels de produits plus volumineux. Le processus de rétro-conception nous permet de déterminer comment un produit a été conçu afin que nous puissions la recréer.

En mécanique, la rétro-conception (RC) est une méthode de création d'un modèle virtuel 3D à partir d'une pièce physique existante en vue d'une utilisation dans le cadre de la **CAO** (Conception Assistée par Ordinateur), de la **FAO** (Fabrication Assistée par Ordinateur), de l'**IAO** (Ingénierie Assistée par Ordinateur), ou avec un autre logiciel. Le processus implique la mesure d'un objet, puis sa reconstruction comme modèle 3D [7].

### II.2.2. Principe de la rétro-conception

Le principe de rétro-conception repose sur la collecte de données sous la forme d'un nuage de points dérivés de la surface de l'objet pour numériser numériquement (via un scanner 3D) ou palper mécaniquement, ou dans le cas de pièces très simples, l'enregistrement de mesures de composants qui permettent une reproduction précise dans le logiciel CAO. Ce nuage de points est traité par les fonctions CAO, qui permettent la reconstruction de surfaces à partir desquelles un modèle paramétrique est codé et finalisé par l'utilisateur et le générateur du système (choix des côtes et les relations inter-côtières, la tolérance...) [8].

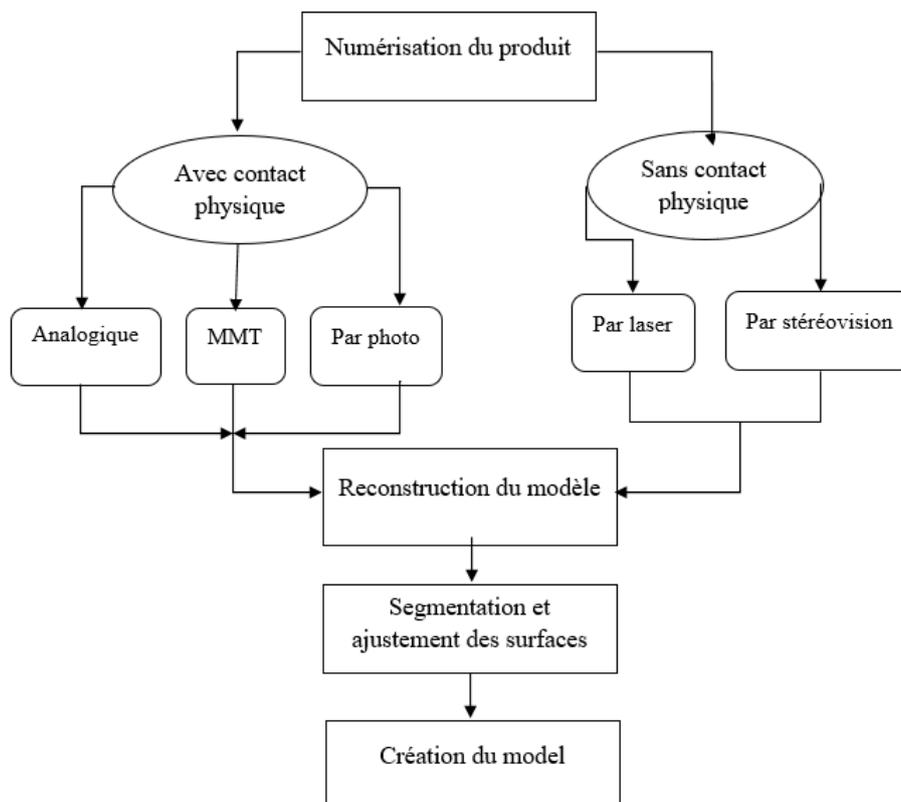


Figure II.01. Synthèse des différentes technologies de digitalisation d'objets.

### II.2.3. Applications

La méthode rétro-conception peut être utilisée dans des situations telles que:

- Le concept initial n'est pas étayé par une documentation adéquate ou suffisante.
- Composants qui ont été utilisés ou jetés et pour lesquels il n'existe aucune source d'approvisionnement. Ce contexte fait référence à des pièces plus anciennes dont les géométries ont été modifiées à la suite d'usures ou de fractures.
- Mettre en œuvre des améliorations de produits lorsque le point de départ est un autre produit avec de meilleurs concepts ou caractéristiques techniques qui a déjà été appliqué et testé sur le marché, dans le but d'améliorer plutôt qu'une simple copie du produit existant ;
- Le modèle CAO d'origine est insuffisant pour prendre en charge les modifications. C'est le cas des pièces pour lesquelles, pour des raisons de propriété industrielle, certaines informations n'ont pas été fournies au sous-traitant de fabrication. Dans ce cas, une re-conception a eu lieu afin d'apporter quelques modifications afin d'assurer une bonne conformité de la production.
- Amélioration des performances et/ou des fonctionnalités du produit. Ce contexte fait référence aux composants qui ont été mal conçus et qui doivent être mis à jour pour garantir le bon fonctionnement.
- Les matériaux défectueux ou les procédés de fabrication défectueux doivent être mis à jour. C'est le cas des pièces anciennes. Le but de la rétro-conception dans ce contexte est de re fabriquer une pièce avec des matériaux et des procédés d'aujourd'hui.

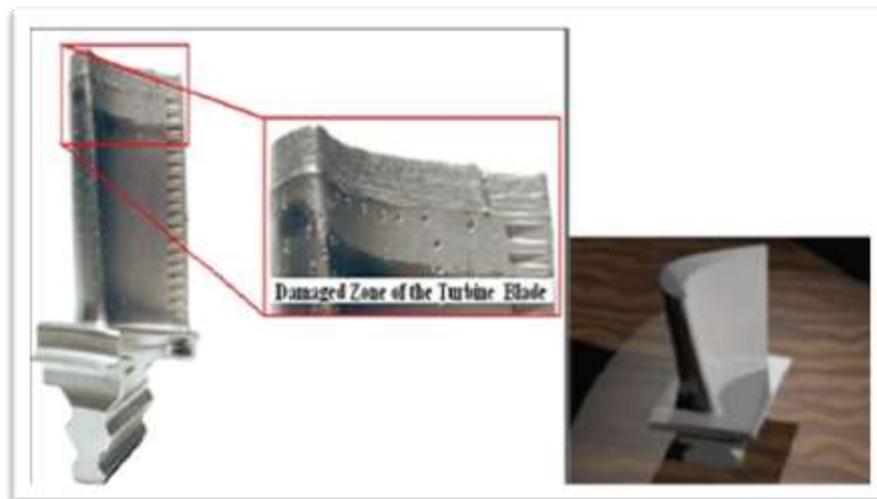


Figure II.02. La rétro conception d'une aube de turbine usée [9].

## II.2.4. Étapes de la rétro-conception

La RC est divisée en quatre étapes: la **numérisation du produit**, **reconstruction surfacique du modèle**, **segmentation et ajustement des surfaces** et la **création du modèle CAO** à partir des données numérisées. La numérisation du produit est le processus qui effectue l'acquisition de données, qui sont les informations des coordonnées géométriques du produit.

### 1. Numérisation du produit

Le concept de numérisation couvre principalement l'aspect de la capture d'informations de la pièce à partir de points dans l'espace 3D, et est associé à la mesure et au relevé topologique de celui-ci. Dans cette étape l'acquisition des données a lieu où plusieurs points sont pris. Lorsque l'angle de fonctionnement de l'équipement ne couvre pas tout l'ensemble du modèle, une autre prise est nécessaire. Le résultat de cette étape est un nuage dense de points formé par plusieurs prises de mesure sous différents angles de vue, ou dans le cas de pièces moins complexes, un ensemble de mesures réalisées par des procédés de mesure utilisant des instruments moins exigeants (pied à coulisse, comparateur, etc.) [8].

Il existe deux techniques de mesures:

#### a. *Techniques avec contact physique*

##### *Par des instruments conventionnels de mesure*

Avec cette technique, l'opérateur, à l'aide d'instruments de mesure conventionnels tels que, le *mètre ruban*, le *pied à coulisse*, le *micromètre*, le *comparateur*, le *trusquin*, enregistre les mesures et à l'aide d'un dessin fait à la main et des mesures enregistrées, est créé le modèle CAO qui sera fidèle aux caractéristiques du modèle d'origine.



Figure II.03. Instruments conventionnels de mesure.

### *Rétro-construction par photographie ou scanner*

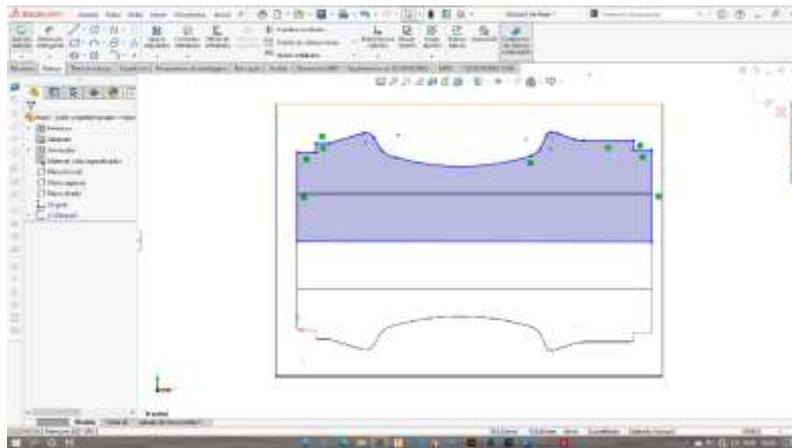
Dans cette méthode, utilisée principalement pour les modèles aux formes moins complexes, une image est prise à l'aide d'une caméra haute résolution, qui sera ensuite traitée dans un logiciel de CAO. De même, le profil de la pièce peut être scanné. Quoiqu'il en soit, le but est d'obtenir les contours qui définissent la forme de la pièce.

Le résultat est ensuite enregistré au format image ou au format PDF, selon les cas, puis est chargé dans le logiciel de CAO choisi, qui dans notre cas est SolidWorks.

Ensuite, pour obtenir le croquis qui servira à créer le modèle 3D, l'utilisateur peut utiliser la fonction « **Autotrace** », qui analyse le dessin et crée automatiquement un croquis à partir de celui-ci.

Cependant, cette option peut ne pas fonctionner dans tous les cas, l'utilisateur peut donc utiliser les outils d'esquisse proposés par le programme pour construire l'esquisse en fonction des contours de l'image.

Enfin, l'utilisateur peut corriger l'échelle entre le dessin et le croquis créé à partir des mesures prises à partir du modèle physique.



*Figure II.04. Rétro-construction par scanner*

### *Machine à mesurer tridimensionnelles (MMT)*

Cependant, pour les pièces légèrement plus complexes une alternative plus appropriée serait le **palpeur**, qui est un instrument de mesure tridimensionnel par contact constitué d'une tête orientable, d'une extension, d'un capteur et d'un stylet. Le stylet est constitué en son

extrémité d'une sphère calibrée qui servira à la mesure. Pour effectuer les mesures, on déplace le palpeur dans le système de coordonnées de la machine. Ce palpeur délivre un « top » lorsqu'il entre en contact avec la pièce, ce qui permet d'afficher la position du centre du palpeur au moment du contact. Toutes ces informations sont mémorisés par l'ordinateur, afin d'être exploitées par la suite par logiciel de métrologie [9].



Figure II.05. Palpeur [ditectindustry.es].

Une autre option est le **Profilomètre**. Selon Keyence (2021), les profilomètres mesurent et enregistrent le profil d'une cible par traçage de sa surface au moyen d'un stylet. Certains instruments servent également de rugosimètres. Les modèles équipés de la commande numérique par ordinateur (CNC) sont capables de mesurer des angles, rayons d'arc, différences de hauteur et pas de vis. Ces instruments conviennent parfaitement à la mesure de profils minuscules, sur des filetages et des films fins de l'ordre du micromètre. Ces dernières années, des modèles de profilomètres employant un laser au lieu d'un stylet ont été développés afin de mesurer des profils complexes par traçage sans contact. Certains modèles sont même capables d'exécuter la mesure sur la surface supérieure et la surface inférieure.

Ces instruments sont principalement utilisés en création de prototypes pour vérifier le respect des spécifications du dessin de conception. Ils sont également exploités en rétro conception [10].

A partir des informations acquises au niveau de l'ordinateur par le palpement des points, le logiciel détermine, par des traitements mathématiques, des éléments géométriques associés (point, droite, cercle, plan, cylindre, cône, sphère) afin de réaliser la vérification des spécifications (géométriques et dimensionnelles) du dessin de définition de la pièce [10].



Figure II.06. Profilomètre de surfaces [hellopro.fr].

### *b. Techniques sans contact physique*

La technique est également connue sous le nom de balayage de nuages de points car de nombreux points sont capturés en même temps, ce qui rend le processus plus agile que le balayage point à point. Les méthodes les plus utilisées sur le marché projettent un faisceau laser sur l'objet et utilisent des caméras pour capturer des images tout en identifiant leurs coordonnées en trois dimensions [9].

### *Rétro conception de pièce à partir de scanning laser 3D*

Dans cette technique, le scanner 3D projette un faisceau laser sur la pièce et pour collecter rapidement et avec précision les mesures géométrique de la surface d'une pièce existante.



Figure II.07. Numérisation par laser [tradeindia.com].

Le résultat du processus de numérisation est un nuage de points 2D ou 3D. En numérisation, on obtient couramment un nuage de points, la distance entre eux étant très importante pour obtenir une capture satisfaisante de la surface, en particulier des régions où il y a un changement rapide de courbure [9].

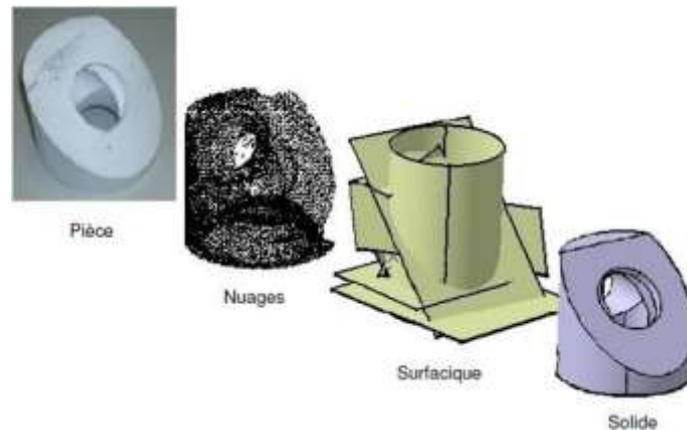


Figure II.08. Les étapes de la méthode de retro conception [9].

### Reconstruction 3D par stéréovision

La stéréovision est l'une des techniques puissantes utilisées pour obtenir des informations tridimensionnelles sur les coordonnées des points d'un objet à partir du traitement d'une image (Figure II.8). Cette technique est basée sur le principe de la vision humaine en utilisant l'appariement entre positions homologues dans ou plusieurs images. En utilisant une telle méthode, on peut obtenir des mesures tridimensionnelles avec une précision de l'ordre de  $20\mu\text{m}$ , précision qui est intimement liée à la disposition et à l'environnement des capteurs stéréoscopiques lors des prises de vue [9].



Figure II.09. Dispositif utilisé dans la stéréovision [9].

## **2. Reconstruction surfacique du modèle**

Après l'acquisition des données effectuées à l'étape précédente, elles sont saisies dans un programme de CAO qui en fonction de la méthode choisie dans la phase précédente nécessitera un traitement spécifique.

La reconstruction surfacique permet d'exploiter le nuage de points, qui représente une donnée brute, en élaborant des représentations géométriques plus élaborées à travers le maillage dans un premier temps qui permettra ensuite à des algorithmes de segmentation ou d'extraction d'entités d'identifier la topologie du produit. Pour ce faire, le nuage de points devra être prétraité à travers l'échantillonnage des points dans le nuage et le filtrage des bruits dus aux erreurs relatives au matériel de digitalisation [8].

La création d'un maillage triangulaire unique est effectuée une fois que tous les plans de points sont alignés.

## **3. Segmentation et ajustement des surfaces**

La segmentation est une des parties les plus importantes dans le traitement des données géométriques. Un processus d'union et de réduction des régions qui se chevauchent commence. Les vues sont réunies en un seul modèle, avec son maillage simplifié contenant tous les points numérisés [8].

Enfin, le lissage du maillage du triangle génère une nouvelle représentation du nuage de points à partir des sommets du triangle et des orientations de direction. Les erreurs dimensionnelles telles que le bruit (défauts), les erreurs d'étalonnage et d'enregistrement peuvent être éliminées sans détruire la géométrie de l'objet. Pour cela, le maillage doit passer par l'étape de lissage, qui consiste à construire le maillage en considérant un écart moyen entre les points faisant partie d'une certaine région [8].

## **4. Création du modèle 3D**

Dans cette étape, la reconstruction du modèle CAO a lieu, qui n'est rien de plus que le règlement des géométries sur les points obtenus dans la numérisation. Chaque région

représente une caractéristique individuelle qui peut être mathématiquement représenté par une surface individuelle dans le cas d'une reconstruction de modèle [8].

Généralement, dans les logiciels de CAO la représentation des modèles se fait par l'un de ces deux procédés:

- Représentation des limites (*Boundary Representation* ou *B-Rep*) - le modèle CAO reconstruit la surface d'une région individuelle et combine ces surfaces en un modèle complet représentant la pièce ou le prototype numérisé.
- Géométrie de construction de solides (*Constructive Solid Geometry* ou *CSG*) - le modèle CAO est obtenu à partir de l'association des géométries simples et à l'aide d'opérateurs booléens (et, ou, sauf, ...).

Après traitement, le modèle est reconstruit et comparé au modèle d'origine pour s'assurer que le profil et les mesures respectives ont été respectés. Il faut cependant que des tolérances acceptables soient définies pour la validation du modèle ou non. Si le modèle n'est pas conforme aux spécifications du modèle d'origine il est rectifié ou rejeté et le processus est répété du début. Et s'il est conforme aux spécifications souhaitées, il est approuvé et passé en phase de fabrication [8].

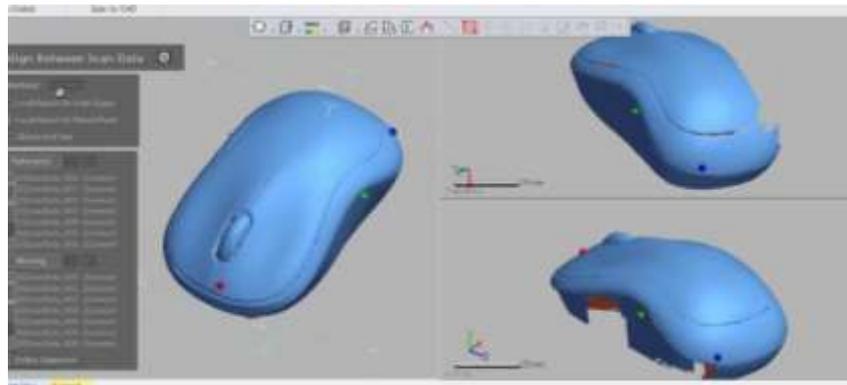


Figure II.10. Reconstruction d'une souris [FARO Technologies].

Pour certains modèles plus simples, les deuxième et troisième étapes ne sont pas nécessaires. L'acquisition de données se fait à partir d'instruments de mesure conventionnels qui enregistrent les mesures de l'objet et avec ceux-ci un croquis est créé dans le programme de CAO qui est basé sur la forme de l'objet d'origine et les mesures acquises dans le processus de mesure lui sont attribuées.

### II.2.5. Les logiciels utilisés pour la rétro-conception:

Aujourd'hui, de nombreux logiciels existent sur le marché pour répondre à l'emploi industriel et pour supporter l'activité de rétro conception. Ces logiciels permettent d'obtenir un modèle CAO. On trouve plusieurs logiciels : **Geomagic, CATIA, DReshaper, SolidWorks, Nikon Metrology.**

Nous, nous avons choisi de travailler ici avec le logiciel **SolidWorks**.

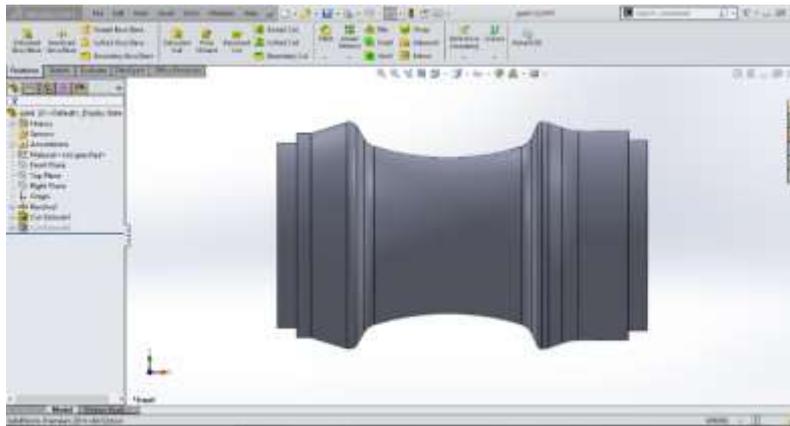


Figure II.11. Un galet (*interface SOLIDWORKS*).

### II.2.6. L'étude du cas

L'étude de cas sera réalisée en se basant de l'hypothèse d'un bureau d'études de fabrication mécanique qui, ayant reçu un produit endommagé d'un client, doit appliquer ses connaissances et son expérience en rétro-conception pour reconstruire le modèle et le fabriquer plus tard. Le produit en question est un galet d'une profileuse qui a été endommagé.

La machine utilisée par le client pour fabriquer les tôles n'a pas été produite par le fabricant depuis longtemps, c'est pourquoi il n'y a pas de pièces de rechange disponibles sur le marché. Étant donné que l'investissement pour l'acquisition de nouveaux équipements serait très coûteux cela semblait la meilleure option pour résoudre ce problème.

#### Causes d'endommagement possibles :

- L'utilisation intensive de la profileuse a conduit à l'endommagement du galet et à la casse d'une partie de celui-ci, ce qui nécessite une re-conception et la réalisation de cette pièce.

- Mauvais réglage de la position ou des vitesses d'entraînement de la pièce par l'utilisateur.
- Les défauts dans les bandes métalliques.



Figure II.12. Galets cassés d'une profileuse

#### II.2.6.1. Solutions proposées

Dans le bureau d'étude (BE), l'étude de la pièce cassée (le galet) nous permet de choisir une solution prenant en compte ses dimensions. La technique de rétro-conception classique nous permet de prendre les dimensions de la pièce à l'aide des instruments de mesure comme le pied à coulisse, le micromètre, le comparateur, etc.

Mais les mesures obtenues par ces instruments finissent par être insuffisantes en raison de la forme de la pièce (pièce à plusieurs courbures).

En raison de ces difficultés, nous proposons deux solutions possibles :

- a) A l'aide d'un Profilomètre, on prend les mesures du galet et avec le pied à coulisse on prend les mesures du diamètre ainsi que de la longueur totale.

L'avantage de cette méthode est que les données seront directement chargées dans un programme qui reconnaîtra automatiquement le profil et ses mesures respectives.

Ensuite, c'est à nous de traiter les résultats et de créer avec eux le modèle 3D de la pièce.

Mais l'inconvénient est son coût d'acquisition, si le centre d'usinage n'en est pas propriétaire. Et c'est encore plus pénalisant si le workflow de l'entreprise ne nécessite pas une machine de cette nature.

- b) À partir de la pièce, nous allons concevoir un moule en sable et à partir de celui-ci, nous allons fabriquer un galet en plastique identique à l'original. Ensuite, avec une scie, on fera une coupe longitudinale et on divisera la pièce en deux, en veillant à le faire afin d'acquérir une surface plane (sans ondulations).

Nous mettons la surface plane sur du papier blanc et avec un crayon on tracera le contour du galet dessus. Après avoir dessiné le profil sur papier, on le scanne puis on le charge dans SolidWorks (un programme CAO). Une fois l'image chargée, nous allons tracer le contour à l'aide des outils d'esquisse disponibles dans le programme.

Nous prendrons les mesures possibles des longueurs ainsi que le diamètre avec le pied à coulisse et nous les appliquerons aux lovais respectifs dans le croquis.

Une fois cela est fait, nous utiliserons la fonction « **révolution** » présente dans l'onglet **fonctions** et sélectionnerons l'axe de la pièce et le contour dessiné et nous créerons le modèle 3D.

Enfin, nous ajouterons les derniers détails (trou et clavette).

### II.2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous parlons de la rétro-conception. Où l'on parle du principe de la rétro-conception, de ses applications, des étapes à suivre, des techniques habituellement utilisées dans le processus initial de numérisation des produits ainsi que de certains logiciels utilisés dans ce processus.

C'est dans ce chapitre que nous avons présentés les solutions possibles pour reconstruire la pièce à l'étude et nous avons choisi celle qui convient le mieux à nos possibilités.

### III.1. Introduction

Pour qu'un produit soit mécanique ou non, soit accepté sur le marché grand public, il ne suffit pas seulement qu'il ait un bon projet de dimensionnement avec les calculs des efforts, l'usure ainsi que sa durée de vie vérifiés. Ce ne sont là que quelques-unes des nombreuses exigences à prendre en compte avant que le projet final ne soit mis sur le marché.

Autres exigences à prendre en compte dans le processus sont :

- **Interchangeabilité** - une condition qui permet aux pièces qui ont été fabriquées par différents fabricants ou à des moments différents d'être utilisées dans des projets successifs sans risque d'incompatibilité dimensionnelle.
- **Qualité** - la qualité d'un produit doit être maintenue constante pendant toute la durée de fabrication de la pièce ;
- **Coût** - le coût final du produit doit être aussi bas que possible, tout en couvrant tous les coûts de fabrication, de main-d'œuvre et de profit nécessaires. Cette condition assure une bonne place sur le marché par rapport à d'éventuels concurrents.

Pour s'assurer que ces exigences sont respectées, garantissant ainsi une meilleure chance de succès, il existe le **Bureau d'Etude** (BE) et le **Bureau de Méthodes** (BM).

Selon *SIMMO Company* (2021), le **Bureau de Méthodes** est l'interface entre la ligne de production et le **Bureau d'Etude**. Il est chargé de l'industrialisation des produits, c'est-à-dire de concevoir et de fournir les outils nécessaires à la production. Il se doit d'améliorer aussi la productivité globale de la production, d'améliorer les conditions de travail et de fournir les outils d'analyses nécessaires aux études des coûts standards, c'est-à-dire :

- Vérifier avec le bureau d'étude la faisabilité et la fabricabilité d'un produit;
- Définir les gammes d'usinage;
- De mettre en œuvre les moyens de production nécessaires (machines, opérateurs, matériels, équipements...);
- Définir les temps et les coûts de production ;
- Optimiser les temps et les coûts de production.

Parmi les différents outils mis à la disposition de ces professionnels, il y a les programmes CAO/FAO, qui sont des programmes qui ont émergé avec le développement de technologies pour aider à accomplir des tâches aussi efficace et précise que possible.

### III.2. Historique

Le premier logiciel de conception est apparu en 1963, avec le DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) (Sketch pad développé au MIT par **Ivan Sutherland**).

Dans les années 1970, la modélisation 3D solide est apparue, utilisant deux techniques distinctes : **B-Rep** (Boundary Représentation) et **CSG** (Constructive Solide Géométrie).

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

**PRONTO** qui fut développé par **PaTrick Hanratty** en 1957 est le premier logiciel de FAO commercialisé.

La FAO, comme le logiciel du CAO, a considérablement évolué à la suite des progrès technologiques, l'amélioration de la puissance de calcul, de mémoire et de visualisation de l'ordinateur. Toutefois, les systèmes du CAO et de la FAO ont depuis longtemps évolués en tandem, posant ainsi quelques difficultés pour passer de l'un à l'autre.

La conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO ou CAO-FAO) sont deux champs d'application informatique en Génie Mécanique qui ont plusieurs points en commun, elles sont souvent présentées conjointement. Chacune de ces applications porte sur les mêmes pièces mécaniques et utilise une base informatique commune : les ressources graphiques d'édition et de gestion [9].

#### III.5.2. Rôle des ingénieurs de fabrication

Dans les environnements CIM, les ingénieurs de fabrication interagissent très étroitement avec les concepteurs. Ils doivent : comprendre la conception en particulier la CAO et le processus de conception. La CAO exige qu'ils aient un aperçu des principes de la technologie informatique et les terminologies associées telles que les bits et les octets, les RAM et ROM. Il en va de même pour les superviseurs de première ligne ou les contremaîtres qui interagissent avec les opérateurs, la gestion et l'équipement de l'usine. Le personnel d'entretien doit travailler davantage en équipe avec un bagage (maximum, beaucoup) d'expertise dans des domaines aussi divers que l'électronique, l'informatique, l'hydraulique, la pneumatique et les domaines habituels des systèmes mécaniques et électriques [18].

### III.3. Définition FAO

La **Fabrication Assistée par Ordinateur** (FAO) est une technologie d'application qui utilise des logiciels informatiques et des machines pour faciliter et automatiser les processus de fabrication. La FAO est le successeur de l'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) et est souvent utilisée en tandem avec la conception assistée par ordinateur (CAO).

La FAO est l'utilisation de logiciels pour contrôler les machines-outils dans la fabrication de pièces à usiner. La FAO peut également faire référence à l'utilisation d'un ordinateur pour aider dans toutes les opérations d'une fabrication y compris la planification, la gestion, le transport et l'entreposage [18].

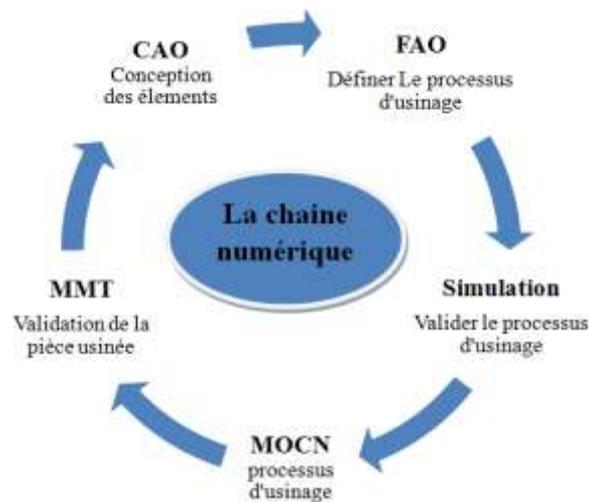


Figure III.01. La chaîne de production d'une pièce mécanique [9].

#### III.3.1. Objectif de la FAO

Toute usine peut être rendue hautement automatisée en déployant des systèmes en temps réel et la robotique. Un système de FAO est très efficace car il peut contrôler la maison de production via différentes techniques automatisées. Le but de la FAO est de s'assurer que le taux d'erreurs est réduit,

L'uniformité des produits est élevée et la précision dans les processus peut être atteinte. Les opérations de la FAO font parties maintenant dans presque toutes les industries. Elles sont utiles pour supprimer les erreurs des processus de fabrication primaires et peuvent également garder une trace des commandes et du matériel à utiliser. Cela a également réduit le coût de la

main-d'œuvre et d'autres frais généraux d'exploitation. Les processus sont maintenant entièrement automatisés, ils peuvent remplacer les outils et changer les processus successifs par eux-mêmes [18].

### III.4. Tour à commande numérique

Pour compléter le processus CFAO, il existe des **Machines-Outils à Commande Numérique** (MONC) ou **Computer Numerical Control Machine** (CNCM) en anglais, qu'est une machine-outil dotée d'une commande numérique assurée par un ordinateur. Ce sont des machines équipées d'un **appareil électronique** capable de recevoir des instructions et d'envoyer des signaux à la machine-outil afin d'effectuer des opérations sans intervention de l'opérateur et d'une **partie opérative** (PO) comprenant la structure de la machine-outil, le porte-outil, l'outil et le porte-pièce. Ces instructions sont transmises à une machine CNC sous la forme d'un programme séquentiel d'instructions de commande de machine telles que le G code, puis exécutées. Le programme peut être écrit par une personne ou bien plus souvent généré par un logiciel de CAO ou un logiciel FAO.

Selon leurs configurations et leurs capacités respectives ils sont capables ou non de : changer des pièces et des outils et réaliser les différentes phases d'usinage sans intervention de l'opérateur.

Les MONC les plus courantes dans l'industrie de fabrication mécanique sont le **tour** et la **fraiseuse**.

Selon J. Bohan (1998), le **tournage** est un procédé d'usinage permettant l'obtention des surfaces de révolution intérieures et extérieures, des surfaces planes ainsi que d'autres surfaces telles que celles obtenues par filetage.

Le brut est initialement de forme cylindrique, qui sera usiné par les différentes opérations de tournage jusqu'à la forme finale de la pièce [20].



Figure III.02. Un tour à commande numérique [sunmaster-cnc.com].

#### III.4.1. Les opérations de tournage

- **Chariotage** – est une opération qui consiste à usiner en longueur une surface cylindrique ou conique extérieure.
- **Dressage** – est une opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.
- **Alésage** - est une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.
- **Perçage** - est une opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt.
- **Rainurage** – est une opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.
- **Chanfreinage** – est une opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.
- **Tronçonnage** - est une opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.
- **Filetage** – est une opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

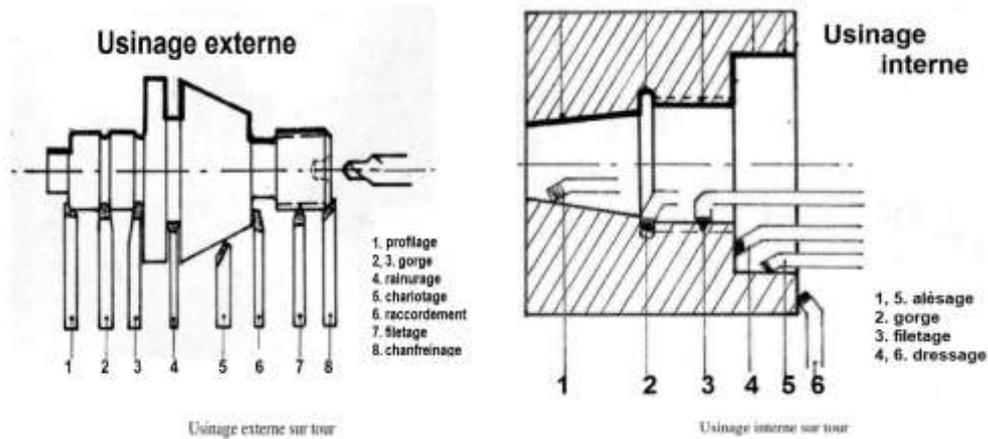


Figure III.03. Les opérations de tournage

### III.4.2. Maintien en position de la pièce

Quel que soit le type de mandrin à serrage automatique utilisé, on suppose que le serrage est transmis à la pièce par l'intermédiaire des mors. Ainsi, on adopte pour les actions mécaniques de serrage le modèle proposé (figure III.07), pour lequel le serrage est modélisé par l'action résultante de chacun des mors sur la pièce [11].

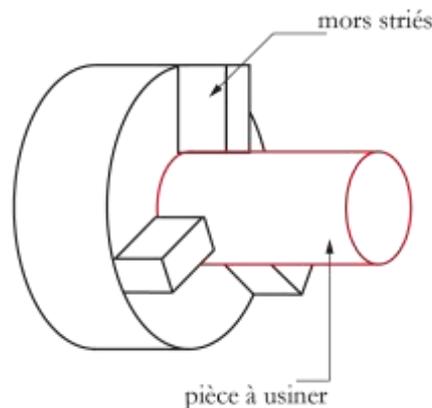


Figure III.04. Mise en position de la pièce (brut)

- **Grandeurs cinématiques :**

Le mouvement de l'outil par rapport à la pièce résulte de la composition d'un mouvement dit d'avance et d'un mouvement dit de coupe avec :

- $\vec{V}_f$  : vitesse d'avance de l'outil par rapport à la pièce.
- $\vec{V}_c$  : vitesse de coupe de l'outil par rapport à la pièce.

La vitesse résultante  $\vec{V}_e$ , appelée vitesse effective de coupe, est tangente à la trajectoire de l'outil dans son mouvement par rapport à la pièce [11].

- **Grandeurs mécaniques**

Concernant les actions mécaniques, les hypothèses classiques sont reprises. Le torseur des actions mécaniques de l'outil sur la pièce a pour modèle par un glisseur qui passe par le point P, milieu de l'arête utile de coupe contenu dans le plan  $\{O, \vec{z}, \vec{e}_1\}$ .

Ce glisseur est caractérisé en P par ses trois composantes :

$$[T] (\text{outil/pièce}) = P \left\{ \begin{array}{c} \vec{F}_n + \vec{F}_c + \vec{F}_a \\ 0 \end{array} \right.$$

- $\vec{F}_n$  : composante normale, ou effort de pénétration,
- $\vec{F}_c$  : composante tangentielle, dans la direction de coupe,
- $\vec{F}_a$  : composante d'avance, dans la direction du mouvement d'avance.

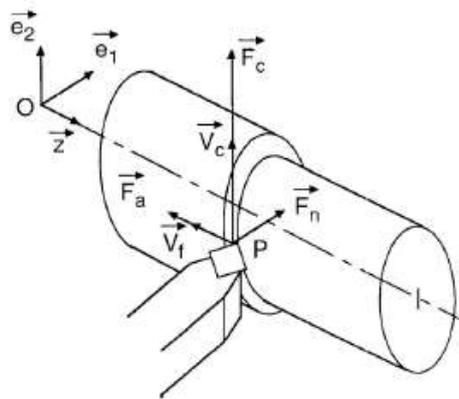


Figure III.05. Définitions préliminaires [12].

### Effort de coupe

Cette partie est consacrée à la détermination des actions mécaniques liées au phénomène de coupe en fonction des paramètres géométriques de l'outil, des conditions cinématiques et des conditions de coupe. On s'intéresse plus particulièrement à la détermination des paramètres influant sur la composante tangentielle d'effort appelée effort de coupe. La connaissance de l'effort de coupe est un élément essentiel pour le calcul de la puissance associée au phénomène de coupe et dans la détermination de l'effort de serrage [11].

La modélisation adoptée volontairement simplifiée du phénomène de coupe en tournage est:

- l'arête de coupe est rectiligne et perpendiculaire au mouvement d'avance de l'outil,
- la formation du copeau se fait par glissement suivant des plans de cisaillement,
- l'épaisseur de copeau reste faible devant sa largeur.

Le problème est bidimensionnel, c'est-à-dire que vitesses et les résultantes des actions mécaniques sont contenues dans un plan  $\{P, \vec{e}_a, \vec{e}_t\}$  du repère galiléen. Les actions mécaniques sont modélisables par des glisseurs au point P [11].

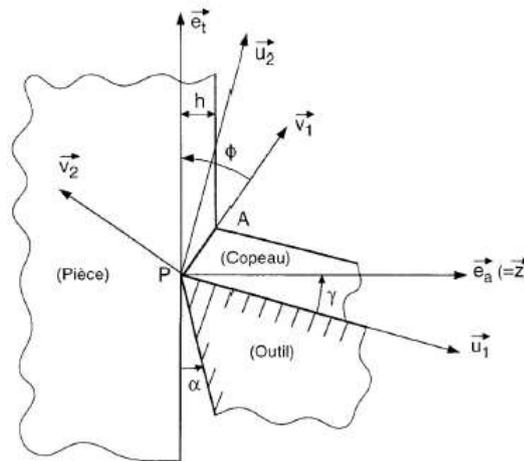


Figure III.06. Paramétrage de la coupe [11].

### III.5. Outil de coupe

En fonction de l'opération à effectuer, les outils mis en jeu sont différents en forme et en géométrie.

En général un outil de coupe est constitué d'un corps et d'une queue (Figure III.09), cette dernière est de section circulaire ou carrée et a pour rôle le maintien de l'outil au porte-outil (la tourelle en tournage, la broche en fraise et perçage), la première partie est destinée à recevoir les éléments tranchants ou les plaquettes. L'élément coupant est limité par des faciès dont l'intersection forme les arêtes (Figure III.10). Seules les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille interviennent dans le processus de la coupe du métal, c'est ces dernières qui forment la partie active [12].

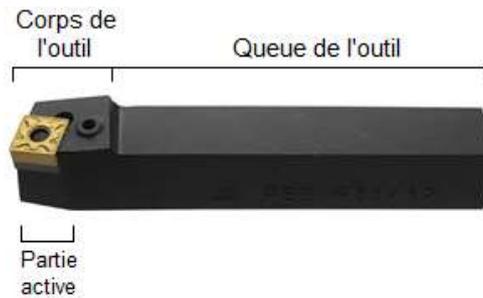


Figure III.07. Outil à chariotier à plaquettes amovibles [12].

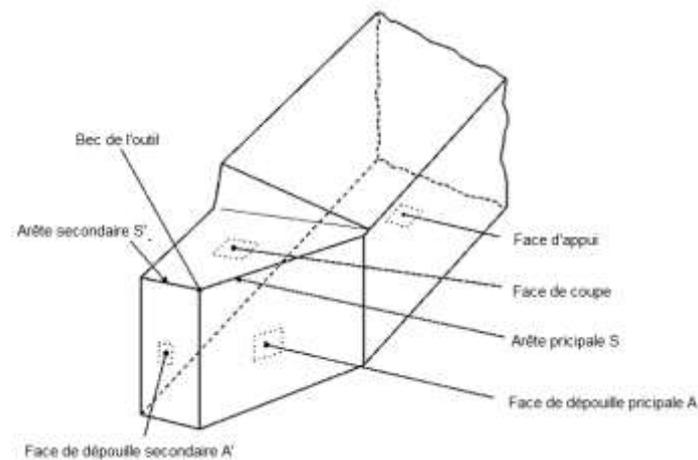


Figure III.08. Faces limitant la partie active de l'outil [12].

La partie active est la partie qui supporte la plupart des efforts pendant le processus d'usinage. Pour cette raison, le professionnel du BM doit faire preuve de discernement dans le choix de la forme et du matériau dans lesquels il est fabriqué.

Actuellement, les plaquettes sont fabriquées avec les matériaux les plus divers qui offrent différents niveaux de dureté et résistances mécaniques et thermiques.

- **Plaquettes en aciers rapides supérieurs** - usinage par les outils en ARS s'effectue à faible vitesse de coupe pour éviter l'échauffement trop important et aussi éviter que l'outil perd ses caractéristiques (la trempe dispersée), une usure rapide de l'arête soit observée.
- **Plaquettes en carbure métalliques** – ont une résistance mécanique et thermique supérieure aux plaquettes en ARS ce que permet le choix des vitesses de coupe très importantes allant jusqu'à 100m/min. la durée de vie est aussi supérieur.

- **Plaquettes en carbure revêtus** – comme la grande partie des carbures obtenu par frittage ont une faible ténacité, quelques matériaux de revêtement lui sont appliqués pour leur apporter une amélioration dans un domaine particulier.
- **Plaquettes en céramique** – leur point fort est l'excellente résistance thermomécanique. Sont favorable à l'usinage continue et donnant un excellent état de surface.
- **Plaquettes cermets** – ils ont une densité faible avec une dureté et résistance à l'usure plus élevées par rapport aux métaux durs conventionnels. Ils sont donc destinés pour les opérations de finition et l'usinage de précision sollicitant un travail à grandes vitesses de coupe et faibles avances.
- **Plaquettes à nitrure de bore cubique (CBN)** - est un matériau très dur prévu pour l'usinage des aciers trempés, des fontes et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Il exige des conditions rigoureuses de travail (machine stable, grande rigidité et arrosage permanent) et sont destinées principalement à la finition des pièces de précision.
- **Plaquettes en diamant** – le diamant est dur mais instable à haute températures se transforme en graphite. Il convient à l'usinage des alliages d'aluminium, de cuivre, de magnésium...etc.

Pour chaque matériau d'outil de coupe, il existe une plage adéquate pour la vitesse de coupe recommandée ainsi que celle d'avance [12].

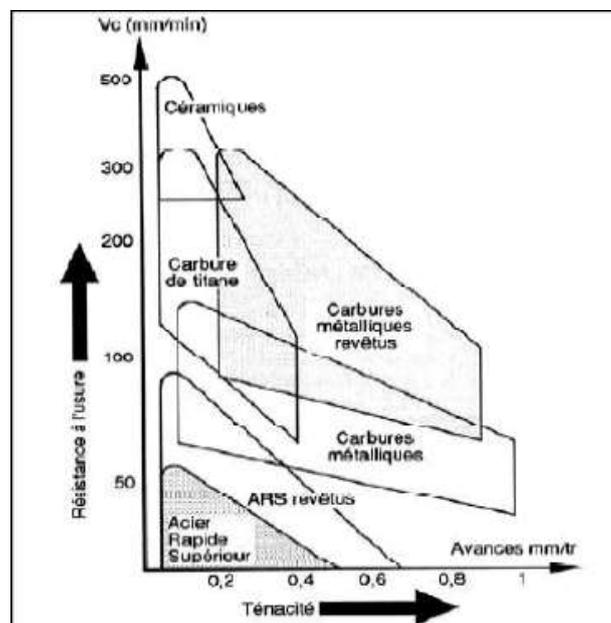


Figure III.09. Vitesses de coupe et d'avances pour les principaux matériaux à outil de coupe [12].

### III.5.1. Forme et géométrie des outils de coupe

Il est nécessaire de définir les différents angles caractéristiques de l'outil. Ces derniers sont établis selon les plans de références dans le système de l'outil en main (Figure III.9).

#### Plans références d'outil en main

Les plans établis pour observer les différentes sections orthogonales de la partie active de l'outil sont les suivantes :

- $P_r$  : plan parallèle à la face d'appui de l'outil.
- $P_s$  : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à  $P_r$ .
- $P_o$  : plan contenant la vitesse de coupe théorique  $V_c$  au point de l'arête et perpendiculaire à  $P_r$  et perpendiculaire à  $P_s$  ( $P_o$  est incliné par rapport à  $V_f$ ).
- $P_n$ : plan perpendiculaire à  $P_o$  et perpendiculaire à l'arête.
- $P_f$ : plan perpendiculaire à  $P_r$  et parallèle à la vitesse d'avance  $V_f$ .

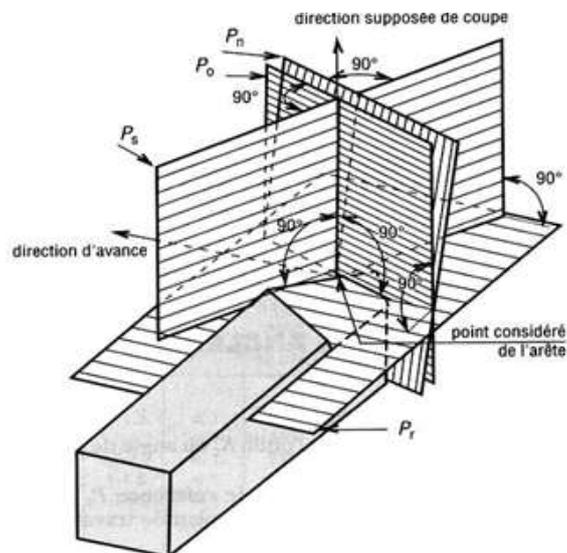


Figure III.10.Plans sur un outil en main [12].

À partir de ses plans on peut définir des systèmes d'angles selon chaque section voulue en notant toujours les désignations d'angles suivants :

- $\alpha$  : angle de dépouille principal
- $\beta$  : angle de taillant

- $\gamma$  : angle de coupe

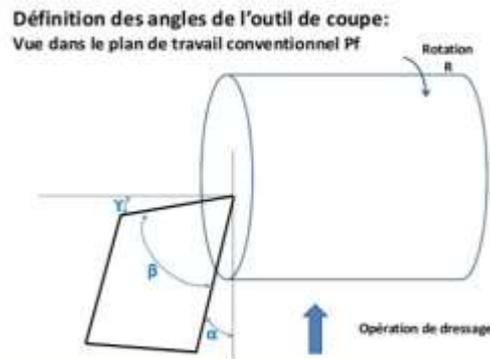


Figure III.11. Angles de l'outil de coupe

Pour distinguer les angles de coupe d'un plan à l'autre, on attribue l'indice du plan choisi pour chaque angle observé dans sa section.

**Exemple** : Sur le plan **Pf**, les angles observés sont :  $\alpha_f$ ,  $\beta_f$  et  $\gamma_f$ .

Le choix de ces paramètres dépend directement de la forme de l'outil de coupe et sa nuance, de la matière de la pièce à usiner, du type de machine-outil et de l'opération à exécuter et des contraintes de finition du produit exigé.

### III.5.2. Influence des angles sur la coupe

L'**angle  $\alpha$**  (l'angle de dépouille) est responsable pour éviter le frottement de l'outil avec la surface de la pièce à usiner. Si  $\alpha$  est trop petit l'outil risque de toucher la surface usiné, ce qui provoque une détérioration de la même et un échauffement important.

L'**angle  $\beta$**  (angle de taillant) est l'angle qui donne la résistance à l'outil. Plus cet angle est petit plus la résistance est faible, ce qui forcera une diminution des efforts de coupe.

L'**angle  $\gamma$**  (angle de coupe) favorise la formation du copeau.

## III.6. Choix d'outil

Actuellement, le choix des outils de coupe s'oriente de plus en plus vers les outils à plaquettes amovibles. Ils garantissent une multiplicité des arêtes de coupe sur la même plaquette une dureté de vie importante, la suppression des opérations d'affûtage, possibilité de

changer la partie active, permettant ainsi l'utilisation du même corps d'outil pour plusieurs plaquettes, etc.

### III.6.1. Etapes pour le choix d'outil de coupe

Le choix de l'outil à utiliser dépend de certaines caractéristiques qui garantissent des conditions de coupe optimales comme l'opération à réaliser, la machine employée, des efforts de coupe, le matériau et la forme géométrique de la pièce, la formation du copeau et l'utilisation ou non de l'arrosage.

Pour assurer un bon choix du meilleur outil à être utilisé pour chacune des opérations du processus de fabrication, certaines étapes sont nécessaires.

#### *Etape 1 : Choix du système de fixation de la plaquette*

La norme ISO présente quatre types de fixation : S, M, P et C.

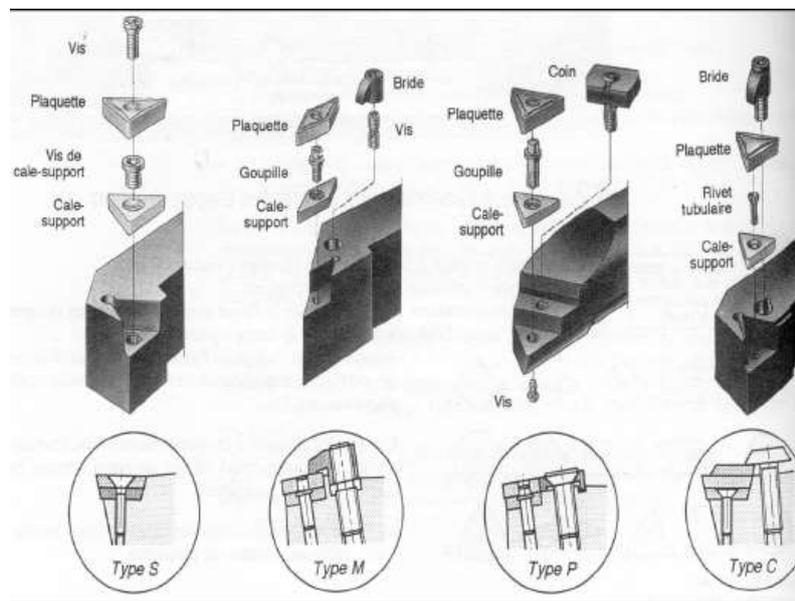


Figure III.12. Différents types de fixation de la plaquette [13].

Les fixations **S** et **C** accueillent des plaquettes de forme de base positive rendant l'arête de coupe plus fragile mais permettant une meilleure évacuation de copeau.

Les fixations **M** et **P** accueillent des plaquettes de forme de base négative permettant une plus grande robustesse de l'arête de coupe [13].

**Étape 2 : Choix de la direction de l'outil**

Pour le choix de la direction de la partie active de l'outil il faut savoir si la tournelle de la machine est-elle avant ou arrière, les surfaces à usiner, les directions d'usinage ainsi comme l'angle de plongée.

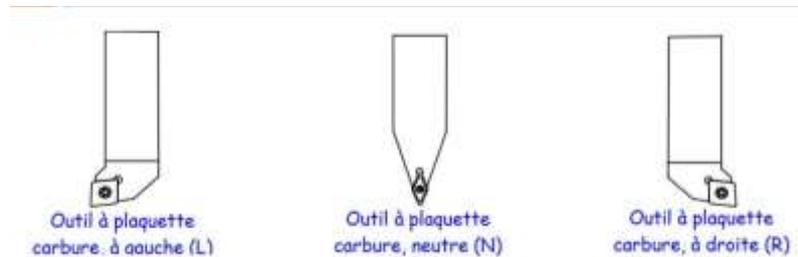


Figure III.13. Direction de l'outil de coupe [slideplayer.fr].

**Étape 3 : Choix de la forme de la plaquette**

La forme de la plaquette doit être sélectionnée en fonction de l'accessibilité de l'angle d'attaque nécessaire pour l'outil. Choisir le plus grand angle de pointe possible pour plus de résistance et de fiabilité. Mais ceci doit être équilibré en fonction de la variation des coupes nécessaires [14].

Un grand angle de pointe est plus résistant, mais il demande plus de puissance de la machine et présente une tendance plus élevée aux vibrations [14].

Un petit angle de pointe est moins résistant et donne un petit engagement de l'arête de coupe ce qui le rend plus sensible aux effets de la chaleur [14].

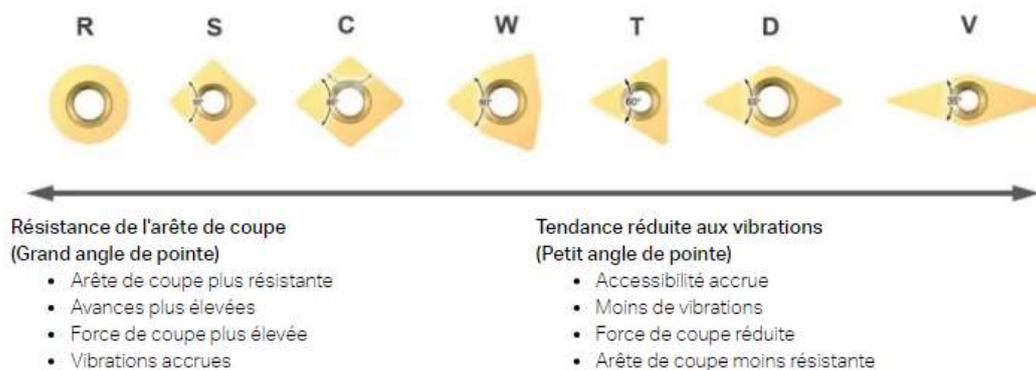


Figure III.14. Forme des plaquettes [14].

**Etape 4 : Choix de la taille de la plaquette**

On parle ici de la longueur nominale de l'arête. On doit choisir la taille de la plaquette en fonction des besoins de l'application et de l'espace disponible pour l'outil de coupe dans l'application. Avec les grandes plaquettes la stabilité est meilleure. Il faut aussi tenir compte de la profondeur de la passe et la distance entre le point de contact de la plaquette avec la pièce et son centre [14].

**Etape 5 : Choix de la nuance de la plaquette**

Le choix des caractéristiques mécaniques, thermiques et chimiques du matériau de la plaquette dépend des caractéristiques du matériau à usiner (la dureté), du type d'usinage (ébauche ou finition) et des conditions de travail (les chocs) [13].

**Etape 6 : Choix du rayon de bec de l'outil**

Le choix du rayon de bec dépend de la profondeur de coupe et de l'avance. Il influence l'état de surface, la fragmentation des copeaux et la résistance de la plaquette [14].

- **Petit rayon de bec** : idéal pour les petites profondeurs de coupe, réduction des vibrations, arête de coupe moins résistante, meilleure fragmentation des copeaux en général
- **Grand rayon de bec** : avances élevées, grandes profondeurs de coupe, grande sécurité d'arête, forces de coupe radiales plus élevées

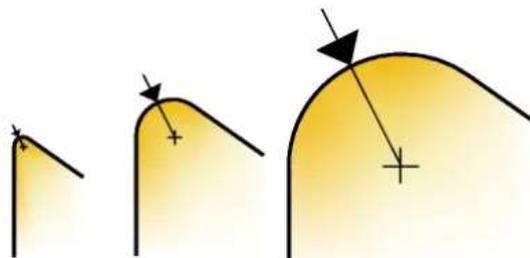


Figure III.15. Rayons de bec d'outil de coupe [14].

Il est donc de la responsabilité du professionnel du BM de choisir le rayon de bec qui convient le mieux au résultat souhaité [14].

#### *Etape 7 : Choix des conditions de coupe*

Les conditions de coupe recherchées sont la vitesse de coupe  $V_c$  et l'avance  $f$ . On peut trouver ces informations sur des tableaux que sont disponibles selon le matériau de la pièce à être usiné.

D'abord, on cherche à savoir le matériau à usiner. Ensuite, on cherche la nuance et puis on prend une avance plus ou moins grande selon l'opération à réaliser. Finalement on trouve la vitesse de coupe. Puis, avec ces valeurs déjà définies, on calcule la vitesse de rotation  $N$  et la vitesse d'avance  $V_f$ .

### **III.7. Fabrication du galet**

Une fois la partie de conception terminée, le projet est passé au BM pour la phase d'études de la meilleure méthodologie pour le processus de fabrication.

Pour que cette phase soit achevée le plus efficacement possible, il est nécessaire que les professionnels du BM suivent une série d'étapes définies.

La pièce sera usinée puis soumise à un traitement thermique dans le but d'augmenter sa dureté. Ensuite elle sera ramenée à la machine pour l'étape de finition qui donnera sa forme finale.

#### **III.4.2. Etapes de fabrication**

##### *Etape 1 : Sélection du brut et méthode d'usinage*

Pour notre cas le brut est en acier **X160CrMoV12**, un acier fortement allié qui est généralement utilisé pour la fabrication d'outils en raison de sa dureté et de sa résistance à l'usure. La méthode d'usinage est évidemment le tournage, comme la pièce et le brut sont de forme cylindrique, cela a plus de sens en termes de praticité et de gain de temps.

Le matériau aura un diamètre de 122mm (diamètre disponible sur le marché, qui est le plus proche du diamètre maximum de la pièce) et son prix sur le marché international varie de 1080 DA à 1800 DA pour un kilo. La longueur sera mieux discutée dans l'étape 2.

*Étape 2 : Détermination de la séquence des opérations et des processus d'usinage pour chaque surface de pièce*

La séquence des opérations est présentée dans un document appelé **gamme d'usinage**.

La **gamme de l'usinage** est une feuille donnant l'ordre chronologique des différentes opérations d'usinage d'une pièce en fonction des moyens d'usinage [15].

La feuille résume l'étude et doit :

- permettre l'identification de la pièce étudiée ;
- présenter très clairement la succession des phases ;
- préciser les surfaces usinées à chaque phase ;

A ce stade, selon le projet, la mise en position de chaque opération peut également être contenue, ainsi que les plages de tolérance acceptables dans les cotations respectives. C'est ce que nous avons décidé de faire.

A ce stade plus précisément, en ce qui concerne la mise en position de la pièce, nous avons proposé 3 approches possibles.

- a) Dans le premier, nous définissons la longueur du matériau à 300 mm, de cette façon, il sera possible d'assembler dans le tour sans avoir besoin d'une poupée mobile pour réduire les vibrations de la pièce.

Dans ce cas la pièce sera usinée en ébauche, amenée au traitement et passera par les étapes de finition et sera ensuite découpée à la fin (pour la séparer de la pièce inutile)

Mais les inconvénients de cette approche seront le gaspillage de matière qui se traduira par conséquent par un coût élevé.

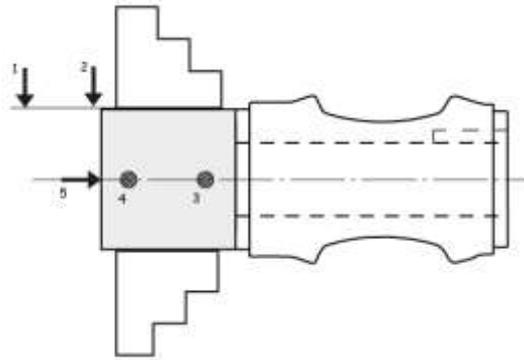


Figure III.16. Mise en position (approche 1)

- b) Dans la seconde approche, la longueur du brut sera de 200mm et après perçage et alésage, un axe est introduit en serrage et fixé à l'aide d'un écrou qui permettra l'usinage de la pièce sans contact direct entre celle-ci et le tour. Cet axe sera fabriqué sur mesure à cet effet (dimensions dans les annexes à la fin du document).

Dans cette configuration il faudra utiliser la poupée mobile pour assurer la stabilité en rotation.

L'inconvénient de cette approche réside dans le processus de traitement thermique. Etant donné que la pièce sera susceptible d'une expansion (même minime) et donc que l'alésage aurait besoin d'un processus de finition, le processus de mise en place serait difficile.

Ce problème peut être résolu en réalisant l'étape de finition avant le traitement thermique puis en portant l'ensemble (pièce et boulon) au four, mais cela implique de fabriquer l'axe dans un matériau plus résistant à la chaleur que la pièce et ainsi, éviter la dilatation du trou. Cependant, le coût de l'axe sera également élevé ce qui augmenterait considérablement le coût de fabrication de la pièce.

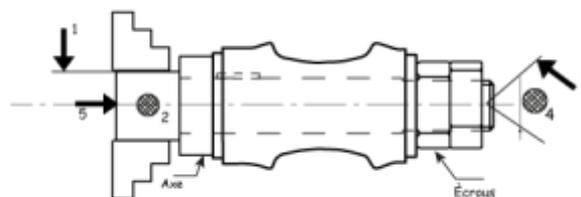


Figure III.17. Mise en position (approche 2).

c) Dans la troisième approche, Nous supposerions que la surface A (voir figure ci-dessous) est une surface qui ne sera pas en contact étroit avec la feuille et est donc une surface non primaire pour la forme finale du produit final. L'ébauche et la finition de l'alésage se feront dans la même phase. Une fois terminé, l'axe sera retiré et seule la pièce recevra le traitement thermique.

Après avoir fait le contrôle et connaissant la quantité de matière qu'il faudra enlever dans la finition, on remonte la pièce sur le tour, mais cette fois le sciage se fera sur la surface A (cette surface passera quand même par les étapes de finition). La passe de finition d'alésage est faite (si nécessaire) et l'axe est ensuite remonté pour les marches de finition de la surface extérieure du galet. Une fois cette phase est terminée, l'axe est retiré et l'inspection finale est effectuée.

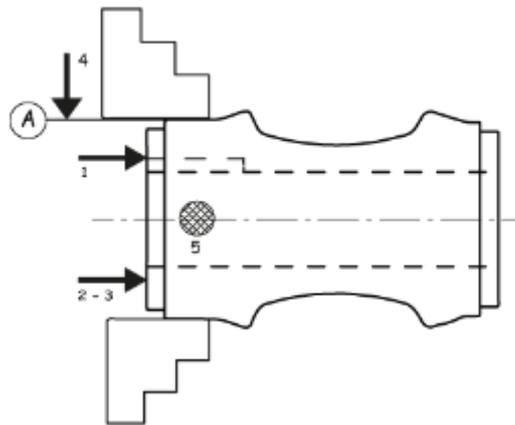


Figure III.18. Mise en position (approche 3)

Pour des raisons de coûts et de meilleur contrôle dans la prévision des résultats, nous avons choisi de travailler selon la troisième approche.

Pour faire la rainure dans le galet nous avons utilisé la mortaiseuse. Elle est utilisée pour la réalisation de mortaises ou des rainures de clavette. Une telle opération d'usinage porte le nom de mortaisage.

L'outil utilisé est un outil de chariotage classique monté rigide sur le porte-outil, il doit être soigneusement monté pour éviter le talonnage. Pendant la phase « montée », l'outil ordinaire talonne sur la pièce provoquant une usure rapide. Cet inconvénient peut être corrigé dans certain cas, en adoptant un porte-outil articulé à ressort. Selon le travail à exécuter, les outils peuvent avoir des profils divers (carré, rond, etc..) et si possible lubrifier à l'huile de coupe pour atténuer les effets de frottement.

**Etape 3 : Sélection des équipements et outillages pour les opérations d'usinage**

Comme on le voit dans la gamme d'usinage, le processus de fabrication comprend une série de surfaces à usiner ainsi que différentes opérations à effectuer. Il est cependant nécessaire de choisir le meilleur outil pour chaque opération et surface en fonction des informations que nous avons obtenues dans les étapes précédentes.

Les détails des outils qui seront utilisées dans la phase d'usinage de la pièce sont présentés ci-dessous.

*Tableau III.01. Choix d'outil de dressage/charriotage extérieure*

<b>Outil de dressage/chariotage extérieure</b>		
<b>Plaquette</b>		
	<b>Ebauche</b>	<b>Finition</b>
<b>Matériau</b>	Carbure	Carbure
<b>Forme</b>	C (80°)	C (80°)
<b>Taille</b>	08 (8.06mm)	08 (8.06mm)
<b>Epaisseur</b>	04 (4.76)	04 (4.76)
<b>Rayon du bec</b>	08	04
<b>Angle de dépouille</b>	5°	5°
<b>Angle de coupe</b>	5°	5°
<b>Nuance</b>	P35	P35
<b>Corps d'outil</b>		
<b>Système de fixation</b>	P	P
<b>Direction</b>	R (Droite)	R (Droite)
<b>Longueur</b>	150mm	100mm
<b>Largeur x Epaisseur</b>	20x20mm	25x25mm
<b>Angle de direction d'arête</b>	L (95°)	L (95°)
<b>Largeur de queue</b>	20mm	20mm

*Tableau III.02. Choix d'outil de mortaisage*

<b>Outil de martaisage</b>	
<b>Largeur (plaquette)</b>	15mm
<b>Epaisseur (plaquette)</b>	10mm
<b>Longuer (corps d'outil)</b>	80mm

Tableau III.03. Choix d'outil à percer

<b>Outils à percer</b>	
<b>Outil de centrage</b>	
	<b>Ebauche</b>
<b>Longueur</b>	36mm
<b>Diamètre</b>	12mm
<b>Nombre de flute</b>	1
<b>Angle</b>	90°
<b>Angle de la flute</b>	30°
<b>Outil de perçage</b>	
<b>Longueur</b>	320mm
<b>Diamètre</b>	35mm
<b>Nombre de flute</b>	2
<b>Angle</b>	118°
<b>Angle de la flute</b>	30°
<b>Longueur de queue</b>	250mm

Tableau III.04. Choix d'outil à aléser

<b>Outil à aléser</b>		
<b>Plaquette</b>		
	<b>Ebauche</b>	<b>Finition</b>
<b>Matériau</b>	Carbure	Carbure
<b>Forme</b>	C (80°)	C (80°)
<b>Taille</b>	12	12
<b>Epaisseur</b>	T3 (3.97)	T3 (3.97)
<b>Rayon du bec</b>	08	04
<b>Angle de dépouille</b>	7°	7°
<b>Angle e coupe</b>	3°	3°
<b>Nuance</b>	P35	P35
<b>Corps d'outil</b>		
<b>Système de fixation</b>	P	P
<b>Direction</b>	R	R
<b>Longueur</b>	300mm	300mm
<b>Largeur x Epaisseur</b>	25x20mm	25x20mm
<b>Angle de direction d'arête</b>	L	L

Tableau III.05. Choix d'outil à charrioter (profil de la pièce)

Outil à charioter (profil du galet)		
Plaquette		
	Ebauche	Finition
Matériau	Carbure	Carbure
Forme	D (55°)	D (55°)
Taille	12 (12.9mm)	12 (12.9mm)
Epaisseur	06 (6.35mm)	06 (6.35mm)
Rayon du bec	08	04
Angle de dépoile	30°	30°
Angle e coupe	5°	5°
Nuance	P35	P35
Corps d'outil		
Système de fixation	P	P
Direction	L (1ere passage) et R (2éme passage)	L (1ere passage) et R (2éme passage)
Longueur	150mm	150mm
Largeur x Epaisseur	25x20mm	25x20mm
Angle de direction d'arête	J	J (3° de dépouille)

#### Etape 4 : Sélection des conditions de coupe

A l'aide des abaques, nous avons pu trouver les vitesses de coupe et les vitesses d'avance habituelles utilisées pour usiner la matière de notre choix. A partir de là, on a pu calculer les vitesses de rotation de la broche et les vitesses d'avance de l'outil.

#### Conditions de coupe

La pièce est en acier fortement allié **X160CrMoV12**

#### Tournage extérieur (dressage et chariotage) en ébauche

- Vitesse de coupe :  $V_c = 150$  m/min et Avance :  $f = 0.4$  mm/tr
- Fréquence de rotation :  $N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$

Avec : **D** = diamètre de la pièce

$$N = \frac{1000 * 150}{3.14 * 122} = 391 \approx 400 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance :  $V_f = N * f$   
 $V_f = 400 * 0.4 = 160 \text{ mm/min}$

### **Perçage en ébauche**

- Vitesse de coupe :  $V_c = 40 \text{ m/min}$  et Avance (foret hélicoïdal) :  $f = 0.02 * \text{Ø foret}$   
 $f = 0.02 * 20 = 0.4 \text{ mm/tr}$

- Fréquence de rotation :  $N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$

Avec : **D** = diamètre du foret

$$N = \frac{1000 * 40}{3.14 * 20} = 636 \approx 650 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance :  $V_f = N * f$   
 $V_f = 650 * 0.4 = 260 \text{ mm/min}$

### **Alésage ébauche**

- Vitesse de coupe :  $V_c = 12 \text{ m/min}$  et Avance :  $f = 0.02 * \text{Ø alésoir}$   
 $f = 0.02 * 20 = 0.4 \text{ mm/tr}$

- Fréquence de rotation :  $N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$

Avec : **D** = diamètre de la pièce

$$N = \frac{1000 * 12}{3.14 * 20} = 191 \approx 200 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance :  $V_f = N * f$   
 $V_f = 200 * 0.4 = 80 \text{ mm/min}$

### **Tournage extérieur (dressage et chariotage) en finition**

- Vitesse de coupe :  $V_c = 120 \text{ m/min}$  et Avance :  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$

- Fréquence de rotation :  $N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$

Avec : **D** = diamètre de la pièce

$$N = \frac{1000 * 120}{3.14 * 122} = 313 \approx 350 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance :  $V_f = N * f$   
 $V_f = 350 * 0.2 = 70 \text{ mm/min}$

**Alésage finition**

- Vitesse de coupe :  $Vc = 12$  m/min et Avance :  $f = 0.02 * \varnothing$  alésoir  
 $f = 0.02 * 12 = 0.2$  mm/tr

- Fréquence de rotation :  $N = \frac{1000 * Vc}{\pi * D}$

Avec : **D** = diamètre de la pièce

$$N = \frac{1000 * 12}{3.14 * 10} = 382 \approx 400 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance :  $Vf = N * f$   
 $Vf = 400 * 0.2 = 80$  mm/min

Tableau III.06. Conditions de coupe

	Vc (m/min)	f (mm/tr)	N (tr/min)	Vf (mm/min)
<b>Tournage Extérieur</b>				
<b>Ébauche</b>	150	0.4	400	160
<b>Finition</b>	120	0.2	350	70
<b>Perçage</b>				
<b>Ébauche</b>	40	0.4	650	260
<b>Alésage</b>				
<b>Ébauche</b>	12	0.4	200	80
<b>Finition</b>	12	0.2	400	80

**Etape 5: Élaboration des parcours-outils**

Après que les phases de fabrication, les outillages à utiliser et les conditions de fabrication sont connus, on passe ensuite au traitement de la pièce dans un logiciel FAO. L'objectif final de cette phase est de générer le parcours que l'outil devra suivre dans le processus de fabrication appelé aussi la **trajectoire de l'outil**.

Il existe aujourd'hui plusieurs programmes capables d'effectuer cette tâche. Certains d'entre eux ont une double fonction (CAO et FAO) et d'autres sont spécialement conçus pour la partie FAO.

Parmi les nombreux logiciels disponibles, ceux qui se démarquent le plus sont : MASTERCAM, FUSION 360, SOLIDWORKS CAM, TEBIS FAO et ESPRIT FAO.

Pour notre travail, nous avons choisi de travailler avec Master Cam car c'est un logiciel avec une interface conviviale, avec une courbe d'apprentissage favorable et qui convient à

tous les niveaux (des débutants aux professionnels plus expérimentés). C'est cette polyvalence qui en fait le programme FAO le plus largement utilisé dans les industries manufacturières.

Il comprend toute sorte de tâche en relation à l'ingénierie industrielle, il se compose de plusieurs modules, chacun de ces derniers est spécialisée à un travail concret par exemple :

- **Mill** : travail de fraiseuse.
  - **Lathe** : tournage.
  - **Wire** : programmation d'électroérosion de coupure par fil de fer
  - **Router** : création de lignes, cercles, arcs ou surfaces 3D avec opérations de découpage.
- Et plusieurs d'autres.

Autres avantages du logiciel de FAO : meilleure qualité finale des pièces, élimination des efforts inutiles, itérations de pré-production, plus grande collaboration entre les équipes de conception et de production, meilleur contrôle des modifications de conception, production plus efficace, simulation d'usinage ou processus de fabrication utilisé (afin de vérifier qu'il y a des problèmes dans le programme généré ou des interférences), parmi beaucoup d'autres.

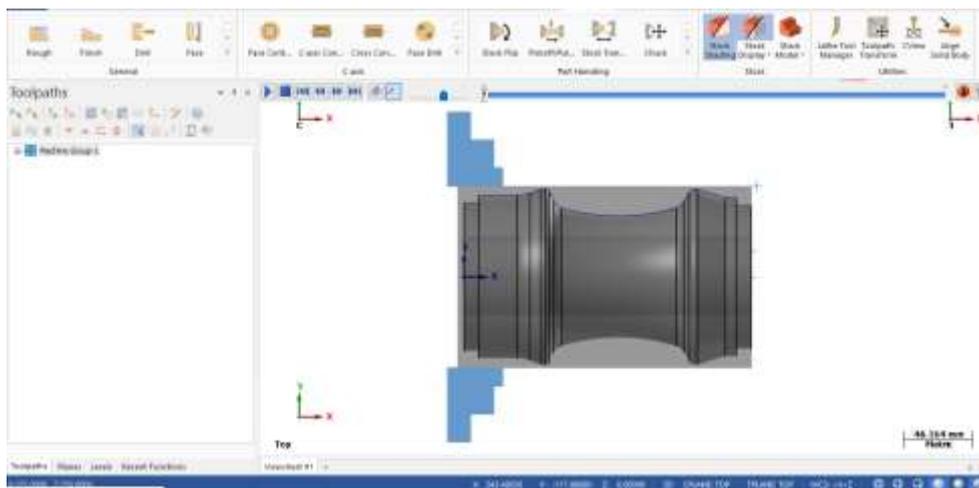


Figure III.19. Une pièce en tournage (*interface MASTERCAM*).

À la fin de cette phase, il est important de réaliser la simulation du processus de fabrication pour s'assurer que tout est conforme aux attentes.

**Étape 6 : Post-traitement (G-Code)**

Le **G-Code** est un langage de programmation pour les machines CNC (Computer Numerical Control). Le code G signifie « code géométrique ». Nous utilisons ce langage pour dire à une machine quoi faire ou comment faire quelque chose. Les commandes G-code indiquent à la machine où se déplacer, à quelle vitesse se déplacer et quel chemin suivre. Cette séquence de codes est créée pour chaque mouvement effectué par l'outil. Pour cette raison, si l'outil effectue encore et encore le même type d'opération, le code peut contenir des répétitions successives nécessaires à la programmation de son mouvement.

Pour pallier ce problème, on a décidé d'utiliser les cycles appelés **cycles d'aide à la programmation en tournage**, surtout le **cycle d'ébauche en tournage (G71)**.

L'image ci-dessous représente un cycle d'alésage ainsi que son G-code respectif.

Les sept premières lignes représentent les détails de l'outil ainsi que les détails de la rotation du mandrin.

La huitième ligne ordonne à l'outil de se déplacer jusqu'au point de départ du cycle.

Les lignes marquées sont celles correspondantes au cycle.

Dans la première ligne :

- **G71** est notre G-Code qui permet aux commandes de savoir que nous souhaitons utiliser un cycle d'ébauche et que les informations suivantes s'appliquent à cela.
- Le **U** est la profondeur de coupe de chaque passe d'ébauche. Le **R** fait référence à la distance à laquelle l'outil se rétractera de la pièce en X lors du retour rapide au début du cycle.

Dans la deuxième ligne :

- Les valeurs **P** et **Q** définissent respectivement le point de départ et de fin de notre sous-programme. Ces valeurs peuvent être n'importe quelle valeur à 3 chiffres tant qu'elles correspondent aux nombres « **N** » du sous-programme.
- Les valeurs **U** et **W** de cette ligne correspondent à la quantité du brut à laisser pour l'étape de finition sur les axes X et Z respectivement.
- La valeur **F** indique la vitesse d'avance de l'outil.

La troisième correspond au début du profil et la cinquième ligne correspond à la fin du profil. Ayant ces données, la machine est capable d'usiner tout le brut qui se trouve entre ces deux points.

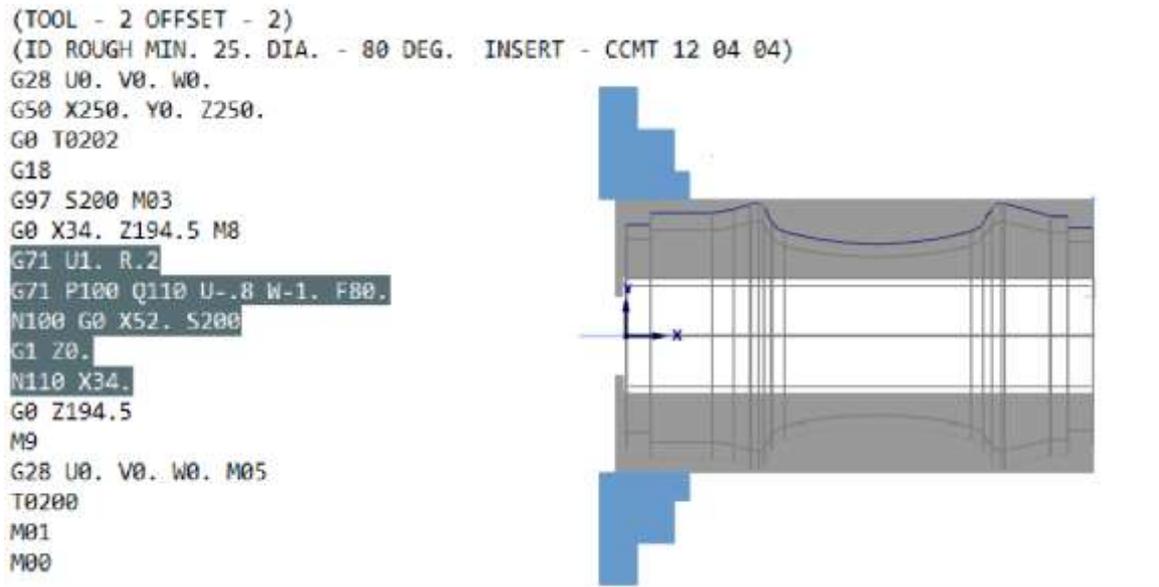


Figure III.20. Cycle de tournage intérieure (*alésage*).

### **Etape 7 : Usinage (ébauche)**

Une fois le code généré, il est transmis à la machine soit en connectant l'ordinateur à la machine et en lançant directement l'opération, soit à l'aide d'un périphérique qui reçoit le code de l'ordinateur et se connecte à la machine ou en tapant le code directement dans l'interface de la machine.

Dès que le programme est exécuté, la machine commence à effectuer les opérations d'usinage.

### **Etape 8 : Traitement thermique**

Le galet d'une profileuse est traité thermiquement par une méthode appelée **trempe**.

La trempe est un procédé de traitement thermique de l'acier visant à obtenir la dureté. Un outil correctement trempé donne une longue durée de vie qui ne s'use pas et ne se déforme pas rapidement.

Un bon traitement thermique doit avoir le contrôle du temps, de la température, de l'atmosphère et de la vitesse de refroidissement. À partir de ces paramètres, il est possible de modifier les propriétés et de donner les caractéristiques attendues au matériau.

Le procédé consiste à chauffer l'acier dans un four à une température supérieure à la zone critique. Pour l'acier X160CrMoV12, la température varie de 1020°C à 1050°C selon la composition. La pièce reste à cette température le temps de se transformer en austénite. Ce qui distingue cette forme de traitement c'est son processus de refroidissement. La pièce est sortie du four et refroidi par gaz, dans l'huile ou bien par un bain de sels. La température descend à 20°C, c'est un refroidissement brusque [5].

Lorsque l'austénite est refroidie trop rapidement, elle n'a pas le temps de se transformer en ferrite, cémentite ou perlite. L'austénite devient un nouveau constituant de l'acier appelé **martensite**.



Figure III.21. Four de traitement thermique [uniforja.com.br].

Dans le refroidissement rapide, les atomes de carbone sont piégés à l'intérieur de l'austénite. De cette façon, les atomes produisent une déformation considérable dans le réseau de ferrite, sollicitant le matériau et augmentant sa dureté.

### Revenu

Le traitement de trempe provoque de profonds changements dans les propriétés de l'acier, dont certains tels que la dureté et la résistance à la traction, atteignent des valeurs élevées. Cependant, d'autres propriétés telles que la résistance aux chocs et l'allongement, restent à des

valeurs très faibles et le matériau acquiert une quantité appréciable de contraintes internes. Un acier dans cette situation n'est pas adapté au travail.

Pour corriger ses tensions justes après la trempe, la pièce est placée dans le four à une température inférieure à la zone critique. La valeur cible requise pour cette pièce était de 58 à 60HRC, le revenu sera donc effectuée à des températures allant de 200°C à 300°C (figure III.15) selon l'utilisation future de l'acier. Après un certain temps (d'une à trois heures), la pièce est retirée du four et laisser refroidir par n'importe quel moyen.

Le but est de corriger la dureté excessive de la trempe, de soulager ou d'éliminer les tensions internes. Il s'agit donc d'un processus réalisé toujours après trempe [16].

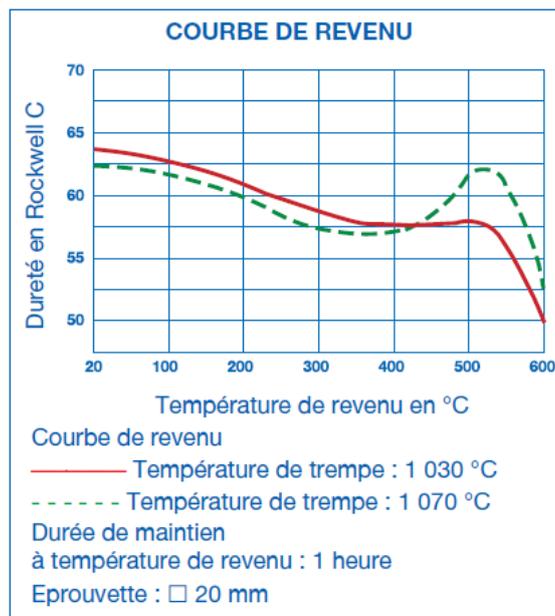


Figure III.22. Dureté suivant la température de revenu [5].

### **Etape 9 : Usinage (finition)**

Après le traitement thermique, la pièce subit une petite expansion volumique. Pour mener à bien le processus de finition, il est nécessaire que nous connaissions la quantité d'épaisseur qui sera nécessaire à usiner. Par conséquent, nous continuons avec le contrôle qui nous donnera les dimensions actuelles de la pièce et en fonction de ces dernières nous programmons les étapes de finition.

Les données du processus de fabrication sont fournies dans le tableau des plages d'usinage et les données des conditions de coupe peuvent être trouvées dans les tableaux correspondants.

### *Etape 10 : Contrôle finale*

Dans cette phase, le contrôle final est effectué pour déterminer si les mesures et les intervalles de tolérance respectifs sont conformes aux exigences définies. Si elle est confirmée, la pièce sera approuvée et sera prête à être livrée au client. Mais si ce n'est pas le cas, il faut déterminer les causes d'échec et si possible les corriger et sinon les jeter et en usiner une autre (situation à éviter).

#### **III.7.2. Coût de fabrication**

Le coût de fabrication d'une pièce mécanique est le coût final qui comprend le coût des produits, des activités et de la main-d'œuvre respective impliquée dans chaque processus de fabrication de cette pièce.

Ce coût dicte le coût final de la pièce et il est important qu'il soit accessible au client, mais qu'il couvre les dépenses de l'entreprise ainsi que les bénéfices nécessaires à son succès.

De manière générale, les principaux éléments qui contribuent à ce coût sont :

- Le coût de la matière première (achat, transport et stockage) ;
- Le type de procédé d'usinage ;
- Temps d'usinage ;
- Dépréciation de la machine, etc... ;
- La main-d'œuvre impliquée dans tout le processus de fabrication.

Cependant, le coût varie en fonction de la quantité de pièces à produire. Plus la quantité est importante, plus le prix par pièce a tendance à baisser.

Sur la base d'études de coûts réalisées sur le marché algérien ainsi que sur le marché international, nous sommes arrivés aux valeurs suivantes :

- Matière première : 10800 DA.
- Main d'œuvre : 1800 DA.
- Le cout de l'opération: 750 DA (tournage) + 550 DA (traitement thermique)
- Le cout de marche des machines : 3000 DA.

Dons le coût total de fabrication de la pièce est de : 16900 DA.

## Conclusion générale

Le profilage est un procédé qui consiste à faire passer une tôle le long du rouleau aux formes bien définies jusqu'à atteindre le profil souhaité.

Bien qu'il s'agit d'un procédé à haute productivité par rapport aux autres procédés de fabrication mécanique. Cette productivité, qui est largement associée à la vitesse de production élevée peut être compromise par la présence d'une erreur dans la chaîne de production. Par conséquent, le dimensionnement et la production des outils utilisés dans le processus doivent être soigneusement analysés et réalisés pour garantir les résultats souhaités et ainsi éviter les erreurs pouvant entraîner des dépenses inutiles. Si ces erreurs se produisent, il est important de remplacer immédiatement le composant afin de répondre rapidement aux besoins du client. Et dans les situations où il n'y a pas de pièces de rechange disponibles et où le changement de machine est une option très coûteuse, la rétro-conception peut être utile.

RE, étant une technique qui permet le passage d'un projet physique à un projet virtuel, elle nous permet d'acquérir les spécifications techniques de la pièce de les traiter si nécessaire et avec elles de pouvoir fabriquer une nouvelle pièce.

Cette technique gagne en popularité sur le marché actuel et dispose déjà de moyens automatisés offrant une grande précision et une grande agilité de travail. Cependant, ces moyens sont irréalisables pour certaines petites entreprises en raison de leur coût d'acquisition et de maintenance. Par conséquent, ces entreprises sont limitées à travailler avec des projets peu exigeants en utilisant des processus de la RC moins coûteux.

Bien que la RC soit une technique utilisable dans des cas particuliers, elle est parfois nécessaire permettant de réduire les coûts de production d'un produit donné.

Ce travail nous a permis de développer de nouvelles connaissances concernant le procédé de la RC, ses applications, méthodes et étapes ainsi que certains outils utilisés dans le procédé.

Cela nous a également permis d'approfondir les connaissances et les compétences de conception et de fabrication mécaniques acquises au cours de la formation de la planification à l'exécution du projet.

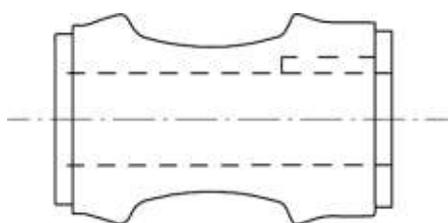
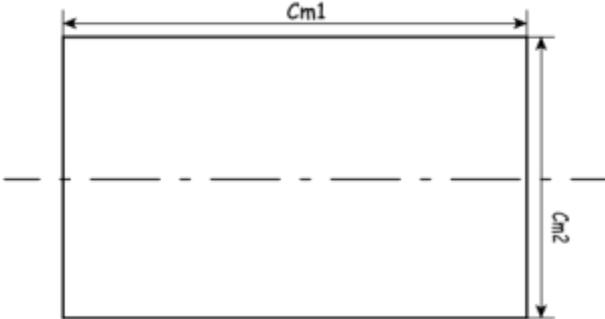
Enfin, ce travail a servi à la préparation au monde professionnel puisqu'il nous a demandé un effort mental dans la recherche de solutions viables pour résoudre un problème concret.

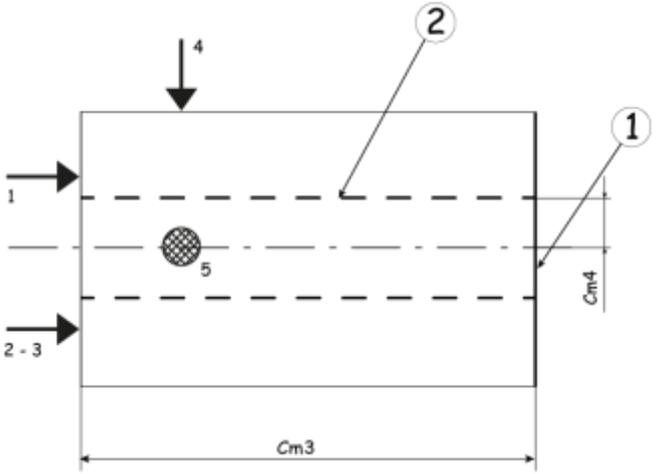
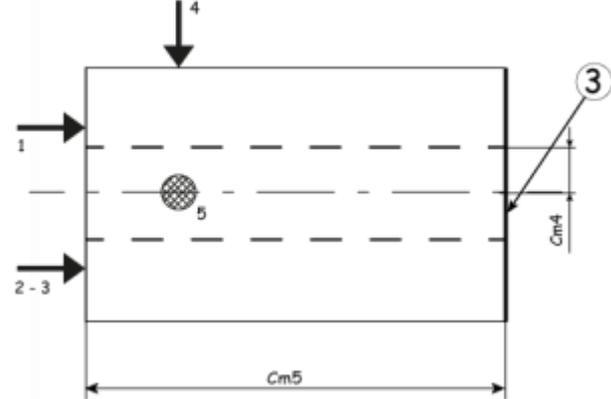
## References bibliographiques

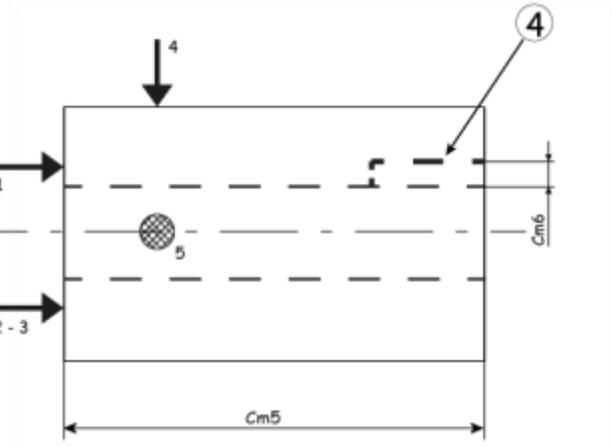
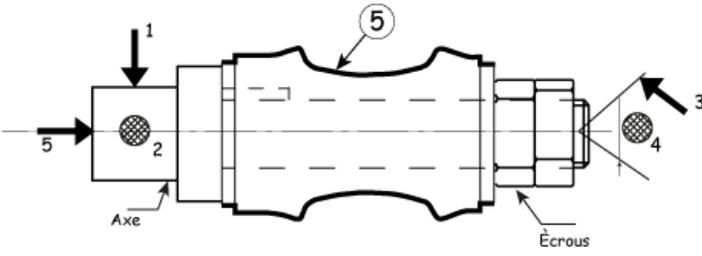
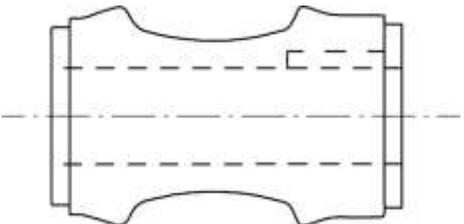
- [1] RAJAOHSONA, Tojo Herimirija. Etude et conception d'une profileuse a galets pour lames de volet roulant. Mémoire d'ingénierie en Génie Industriel. Université d'Antananarivo. 2010. 116p
- [2] INDUSTRY QUICK SEARCH. Roll Forming. In : ISQ Directory. Site disponible sur : [www.iqsdirectory.com/articles/roll-forming.html](http://www.iqsdirectory.com/articles/roll-forming.html) (page consulté le 24/05/2021)
- [3] DE ALMEIDA, Mateus da Silva. CONFORMABILIDADE: análise de inconformidades no processo de conformação de chapas metálicas por rolos moldadores. Monographie de baccalauréat en Génie Mécanique. Centro Universitário do sul de Minas. 2012. 50p
- [4] MAKHLOUFI, Lydia. Conception des galets d'une profileuse de tôles. Memoire de master en Fabrication Mécanique et Productique. Université Abderahmane Mira de Bejaia. 2017 – 2018. 68p
- [5] ALBERT & DUVAL. Acier X160CrMoV12.
- [6] HALMOS, George T. Roll Forming Handbook. États Unis. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2006
- [7] HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENCE. Retróconception. In : Hexagon MI. Site disponible sur : [www.hexagonmi.com/fr-fr/solutions/technical-resources/metrology-101/reverse-engineering](http://www.hexagonmi.com/fr-fr/solutions/technical-resources/metrology-101/reverse-engineering) (page consulté le 27/05/2021)
- [8] PILLON, Mayara Manço. Aplicações da Engenharia Reversa no desenvolvimento de produtos. Monographie de baccalauréat en Génie de Production. Centro Universitário Eurípides de Marília. 2015. 60p
- [9] HAFIDI Saida . Modélisation géométrique par rétro conception d'une pièce complexe . 2016/2017
- [10] KEYENCE. Profilomètres. In : Keyence, Principes fondamentaus de la mesure. Site disponible sur : <https://www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/measurement-selection/type/shape.jsp> (page consulté le 29/05/2021)

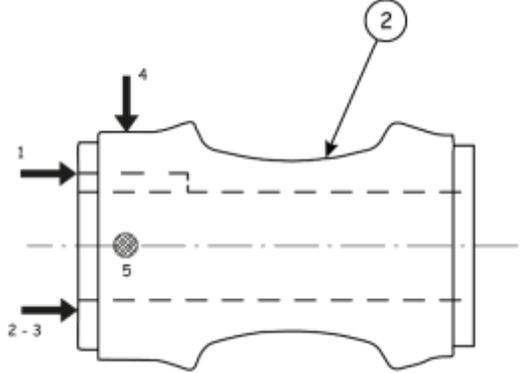
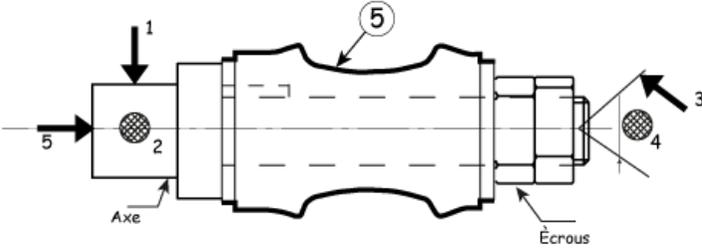
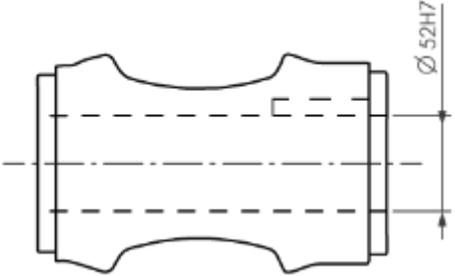
- [11] BTP. Tour à commande numérique. 2000 - SI1. Durée 5 heures
- [12] Dr. BENNEGADI, Mohammed El Larbi. Cours : Coupe des Métaux. Fabrication Mécanique et Productique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF. 2018
- [13] NCIRI, Rached. Suport de cours : Etude de la coupe. Licence appliquée en Génie Mécanique. Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa. 2014-2015
- [14] SANDVIK COROMANT. Comment Choisir une plaquette de tournage correcte. Site disponible sur :
- <https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx> (page consulté le 08/06/2021)
- [15] Bertrouf, Nerijp (Contributeurs). Gamme d'usinage. Source:
- <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72219523>
- [16] Divisão de Recursos Didáticos da Diretoria de Educação do Departamento Regional do SENAI-SP. Tratamento térmico. São Paulo. DA SILVA, Cleide Aparecida. 1995 – 2008.
- [17] XPAIR. Bureau d'études. In : Xpair Algerie. Site disponible sur :
- [xpair.com/lexique/definition/bureau-etudes-html](http://xpair.com/lexique/definition/bureau-etudes-html).
- [18] SANTOKI Karan J. Computer aided manufacturing. Darshan Institute of Engineering & Technology, Rajkot. Department of Mechanical Engineering
- [19] FAUSTINO Valdeci. Perfiladeira linear automatizada. Monographie de baccalauréat en Génie Mécanique et Automation de Systèmes. Universidade São Francisco, São paulo, Brasil. 2014. 42pg
- [20] AUTODESK CAM. Fundamentals of CNC Machining – A Pratical Guide for Beginners. Autodesk.Inc. United States of America. 2014

# **Annexes**

GAMME D'USINAGE					
Élément: Galet		Materiau : X160CrMoV12			
Organe: Profileuse		Nombre de pièces : 1			
N°. Ph.	Designation des phases	Machines utilisées	Appareillage	Croquis	Vitesses de coupe
10	Débitage Cm1 = 200mm Cm2 (diamètre) = 122mm	Machine de découpage	Pied à coulisse		

20	<p>Dressage ébauche 1</p> <p>Perçage et alésage ébauche 2</p> <p><math>Cm3 = 198^{\pm 1}</math> mm <math>Cm4 = 25^{\pm 0.5}</math> mm</p>	Tour CNC	<p>Outil a dresser et charioter</p> <p>Foret Ø35</p> <p>Outil a aléser</p>		<p><b>Dressage :</b>  <math>Vc = 150</math> m/min  <math>f = 0.4</math> mm/tr  <math>N = 400</math> tr/min  <math>Vf = 160</math> mm/min</p> <p><b>Perçage :</b>  <math>Vc = 40</math> m/min  <math>f = 0.4</math> mm/tr  <math>N = 650</math> tr/min  <math>Vf = 260</math> mm/min</p> <p><b>Alésage :</b>  <math>Vc = 12</math> m/min  <math>f = 0.4</math> mm/tr  <math>N = 200</math> tr/min  <math>Vf = 80</math> mm/min</p>
30	<p>Dressage ébauche (pièce renversée) 3</p> <p><math>Cm5 = 196^{\pm 1}</math> mm</p>	Tour CNC	Outil a dresser et charioter		<p><b>Dressage :</b>  <math>Vc = 150</math> m/min  <math>f = 0.4</math> mm/tr  <math>N = 400</math> tr/min  <math>Vf = 160</math> mm/min</p>

40	Mortaisage de la rainure 4	Mortaiseuse	Outil de mortaisage		<p><b>Mortaisage :</b>  <math>f = 0.4 \text{ mm/tr}</math>  <math>V_f = 280 \text{ mm/min}</math>  <math>a_p = 0.8 \text{ mm}</math></p>
50	Chariotage ébauche 5	Tour CNC	Outil a charioter		<p><b>Dressage :</b>  <math>V_c = 150 \text{ m/min}</math>  <math>f = 0.4 \text{ mm/tr}</math>  <math>N = 400 \text{ tr/min}</math>  <math>V_f = 160 \text{ mm/min}</math></p>
60	Traitement thermique	Four de tremp	Pince		

70	Alésage en finition 2	Tour CNC	Outil à aléser		<p><b>Alesage :</b>  <math>V_c = 12 \text{ m/min}</math>  <math>f = 0.4 \text{ mm/tr}</math>  <math>N = 200 \text{ tr/min}</math>  <math>V_f = 80 \text{ mm/min}</math></p>
80	Chariotage en finition 5	Tour CNC	Outil de dressage – chariotage extérieure		<p><b>Chariotage :</b>  <math>V_c = 120 \text{ m/min}</math>  <math>f = 0.2 \text{ mm/tr}</math>  <math>N = 350 \text{ tr/min}</math>  <math>V_f = 70 \text{ mm/min}</math></p>
90	Contrôle final				

## G – Code

### Galet

```
%  
O0000  
(PROGRAM NAME - GALET)  
(DATE=DD-MM-YY - 09-09-21 TIME=HH:MM - 03:05)  
(MATERIAL - X160CrMoV12)  
  
G21  
G18  
(DRESSAGE - PLAQUETTE - CNMG 12 04 08 - 80 DEG.)  
G28  
G0 T0101  
G50 S1600  
G97 S400 M03  
G0 X126. Z194.2 M8  
G98 G1 X-1 F160.  
G0 Z196. X126.  
Z192.4  
G1 X-1.  
G0 Z196 M9  
G28 M05  
M01  
  
(CENTRAGE - OUTIL - 12. DIA.)  
G28  
G0 T11312  
G97 S650 M03  
G0 X0. Z196 M8  
G1 Z187. F260.  
G0 Z196.  
M9  
G28 M05  
M01  
  
(PERÇAGE - OUTIL - 18. DIA.)  
G28  
G0 T13029  
G97 S650 M03  
G0 X0. Z196 M8  
Z193.  
G1 Z144. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z94. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z44. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z-20. F260.  
G0 Z196  
M9  
G28 M05  
M01
```

(PERÇAGE - OUTIL - 35. DIA.)

G28  
G0 T13029  
G97 S650 M03  
G0 X0. Z196 M8  
G1 Z144. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z94. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z44. F260.  
G0 Z193.  
G1 Z-20. F260.  
G0 Z196.  
M9  
G28 M05  
M01

(ALÉSAGE - OUTIL - 25. DIA. - 80 DEG. - CCMT 12 04 04)

G28  
G0 T7373  
G0 X35. Z194 M8  
G96 S200  
G71 U1. R.2  
G71 P100 Q110 U-.4 W-1. F80.  
N100 G0 X35. S200  
G1 Z0.  
N110 X52.  
G0 Z194 M9  
G28 M05  
M01

(MORTAISAGE - PLAQUETTE - 15X10)

G28  
T0505  
G0 X52. Z164.  
G71 U0.8. R.1  
G71 P200 Q210 U0. W0. F200.  
N200 G1 X52  
Z142.4  
N210 X52.  
G0 Z194.  
G28  
M00

(INVERSION DU BRUTE)

(DRESSAGE - PLAQUETTE - CNMG 12 04 08 - 80 DEG.)

G28  
G0 T0101  
G50 S1600  
G97 S400 M03  
G0 X126. Z194.6 M8  
G98 G1 X51 F160.  
G0 Z196 X126.  
Z192.8  
G1 X51  
G0 Z196 M9  
G28 M05  
M30  
%

## Assemblage

⊘

O0001

(PROGRAM NAME - ASSEMBLAGE GALET ET AXE)  
(DATE=DD-MM-YY - 09-09-21 TIME=HH:MM - 03:04)

G21

G18

(PROFILAGE - PLAQUETTE DROITE - DNMG 15 06 08 - 55 DEG )

G28

G0 T0808

G97 S400 M03

G0 X120.15 Z195. M8

G71 U2. R.2

G71 P100 Q110 U1. W.2 F160.

N100 G0 X99.54 S400

G1 Z182.06

X107.96

G3 X109.56 Z181.26 K-.8

G1 Z155.67

G2 X112.523 Z147.284 I24.547 K.013

G1 X117.644 Z140.253

G3 X118.91 Z136.652 I-9.927 K-3.602

G1 Z136.639

Z136.638

G3 X117.907 Z134.889 I-3.3

G1 X84.961 Z108.527

G2 X81.685 Z87.903 I129.042 K-20.624

X93.257 Z49.45 I130.68

X100.509 Z44.92 I7.723 K2.468

G1 X112.918 Z41.286

G3 X118.561 Z36.524 I-2.609 K-4.762

X118.502 Z35.96 I-5.43

N110 G1 X120.15

G0 Z195.

M9

G28 M05

M01

(PROFILAGE - PLAQUETTE GAUCHE - DNMG 15 06 08 - 55 DEG )

G28

G0 T0909

G97 S400 M03

G0 X124.6 Z-3. M8

X120.91

G71 U2. R-.2

G71 P120 Q130 U1. W-.2 F160.

N120 G0 X96.7 S400

G1 Z10.09

X105.1

G2 X106.7 Z10.89 K.8

G1 Z18.069

X118.079 Z36.524

G2 X118.561 Z38.124 I-5.189 K1.599

X116.911 Z41.002 I-5.43

G1 X86.063 Z65.685

G3 X81.685 Z89.502 I128.492 K23.818

X92.831 Z127.257 I130.68

X101.439 Z132.141 I7.536 K-2.303

G1 X115.032 Z135.232  
G2 X118.714 Z137.44 I-1.361 K3.006  
N130 G1 X120.91  
G0 Z-3.  
M9  
G28 M05  
M30  
%