

Université 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : **DERBAL Brahim**

=====

Conception et Fabrication d'un Arbre
d'Entrainement sur Machine-Outil à
Commande Numérique

=====

Sous la Direction de :

Pr. DJAMAA Mohamed Cherif

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à remercier dieu puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Pr DJAMAA Mohamed Cherif, pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Ce modeste travail est dédié à tous les membres de ma famille.

Mes vifs remerciements vont également aux enseignants du département de Génie Mécanique qui ont participé à ma formation en Master.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Résumés

Introduction générale	01
Chapitre I. Partie bibliographique	03
1.1 Introduction	04
1.2 Mécanismes de transmission de mouvement	04
1.3 Eléments de transmission de mouvement circulaire	05
1.4 Matériaux employés pour la fabrication des arbres	06
1.5 Application de la CFAO pour l'usinage des pièces	07
1.5.1 La conception assistée par ordinateur (CAO)	08
1.5.2 La fabrication assistée par ordinateur (FAO)	10
1.5.3 Les machines à commande numérique	10
CHAPITRE II : Partie Technologique	12
2.1 Introduction	13
2.2 Fonctionnement de la pièce	13
2.3 Données de départ	13
2.4 Analyse technologique	14
2.5 Détermination de type de production	16
2.6 Mode d'obtention de l'ébauche	17
2.7 Calcul des surépaisseurs	18
2.8 Calcul et choix des régimes de coupe	23
2.9 Présentation des contrats de phases	26
2.10 Programmation manuelle de la phase de tournage	37
CHAPITRE II : Etude expérimentale	41
3.1 Introduction	42
3.2 Etude du phénomène d'usure des plaquettes	42
3.3 La surveillance de l'usure	45
3.4 Etude de cas de l'usure d'outil	49
3.5 Modèle de Taylor	51
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	54

ملخص

لقد أصبح تشكيل قطع ميكانيكية بواسطة آلات أدوية ذات التحكم العددي أسهل بكثير من ذي قبل. فمن ناحية أولى، يتم تقليص الزمن المخصص للتصنيع من خلال تجميع عدة عمليات على نفس الآلة دون فك وإعادة تركيب القطعة خلال عملية التصنيع، ومن ناحية أخرى، يتم ضمان دقة الأبعاد وخشونة السطح. ورغم هذه الإيجابيات، فإن العمل على هذا النوع من آلات يتطلب إتقان برمجة مختلف عمليات التصنيع، إما يدوياً أو بمساعدة الحاسوب.

في هذا السياق، يهدف العمل الذي قمنا به في هذا المشروع إلى تصنيع عمود ناقل للحركة على مخرطة ذات تحطم عددي. فبعد إجراء بحث بليوغرافي حول عناصر نقل الحركة وخاصة الأعمدة الناقلة، قمنا بإنجاز وثيقة يمكن اعتمادها من قبل مكتب الأساليب وبها المراحل المختلفة التي يجب المرور بها بدءاً من الرسم التعريفي للقطعة إلى غاية تقنيات التصنيع التي يجب تطبيقها مع تقديم جميع الحسابات اللازمة لتحديد أبعاد القطعة الخام وتلك التي تتعلق بشروط القطع التي سيتم اعتمادها.

وأخيراً تقدمنا ببحث مقتضب يهدف إلى دراسة ظاهرة تآكل أدوات القطع المستخدمة أثناء التصنيع والقوانين التي تحكمها. وتتمثل الفكرة في إظهار تأثير تكرار الاختبارات على دقة نماذج تايلور، والتي تكون بمثابة مرجع لاختيار شروط القطع من قبل الشركات المصنعة، وخاصة سرعة القطع.

الكلمات المفتاحية: عمود النقل، التحليل التكنولوجي، التصنيع الآلي على ماكينات CNC، تآكل الأدوات، تكرار القياسات. الحاسب الآلي، تآكل الأدوات، تكرار القياسات.

Summary

Cutting process on CNC machines has made the mechanical parts manufacturing much easier. On one hand, machining time is optimized by grouping several operations on the same machine without dismantling the part and on the other hand, dimensional precision and surface roughness are guaranteed. However, working with CNC machines requires mastery of machining cycles programming, either manually or in CAM.

In this context, our work aims to manufacture a drive shaft on a CNC lathe. After a bibliographic research on motion transmission elements, in particular drive shafts, we presented the different stages to create a methods office document starting from the part definition drawing to the manufacturing techniques to be applied. All calculations, necessary to determine the raw part dimensions and those, which concern the cutting conditions to be adopted, are presented.

Finally, a research section is introduced in order to study the wear phenomenon of cutting tools used during machining and the laws, which govern it. The idea is to show the impact of the tests repetition on the accuracy of Taylor models, which serve as a reference for the choice of cutting conditions by manufacturers, especially cutting speed.

Key words: Transmission shaft, technological analysis, machining on CNC machines, tool wear, repetition of measurements.

Résumé

La mise en forme par enlèvement de la matière sur les machines-outils à commande numérique a rendu la fabrication mécanique des pièces beaucoup plus facile. D'une part, le temps d'usinage est optimisé par regroupement de plusieurs opérations sur la même machine sans démontage de la pièce et d'autre part, la précision dimensionnelle et l'état de surface sont garantis. Par contre, le travail sur des machines CNC nécessite la maîtrise de la programmation des cycles d'usinage, soit manuellement, soit en FAO.

Dans ce contexte, notre travail a pour but de réaliser la fabrication d'un arbre d'entraînement sur un tour à commande numérique. Après une recherche bibliographique sur les éléments de transmission de mouvement, en particulier les arbres d'entraînement, nous avons présenté les différentes étapes d'élaboration d'un document de bureau des méthodes en partant du dessin de définition jusqu'aux techniques de fabrication à appliquer en faisant tous les calculs nécessaires pour dimensionner la pièce brute et les calculs qui concernent les conditions de coupe à adopter.

Enfin, une partie recherche est introduite afin d'étudier le phénomène d'usure des outils de coupe utilisés lors de la fabrication par usinage et les lois qui le régissent. L'idée est de montrer l'impact de la répétition des essais sur l'exactitude des modèles de Taylor qui servent comme référence pour le choix des conditions de coupe par les industriels, surtout la vitesse de coupe.

Mots clés : Arbre de transmission, analyse technologique, usinage sur machines CNC, usure des outils, répétition des mesures.

Introduction générale :

La fabrication industrielle consiste à trouver de nouvelles méthodes dont l'objectif est d'augmenter la productivité, d'assurer la qualité des pièces fabriquées en minimisant les coûts et en améliorant la fiabilité des produits proposés à la vente aux consommateurs.

L'usinage par enlèvement de matière sur les machines-outils conventionnelles prend beaucoup de temps lors de la fabrication des pièces et demande des opérateurs qualifiés pour atteindre une qualité juste moyenne d'une pièce. L'arrivée des machines-outils à commande numérique a rendu l'usinage beaucoup plus facile en garantissant la précision demandée dans un temps optimisé qui résulte principalement de regroupement de plusieurs opérations sur la même machine sans démontage de la pièce. Par ailleurs, l'usinage CNC nécessite la maîtrise de la machine elle-même et de la programmation des cycles d'usinage selon le codage accepté par le calculateur.

En outre, si la pièce à fabriquer est complexe, les utilisateurs auront recours à la programmation des trajectoires d'outils par l'intermédiaire d'une conception et fabrication assistées par ordinateur CFAO. Les arbres d'entraînement qui sont des éléments très importants pour la transmission d'un mouvement et avec une très grande efficacité, peuvent être produits dans un système de CFAO lié avec une machine d'usinage à commande numérique.

Dans ce contexte, notre travail a pour but de réaliser la fabrication d'un arbre d'entraînement sur machine-outil à commande numérique en partant de la conception proposé par le dessin de définition.

Pour faciliter la présentation de notre projet, le manuscrit est organisé en trois chapitres complémentaires :

- Dans le premier chapitre, nous présentons une recherche bibliographique dans laquelle nous sommes intéressés aux éléments de transmission de mouvement. En particulier, la conception des arbres d'entraînement, les matériaux utilisés, leurs modes d'obtention en ébauche et finalement leur fabrication par les machines outil à commande numérique.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation d'un document bureau des méthodes en partant du dessin de définition d'un arbre d'entraînement aux techniques de fabrication à appliquer en faisant tous les calculs nécessaires pour dimensionner la pièce brute et les conditions de coupe à adopter.
- Le dernier chapitre est réservé à l'étude du phénomène d'usure et les lois qui le régissent. L'idée est de montrer l'impact de la répétition des essais sur l'exactitude des modèles de Taylor.
- Conclusion générale.

Chapitre I

Etude Bibliographique

1.1 Introduction :

Dans cette partie, on va consulter les références bibliographiques existantes pour situer notre travail par rapport aux travaux existants. Dans le domaine de conception et de fabrication des pièces, le développement industriel s'est accéléré depuis les années cinquante, en conformité avec un plan économique global qui exige l'utilisation en plein rendement des équipements en place et implique une exploitation correcte et efficace des machines, des mécanismes et des dispositifs.

La pièce faisant l'objet de mon étude est un arbre qui assure la transmission de mouvement circulaire à partir d'un arbre moteur vers une pièce réceptrice de ce mouvement.

1.2 Mécanismes de transmission de mouvement :

L'industrie moderne utilise une grande variété de machines constituées de différents mécanismes qui représentent des ensembles complexes incluant de grosses pièces hétérogènes quant à leurs formes, matériaux d'exécution, propriétés, etc.

La machine est un dispositif mécanique dont les parties constitutives fonctionnant en concordance pour exécuter des mouvements prescrits dans le but de réaliser la transformation de l'énergie. En fonction du caractère que revêt le travail accompli, on distingue des machines-moteur, des machines-outils conventionnels et des machines à commande numérique qui sont une nouvelle classe des machines [1].

Toutes les machines sont constituées de pièces groupées en mécanismes et modules. Les mécanismes de transmission de mouvement circulaire représentent la majorité de ces mécanismes.

D'autres mécanismes sont utilisés pour la transformation de mouvement circulaire en mouvement rectiligne sont les mécanismes bielle-manivelle, le mécanisme à crémaillère, le mécanisme à vis et écrou, le mécanisme à excentrique, le mécanisme à coulisse, le mécanisme à rochet et cliquet et autres.

Dans tous ces mécanismes, les arbres de transmission jouent un rôle très important pour assurer correctement la transmission de mouvement et de puissance.

1.3 Éléments de transmission de mouvement circulaire :

Parmi les pièces les plus caractéristiques employées à la transmission du mouvement circulaire dans les mécanismes cognitifs des équipements industriels, on trouve les arbres, les axes, les paliers, les accouplements et d'autres éléments.

L'arbre est une pièce qui tourne dans des paliers pour transmettre un couple dans les mécanismes et les ensembles de machines. La conception des arbres est définie par le procédé de fixation des pièces qu'ils devront porter, par le type et la dimension du palier qui leur serviront d'appui, de même que par les conditions technologiques d'usinage et d'assemblage. De ce fait, un arbre peut être droit, coudé comme le vilebrequin, cannelé, arbre-pignon, etc. Les arbres peuvent être lisses et à gradin dont la forme de ces derniers est imposée par les différents types d'ajustement à réaliser sur telle ou telle portée, de même que par les conditions de réalisation et de montage. Un arbre long peut être composé en joignant entre ses plusieurs tronçons à l'aide des manchons. D'après la section qu'ils présentent, les arbres se subdivisent en arbres pleins et en arbres creux, les arbres de section creuse sont plus légers et peuvent servir de logement à d'autres pièces.

La grande majorité des parties tournantes des dispositifs d'entraînement des machines (engrenages, disques, accouplements, poulies, etc.) sont montées sur des arbres et sur des axes qui peuvent occuper une position horizontale, verticale ou inclinée dans l'espace. Pour transmettre les efforts, les arbres sont rendus solidaires avec les éléments qu'ils portent à l'aide des clavettes ou par l'intermédiaire des cannelures. Bien que l'usinage des cannelures soit plus compliqué par rapport au clavetage, l'assemblage par cannelures assure une mise en place précise de la pièce sur l'arbre et permet de transmettre des couples moteurs très importants pour une section moindre de l'arbre et une résistance à l'usure accrue.

Lors du fonctionnement, les arbres sont sollicités à la fois en flexion et en torsion et sont également soumis à l'effort de traction-compression dans certain cas.

Selon sa géométrie et ses fonctions, un arbre peut porter différentes dénominations. Il est appelé arbre de transmission s'il transmet une puissance d'un moteur à un élément de machine. Alors

qu'il est appelé arbre de renvoi s'il distribue un mouvement de rotation entre différents éléments.

Pour l'obtention de bruts, les arbres étagés sont généralement issus de bruts forgés. Par contre, l'extrusion par laminage est également le mode d'obtention le plus courant pour des arbres plus au moins lisses. Les arbres sont très rarement obtenus à partir des bruts moulés pour des raisons de résistance mécanique insuffisante.

Comme les arbres servent d'appuis aux pièces tournantes, les paliers destinés à loger des pièces doivent être soigneusement usinés pour assurer un accouplement parfait avec les pièces conjuguées.

1.4 Matériaux employés pour la fabrication des arbres :

Les arbres d'entraînement sont généralement fabriqués à partir de matériaux robustes et résistants pour assurer leur durabilité et leur capacité à transmettre la puissance de manière fiable. Les matériaux couramment utilisés pour la fabrication des arbres d'entraînement sont principalement les aciers en raison de leur résistance élevée et de leur capacité de résister aux contraintes mécaniques [2].

Parmi les aciers souvent utilisés [3], on trouve les aciers alliés qui sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Outre le fer et le carbone, ces aciers contiennent un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques suite à la naissance de carbures complexes généralement plus durs que le carbure de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage.

Selon les quantités des éléments d'addition, ces aciers peuvent être faiblement alliés si la teneur en n'importe quel élément d'addition est inférieure ou égale à 5%. Un exemple de ce type d'acier, désigné 42 CD 4, se compose de 0.42% de carbone et 4% de chrome.

Les aciers fortement alliés contiennent au moins un élément d'addition qui dépasse 5%. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique, etc. Un exemple de ce type d'acier, désigné Z 200 C13, se compose de 2% de carbone et 13% de chrome.

Les aciers non alliés sont regroupés en trois classes :

- Aciers ordinaires de classe A : Un exemple de ce type d'acier est désigné A 50 2 avec une résistance mécanique de 500N/mm².

- Aciers ordinaires de classe E : Ce type d'acier est désigné E 26 2 avec une résistance à la limite élastique de 260 N/mm².
- Aciers ordinaires de classe XC : ils ont une bonne aptitude aux traitements thermiques. Dans cette catégorie, on trouve :
 - Les aciers courants, désignés par les lettres CC. Un exemple de ce type d'acier est désigné CC 48 avec 0.48% de carbone.
 - Les aciers fins, employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques. Leur désignation commence par les lettres XC, suivi par un chiffre qui indique le pourcentage de carbone. Un exemple de ce type d'acier est désigné XC 65 avec 0.65% de carbone.

Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits et présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impuretés. Les traitements thermiques pour les aciers fins dépendent du pourcentage du carbone. L'acier contenant moins de 0.3% de carbone, est destiné à subir une cémentation avant la trempe. Alors que, les aciers contenant jusqu'à 0.5% de carbone sont destinés à l'amélioration des caractéristiques mécaniques par une trempe suivie d'un revenu à haute température. Au-delà de 0.5% de carbone, ces aciers sont destinés à recevoir une trempe et un revenu soit à température moyenne soit à basse température [4].

1.5 Application de la CFAO pour l'usinage des pièces :

La conception et la fabrication assistées par ordinateur se définissent comme l'ensemble des aides informatiques au bureau d'études pour l'établissement d'un cahier de charges relatif à un nouveau produit jusqu'à la génération des documents et des fichiers nécessaires à la fabrication.

Cette technologie permet à l'homme et à la machine d'être liés pour résoudre un problème en utilisant au mieux les compétences de chacun. Dès les années 70, il a été possible de mettre en place des logiciels spécifiques destinés à résoudre le problème des surfaces complexes pour l'industrie aéronautique et automobile. Au début des

années 90, une nouvelle approche révolutionne la CFAO traditionnelle dont l'idée est de ne plus considérer la géométrie comme l'information de base, mais plutôt d'interpréter la pièce comme un ensemble logique et cohérent de fonctions mécaniques. Finalement, concevoir un objet, ce n'est pas seulement l'imaginer comme un concept, mais c'est aussi le décrire de façon explicite (itération des tracés, calculs et expériences) afin de transmettre la connaissance totale du concepteur à tous ceux qui doivent intervenir pour le réaliser.

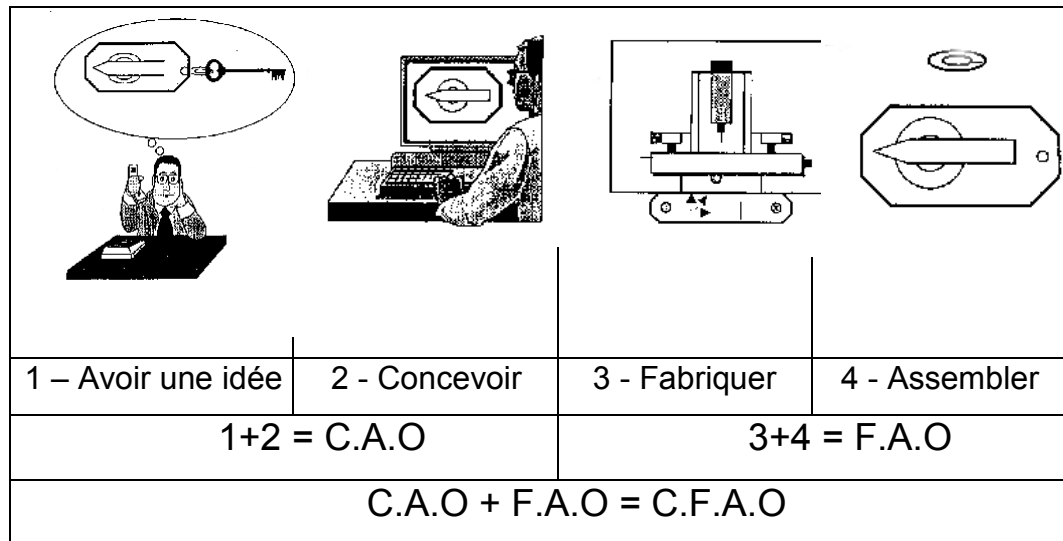


Fig. 1.1. Structure d'un système CFAO [5].

1.5.1 La conception assistée par ordinateur (CAO) :

La CAO comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique et de réaliser des produits manufacturés. En deux décennies, l'informatique a permis le remplacement du dessin industriel traditionnel par la CAO et les fichiers numériques de conception peuvent alimenter directement les machines à commande numérique dans les ateliers de production.

Pour concevoir un nouveau produit, il faut passer un certain nombre d'étapes comme la définition des critères visant une efficacité maximale, la création de dessins respectant au mieux les critères de fonctionnement, la simulation de l'objet ainsi conçu et en fin l'analyse du comportement.

En phase de dessin, l'opérateur entre en mémoire de l'ordinateur la forme générale de l'objet à concevoir, généralement sous deux aspects au moins (de face et de profil par exemple) et éventuellement, une section caractéristique de l'objet à représenter.

Pour faciliter le dessin d'une pièce, le système CAO peut relier automatiquement deux points par un segment, tracer un cercle passant par trois points, arrondir les angles, lisser les courbes, etc. Une fois que l'utilisateur a spécifié les dimensions de l'objet dans un plan, de profil en vue frontale, le système peut obtenir les caractéristiques spatiales de l'objet en 3D (symétrie, perspectives, faces cachées, rendu).

En phase de calcul, le logiciel utilisé exploite la puissance du calculateur notamment pour le calcul par éléments finis en appliquant un maillage qui consiste à décomposer la structure étudiée en éléments géométriques simples, tels que les polygones. En calcul statique, certains paramètres, notamment la répartition des contraintes subies par une pièce mécanique peut être obtenue. La forme optimale de la pièce finie est obtenue en faisant varier la forme de la pièce, le matériau et les dimensions de façon que les contraintes deviennent acceptables [6].

Un des logiciels de conception les plus répondus dans le domaine de la CAO s'appelle SolidWorks. Il est simple d'utilisation, facile à apprendre et il offre une approche de conception 3D native avec l'environnement Windows de Microsoft. Il dispose des fonctionnalités avancées dans le domaine de la modélisation des pièces, la définition de formes complexes, la création et la gestion de très gros assemblages et la mise en plans.

SolidWorks permet, entre autres, la migration d'un environnement de conception 2D vers un environnement 3D et de nouvelles performances au niveau des mises en plan. Les animations de pièces peuvent être enregistrées dans le format AVI et peuvent être ainsi visualisées en 3D par le lecteur multimédia de Windows sans aucun logiciel de CAO. SolidWorks comporte des convertisseurs de fichiers pour tous les types de données CAO, notamment IGES, STEP, STL, etc.

1.5.2 La fabrication assistée par ordinateur (FAO) :

La FAO ou CAM (En Anglais) est le complément logique de la CAO puisqu'elle assure l'interface entre le système de CAO et les machines à commande numérique qui assurent un usinage automatisé de chaque pièce à partir de sa définition informatique. Les logiciels les plus évolués sont capables de passer à la programmation des parcours outils afin d'écrire le fichier texte contenant le programme de pilotage d'une machine-outil à commande numérique à travers le contrôle des mouvements qu'elle doit exécuter pour réaliser la pièce demandée. La visualisation graphique de l'action des outils dans la matière permettant ainsi au programmeur de vérifier ses méthodes d'usinage et éviter à priori les collisions entre les différents chariots de la machine-outil. Le programme, ainsi élaboré et vérifié, est transmis à la machine-outil à commande numérique à travers des liaisons directes ou indirectes.

1.5.3 Les machines à commande numérique :

Les machines à commande numérique ont une tâche très importante dans la chaîne de fabrication numérique. Par définition, ces machines sont à cycle automatique programmable régi par la partie commande qui est plus importante que la partie opérative.

Le directeur de commande numérique (DCN) ou le calculateur CNC selon la machine peut exploiter et interpréter les informations données par le programme et par les capteurs de mesure pour envoyer des ordres de commande codés à la machine. Cette dernière possède des chariots équipés de vis à billes, afin d'éliminer les jeux, commandés par des moteurs pas-à-pas et les déplacements résultants sont contrôlés avec des capteurs de mesure (Fig. I.2).

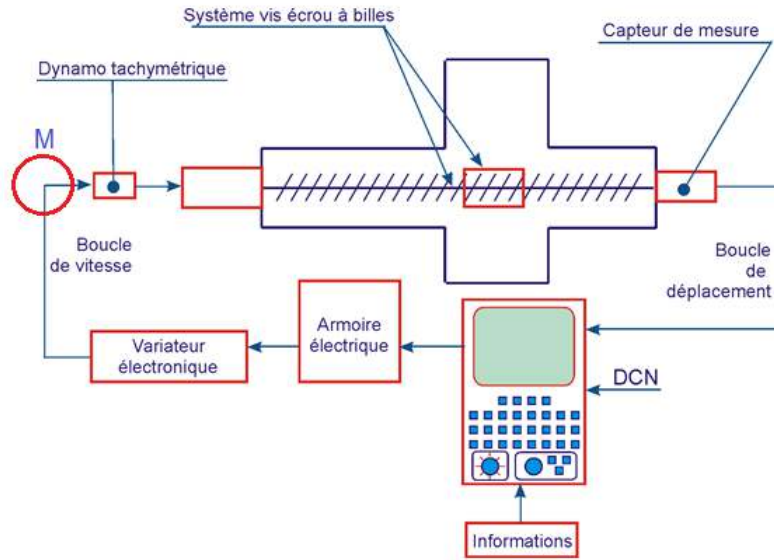


Fig. I.2. Principe de fonctionnement d'une MO à CN [7].

Chapitre II

Partie Technologique

2.1 Introduction :

A partir du dessin de définition, une série d'opérations mathématiques permettra d'obtenir les surépaisseurs minimales à prévoir sur la pièce brute pour l'économie de la matière d'une part et pour augmenter la durée de vie des machines et des outils de coupe d'autre part. L'organisation du travail passera par l'optimisation des étapes de fabrication de la pièce en proposant une gamme d'usinage et des contrats de phases détaillés pour faciliter la réalisation de la pièce sur les différentes machines y compris le tour à commande numérique de type NUM760T.

2.2 Fonctionnement de la pièce :

Cette pièce fait partie d'un mécanisme de transmission de mouvement où elle joue un rôle très important pour recevoir et transmettre le mouvement. La pièce, proposée à la réalisation, est un arbre denté qui comporte deux paliers à roulements pour faciliter la rotation, une denture taillée sur le corps de l'arbre pour transmettre le mouvement et des méplats, formant un carré, taillés sur l'un des bouts de l'arbre pour faciliter le montage d'une poulie qui peut recevoir le mouvement à partir d'un moteur électrique.

2.3 Données de départ :

Ces données représentent des éléments de base qui nous permettent de faire toute l'étude afin de choisir les équipements nécessaires à la fabrication de la pièce. On a besoin de :

- Dessin de définition de la pièce avec toutes les exigences techniques émises à la pièce : Nous avons repris le dessin de définition de la pièce sur SolidWorks en spécifiant certaines exigences manquantes sur le dessin original (Fig. 2.1).
- Matière de la pièce : La matière proposée pour l'obtention de la pièce brute est un acier non allié XC 48 ayant les caractéristiques mécaniques et la composition chimique ci-dessous [8].

Les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

$R_m(N/mm^2)$	$R_e(N/mm^2)$	A (%)	Dureté HB
560-620	275-340	14-16	220

La composition chimique :

C	Mn	Si	P	S
0,42-0,50	0,50-0,80	0,15-0,40	≤ 0,035	≤ 0,035

- Poids de la pièce : 2.844kg.
- Programme annuel de production : 10000 pièces.
- Nombre des équipes de travail : une équipe.
- Equipements disponibles : Tour CNC, fraiseuses, rectifieuses, fours de traitements thermiques, etc.

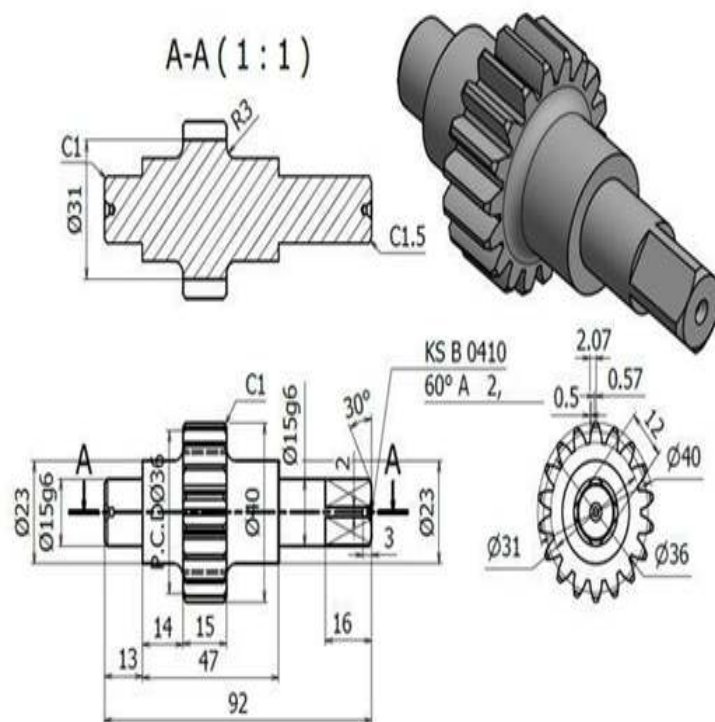
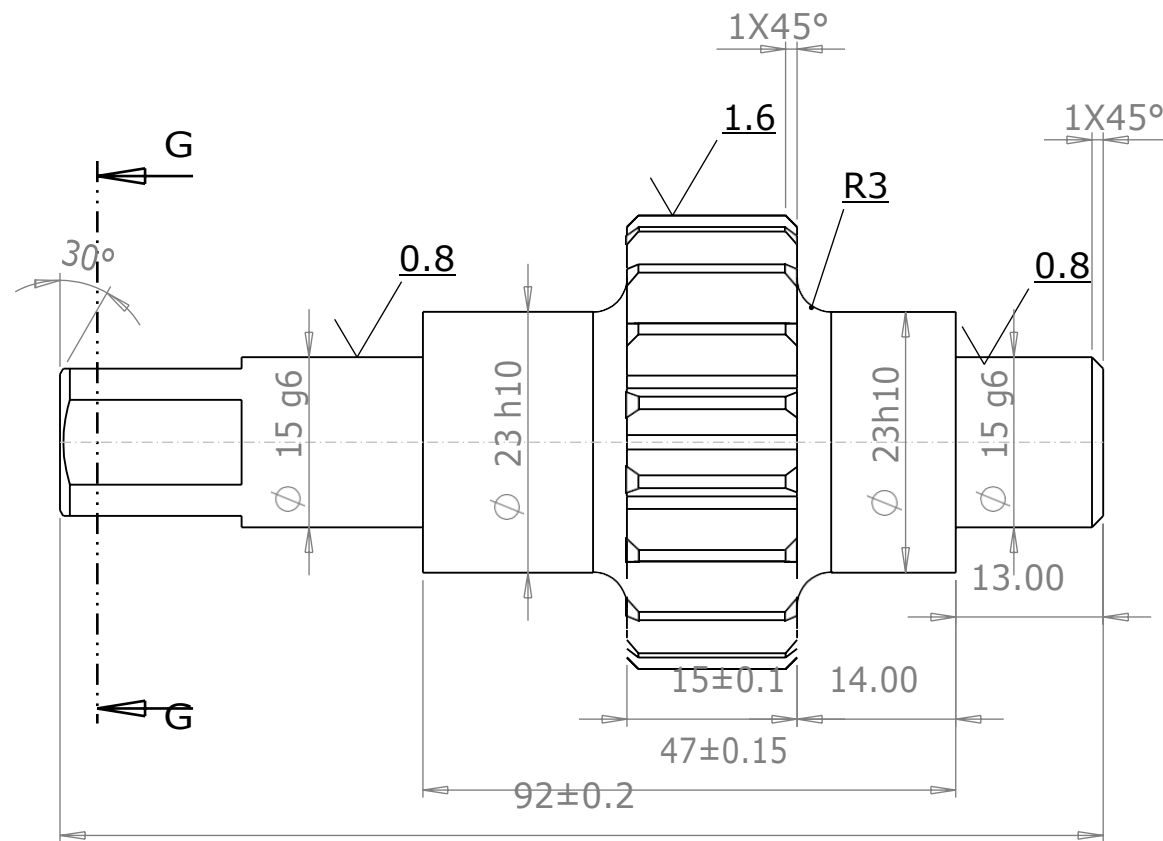
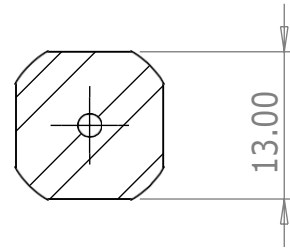


Fig. 2.I. Dessin de définition pris de la référence [9].

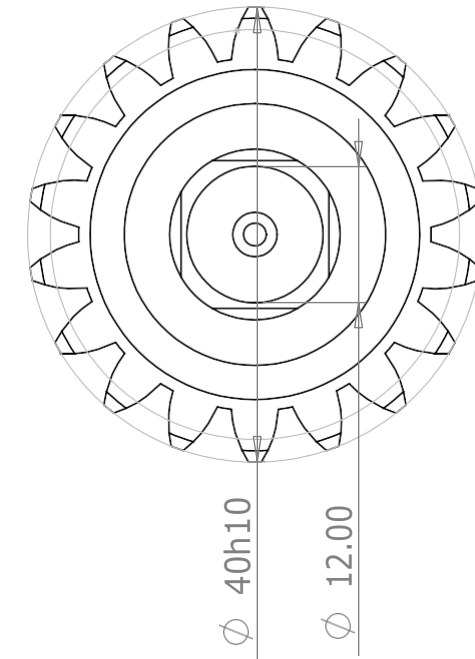
2.4 Analyse technologique :

L'analyse technologique de la pièce, basée sur les exigences du dessin de définition de la pièce, montre que parmi toutes les surfaces usinées ayant des exigences dimensionnelles et des qualités de surface très serrées se trouvent sur les parties nobles de la pièce qui sont les paliers à roulements. En partant d'une ébauche estampée à chaud de 15^{ème} qualité de précision, les deux paliers à roulements permettant un bon positionnement de l'arbre dans son boîtier. Ils se caractérisent par une précision de 6^{ème} qualité et une rugosité Ra=0.8 µm.

SECTION G-G



m=2
z=18 dents



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE				TITLE: Arbre d'entraînement				
CHK'D	DERBAL		2023								
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL: XC48					

L'usinage nécessite un nombre d'opérations important pour atteindre les exigences du dessin de définition, à savoir deux chariotages sur le tour CNC et un minimum de deux rectifications successives de préférence sans démontage de la pièce afin d'avoir une bonne coaxialité même si cette exigence n'est pas imposée par le concepteur mais elle garantit le bon fonctionnement de la pièce dans son boîtier.

2.5 Détermination de type de production :

Le choix de type de production est basé sur la connaissance du poids de la pièce, le volume du programme annuel et les caractéristiques géométriques du produit à fabriquer, toute en tenant compte des capacités de l'entreprise que ce soit d'ordre économique ou bien technique.

Les différents types de production sont :

- Production unitaire ;
- Production en série ;
- Production en masse.

Si la pièce est déjà fabriquée, la détermination de type de production dépend du calcul du coefficient de fixation de phases, calculé par la formule 2.1.

$$K_{fp} = \frac{t_c}{t_{pm}} \quad 2.1$$

t_{pm} Définit le temps moyen par pièce en phase d'usinage (min).

t_c Définit la cadence de travail (min/pièce).

Pour la détermination de la cadence de travail, on utilise la formule suivante :

$$t_c = \frac{60f}{n} e \quad 2.2$$

f Fond effectif du temps de fonctionnement de l'équipement mécanique (heure).

n Volume du programme annuel (pièces/an).

e Nombre d'équipes.

Il existe une autre méthode pour déterminer le type de production d'une manière approximative dans le cas où la pièce sera fabriquée pour la première fois en se servant du tableau suivant [10] :

Production	Programme annuel de production des pièces		
	Grande pièce	Pièce moyenne	Petite pièce
Unitaire	5	10	100
En série	5-10	10-5000	5000-50000
En masse	≥1000	≥5000	≥50000

D'après les données qui concernent notre pièce en particulier son poids et son programme de production, on peut estimer sa production en série.

2.6 Mode d'obtention de l'ébauche :

Le mode d'obtention de l'ébauche se détermine en se basent sur l'analyse du dessin technique de la pièce finie et en tenant compte des données principales comme la nature du matériau de la pièce, les exigences techniques (précision des côtes et état de surfaces), la forme et le poids de la pièce, le volume du programme annuel tout en garantissant un cout de production minimal et une qualité acceptable de l'ébauche.

Compte tenu de ces exigences, il est recommandé de choisir l'un des procédés de déformation plastique comme procédé d'obtention de l'ébauche. Le forgeage représente l'ensemble des opérations mécaniques pour la déformation plastique du métal soit chaud soit à froid dont le morceau de métal appelé (lopin), de volume calculé, est façonné par choc ou par pression. Le choix entre les différents procédés de forgeage dépend des possibilités de chaque procédé. Parmi ces procédés, on trouve :

- Le forgeage manuel pour produire les pièces unitaires ;
- Le matriçage utilise deux matrices supérieures et intérieures liées entre elles pour la mise en forme du métal par choc (moutons et pilons) pour la production de petite série ;

- L'estampage utilise deux empreintes liées à la machine. La matrice inférieure liée à la chabotte et la matrice supérieure liée à la masse frappante. La mise en position d'une matrice par rapport l'autre se fait indirectement par le coulisseau. Ce procédé est réservé pour la production en grande série.

Tous les métaux présentant une certaine malléabilité sont forgeables à chaud ou à froid suivant le degré de malléabilité du métal, le volume et la complexité de la pièce obtenir.

L'une des avantages essentiels des pièces produites par forgeage est l'amélioration des caractéristiques mécaniques [11]. L'action de forgeage qui suit l'action de pétrissage du métal commence lors du laminage de telle sorte que les défauts internes du métal sont résorbés et le fluage du métal est canalisé par les gravures pour donner naissance à un fibrage orienté. L'autre avantage est l'économie de métal qui peut atteindre 34 à 42% du volume nécessaire comparativement avec une pièce obtenue à partir d'une ébauche laminée. Cela conduit automatiquement à la réduction des frais d'usinage du fait que le volume de copeaux à enlever est limité uniquement aux surfaces fonctionnelles. Par contre, il se peut que des déformations longitudinales dues soit à l'ouverture des matrices ou à une mauvaise position lors du refroidissement. Si la flèche est trop grande, la pièce doit être redressée pour que les défauts soient compris dans les tolérances avant qu'elle sera transmise l'usinage. Avant l'usinage, les pièces forgées doivent subir un recuit de stabilisation [3].

2.7 Calcul des surépaisseurs :

L'établissement des valeurs optimales des sur épaisseurs et des dimensions avec tolérances de fabrication pour l'ébauche est une tâche essentielle du point de vue technique et économique. Sans le calcul des surépaisseurs, on peut choisir une surépaisseur excessive ou insuffisante. Quelque soit la nature de l'usinage des pièces mécaniques une surépaisseur excessive implique un emploi des opérations d'usinage supplémentaire et augmente le débit de métal, la quantité de travail, la consommation des outils de coupe et l'énergie électrique et l'augmentation du prix de revient des pièces.

La méthode qu'on va utiliser lors de nos calcul est la méthode analytique [12]. Selon cette méthode, la surépaisseur doit être suffisante pour éliminer les défauts d'usinage et la couche défectueuse des opérations technologiques ainsi que les défauts de positionnement au cours de l'exécution d'une opération donnée.

Afin de calculer la surépaisseur de chaque opération, on doit établir un routage d'usinage en partant de l'ébauche jusqu'à l'opération finale. Le routage technologique d'usinage proposé doit permettre de respecter les exigences technologiques du dessin de définition de chaque surface indépendante.

La surépaisseur minimale à respecter doit prendre en compte les différents défauts à enlever lors d'une opération d'usinage. Ces défauts sont principalement : la rugosité totale, la couche défectueuse, le gauchissement et l'erreur de mise en position. Les deux premiers défauts sont pris de la référence [12], alors que les deux derniers sont à calculer.

Dans le cas d'une pièce de révolution, la surépaisseur minimale est calculée par la formule suivante :

$$2Z_{min} = 2(R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + \rho_{i-1}) + \varepsilon_m \dots \dots \dots 2.3$$

La rugosité totale R_z est l'état de la surface produite par un procédé d'obtention de l'ébauche et par les opérations successives d'usinage. Cette grandeur décroît progressivement par rapport à celle de l'ébauche en arrivant finalement à respecter la rugosité exigée par le dessin de définition.

La couche défectueuse T_i est une couche superficielle de la pièce produite par une opération technologique qui peut avoir des caractéristiques différentes de celles du métal de base. Elle doit être enlevée partiellement par les opérations successives jusqu'à sa disparition totale.

L'écart sommaire ρ_{i-1} est un défaut résultant d'un ensemble de défauts liés au procédé de mise en forme de l'ébauche tels que le déplacement ρ_d et le gauchissement ρ_g et du défaut de centrage ρ_c s'il est nécessaire de réaliser des trous de centre pour le positionnement. Ce défaut est calculé pour l'ébauche par la formule suivante :

$$\rho_{eb} = \sqrt{\rho_d^2 + \rho_g^2 + \rho_c^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

D'après le tableau 14 [12], pour une ébauche estampée, le défaut $\rho_d = 1mm$

Le défaut de gauchissement pour un arbre est :

$$\rho_g = \Delta_c * l \dots\dots\dots (2.5)$$

Pour une 2^{ème} classe de précision de l'ébauche, $\Delta_c = 5$ et l demi-longueur de la pièce selon le tableau 15.

$$\rho_g = 5 * 46 = 230 \mu m$$

$$\rho_c = \sqrt{(IT_{eb}/2)^2 + 0.25} = \sqrt{(0.5/2)^2 + 0.25} = 560 \mu m$$

$$\rho_{eb} = \sqrt{\rho_d^2 + \rho_g^2 + \rho_c^2} = \sqrt{10^2 + 230^2 + 560^2} = 685 \mu m$$

Les écarts sommaires intermédiaires sont calculés comme suit :

$$\rho_i = k_{pi} * \rho_{eb} \dots\dots\dots (2.6)$$

- Chariotage préalable : $\rho_{ch_{eb}} = 0.6 * 685 = 51.11 \mu m$
- Chariotage de finition : $\rho_{ch_f} = 0.04 * 685 = 27.4 \mu m$
- Rectification préalable : $\rho_{re_{eb}} = 0.02 * 685 = 13.7 \mu m$

Le défaut de mise en place ϵ_m peut apparaitre lors de l'opération en cours où la position de la surface à usiner dépend des positions de des surfaces de positionnement et de serrage de la pièce sur la machine-outil. L'instabilité de mise en place doit être compensée par la composante supplémentaire de la surépaisseur intermédiaire.

$$\epsilon_m = \epsilon_p + \epsilon_s \dots\dots\dots (2.7)$$

Avec :

ϵ_p : Défaut de positionnement de l'opération en cours.

ϵ_s : Défaut de serrage de l'opération en cours

Pour le chariotage préalable, le défaut de positionnement résulte de l'opération de centrage en se servant d'un serrage pneumatique appliqué à la pièce sur les deux paliers de 15 mm en opposition des appuis en V. Du fait que les trous de centre sont utilisés pour la mise en position lors du tournage, les défauts de positionnement et de serrage ont les valeurs suivantes :

$$\varepsilon_p = \frac{IT^{éb}}{2} = \frac{500}{2} = 250\mu m$$

$$\varepsilon_s = 80\mu m$$

Alors : $\varepsilon_m = \varepsilon_p + \varepsilon_s = 250 + 80 = 330\mu m$

Pour le chariotage de finition, ce défaut est nul car l'opération est réalisée dans la même phase sans démontage de la pièce.

$$(\varepsilon_m = 0).$$

Pour la rectification préalable, les surfaces des deux paliers ne sont pas soumises à un serrage ($\varepsilon_s = 0$). Alors :

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p = \frac{IT^{ch}}{2} = \frac{70}{2} = 35\mu m$$

Pour la rectification de finition, ce défaut est nul car l'opération est réalisée sans démontage de la pièce ($\varepsilon_m = 0$).

Le calcul des valeurs minimales et maximales des surépaisseurs se fait par la formule principale suivante :

$$2z_{min} = 2(R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + \rho_{i-1}) + \varepsilon_m \dots \dots \dots (2.8)$$

$$z_{max} = \frac{2z_{min}}{2} + IT_i + IT_{i-1} \dots \dots \dots (2.9)$$

Calcul des valeurs minimales :

- Rectification de finition : $2z_{min} = 2(10 + 20 + 15) = 90 \mu m$
- Rectification préalable : $2z_{min} = 2(30 + 30 + 45) + 35 = 205 \mu m$
- Chariotage de finition : $2z_{min} = 2(50 + 50 + 70) = 280 \mu m$
- Chariotage préalable : $2z_{min} = 2(150 + 250 + 685) + 330 = 2500 \mu m$

Calcul des valeurs maximales

- Rectification de finition : $z_{max} = 45 + 11 + 27 = 83 \mu m$
- Rectification préalable : $z_{max} = 102.5 + 27 + 70 = 189.5 \mu m$
- Chariotage de finition : $z_{max} = 140 + 70 + 180 = 390 \mu m$
- Chariotage préalable : $z_{max} = 1250 + 180 + 500 = 1930 \mu m$

Les résultats de calcul sont représentés dans le diagramme de superposition des côtes ci-dessous.

Diagramme de superposition des côtes

Phases	Opérations	Composants de la surépaisseur minimale				$2Z_{\min} \mu\text{m}$	IT μm	$Z_{\max} \mu\text{m}$	$\varnothing_{\min} \text{mm}$	$\varnothing_{\max} \text{mm}$	Côte Technologique
		$R_z \mu\text{m}$	T μm	$\rho \mu\text{m}$	$\varepsilon_m \mu\text{m}$						
Ebauche estampée		150	250	685	-	-	500	-	18.346	18.846	$\varnothing 18.5^{+0.33}_{-0.17}$
Tournage	préalable	50	50	40	330	2500	180	1930	15.666	15.846	$\varnothing 15.846_{-0.18}$
	finition	30	30	25	0	280	70	390	15.316	15.386	$\varnothing 15.386_{-0.07}$
Rectification	préalable	10	20	15	35	205	27	199.5	15.084	15.111	$\varnothing 15.111_{-0.027}$
	finition	5	10	0	0	90	11	83	14.983	14.994	$\varnothing 15^{-0.06}_{-0.017}$

2.8 Calcul et choix des régimes de coupe :

Le choix d'un régime de coupe bien adopté est basé sur l'étude des paramètres relatifs à la pièce comme le matériau à usiner, les dimensions de la pièce et les paramètres relatifs à l'outil. Pour choisir un tel régime de coupe, on doit tenir compte de la nature de travail à exécuter, du type et du matériau de l'outil et de la pièce d'après les tableaux de recommandation des fournisseurs d'outillage ou d'après les résultats de certaines expérimentations d'usinage.

Phase de tournage :

Sur le tour à commande numérique de type NUM760T, on effectue sur la pièce, les opérations suivantes :

- Chariotage préalable ;
- Chariotage de finition.

A. Choix de l'outil de coupe :

Le choix des outils de coupe est une tâche essentielle, non seulement leurs formes et dimensions mais aussi le matériau qui constitue la partie active.

La firme HERTEL propose un système FTS qui se compose d'une unité de serrage sur laquelle s'adaptent des têtes d'outils interchangeables pour des opérations d'usinage intérieures et extérieures.

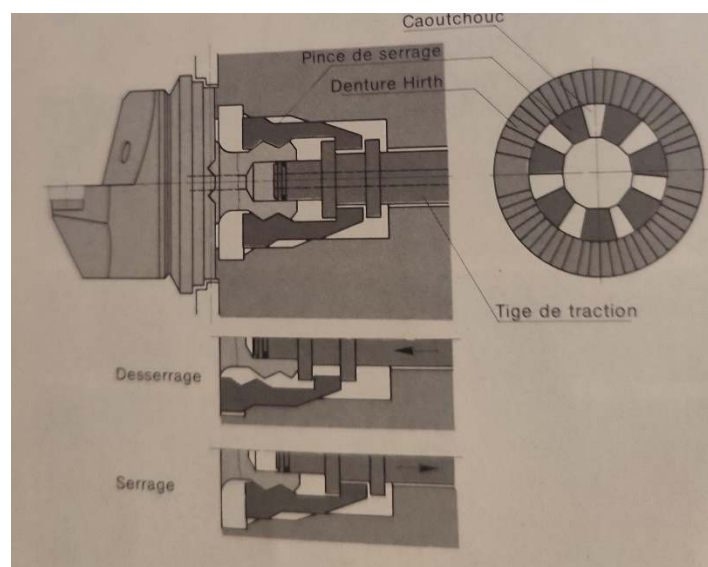


Fig. 2.2. Système FTS de la firme HERTEL.

La caractéristique principale de ce système se trouve être une denture autocentrante, combinée avec une pince de serrage qui assure un accouplement rigide et sans jeu avec l'outil [13].

Pour les opérations de chariotage en cycle, on a choisi un outil à charioter de désignation N40C-PDUNR15H50 pour le tournage de à droite à gauche sur lequel est montée une plaquette rhombique à 55° portant la désignation DNMP150612. La plaquette commercialisée par la firme Hertel CM2, est destinée pour tous les travaux même difficiles en usage universel en ébauchage, est à base carbure métallique P25, revêtue en TiC-TiN Pour la finition. La plaquette ayant la même forme désigné Hertel CP1, destinée pour tous les travaux légers à moyens en coupe continue à grande vitesse, en finition est à base carbure métallique P10, revêtue en TiC-Al2O3.

Les paramètres géométriques de cet outil sont :

- Angle de direction principale $\varphi=93^\circ$
- Angle de dépouille $\alpha=11^\circ$
- Angle d'attaque $\gamma=0^\circ$
- Rayon du bec de la plaquette $r=1.2 \text{ mm}$

B. Calcul de la vitesse de coupe :

La vitesse est calculée d'après des formules proposées dans [14]. Il est essentiel de choisir la tenue de la plaquette ($T=60\text{min}$), l'avance et la profondeur de passe qui peut prendre des valeurs maximales ($p=Z_{\text{max}}$).

Pour le chariotage préalable :

L'avance est choisie d'après [14] $a=0.4 \text{ mm/tr}$.

La vitesse de coupe est calculée d'après la formule suivante :

$$V_c = 364 T^{-0.2} * p^{-0.15} * a^{-0.35} * K_v \quad (2.10)$$

Le coefficient de correction permet de réajuster la valeur de la vitesse de coupe en fonction des conditions de réalisation de l'opération.

$$K_v = K_{v1} * K_{v2} * K_{v3} * K_{v4} * K_{v5} \dots \dots \dots (2.11)$$

$K_{v1} = 0.88$ Pour un outil à charioter avec un angle de direction 90° .

$K_{v2} = 1$ Pour un angle d'attaque de 0° .

$K_{v3} = 1.2$ Pour un une plaquette Hertel CM2.

$K_{v4} = 0.85$ Pour une surface brute obtenue par estampage.

$K_{v5} = 65/R = 65/80 = 0.8$ Pour un acier de résistance à la traction égale à 80 dN/mm^2 .

$K_{v6} = 1$ Pour un travail avec lubrification.

$$K_v = 0.88 * 1.2 * 0.85 * 0.8 = 0.7$$

La vitesse :

$$V_c = 364 \cdot 60^{-0.2} * 1.89^{-0.15} * 0.4^{-0.35} * 0.7 = 140 \text{ m/min}$$

Pour le chariotage de finition :

L'avance est choisie d'après [14], $a=0.2 \text{ mm/tr}$.

$$V_c = 437T^{-0.2} * p^{-0.15} * a^{-0.2} * K_v \quad (2.12)$$

Le coefficient de correction de la vitesse de coupe en finition est calculé comme suit :

$K_{v1} = 0.88$ Pour un outil à charioter avec un angle de direction 90° .

$K_{v2} = 1$ Pour un angle d'attaque de 0° .

$K_{v3} = 1.4$ Pour une plaquette Hertel CP1.

$K_{v4} = 1$ Pour une surface préalablement usinée.

$K_{v5} = 65/R = 65/80 = 0.8$ Pour un acier de résistance à la traction égale à 80 dN/mm^2 .

$K_{v6} = 1$ Pour un travail avec lubrification.

$$K_v = 0.88 * 1.4 * 0.85 * 0.8 = 0.8$$

La vitesse de coupe :

$$V_c = 473 * 60^{-0.2} * 0.39^{-0.15} * 0.2^{-0.35} * 0.8 = 310 \text{ m/min}$$

C. Calcul de la puissance de coupe :

La puissance effective nécessaire à la coupe permet de connaître le rendement réel de la machine lorsqu'elle fonctionne à ses différentes vitesses de rotation pour obtenir sa capacité réelle de production.

La puissance est calculée d'après la formule suivante :

$$W = 0.045 * p * a^{0.75} * v * k_w \dots\dots\dots (2.13)$$

Avec un coefficient de correction $k_w = k_{w1} * k_{w2} * k_{w3}$

$k_{w1} = 0.95$. Pour un outil à charioter

$k_{w2} = 1.06$. Pour un angle d'attaque de 0°

$k_{w3} = 1$. Pour un usinage avec lubrification

$$k_w = 0.95 * 1.06 = 1.007$$

Chariotage ébauche :

$$W_e = 0.045 * 1.93 * 0.4^{0.75} * 140 * 0.7 = 4.3 \text{ kw}$$

Chariotage de finition :

$$W_f = 0.045 * 0.39 * 0.2^{0.75} * 310 * 1.007 = 1.63 \text{ kw}$$

Pour la phase de fraisage :

Les conditions de coupe pour la phase de fraisage sont prises de la référence [15]. En se servant d'une fraise en carbure métallique de diamètre $D=60\text{mm}$, une opération de dressage simultané des deux bouts est réalisée.

L'avance choisie $a=100 \text{ mm/min}$;

La vitesse de coupe $V_c=100 \text{ m/min}$.

2.9 Présentation des contrats de phase :

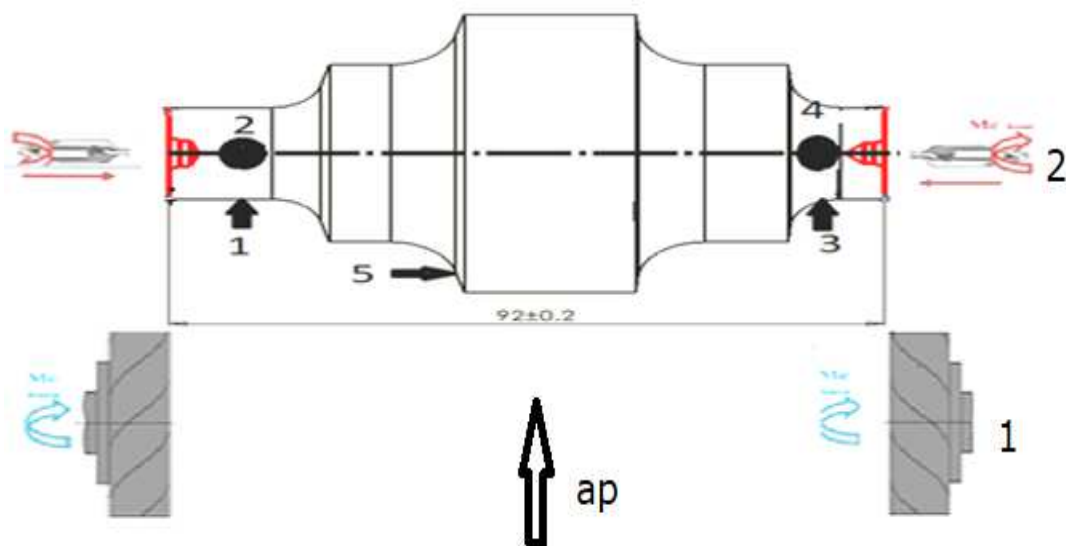
Tous les contrats de phase sont présentés selon la gamme d'usinage proposée après une analyse technologique de la pièce.

Dans chaque contrat de phase, toutes les données nécessaires à l'usinage doivent être disponibles à l'opérateur de la machine-outil en particulier le schéma de mise en position, les conditions de coupe, l'outillage de coupe et les moyens de contrôle des côtes à respecter pour chaque opération d'usinage.

Si le contrôle par lot de pièce abouti à de bons résultats, l'opération d'usinage peut être poursuivie. Autrement, l'opérateur procède aux réglages nécessaires ou à la prospection de l'état des outils de coupe à la suite de l'usure en allant changer les plaquettes.

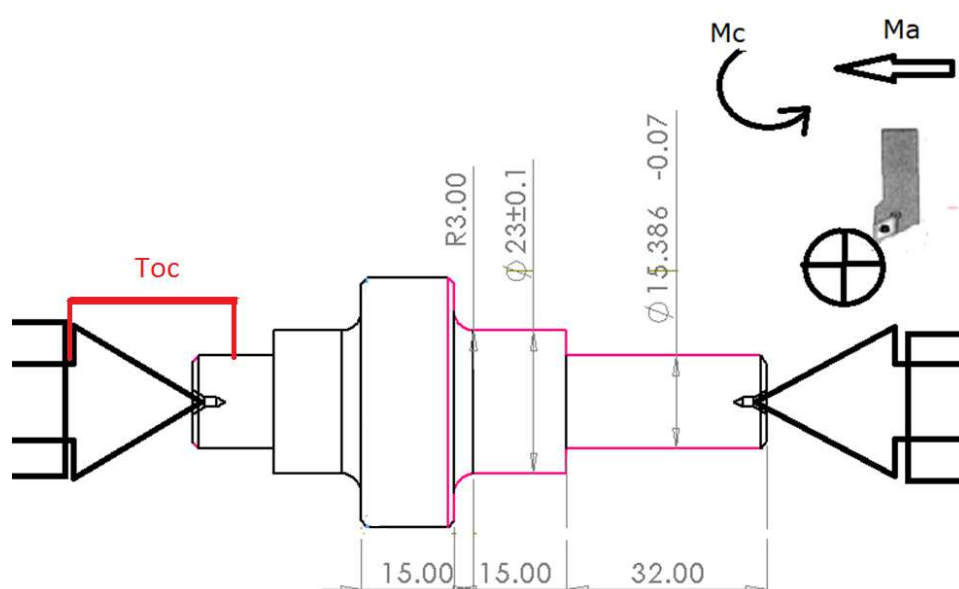
Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N°: 10	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Contrôle de brut		
Machine-Outil : Banc de contrôle		
<p>Technical drawing of a shaft with the following dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> Total length: 100 ± 0.5 Left diameter: $\varnothing 18.50^{+0.33}_{-0.17}$ Second diameter: $\varnothing 25.00^{+0.45}_{-0.15}$ Third diameter: $\varnothing 42.50^{+0.50}_{-0.20}$ Fourth diameter: $\varnothing 25.00^{+0.45}_{-0.15}$ Right diameter: $\varnothing 18.50^{+0.33}_{-0.17}$ 		
Désignation des Sous-Phases	Eléments de coupe	Outillage
Contrôle de brut	$L=100 \pm 0.5$ $\varnothing 18.5^{+0.33}_{-0.17}$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Règle graduée ▪ Pied à coulisse

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N°: 20	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Dressage-centrage		
Machine-Outil : Fraiseuse-centreuse		



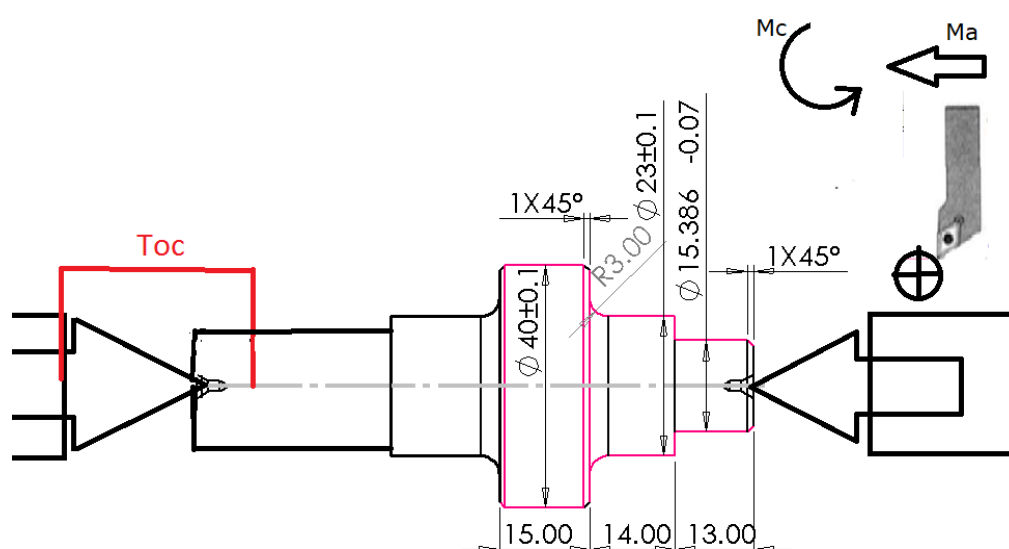
Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		Vc (m/min)	N (tr/min)	a (mm/min)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 21	N°211 : Fraisage des bouts	100	530	100	Fraises à surfacer en CM Ø 60 mm	Réglet
	N°212 : Centrage des bouts	30	160	0.1 mm/tr	Forêt à centrer	---

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N°: 30	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Tournage ébauche et finition 1 ^{er} coté		
Machine-Outil : Tour CNC NUM760T		



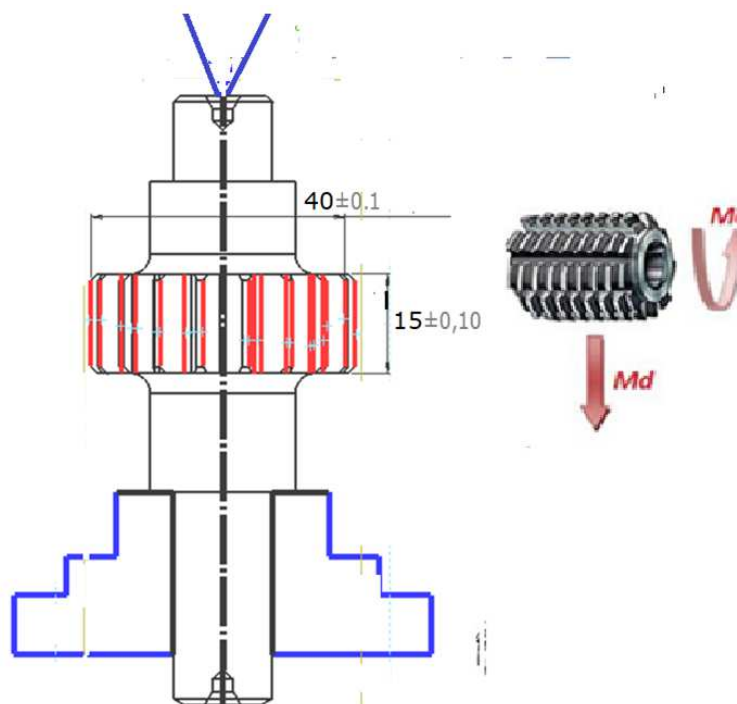
Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		Vc (m/min)	N (tr/min)	a (tr/min)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 31	N°311 : Tournage ébauche	140	1120	0.4	Plaquette en carbure	Pied à coulisse
	N°312 : Tournage de finition 1 ^{er} coté	310	2500	0.2		

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N°: 30	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Tournage ébauche et finition 2 ^{ème} coté		
Machine-Outil : Tour CNC NUM760T		



Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		Vc (m/min)	N (tr/min)	a (tr/min)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 32	N°321 : Tournage ébauche 1 ^{er} coté	140	1120	0.4	Plaquette en carbure	Pied à coulisse
	N°322 : Tournage de finition 1 ^{er} coté	310	2500	0.2		

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N : 40	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Taillage de la denture		
Machine-Outil : Tailleuse par fraise mère		



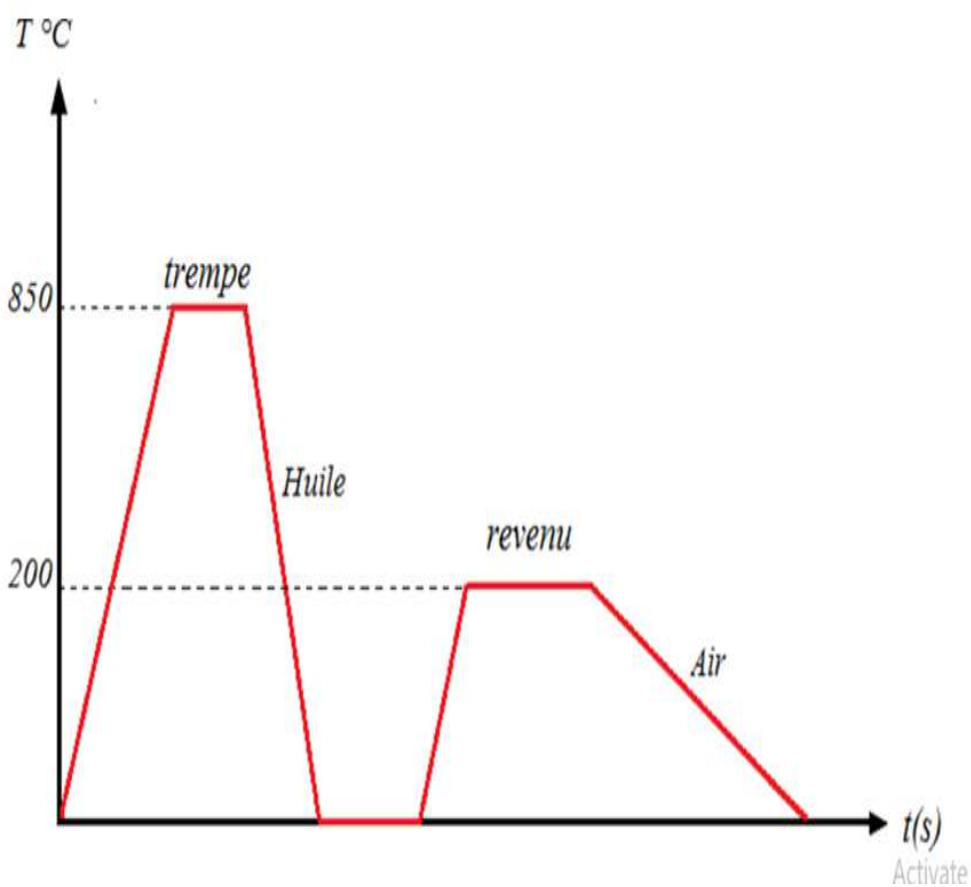
Désignation des Sous-Phases et Opérations		Eléments de coupe			Outillage	
		V_C (m/min)	N (tr/min)	a (mm/min)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 41	N°411 : Taillage par génération de la denture $Z=18, m=2.$	40	106	30	Fraise-mère en ARS $\varnothing 120$	Banc de control des dentures

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier		Bureau des Méthodes			
	Pièce : Arbre d'entraînement					
Phase N : 50	Matière : XC48		Date : 15/06/2023			
	Programme annuel : 10000 pièces					
Désignation : Fraisage des méplats						
Machine-Outil : Fraiseuse verticale						
Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		VC(m/mi n)	N (tr/min)	a (mm/min)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 51	N°511 : Fraisage des méplats. Système d'indexation	60	640	80	Frais 3 taillesen CM Ø30	Pied à coulisse

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N : 60	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	

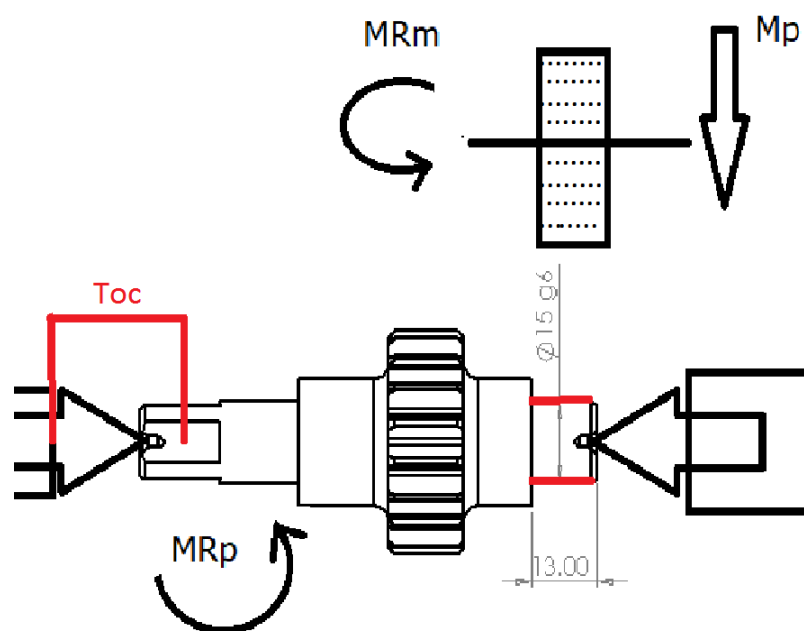
Désignation : traitement thermique

Machines : Fours de traitement thermique



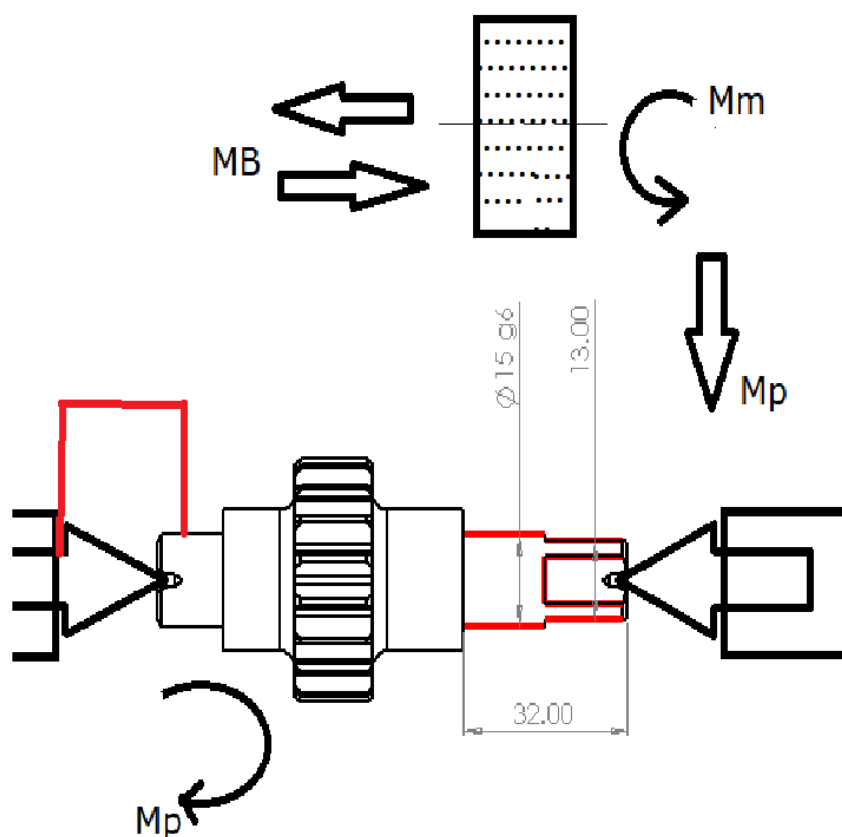
Phase de trempe et revenu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trempe à une température $T = 850^{\circ}\text{C}$ avec refroidissement à l'huile. ▪ Revenu à basse température $T = 200^{\circ}\text{C}$ avec refroidissement à l'air. 	Appareil de mesure de dureté
---------------------------	--	------------------------------

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N : 70	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Rectification ébauche + finition 1 ^{er} coté		
Machine-Outil : Rectifieuse cylindrique		



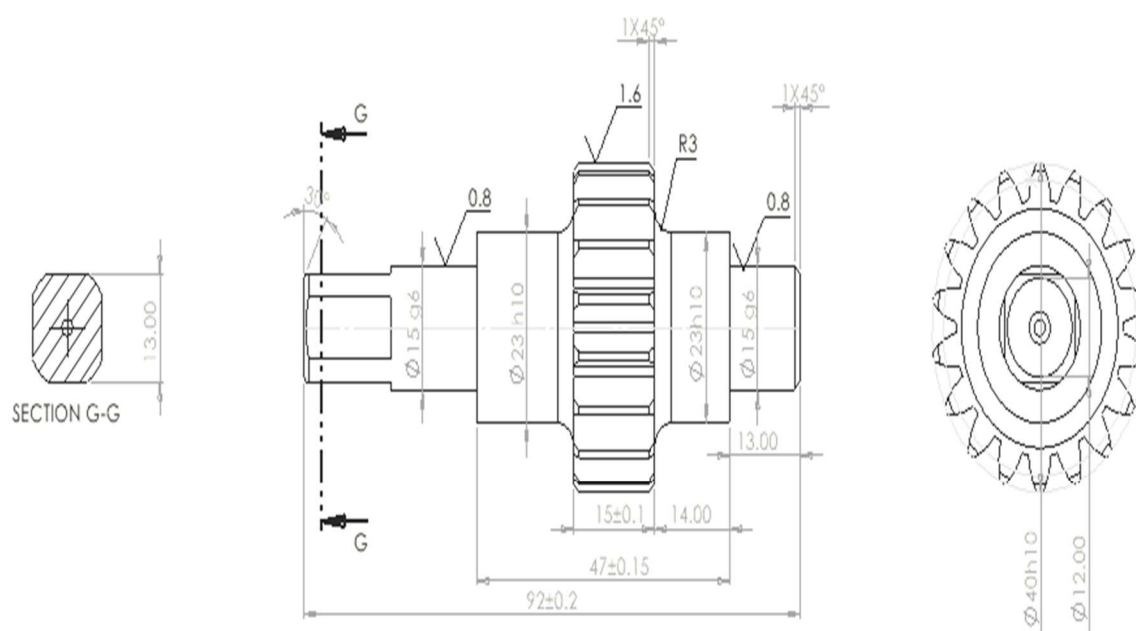
Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		V_C (m/min)	N (tr/min)	a (mm/tr)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 71	N°711 : Rectification par plongé du Ø15g6.	$V_m=50$ m/s $V_p=20$ m/min	$N_m=5310$ $N_p=425$	0.005	Meule cylindrique D=180m B=15 mm	

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N : 80	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Rectification ébauche + finition 2 ^{ème} coté		
Machine-Outil : Rectifieuse cylindrique		



Désignation des Sous-Phases		Éléments de coupe			Outillage	
		V_C (m/min)	N (tr/min)	a (mm/tr)	Fabrication	Vérification
Sous Phase N° 81	N°811 : Rectification par plongé du Ø15g6.	$V_m=50$ m/s $V_p=20$ m/min	$N_m=5310$ $N_p=425$	0.005	Meulecyl indrique D=180m B=15 mm	

Contrat de Phase	Ensemble : Boitier	Bureau des Méthodes
	Pièce : Arbre d'entraînement	
Phase N°:90	Matière : XC48	Date : 15/06/2023
	Programme annuel : 10000 pièces	
Désignation : Contrôle final		
Machine-Outil : Banc de contrôle du produit		



Désignation des Sous-Phases et Opérations		Éléments de coupe			Outillage	
						Vérification
Sous Phase N° 91	N°911 : Vérification du produit					Banc de contrôle

2.10 Programmation manuelle de la phase de tournage :

La commande numérique est un procédé d'automatisation qui permet les déplacements des organes de la machine-outil, à partir d'informations codées de caractères alphanumériques. Elle est réalisée selon le code ISO et permet de décrire les différentes opérations nécessaires à l'usinage d'une pièce.

L'opérateur introduit le programme dans la machine à commande numérique en utilisant le clavier de celle-ci ou peut être transférer à la machine par un câble RS 232. La MOCN réalise la pièce selon les informations codées contenues dans le programme de la pièce.

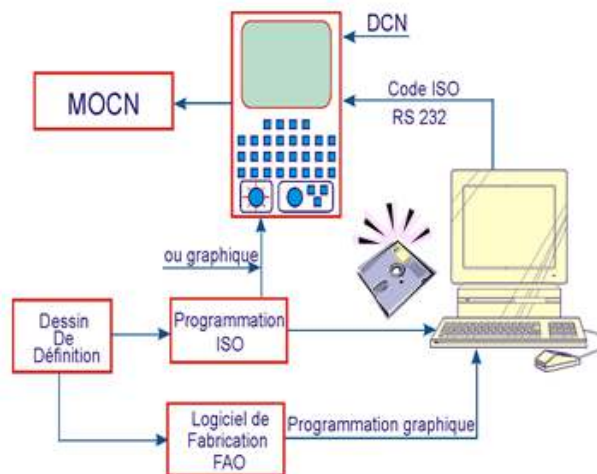


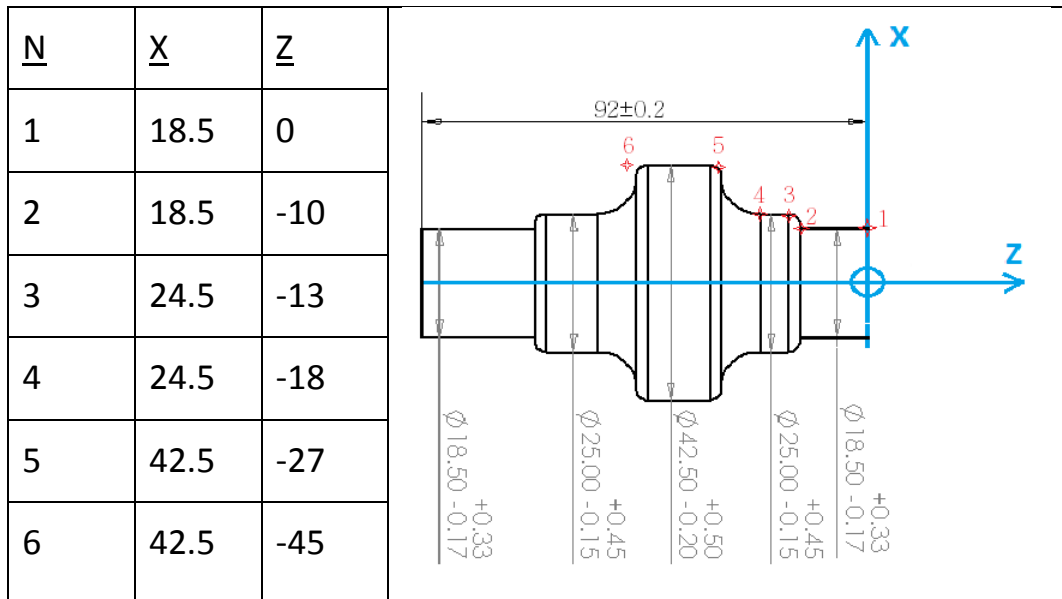
Fig. 2.3. Chargement d'un programme [7].

Avant de commencer la programmation manuelle, il est essentiel de s'assurer de l'implantation correcte des axes et de l'origine de programmation Op.

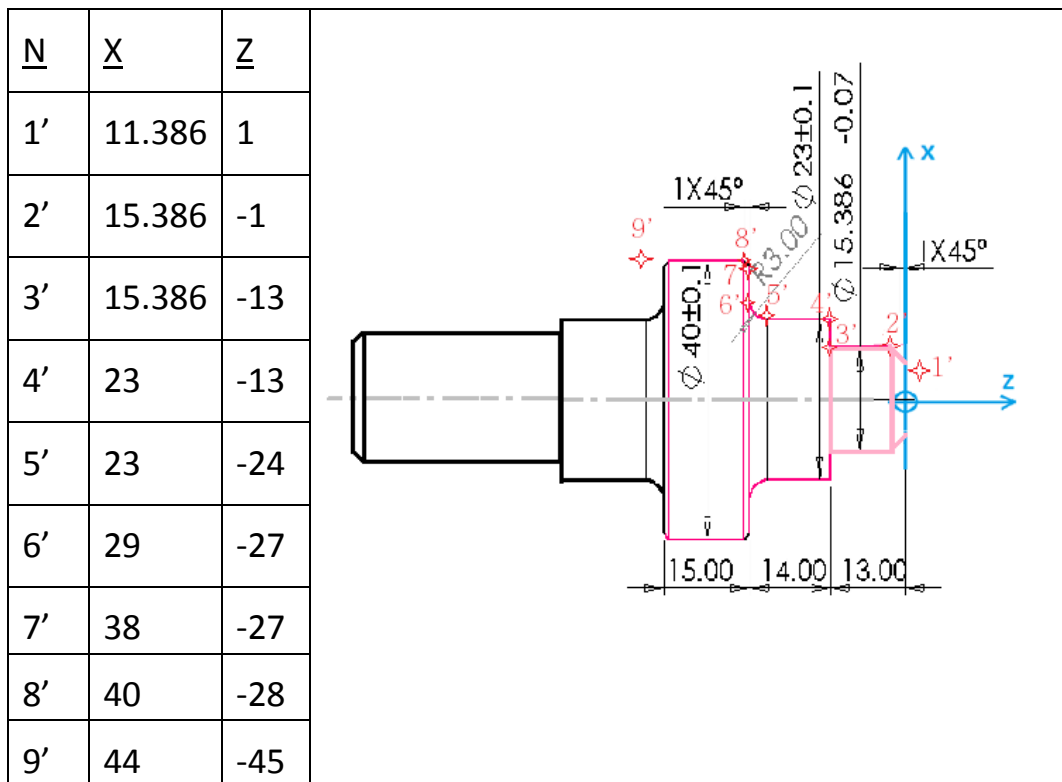
Le calcul des points particuliers du contour à programmer est déterminé selon la programmation en absolue.

Si on travaille en cycle de chariotage, il est nécessaire de calculer aussi les points qui forment le contour de la pièce brute.

Contour du 1^{er} côté de la pièce brute :

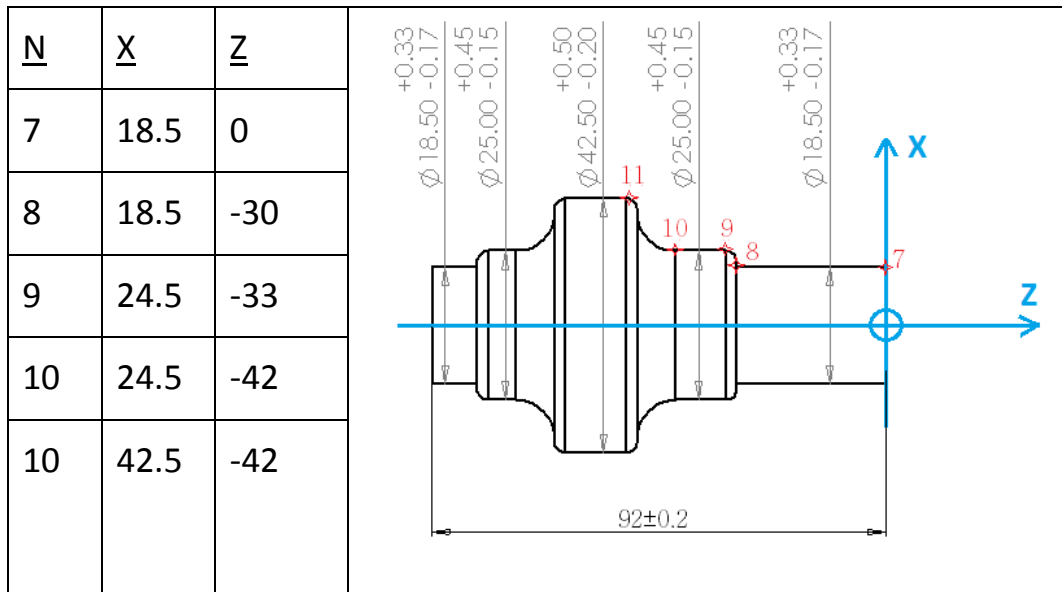


Contour du 1^{er} côté de la pièce finie :

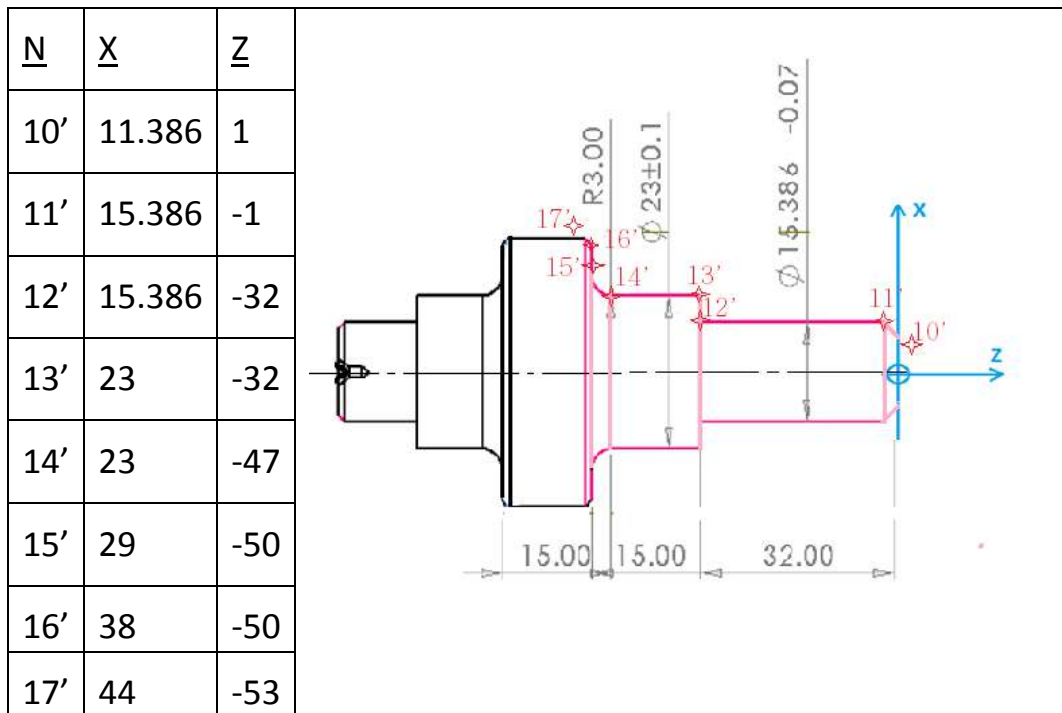


Le chariotage du 2^{ème} coté est réalisé sur la même machine par retournement de la pièce tout en gardant le repère Op fixe. Cette opération est rendue possible grâce au positionnement de la pièce entre pointes tout en assurant sa rotation par toc d'entraînement avec bien sûr une contre pointe programmable en déplacement.

Contour du 2^{ème} côté de la pièce brute :



Contour du 2^{ème} côté de la pièce finie :



Le listing du programme est le suivant :

%2023

N10 G90 G95

Programmation Absolue

N20 G X200.000 Z200.000

Positionnement OM

N30 T1 D1 M6

Choix outil

N40 G92 S8000

Limitation de la fréquence de la broche

N50 G96 S100 M4 M40 M8

Choix de la vitesse de coupe

N60 G79 N160	Saut vers le bloc N160 (début du cycle)
N70 X11.386 Z1.000	Positionnement rapide au point 1'
N80 G1 X15.386 Z-1.000	Déplacement de travail au point 2'
N90 Z-13.000	Déplacement de travail au point 3'
N100 X23.000	Déplacement de travail au point 4'
N110 Z-24.000	Déplacement de travail au point 5'
N120 G2 X29.000 Z-27.000 I3.000 K	Contournage vers le point 6'
N130 G1 X38.000	Déplacement de travail au point 7'
N140 X40.000 Z-28.000	Déplacement de travail au point 8'
N150 X44.00000 Z-45.000	Déplacement de travail au point 9'
N160 G64 N70 N150 I.5 K.2 P2 F0.200	Cycle de tournage
N170 X18.500 Z	Coordonnées du point 1
N180 Z-10.00	Coordonnées du point 2
N190 X24.500 Z-13.000	Coordonnées du point 3
N200 Z-18.000	Coordonnées du point 4
N210 X42.500 Z-27.000	Coordonnées du point 5
N220 Z-45.000	Coordonnées du point 6
N230 G80 X200 Z150	Fin de cycle et retour la position initiale
N240 M00 M9	Arrêt programmé pour retourner la pièce
N250 G97 S800	Rotation broche à 800 tr/min
N260 G X11.386 Z1.000	Positionnement rapide
N270 G96 S100	Choix de la vitesse de coupe
N280 X15.386 Z-1.000	Déplacement de travail au point 10'
N290 X15.386 Z-1.000	Déplacement de travail au point 11'
N300 Z-32.000	Déplacement de travail au point 12'
N310 X23.00	Déplacement de travail au point 13'
N320 Z-47.000	Déplacement de travail au point 14'
N330 G2 X29.000 Z-50.000 I3.000 K	Contournage vers le point 15'
N340 G1 X38.000	Déplacement de travail au point 16'
N350 G64 N280 N340 I.5 K.2 P2 F0.200	Cycle de tournage
N360 X18.500 Z	Coordonnées du point 7
N370 Z-30.00	Coordonnées du point 8
N380 X24.500 Z-33.000	Coordonnées du point 9
N390 Z-42.000	Coordonnées du point 10
N400 X42.500	Coordonnées du point 11
N410 G80 X200 Z150 M9	Fin de cycle et retour la position initiale
N420 M5	Arrêt de la rotation de la broche
N430 M2	Fin du programme

Chapitre III

Etude Expérimentale

3.1 Introduction :

Dans le monde industriel, l'usinage des pièces mécaniques passe par la compréhension du mode de fabrication à adopter en particulier les phases d'élaboration d'un produit par le bureau des méthodes. L'objectif essentiel est la détermination des facteurs fondamentaux qui assurent une bonne compétitivité d'une entreprise.

Dans le but de la recherche d'une meilleure qualité des produits de niveau 3, devenue une nécessité, les entreprises mobilisent la totalité de leurs efforts pour l'amélioration continue de ses produits afin de satisfaire les clients au moindre coût. La qualité d'un produit dépend de nombreuses composantes de manière que l'absence de l'une d'elles conduit automatiquement à la non-qualité. Dans ce cas, l'entreprise subira toutes les conséquences, telles que les réclamations, l'annulation de commande, la perte de clientèle, atteinte à l'image de marque de l'entreprise, etc.

La figure 3.1 présente les principales composantes de la qualité.

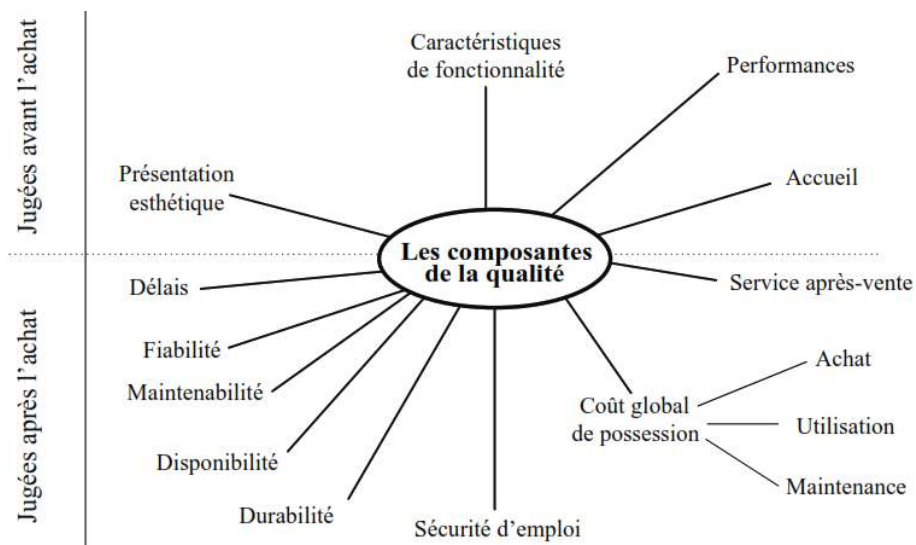


Fig. 3.1. Principales composantes de la qualité [16].

3.2 Etude du phénomène d'usure des plaquettes :

L'une des exigences essentielles des consommateurs pour les pièces fabriquées par usinage est sans doute la qualité des surfaces en raison de son impact sur la performance en fonctionnement des produits. De ce fait, il faut chercher une corrélation entre la rugosité de surface et les paramètres d'usinage (vitesse, avance et profondeur de passe). Au cours d'usinage, plusieurs phénomènes peuvent se

produire tels que l'usure des plaquettes de coupe et les vibrations de l'outil de coupe et qui sont majoritairement responsables à la dégradation de l'état de surface. Ces deux paramètres sont à contrôler soit offline par des moyens de contrôle adaptés à la nature de la mesure soit on-line par des systèmes de surveillance qui doivent tenir compte de la nature complexe du processus de coupe.

Pour le développement d'un système de surveillance performant, les travaux de recherche se sont concentrés principalement sur la mise en place des modèles mathématiques utilisant de grandes quantités de données expérimentales vu que l'automatisation du processus de coupe est devenue possible avec l'introduction des machines à commande numérique.

Dans le domaine de l'usinage, les méthodes de surveillance on-line sont très fiables car elles sont basées sur la mesure de quantités réelles telles que les efforts de coupe, le bruit émis par l'usinage, la température de coupe, les vibrations, etc. A partir de la corrélation de ces paramètres à l'usure de l'outil de coupe, on peut extraire l'ampleur de l'usure de l'outil.

La plupart des auteurs identifient trois périodes de l'usure : initiale qui correspond au rodage, régulière qui représente la vie normale de l'outil et rapide qui signifie le début de dégradation catastrophique de l'outil (figure 3.2).

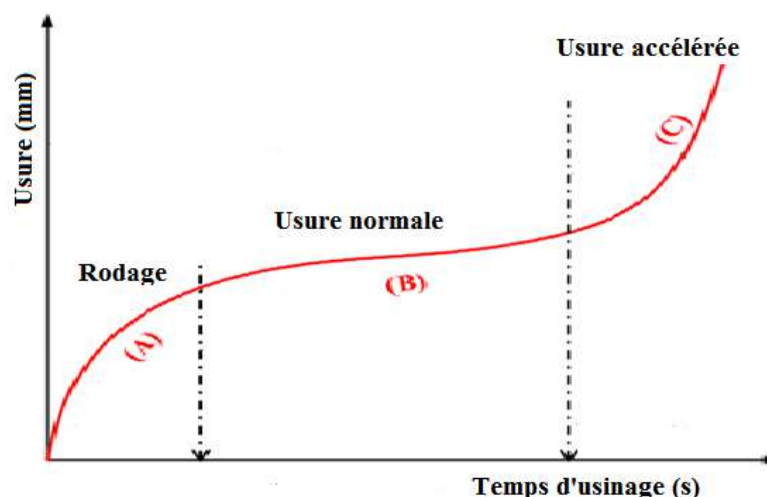


Fig. 3.2. Evolution de l'usure au cours d'usinage.

Si la première et la dernière période de l'usure se produisent plus rapidement que l'usure régulière qui se manifeste après une période

de travail normal de la plaquette, la difficulté est de pouvoir détecter la transition vers l'usure accélérée au moment opportun.

L'usure des plaquettes de coupe est produite par effet mécanique de trois manières :

- Usure adhésive, régie par l'équation de Burwell et Strang, où le rapport entre la surface réelle de contact et la surface apparente de contact $A_r/A_a=10^{-5}$. Les pressions de contact sont donc très grandes et le risque d'avoir adhésion est important.
- Usure abrasive se manifeste à sec dont les particules de métal se glissent entre l'outil et la pièce.
- Usure érosive est le même phénomène que précédemment, mais en présence d'un lubrifiant.

L'usure peut se produire aussi par effet physico-chimique selon deux manières :

- Usure corrosive qui se manifeste au contact de l'air, d'un lubrifiant, à haute température favorisant le transfert des particules de l'outil vers le copeau.
- Usure par diffusion qui apparaît pour des vitesses élevées.

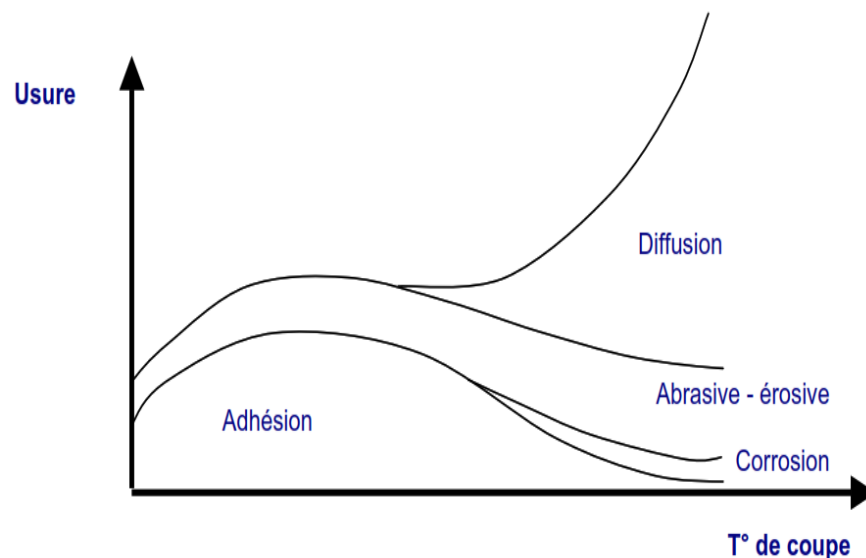


Fig. 3.3. Effet de la température de coupe sur l'usure.

Les modes de défaillance de l'outil de coupe les plus rencontrés sont : l'usure en dépouille, la rupture, l'usure en cratère et la déformation plastique (figure 3.4). L'usure en dépouille et en cratère sont généralement acceptées comme des défaillances normales de

l'outil de coupe car leur évolution est directement liée au temps de coupe. A la différence des défaillances normales, certains autres modes de défaillance peuvent se produire inopinément, même avec un nouvel outil et même si des paramètres d'usinage sont bien choisis.

Il est bien connu que les dimensions de la pièce et sa qualité de surface dépend principalement de l'usure en dépouille. Pour cette raison, les études de l'usure en dépouille et les moyens de la prévoir a fait l'objet de travaux de recherche pendant plusieurs années.





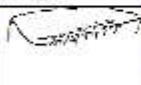


Nom	Allure	Effets	Cause	Remède
Usure en dépouille V_B		L'usure en dépouille est la plus importante. Elle influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface.	V_c trop important.	Réduire V_c ou changer de nuance de plaquette. Revêtement Al_2O_3 (Pour les matériaux réfractaires avec des plaquettes céramiques, il faut au contraire augmenter V_c)
Usure en cratère		Elle entraîne une fragilité de l'arête. Lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre.	Usure par diffusion due à une température trop importante sur la face de coupe.	Choisir une plaquette avec un γ positif. Prendre une plaquette revêtue. Réduire V_c puis V_f .
Déformation plastique (fluage)		L'arête de coupe s'est déformée entraînant une dépression de l'arête et un renflement sur la face de dépouille.	Efforts de coupe trop importants. Température de coupe trop importante	Lubrifier. Réduire V_f Réduire V_c
Ecaillage		Petite fracture entraînant un état de surface médiocre et une usure en dépouille excessive.	Nuance trop fragile Géométrie trop fragile Arête rapportée	Prendre une nuance tenace. Augmenter β et le chanfrein de bec. Réduire l'avance au début de la coupe.
Usure en peigne		Des fissures perpendiculaires à l'arête entraînent son effritement.	Elle est due à des fluctuations thermiques lors de l'usinage : Arrosage intermittent Usinage intermittent.	Sélectionner une nuance tenace offrant une bonne résistance aux chocs thermiques. Pratiquer un arrosage abondant ou usiner à sec.
Arête rapportée		Un copeau se dépose sur la plaquette, entraînant un état de surface médiocre.	V_c trop faible Géométrie mal adaptée au matériau	Augmenter V_c . Revoir les catalogues (cas de l'inox, de certains aluminium)
Rupture		Risque d'endommager la pièce, le porte outil.	Nuance trop fragile. Charge excessive sur la plaquette. Choc lors de l'usinage (plan de joint).	Prendre une nuance tenace. Réduire V_f et a. Dans ce cas : augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.

Fig. 3.4. Modes de dégradation de la partie active d'un outil de coupe [17].

3.3 La surveillance de l'usure :

Afin de détecter les défaillances citées auparavant, deux systèmes de surveillance de l'usinage sont souvent employés. Ceux basés sur une observation directe de l'outil hors usinage par intermittence et ceux basés sur une observation indirecte, c'est-à-dire

en suivant l'évolution d'une grandeur physique lors de l'usinage, les efforts de coupe par exemple.

Une observation directe de l'outil (mesure de sa géométrie, de son usure, etc.) serait plus précise mais elle nécessite l'arrêt de l'opération d'usinage. Or, une surveillance pendant l'usinage permet une réaction en temps réel afin de limiter les dégâts en cas d'une usure excessive mais elle est plus difficile à mettre en œuvre. Les systèmes de surveillance en temps réel pendant l'usinage sont principalement basés sur une observation indirecte de l'état de l'outil, même si le traitement de l'information est plus complexe. Les mesures les plus fréquemment utilisées pour la surveillance continue de l'usure d'une façon indirecte sont l'émission acoustique, les efforts de coupe, les signatures vibratoires, la température, le courant électrique, la puissance des moteurs électriques, etc. [18].

Les signaux mesurés sont généralement affectés par la structure du matériau de la pièce, par la géométrie de l'outil de coupe et par les conditions de coupe. Un système de surveillance on-line de l'usure de l'outil de coupe, conçu pour prendre en compte toutes ces contraintes, est extrêmement recommandé. La figure 3.5 montre une installation de système de surveillance en temps réel.

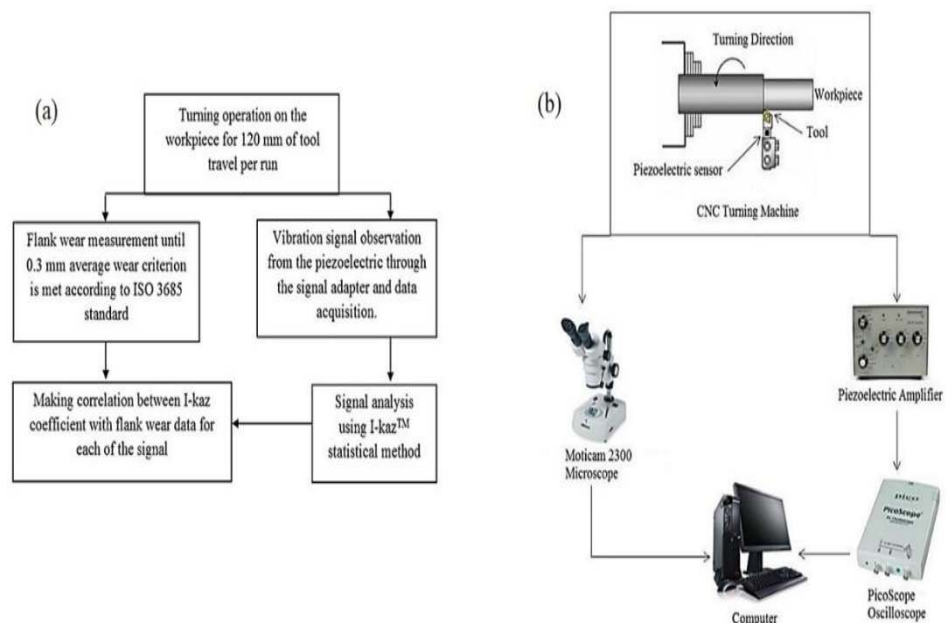


Fig. 3.5. Système de surveillance en temps réel [19].

Dans ce contexte, Prasad et al. [20] ont évalué les performances d'un outil en carbure non revêtu en tenant compte des paramètres de coupe et des différents niveaux de dureté du matériau lors du tournage de l'acier AISI 4140. Des modèles de régression linéaire multiple ont été développés pour établir les corrélations entre les paramètres de coupe et les mesures de performance telles que l'amplitude de vibration et la durée de vie de l'outil. L'ANOVA détermine les paramètres hautement significatifs avec un coefficient de régression proche de 0.9. Cette valeur indique que les modèles développés sont très fiables et pourraient être utilisés efficacement pour prédire les réponses dans le domaine des paramètres de coupe. Les observations expérimentales montrent que les valeurs d'amplitude de déplacement augmentent avec l'augmentation du niveau de dureté de la pièce, de la profondeur de coupe et de la vitesse de rotation. Une tendance similaire est également observée dans l'usure des outils. Les conditions de coupe optimales sont déterminées à l'aide de la méthodologie de surface de réponse (RSM) et de l'approche de la fonction de désirabilité. Les résultats ont indiqué que l'effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe à différents niveaux de dureté de la pièce est plus important lorsque l'usure de l'outil est sur le paramètre souhaité. Lorsque le paramètre souhaité est le déplacement, l'effet de la vitesse de rotation ainsi que des différents niveaux de dureté de la pièce s'avère plus significatif. Les résultats montrent un accord relativement bon entre la prédiction et les valeurs données par les modèles empiriques développés. Hosseini et al. [21] ont considéré le problème de l'estimation de l'usure de l'outil à l'aide de signaux de vibration via la méthode de modélisation de la moyenne mobile autorégressive dépendante du temps de séries fonctionnelles non stationnaires (FS-TARMA). Le rapport d'amortissement des modes de flexion du porte-outil a été sélectionné comme caractéristique à corrélérer avec l'usure de l'outil. L'efficacité et l'applicabilité de l'approche FS-TARMA pour la prédiction des signaux non stationnaires de l'outil ont été démontrées. Les extrêmes qui ont été révélés sur les courbes d'usure ont fourni des mesures pour l'estimation de l'usure de l'outil. En tant que caractéristique sensible à l'usure, les taux d'amortissement modaux sont plus avantageux car ils peuvent être facilement obtenus à l'aide des modèles identifiés. Leur corrélation avec l'usure peut être utilisée dans une estimation en temps réel de

l'usure de l'outil. Funghua et al. [22] ont mené une étude expérimentale dans laquelle le signal vibratoire mesuré est présenté dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. Au début et dans la zone d'usure normale de l'outil, la différence de comportement vibratoire n'est pas grande, mais la zone de l'usure normale est relativement stable. La vibration tardive est plus intense et l'outil de coupe indique un état d'usure accélérée. Dans le domaine temporel, l'amplitude quadratique moyenne et le kurtosis se distinguent de l'état d'usure de l'outil de coupe. Dans le domaine fréquentiel, la fréquence carrée moyenne et le centroïde du spectre de puissance de l'usure de l'outil de coupe ont des caractéristiques correspondantes évidentes. L'exemple prouve que la méthode d'analyse dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel permet d'extraire efficacement les caractéristiques de l'outil de coupe et d'identifier la gravité de l'usure de l'outil de coupe. Babouri et al. [23] présentent une technique indirecte basée sur la mesure des signaux d'accélération lors de l'opération de tournage de l'acier AISI D3. Contrairement à la mesure directe de l'usure de l'outil par microscopie, cette approche peut être effectuée sans arrêter le processus d'usinage. Les fréquences propres du système d'usinage peuvent être identifiées et analysées à partir des signaux mesurés et des autospectres correspondants. La prédiction de l'usure de l'outil est réalisée à travers le calcul d'un indicateur, appelé «Centre de gravité spectral» qui permet de quantifier les changements des amplitudes des fréquences propres de l'outil suite à l'évolution de l'usure de l'outil jusqu'au début de la phase d'usure accélérée. A travers la mesure du bruit de la broche, Seemuang et al. [24] ont engagé une procédure pour surveiller l'usure de l'outil dans un processus de tournage. L'analyse sonore décrit peut-être utiliser pour caractériser facilement un processus d'usinage particulier en enregistrant sa signature audio et en supprimant tout bruit ambiant indésirable. Ils ont trouvé qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la fréquence du bruit de la broche et l'usure de l'outil, mais il est possible d'estimer l'état de l'outil à partir du spectre de puissance du bruit de la broche suite aux changements de vitesse de coupe et d'avance. Dirhamsyah Ahmad et al. [19] développent un système de surveillance de l'usure des outils à l'aide d'un capteur céramique piézoélectrique pour mesurer le signal de vibration provenant de l'usinage, affecté par l'évolution d'usure. En utilisant la méthode

d'analyse statistique I-kazTM, une corrélation entre les coefficients I-kaz, les valeurs Z et l'usure VB est obtenue. Le critère d'usure de l'outil dans le processus d'usinage peut être mis en œuvre avec une référence basée sur les valeurs Z.

3.4 Etude de cas de l'usure d'outil :

La durée de vie est estimée par rapport à l'usure en dépouille dans la zone b en adoptant comme critère d'usure $VB=0.3$ (figure 3.6).

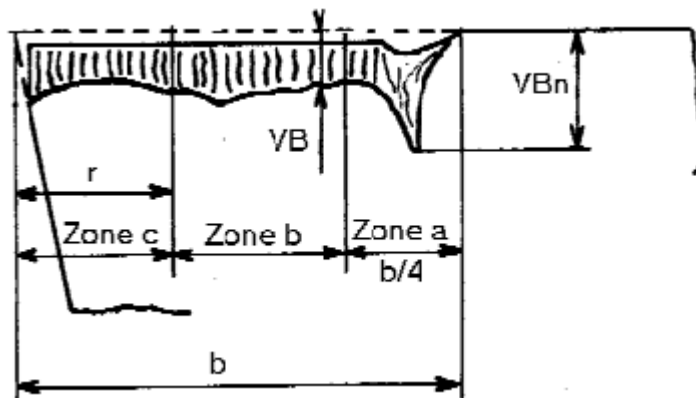


Fig. 3.6. Forme apparente de l'usure en dépouille.

Dans cette partie, on va reprendre les essais réalisés par Babouri [18] dont le but est de voir l'influence de la répétitivité des essais d'usure sur la qualité des résultats obtenus. Ces différentes campagnes d'essais d'usinage ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structures (LMS), Département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 - Guelma.

Les mesures de l'usure en dépouille sur la plaquette de coupe sont réalisées après chaque essai par un microscope optique du type Standard gage-visual 250. Les conditions des différents essais sont regroupées dans le tableau 3.1 et les résultats relatifs à la variation de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage sont présentés par la figure 3.7.

Conditions de coupe pour la compagne N°1 : V _c =120m/min, p=0.2mm, a=0.12mm/tr						
		Essai [23]	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Résultante
N° Séquence	Temps t (s)	Usure VB (mm)				
1	240	0.041				
2	480	0.090				
3	720	0.118				
4	1200	0.154				
5	1440	0.180				
6	1680	0.202				
7	1920	0.215				
8	2400	0.257				
9	2640	0.280				
10	2880	0.292				
11	3360	0.323				
12	3600	0.345				
13	3840	0.360				
14	4080	0.377				
15	4320	0.396				
16	4560	0.403				
Conditions de coupe pour la compagne N°2 : V _c = 175 m/min, ap = 0.2 mm, f = 0.12 mm/tr						
1	169	0.077				
2	507	0.289				
3	676	0.373				
4	845	0.488				
5	1014	0.628				
Conditions de coupe pour la compagne N°3 : V _c = 250 m/min, ap = 0.2 mm, f = 0.12 mm/tr						
1	116	0.091				
2	232	0.218				
3	348	0.359				
4	464	0.920				

Tableau 3.1. Résultats des essais selon le plan expérimental proposé.

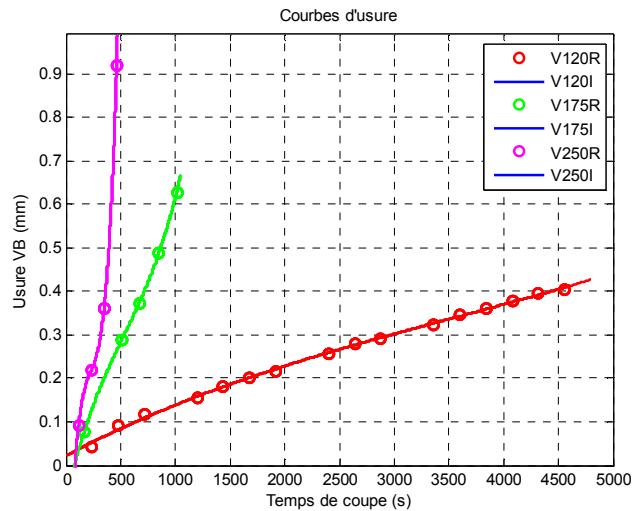


Fig. 3.7. Usure en dépouille (VB) en fonction du temps de coupe.

3.5 Modèle de Taylor :

Le modèle de Taylor est le premier modèle proposé en 1907 pour faire une corrélation entre la tenue de l'outil (T) et la vitesse de coupe comme variable principale et unique. C'est un modèle très simple qui, à partir d'une série d'essais (au moins 3 essais), permet de tracer la courbe de tendance (figure 3.8)

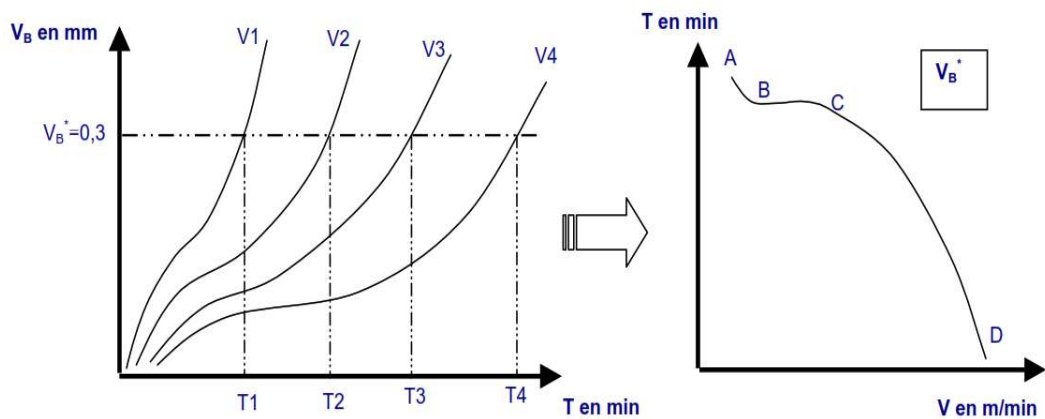


Fig. 3.8. Courbe de tendance de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe.

La courbe de Taylor présente trois zones : une forte usure AB, une phase de stabilisation BC caractérisée par une usure constante et enfin une usure accélérée CD. En gardant uniquement la partie CD sur une échelle logarithmique, le modèle devient linéaire (figure 3.9).

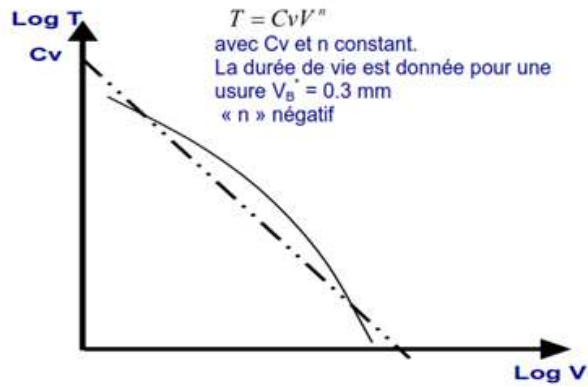


Fig. 3.9. Modèle de Taylor.

3.6 Analyse des modèles :

Malheureusement, suite à la contrainte du temps, nous n'avons pas pu réaliser des essais d'usure. De même pour des simulations où on peut introduire des erreurs aléatoires aux essais réalisés par Babouri [23], la même contrainte est toujours présente.

L'idée derrière cette partie d'études était, en principe, de montrer l'impact de la répétition des essais sur l'exactitude des modèles de Taylor.

Conclusion générale :

En usinage par enlèvement de matière, nous avons le choix d'utiliser des machines-outils conventionnelles ou à commande numérique selon la disponibilité et en fonction du programme annuel de production. Les machines-outils à commande numérique ont rendu l'usinage beaucoup plus facile tout en garantissant la précision demandée. Par ailleurs, la maîtrise de la machine elle-même et de la programmation des cycles d'usinage exige un niveau de qualification équivalent de celui des ingénieurs de production.

Dans ce contexte, nous avons tenté de réaliser une pièce de type arbre d'entraînement en introduisant un tour CNC dans le cycle de fabrication en commençant le travail par une étude technologique, souvent engagé par le service du bureau des méthodes jusqu'à la phase d'usinage.

Finalement, une partie dédiée à une recherche approfondie sur le phénomène d'usure des outils de coupe pour montrer l'effet de la répétition des essais pour réduire les erreurs des modèles de Taylor. Malheureusement et suite au facteur temps, nous n'avons pas pu réaliser ni les essais ni les simulations.

Références bibliographiques :

- [1]. Gelberg B., Pékélis, G. (1987). Réparation de l'équipement industriel. Edition MIR Moscou, version française.
- [2]. <https://openai.com/chatgpt>
- [3]. Boutin, R. Pinot, M. (1986). Fabrications Mécaniques Technologie, Tome II. Les éditions FOUCHER, Paris. ISBN 2-216-00335-2.
- [4]. Bensaada, S. (2010). Traitements thermiques des aciers et fontes. Editions Universitaires Européennes.
- [5]. Djamaa, M.C. (2022). "Cours CFAO". Master 1 Construction Mécanique. Polycopié de cours édité. Département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945-Guelma : 124 pages.
- [6]. Djamaa, M.C. (2022). "TP CFAO". Master 1 Construction Mécanique. Polycopié de travaux pratiques. Département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945-Guelma : 25 pages.
- [7]. https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/pmocn_had.pdf
- [8]. <http://www.metaux-detail.com/pdf/acier/xc48.pdf>
- [9]. <https://www.pinterest.com/pin/645070346631652559>
- [10]. Djamaa, M.C. (1988). ")."Amélioration de la gamme d'usinage d'un cylindre en vue d'augmentation de la productivité et la qualité d'usinage". Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [11]. Bassino, M. (1972). "Matériaux - Usinages – Machines, tome 1". Les éditions FOUCHER, Paris. ISBN 2-216-00194-5.
- [12]. Prikhodko, V. (1985). "Calcul des surépaisseurs d'usinage – Méthode analytique". Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [13]. HERTEL "Outils de coupe pour l'usinage". Manuel N°1050F
- [14]. Loison, L. (1978). "Coupe des métaux - Méthodes de calcul". Ecole Catholique d'Arts et Métiers, Lyon, France.
- [15]. Djaafri, C. (2021). "Etude de fabrication d'un arbre de transmission sur le tour à CN EMCO TURN E25". Mémoire de Master, Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar – Annaba.

- [16]. Mascle, C., et Wygowski, W. (2012). "Fabrication avancée et méthodes industrielles, Tome 1". Presses internationales Polytechnique, Bibliothèque et Archives nationales du Québec ISBN 978-2-553-01630-1 (version pdf).
- [17]. Depeyre, P. (2005). "Fabrication Mécanique". Licence de Technologie et Mécanique. Polycopié de cours édité. Université de la Réunion, France.
- [18]. Babouri, M.K. (2016). "Surveillance de l'évolution de l'usure d'un outil de coupe en tournage". Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945-Guelma: 133 pages.
- [19]. Dirhamsyah Ahmad, M.A.F., Nuawi, M., Abdullah, S., Wahid, Z., Karim, Z., Syamsuddin, M. (2015). "Development of Tool Wear Machining Monitoring Using Novel Statistical Analysis Method, I-kaz™." *Procedia Engineering* 101: 355-362.
- [20]. Prasad, B.S. and Babu, M.P. (2017). "Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis". *Engineering Science and Technology* 20(1): 197-211.
- [21]. Hosseini, A.B. and Ender, C. (2017). "Vibration-based tool wear estimation by using non-stationary Functional Series TARMA (FS-TARMA) models". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93(1): 1431-1442.
- [22]. Fenghua, H. and Xie, F. (2017). "On-line Monitoring for Cutting Tool Wear Condition Based on the Parameters". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 220(1): 012038.
- [23]. Babouri, M.K., Ouelaa, N., Djebala, A., Djamaa, M.C., Boucherit, S. (2017). "Prediction of cutting tool's optimal lifespan based on the scalar indicators and the wavelet multi-resolution analysis". *Lecture Notes in Mechanical Engineering*:299-310.
- [24]. Seemuang, N., McLeay, T., Slatter, T. (2016). "Using spindle noise to monitor tool wear in a turning process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86(9): 2781-2790.