الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــة

Faculté : Technologie
Département : Génie mécanique
Domaine : Sciences et technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication Mécanique et productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Conception et modélisation d'un dispositif de guidage pour travaux de filetage

Présenté par : *MELOUH Faten et SAKER Meriem*

Encadrant : *MOKAS Nacer Professeur Université Bdji Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

LAGRED Ahmed	Professeur	UBMA	Président
MOKAS Nacer	Professeur	UBMA	Encadrant
BENCHIHEUB Sliman	MCA	UBMA	Examinateur
HADIDEN Yazid	Professeur	UBMA	Représentant de l'Agence nationale d'appui et de développement de l'entreprenariat (NESDA)
Nom et prénom	Grade	Université	Représentant d'incubateur (CDE)
ZEROUALI Zine	Directeur technique	Ferrovial Annaba	Partenaire socio-économique

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Ce projet n'est pas simplement un travail académique, mais l'empreinte d'un parcours vécu avec intensité. Il est né d'une idée, façonné par l'effort, et porté par une volonté sincère d'apprendre, de comprendre et de progresser. Chaque étape a été marquée par le doute, l'espoir, le dépassement de soi et la force du collectif. C'est bien plus qu'un mémoire : c'est un hommage discret au chemin parcouru, et à toutes celles et ceux qui y ont contribué, de près ou de loin.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent tout d'abord à **Monsieur N. MOKAS**, Professeur à l'université d'Annaba, notre encadrant académique, pour sa présence constante, son engagement sans faille, et ses conseils éclairés. Véritable pilier de ce travail, il a su nous accompagner avec rigueur, bienveillance et une grande générosité intellectuelle. Son soutien méthodologique et humain a été fondamental dans la réussite de ce projet, et nous lui en sommes profondément reconnaissants.

Nous exprimons également toute notre gratitude à **Mademoiselle S. BELABEND**, pour son accompagnement technique de qualité, sa patience, et son implication continue. Grâce à sa disponibilité et à ses conseils avisés, elle a orienté notre travail avec un grand professionnalisme.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des **enseignants du département de Génie Mécanique** de l'Université d'Annaba, ainsi qu'à l'équipe du **Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (L.R.T.A.P.M.)**. Leurs enseignements, leur engagement pédagogique et leur soutien ont constitué une source précieuse de savoir et d'inspiration.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à toute l'équipe de l'entreprise **FERROVIAL**, quel que soit leur poste ou leur contribution. Chacun d'eux, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité, leur accompagnement tout au long de notre stage pratique.et leur encadrement sur le terrain, qui nous ont permis de nous immerger pleinement dans la réalité industrielle.

Nous remercions tout particulièrement **Monsieur Z. ZEROUALI**, Directeur du Département Technique, pour sa gestion rigoureuse, son implication continue et son souci du bon

déroulement de notre formation. Son professionnalisme a largement contribué à la réussite de notre immersion professionnelle.

Nos vifs remerciements vont également à **Monsieur F. BERIA**, ingénieur, pour la qualité de son accueil, sa générosité, son écoute et la richesse de ses apports techniques. Il a su partager son savoir avec passion et clarté.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à **Monsieur T. KHELAF**, pour ses conseils précieux, son suivi rigoureux et ses efforts constants pour nous encadrer dans le bon déroulement du projet.

Un remerciement particulier à **Monsieur R. BRAHMIA**, opérateur technique, pour sa précision, sa disponibilité et son soutien lors de l'utilisation des équipements. Sa patience et son professionnalisme ont été essentiels à la concrétisation de notre travail.

À toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'accomplissement de ce travail, nous adressons notre plus sincère reconnaissance. Ce mémoire est le reflet d'un effort collectif, nourri de bienveillance, de savoir-faire et d'humanité.

Dédicaces Faten

Louange à Dieu, le Très-Haut, le Tout-Puissant.

Avant toute, je remercie ***Allah****, Lui qui m'a accordé la patience dans les instants de doute, la force dans les heures d'épuisement, et la lumière au cœur des ténèbres. À chaque étape, Il a été mon soutien invisible, ma source de paix, de courage et d'espérance.*

Je dédie ce travail à moi-même,

à cette fille qui a tenu bon quand tout vacillait, à celle qui a affronté l'épuisement, les incertitudes, les silences lourds des nuits blanches, sans jamais plier ni renoncer.
À celle qui a porté ses rêves comme un flambeau dans l'obscurité, et qui a transformé chaque larme en force, chaque chute en relèvement.
Ce mémoire n'est pas une simple obligation académique, c'est le miroir d'un parcours façonné par la douleur, le doute et la foi.
C'est la trace écrite d'un combat silencieux, mais digne, un hommage vibrant à ma propre persévérance, et la promesse que tout ce qui vient sera construit avec foi, amour et détermination inébranlable

« Merci FATEN »

À ma famille, source de mon éducation et de mes valeurs.
Votre amour m'a façonnée et m'a guidée pour devenir la personne que je suis aujourd'hui,

À mon père MELOUH Chafai
pilier de ma vie, exemple éclatant de droiture, de patience et de sagesse.
Ton regard a été pour moi un refuge, ta présence discrète, une force inestimable.
Tu n'as jamais eu besoin de mots pour me transmettre ton amour, car chaque geste, chaque sacrifice, parlait à mon cœur.
Grâce à toi, j'ai appris la persévérance, l'humilité et la dignité.
Que Dieu t'enveloppe de Sa miséricorde, te comble de santé, de sérénité et te garde à mes côtés encore longtemps.
À ma tendre mère, Mme MELOUH

lumière de mes jours et refuge éternel de mon cœur.
Tu es ma prière vivante, mon souffle secret, mon miracle quotidien.
Dans chaque épreuve, ton amour m'a portée, dans chaque silence, tes invocations m'ont protégée.
Ta tendresse m'a nourrie, ton courage m'a inspirée, et ta foi en moi a fait naître ma propre force.
Merci pour ton amour sans limite,.
Que Dieu te récompense pour chaque battement de cœur donné, et qu'Il te comble de paix, de joie, et de santé.

À mes sœurs et à mon frère,
mes âmes jumelles, mes piliers silencieux, dans chacun de vos sourires, j'ai puisé du courage, dans chacun de vos mots, une paix sincère, et dans vos regards, une lumière qui ne m'a jamais quittée.
Vous êtes ma force douce, ma chaleur ce,
Que Dieu vous protège, vous élève au sommet du bonheur, et vous accorde une réussite infinie, à la hauteur de vos cœurs

À *Monsieur N. MOKAS*,

Vous n'avez pas été qu'un enseignant, mais **un véritable mentor.**
Votre patience, votre écoute, vos conseils justes et exigeants, votre confiance constante…
Tout cela a donné à ce mémoire une dimension humaine précieuse.
Merci de m'avoir guidée avec bienveillance, et d'avoir cru en moi, même lorsque moi, je doutais.
Je vous dédie ce travail, avec tout mon respect et une profonde gratitude.

À ma chère binôme Meriem,
Que j'aime, merci pour chaque instant partagé, Ton engagement, ton soutien, ta sincérité fait

Merci pour tout ce que tu as fait pour la réussite de ce travail.

À toutes les personnes qui portent à mon égard un sentiment d'amour, de respect ou simplement de bienveillance,

Je vous dis du fond du cœur : MERCI.

Que Dieu vous le rende au centuple, en bonheur, en paix, et en lumière.



Dédicaces

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Louange à Allah, en premier et en dernier, en apparence et en secret, dans l'intimité et au grand jour. Par sa grâce, les vœux se réalisent, par sa puissance les obstacles disparaissent, et par son assistance le succès s'écrit après une longue attente.

Me voici aujourd'hui au seuil d'un moment dont j'ai longtemps rêvé, un instant qui raconte l'histoire de nuits blanches, de fatigue, de larmes et de certitude que Dieu ne déçoit jamais celui qui Lui est sincèrement dévoué et qui place sa confiance en Lui.

Ce travail n'est pas de simples feuilles écrites, mais l'histoire d'un cœur qui a vécu chaque détail, d'une patience qui a écrit les chapitres de la gloire, et d'une famille qui a été le pilier qui m'a soutenue lorsque les jours m'ont trahie.

À ceux qui, après la grâce d'Allah, ont eu le mérite de me voir atteindre cet instant, j'offre le fruit de cet effort en témoignage d'amour et de reconnaissance :

À mon père **Nacer Eddine**,

Toi qui as été ma force dans mes faiblesses, mon refuge dans mes doutes, et mon soutien silencieux dans l'ombre. Ton amour discret et ta présence constante ont apaisé mes peurs et porté mes espoirs. Malgré tes propres fatigues, tu as toujours été ce pilier solide sur lequel je pouvais m'appuyer. Chaque mot de ce travail te ressemble, et chaque ligne porte ton nom gravé en lettres d'amour et de reconnaissance.

À ma mère **Salima**,

Ma tendresse infinie, mon souffle de vie et ma lumière dans l'obscurité. C'est ton amour inconditionnel qui m'a portée lorsque mes forces m'abandonnaient, et tes prières secrètes qui ont ouvert les portes de l'espoir quand tout semblait s'éteindre. Ta douceur a pensé mes blessures, et ton cœur a été mon abri dans les nuits les plus sombres. Rien au monde ne pourra jamais égaler la pureté de ton amour ni la chaleur de ton étreinte.

À mon frère **Kheir Eddine**,

Toi qui as su être cette présence apaisante qui calme les tempêtes intérieures. Ta sérénité et ton soutien discret ont toujours été ma stabilité dans le tumulte de mes journées Merci d'avoir été là, sans bruit, avec la certitude rassurante de ton amour.

À mes sœurs **Imène** et **Nour El Houda**,

Vos sourires ont été des éclats de lumière dans mes instants d'épuisement. Votre tendresse et votre affection m'ont redonné vie lorsque je sombrais dans le découragement. Vous êtes mes étoiles, celles qui ont veillé sur mon ciel lorsque mes nuits devenaient trop noires.

À **moi-même,** Celle qui ne s'est jamais rendue, qui a résisté, combattu, et qui s'est relevée plus forte à chaque chute.

À celui qui a cru en moi, à celui qui a prié pour moi, à celui qui attendait ce jour avec fierté.

Résume

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'études portant sur **la conception, modélisation et réalisation d'un dispositif mécanique innovant**, destiné à **optimiser les opérations de filetage en fabrication mécanique**. Il s'agit d'un **dispositif de guidage** conçu pour améliorer la précision, la stabilité et la sécurité lors du filetage manuel ou semi-automatique, tout en réduisant les risques de casse d'outil **et** le niveau d'effort requis par l'opérateur.

Le projet a été mené dans une approche complète intégrant les différentes fonctions d'une entreprise industrielle : **bureau d'études**, **bureau des méthodes**, **bureau de contrôle**, et **atelier de réalisation**. La solution proposée a été **entièrement modélisée en CAO**, dimensionnée selon des critères mécaniques rigoureux, puis prototypée en atelier à l'aide de machines-outils à commande numérique, avant d'être **protégée par dépôt de brevet**.

Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité du dispositif à **guider le mandrin avec fluidité**, à **préserver l'alignement de l'outil**, et à **améliorer la qualité du filetage**. Le prototype final présente une solution viable et reproductible, adaptée aux ateliers de mécanique de précision et aux PME industrielles.

Ce mémoire reflète non seulement un **travail académique rigoureux**, mais également une **vision entrepreneuriale concrète**, ouvrant la voie à une **valorisation industrielle réelle** à travers un projet de startup.

« Optimiser l'efficacité industrielle par un guidage intelligent »

« Révolutionner l'avenir dès aujourd'hui »

Abstract

This thesis is part of a final-year engineering project focused on the **design, modeling, and prototyping of an innovative mechanical device** aimed at optimizing threading operations in mechanical manufacturing. The developed system is a **guiding mechanism** specifically designed to enhance precision, stability, and safety during manual or semi-automatic threading processes, while also reducing tool breakage and operator effort.

The project followed a comprehensive industrial approach, integrating all the key functions of a manufacturing company: **design office**, **methods office**, **quality control**, and **workshop production**. The proposed solution was fully modeled using CAD software, dimensioned based on rigorous mechanical criteria, and then prototyped using CNC machine tools—culminating in a **patented innovation**.

The results demonstrated the effectiveness of the device in smoothly guiding the chuck, maintaining proper tool alignment, and significantly improving threading quality. The final prototype offers a reliable, reproducible, and industrially viable solution, suitable for precision mechanics workshops and SMEs.

This thesis reflects not only rigorous academic work but also a **concrete entrepreneurial vision**, paving the way for **real industrial valorization through a startup project**.

“Empowering industrial efficiency through intelligent guidance”

“Threatening the future today”.

الملخص

يأتي هذا البحث في إطار مشروع تخرّج هندسي يُعنى بـ **تصميم، ونمذجة، وإنجاز نموذج أولي لجهاز ميكانيكي مبتكر،** يهدف إلى **تحسين عمليات التلبيس اللولبي** في مجال التصنيع الميكانيكي. يتمثل الابتكار في **آلية توجيه للمحور الحامل للعدّة** ، مصمّمة خصيصًا لتعزيز الدقة، والثبات، والسلامة أثناء عمليات التلبيس اليدوي أو شبه الآلي، مع تقليل مخاطر كسر الأدوات وتقليل الجهد المطلوب من المشغّل

مكتب الدراسات، مكتب :تم تنفيذ المشروع وفق **مقاربة صناعية متكاملة،** تشمل وظائف رئيسية داخل أي مؤسسة إنتاجية تم تصميم الحل باستخدام برامج التصميم الصناعي .**الطرق والأساليب، مكتب المراقبة التقنية، وورشة التصنيع** واحتُسبت أبعاده بناءً على معايير ميكانيكية دقيقة، ثم تم تصنيعه كنموذج أولي باستخدام آلات رقمية، قبل أن يُسجل (CAD) .كـ **ابتكار محمي ببراءة اختراع**

.أثبتت النتائج **كفاءة الجهاز في توجيه الماندران بسلاسة، والحفاظ على محاذاة الأدوات بدقة، وتحسين جودة التلبيس،** النموذج النهائي يُعد **حلًا عمليًا وقابلًا للتكرار والتطبيق الصناعي،** ومناسبًا لورش الميكانيك الدقيقة والمؤسسات الصغيرة .والمتوسطة

هذا العمل لا يُجسّد فقط **جهدًا أكاديميًا عالي المستوى،** بل يحمل أيضًا **رؤية ريادية واضحة،** ويمهد الطريق نحو **استثمار صناعي فعلي من خلال مشروع ناشئ**

" تعزيز الكفاءة الصناعية من خلال التوجيه الذكي"

" نصنع مستقبل الصناعة اليوم"

SOMMAIRE

Remerciements **1**

Dédicaces Faten **4**

Dédicaces **7**

Résume **9**

LISTE DES FIGURES **17**

LISTE DES TABLEAUX **21**

Introduction générale **22**

CHAPITRE I **24**

LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISE (PME) ET L'ORGANISATION INDUSTRIELLE **24**

I.1 Introduction 24

I.2. Généralités sur les PME et PMA. 25

I.2.1 Définition et aperçu historique des PME 25

I.2.2 Classification des entreprises 26

I.3 Les spécificités des PME 30

I.3.1 Fondements théoriques de la spécificité des PME 30

I.3.2 Caractéristiques spécifiques des PME 31

I.3.3 Avantages et inconvénients des PME 32

I.4. Organisation d'Enterprise 33

I.4.1 Introduction 33

I.4.2 Définition d'une entreprise industrielle 34

I.4.3 Fonctionnement d'une entreprise industrielle 35

I.4.4 Structure d'une entreprise industrielle 35

I.4.5. Organigramme d'organisation d'entreprise : 37

I.5 Présentation des services techniques de l'entreprise 37

I.5.1 Le Bureau d'Études : Missions et Responsabilités 38

I.5.2 Définition du Bureau d'Études 38

I.5.3 Missions du Bureau d'Études 39

I.5.4 Typologie des Bureaux d'Études 39

I.5.5 Fonctionnement des Bureaux d'Études 40

I.5.6 Intérêt du Recours à un Bureau d'Études 40

I.5.7 Rôle stratégique du Bureau d'Études 41

I.5.8 Le Dessin Technique et les Normes Associées 41

I.5.9 Cotation et Spécification Géométrique des Produits (GPS) 43
I.5.10 Recommandations ISO en matière de GPS 43
I.5.11 Principes fondamentaux du système GPS 45
I.6 Bureau de méthode « BM » 49
I.6.1 Mission du Bureau des Méthodes d'Usinage 49
I.6.2 Les Paramètres Clés dans l'Élaboration d'un Processus de Fabrication 50
I.6.3 Documents utilisés par le Bureau des Méthodes 50
I.6.4 Documents produits par le Bureau des Méthodes 51
I.6.5 Analyse du Dessin de Définition 51
I.7 Bureau de Contrôle et Métrologie 52
I.7.1 Le Bureau de Contrôle 53
I.7.2 Moyens et Instruments Métrologiques 54
1.7.3 Importance du bureau de contrôle dans la démarche qualité 55
I.8 La Métrologie 55
I.8.1 Généralités sur la Métrologie 56
1.8.2 La métrologie fondamentale (MF) 57
1.8.3 La métrologie industrielle (MI) 58
1.8.4 La métrologie légale (ML) 59
1.8.5 Les erreurs de contrôle 60
1.8.6 Utilité de la métrologie 61
I.9 Conclusion 62
***CHAPITRE II* 64**
***DIMENSIONNEMENT MECANIQUE ET PREPARATION D'UN PRODUIT EN MECANIQUE* 64**
II.1. Introduction 64
II.1.1 Définition d'un système technique 64
II.1.2 Bref historique 65
II.2. Modèles technologiques d'un système mécanique 65
II.2.1 Théorie des systèmes mécaniques 66
II.2.2 Modèles technologiques possible d'un système mécanique 67
II.2.3 Étude géométrique des systèmes mécanique 68
II.3. Dimensionnement en statique 68
II.3.1 Liaison dans un mécanisme 68
II.3.2 Torseurs associés aux liaisons 69
II.3.3 Liaison complètes / Partielles 69

II.3.4. Matériaux constitutifs : 69
II.4. Détermination des forces et moments dans un système mécanique 72
II.5. Détermination des efforts dans un système mécanique 72
II.6. Méthode de résolution des problèmes en statique 73
II.7. Méthode générale de résolution des problèmes en statique par torseurs 74
II.8. Résistance des pièces en statique 74
II.9. Contraintes dans la section critique A, contrainte équivalente 75
II.10. Rupture par fatigue-Historique 76
II.10.1. Introduction 76
II.10.2. Les 3 phases de la rupture 77
II.10.3. Modélisation des essais de Wöhler 77
II.10.4. Mise en évidence de la limite en fatigue pour les aciers 78
II.10.4. Dimensionnement avec Wöhler 78
II.10.5. Calcul de résistance à la fatigue Endurance une pièce (limite de la fatigue) 79
CHAPITRE III 81
USINAGE DE FILETAGE : TYPE DE PROCESSUS ET APPLICATION 81
III.1. Généralités 81
III.2 Techniques d'usinage du filetage 82
III.2.1 Usinage du filetage par enlèvement de matière 82
III.2.2 Usinage du filetage par déformation plastique 86
III.3 Caractéristiques technique du filetage 87
III.3.1 Caractéristiques de l'hélice 88
III.3.2 Profils de filetage et domaine d'applications 89
III.4 Conclusion 90
CHAPITR IV 91
PROCESSUS DE FABRICATION ET PREPARATION DES EQUIPEMENTS 91
IV.1 Introduction 91
IV.2 Origine du besoin et analyse fonctionnelle 93
IV.3 Objectif de la conception 94
IV.4 Présentation du dispositif 94
IV.5 Description de l'essence technique et fonctionnelle de dispositif. 95
IV.6. Processus de réalisation du dispositif. 97
IV.6.1 Choix de la matière d'œuvre 97
IV.6.2 Mode d'obtention de l'ébauche 98

IV.6.3 Préparation de l'ébauche 98
IV.6.4 Chois des outils de coupe 100
IV.6.5 Métrologie et contrôle de qualité 100
IV.7 Choix de la matière à usiner 100
IV.8 Choix des outils de coupe 102
IV.9 Choix de la machine-outil 103
IV.10. Conclusion 104
CHAPITRE V 105
MODELISATION ET ETUDE DU ROUTAGE D'USINAGE DU DISPOSITIF DE GUIDAGE POUR TRAVAUX DE FILETAGE 105
V.1. Introduction 105
V.2. Description du dispositif de guidage pour travaux de filetage 106
V.3. Modélisation des pièces mécaniques sous SolidWorks. 107
V.3.1 la modélisation dans l'ingénierie mécanique 108
V.3.2 Avantages de la modélisation 3D 108
V.3.3 Choix de l'outil numérique 109
V.3.4 Simulation et visualisation du modèle CAO 110
V.4 Elaboration du routage d'usinage du produit 110
V.5 Choix des conditions de coupe 113
V.5.1 Choix des critères de coupe pour le cas du tournage : 114
V.6 Programmation du routage d'usinage sur tour CNC sous CAMWorks 115
V.6.1 Le rôle du logiciel CAMWorks 116
V.6.2 Démarrage de CAMWorks 117
V.6.3 Description du logiciel ShopTurn 119
V.6.4 Les avantages de ShopTurn 121
V.7. Modélisation et étude du routage d'usinage des composants du dispositif 130
V.7.1. Routage d'usinage de l'arbre de guidage (pièce n°1) 132
V.7.2. Routage d'usinage de l'arbre de guidage (pièce n°2) 142
V.7.3. Routage d'usinage de l'adaptateur de guidage (pièce n°3) 152
V.7.4. Pièces d'achat et intégration 159
V.8. Phase de contrôle dimensionnel et validation fonctionnelle. 161
V.8.1. Introduction. 161
V.8.2 Objectifs de la phase de contrôle : 161
V.8.3 Moyens de contrôle utilisés : 162
V.8.4 Conclusion 165

Conclusion générale 167
Références 169

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de l'Organisation d'une entreprise..... 37
Figure 2 : Dessin de définition du produit fini 42
Figure 3 : Organigramme de GPS 44
Figure 4 : Principes du tolérancement géométrique..... 46
Figure 5 : Dessin de définition et tolérancement normalisé d'une pièce. 47
Figure 6 : Zones de tolérance et écarts admissibles 47
Figure 7 : Sceau original du BIPM..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 8 : Fabrication de pièces ; a) tournage : b) fraisage. 60
Figure 9: Illustration schématique d'un mécanisme statique 68
Figure 10 : Illustration Torseurs associés aux liaisons 69
Figure 11 : Classification des matériaux constitutifs 70
Figure 12 : Classification des matériaux en fonction du coût. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 13 : Classification des matériaux en fonction de l'élasticité et la rupture 71
Figure 14 : Classification des matériaux en fonction de la résistance des pièces en statique.. 71
Figure 15 : Classification des matériaux en fonction de la ténacité, rupture et fissure..... 72
Figure 16 : Illustration de la méthode de résolution des problèmes en statique 73
Figure 17 : Illustration de la méthode de résolution des problèmes en statique 74
Figure 18 : Illustration des contraintes dans la section critique A..... 75
Figure 19 : Représentation schématique du phénomène de fatigue 76
Figure 20 : Illustration des phases de rupture 77
Figure 21 : Modélisation des essais de Wöhler..... 77
Figure 22 : Illustration de la limite en fatigue pour les aciers[5] 78
Figure 23 : Dimensionnement avec Wöhler..... 78
Figure 24 : Etude comparative entre le modèle de Wöhler, réel et Basquin 79
Figure 25 : Illustration de la technique d'usinage du filetage au tour..... 83
Figure 26 : Technique de filetage à la fraise..... 84
Figure 27 : Technique d'usinage à matrice..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 28 : Illustration de la technique d'usinage par déformation plastique..... 86
Figure 29 : Production d'une hélice 88
Figure 30 : Différents profils du filetage..... 90
Figure 31 : Etat de livraison de l'acier C35..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 32 : Illustration des plaquettes en carbure métallique..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 33 : Illustration d'un tour CNC 3 axes modèle 104
Figure 34 : Représentation dessin éclatée du dispositif de guidage pour travaux de filetage 107
Figure 35 : Tour CNC modèle DMG MORI CLX 550 111
Figure 36 : Tourelle porte outil du tour CNC modèle DMG MORI CLX 550 112
Figure 37 : Tourelle porte outil du tour CNC modèle DMG MORI CLX 550 113
Figure 38 : Représentation schématique du système d'usinage ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 39 : Interface utilisateur de CAMWorks 117
Figure 40 : Schéma des étapes de création d'une gamme de fabrication 118
Figure 41 : Interface du logiciel ShopTum. ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 42 : Assistance optimale par affichant des images d'aide en couleur 122
Figure 43 : Interface du choix de la norme 122
Figure 44 : Interface du programme d'usinage 123
Figure 45 : Représentation des trajectoires du parcours de l'outil 123
Figure 46 : Interface de calcul automatique de la fréquence de rotation 124
Figure 47 : Interface de gestion des mouvements de positionnement 124
Figure 48 : Interface d'affichage du routage complet 125
Figure 49 : Interface de caractérisation des opérations en cours 125
Figure 50 : Affichage du dessin technique. 126
Figure 51 : Illustration du masque de saisie ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 52 : Représentation de la vue graphique ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 53 : Image d'aide pour élaboration de nouvelle gamme d'usinage **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 54 : Illustration de la possibilité de changement d'outil en cours d'usinage 128
Figure 55 : Illustration de la définition des plans de retrait 128
Figure 56 : Séquence d'usinage d'origine 129
Figure 57 : Séquence d'usinage optimisée par couper et insérer. ... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 58 : Dessin d'ensemble du dispositif avec filière 130
Figure 59 : Dessin d'ensemble du dispositif avec adaptateur ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 60 : Dessin éclaté du dispositif (a, avec filière, b : avec adaptateur) **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 61 : Dessin de définition de l'arbre de guidage (pièce n°1) 133
Figure 62 : Mode d'obtention du brute pour usinage de la pièce n°1 **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 63 : Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères 134
Figure 64 : Dressage de dimensionnement de la brute de la première face 135

Figure 65 : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la premiére face 135
Figure 66 : Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de l'arbre 136
Figure 67 : Chariotage du contour de la première face de l'arbre... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 68 : Fin de programme de la première partie 137
Figure 69 : Simulation 2D du programme de la première partie 137
Figure 70 : Simulation 3D du programme de la première partie 138
Figure 71 : Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères 138
Figure 72 : Dressage de dimensionnement de la brute de la deuxième face 139
Figure 73 : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la deuxième face 139
Figure 74 : Chariotage du contour de la deuxième face de l'arbre 140
Figure 75 : Simulation 2D du programme de la deuxième partie 140
Figure 76 : Simulation 3D du programme de la deuxième partie 141
Figure 77 : Illustration des opérations d'usinage des deux faces de l'arbre..... 141
Figure 78 : Dessin de définition de fourreau (pièce n°2) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 79 : Mode d'obtention du brute pour usinage de la pièce n°2 144
Figure 80 : Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères 145
Figure 81 : Dressage de dimensionnement de la brute de la première face 145
Figure 82 : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la première face 146
Figure 83 : Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de fourreau 146
Figure 84 : Chariotage du contour de la première face de fourreau 147
Figure 85 : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la deuxième face 147
Figure 86 : Chariotage du contour de la deuxième face de fourreau 148
Figure 87 : Chariotage du contour de la deuxième face de fourreau 148
Figure 88 : Illustration de l'opération du rainure rectiligne 149
Figure 89 : Illustration de l'opération du perçage profond 149
Figure 90 : illustration des cercles de position 150
Figure 91 : Fin de programme de la deuxième pièce 150
Figure 92 : Simulation 2D du programme de la deuxième partie 151
Figure 93 : Simulation 3D du programme de la deuxième partie 151
Figure 94 : Illustration des opérations d'usinage des deux faces de fourreau..... 152
Figure 95 : Dessin de définition de l'adaptateur (pièce n°3)..... 153
Figure 96 : Mode d'obtention du brute pour usinage de la pièce n°3 154
Figure 97 : Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères 154

Figure 98 : Dressage de dimensionnement de la brute..... 155
Figure 99 : : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la première face 155
Figure 100 : Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de l'adaptateur 156
Figure 101 : Chariotage du contour..... 156
Figure 102 : Illustration de l'opération de filetage..... 157
Figure 103 : Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage..... 157
Figure 104 : Simulation 2D du programme 158
Figure 105 : Simulation 3D du programme 158
Figure 106 : Illustration de la filière..... 159
Figure 107 : : Illustration de la bille..... 160
Figure 108 : : Illustration de ressort 160
Figure 109 : Vis sans tête à six pans creux - STHC - DIN 914 - M 10 x 10……..172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Instrument Fonction Précision typique…… **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2 Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier C35……101

Tableau 3 Nomenclature des différents composants du dispositif……...**Erreur ! Signet non défini.**

Introduction générale

Dans un contexte industriel de plus en plus compétitif et automatisé, la précision et la fiabilité des opérations d'usinage représentent un enjeu stratégique majeur pour les entreprises manufacturières. Parmi les procédés fondamentaux de fabrication, le filetage occupe une place cruciale en tant que moyen d'assemblage mécanique incontournable. Or, malgré les avancées technologiques, cette opération demeure sujette à de nombreuses contraintes techniques, notamment lorsqu'elle est réalisée manuellement ou avec des moyens conventionnels. Les défauts d'alignement axial, la difficulté d'engagement de l'outil, la rupture prématurée des outils, le pas de vis abîmé, le filetage foiré garantissent une pièce détruite sans oublier les défauts géométriques tels sont les problèmes qui impactent la qualité, la sécurité et la rentabilité des productions. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de fin d'études, dont l'objectif principal est la conception et la modélisation d'un dispositif de guidage pour travaux de filetage, adaptable à différents types d'outils, compatible avec les systèmes de montage et de fixation de tous les type de machine-outil.

Cette solution innovante vise à assurer un guidage axial stable et précis pendant l'opération de filetage, tout en contrôlant les efforts appliqués sur l'outil, en diminuant le taux de rejet des pièces, et en prolongeant la durée de vie des outils de coupe. Le travail présenté dans ce mémoire s'appuie sur une démarche scientifique rigoureuse, combinant des connaissances théoriques en mécanique, des méthodes de dimensionnement, une analyse fonctionnelle approfondie, ainsi que des outils numériques de conception assistée par ordinateur (CAO/FAO). Il se compose de cinq chapitres complémentaires, articulés comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à une étude générale sur les Petites et Moyennes Entreprises (PME) industrielles, leur rôle économique et organisationnel, ainsi que la structure fonctionnelle des services techniques tels que le bureau d'études, le bureau des méthodes, et le bureau de contrôle et métrologie, qui forment le socle du cycle de développement du produit.

- Le deuxième chapitre aborde le dimensionnement mécanique du système, en s'appuyant sur l'analyse des liaisons, la modélisation des efforts statiques à l'aide des torseurs, la sélection rationnelle des matériaux, et les calculs de contraintes dans les zones critiques, sans négliger les phénomènes de fatigue qui influencent la fiabilité à long terme des pièces mécaniques.

- Le troisième chapitre explore les différentes techniques d'usinage du filetage, qu'il s'agisse de procédés par enlèvement de matière ou par déformation plastique. Les caractéristiques géométriques du filet, les profils standardisés, les tolérances, ainsi que les contraintes d'usinabilité sont analysées pour mieux adapter la conception du dispositif aux exigences réelles de l'atelier.

- Le quatrième chapitre traite de la conception proprement dite du dispositif, en intégrant l'analyse fonctionnelle, la rédaction du cahier des charges, le choix des matériaux, les méthodes d'obtention des ébauches, les outils de coupe, et les moyens de contrôle. Ce chapitre constitue une passerelle entre la théorie et la fabrication concrète du prototype.

- Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation 3D et à l'étude de la gamme d'usinage. À travers l'utilisation de SolidWorks pour la modélisation géométrique, et de logiciels FAO tels que CAMWorks et ShopTurn pour la simulation et la génération du code d'usinage CNC, nous avons pu anticiper la fabrication et valider les choix technologiques retenus.

Ce projet, réalisé en partie dans le cadre d'un stage technique au sein d'un environnement industriel, nous a permis de mettre en œuvre nos compétences en ingénierie de conception, en modélisation numérique, en analyse mécanique et en préparation à la fabrication. Plus qu'un simple travail académique, cette étude propose une solution technique novatrice, ergonomique, et potentiellement industrialisable, répondant aux besoins concrets des ateliers mécaniques et ouvrant des perspectives vers la protection intellectuelle par brevet et la création d'une start-up technologique spécialisée dans les dispositifs d'aide à l'usinage de précision.

CHAPITRE I

LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISE (PME) ET L'ORGANISATION INDUSTRIELLE

I.1 Introduction

Les Petites et Moyennes Entreprises (PME) et les Petites et Moyennes Industries (PMA) occupent une place centrale dans le dynamisme économique mondial. Véritables catalyseurs de croissance, elles contribuent de manière significative à la création d'emplois, à la compétitivité des marchés et à l'innovation technologique. Leur flexibilité, leur capacité d'adaptation et leur proximité avec les écosystèmes locaux en font des acteurs clés du développement durable et de la transformation industrielle.

Les PME, grâce à leur structure agile et réactive, stimulent l'innovation et favorisent l'émergence de solutions adaptées aux besoins évolutifs des consommateurs et des entreprises. Elles jouent un rôle essentiel dans la diversification économique, la valorisation des savoir-faire locaux et l'optimisation des chaînes de valeur. Parallèlement, les PMA, en tant que moteurs de l'industrialisation, renforcent les capacités de production et assurent une compétitivité accrue sur les marchés nationaux et internationaux.

Toutefois, ces entreprises doivent relever des défis majeurs, notamment en matière d'accès au financement, de transition numérique, de modernisation des processus industriels et de gestion des talents. La mise en place de stratégies robustes, intégrant l'innovation, la transformation digitale et l'optimisation des ressources, est essentielle pour garantir leur pérennité et leur expansion.

L'accompagnement institutionnel, l'amélioration de l'environnement réglementaire et le développement de partenariats stratégiques sont des leviers déterminants pour favoriser la croissance des PME et PMA. En renforçant leur compétitivité et leur capacité d'innovation, ces entreprises jouent un rôle fondamental dans la structuration d'économies résilientes et performantes.

Ce chapitre, se concentrera sur une analyse approfondie des PME et PMA en mettant en lumière leurs structures organisationnelles, leurs processus internes, et leur rôle clé dans le

développement économique. À travers des études de cas et des données empiriques, il offrira une perspective claire sur les défis et les opportunités auxquels ces entreprises font face. Une attention particulière sera portée sur leur capacité à innover, à s'adapter aux évolutions du marché et à contribuer au développement durable

I.2. Généralités sur les PME et PMA.

"Depuis des années, une recherche en petite et moyenne entreprise s'est faite notamment par un nombre croissant de colloques, la création d'associations, la multiplication de revues spécialisées attestent de la vitalité de cette communauté scientifique" (Torrès O., 1998)[1]. Grâce à leur dimension humaine, ces entreprises sont qualifiées comme étant un « modèle d'adaptation à la crise » (Torrès O., 1998)[1] par leur enjeu économique qui se caractérise par une souplesse, un dynamisme et une flexibilité, cela veut dire que les PME prennent en considération les caractéristiques et les changements de l'environnement dans lequel elles évoluent.

Vue son statut dynamique, la petite et moyenne entreprise est considérée comme une cellule de richesse, une source de satisfaction aux besoins économiques et sociaux, en matière de croissance économique et de développement régional, comme un « enjeu de taille11 » pour amorcer la lutte contre le chômage, etc.

La définition de la PME n'est inanimée. En effet, "ce secteur n'a rien d'homogène puisqu'on compte les très petites entreprises, les petites, les moyennes, les travailleurs autonomes, les artisans, le café du coin de la rue, cybercafés, etc." (Merzouk F., 2009) [2]. Du fait de leur caractère hétérogène, une définition statistique permet bien de cerner l'importance du facteur taille comme critère de découpage (Torrès O., 1998)[1].

"En Algérie, comme dans d'autres pays, les PME constituent la grande partie du tissu économique, bien que l'importance accordée à celles-ci n'est pas récente. Ainsi les résultats sont apparus qu'à partir des années 2000, après une série de mesures d'accompagnement des entreprises pour les amener à acquérir une capacité suffisante de compétitivité" (Chelil, A. et Ayad SM., 2009).[3]

I.2.1 Définition et aperçu historique des PME

La notion de petite et moyenne entreprise (PME) peut être appréhendée à partir de critères internes à la structure même de l'entreprise. Pour cerner cette catégorie d'entreprises, deux

démarches principales se dégagent : l'une à dominante quantitative et descriptive, l'autre davantage qualitative et analytique. Ces deux perspectives, bien qu'autonomes, s'inscrivent dans la logique des théories néoclassiques de la firme, et se révèlent en réalité complémentaires.

La première démarche s'attache essentiellement à des indicateurs visibles et mesurables de l'entreprise, sans toutefois pénétrer son fonctionnement interne ce que certains appellent la « boîte noire ».

À l'opposé, la seconde démarche privilégie une lecture managériale et organisationnelle, mettant en lumière l'interaction de l'entreprise avec son environnement socio-économique. Qu'ils soient d'ordre quantitatif ou qualitatif, les critères mobilisés par ces deux approches demeurent de nature interne à l'entité étudiée.

I.2.2 Classification des entreprises

1. Classification selon la nature économique

L'analyse économique des entreprises permet de les classer selon trois dimensions complémentaires [4]**:**

- Par secteur d'activité,
- Par nature des opérations réalisées,
- Par branche d'activité.

➢ Classification par secteur

Selon ce critère, on distingue traditionnellement trois grands secteurs économiques :

- **Secteur primaire** : il comprend les structures économiques dont l'activité repose principalement sur l'exploitation directe des ressources naturelles, comme l'agriculture, la pêche et l'élevage.
- **Secteur secondaire** : il regroupe les entreprises ayant pour vocation la transformation des matières premières en produits finis. Il s'agit notamment de l'ensemble des industries manufacturières et extractives.
- **Secteur tertiaire** : il englobe toutes les entreprises fournissant des services. Ce secteur est particulièrement diversifié et inclut des domaines tels que le transport, la distribution, les loisirs, le crédit, les assurances, l'hôtellerie, etc.

- **Classification selon le type d'opérations réalisées**

Les activités menées par les entreprises peuvent être réparties en cinq grandes catégories :

- **Activités agricoles** : elles reposent sur l'exploitation du milieu naturel et sont fortement dépendantes des facteurs climatiques et géographiques.
- **Activités industrielles** : elles consistent à transformer les matières premières en produits finis à travers des procédés mécaniques, chimiques ou technologiques.
- **Activités commerciales** : ces entreprises jouent un rôle clé dans la chaîne de distribution des biens. Elles peuvent exercer en tant que grossistes (achat en grande quantité auprès des producteurs et revente à d'autres commerçants), semi-grossistes (intermédiaires entre grossiste et détaillant) ou détaillants (vente directe aux consommateurs).
- **Activités de services** : elles sont subdivisées en deux catégories :
  - ✓ **Services destinés aux entreprises** : tels que les cabinets d'études, les agences de publicité ou les sociétés de conseil.
  - ✓ **Services aux particuliers** : comme les services de transport, de restauration ou de location.
- **Activités financières** : menées principalement par les banques, elles portent sur la gestion des flux monétaires, notamment la création, la mobilisation, la transformation et la redistribution de capitaux et de l'épargne.

- **Classification par branche d'activité**

Contrairement au secteur, qui regroupe plusieurs types d'activités, une **branche** désigne un ensemble d'entreprises fabriquant essentiellement un même type de produit. Par exemple, la branche pharmaceutique ou la branche textile.

Les entreprises appartenant à une même branche présentent souvent des caractéristiques communes, notamment :

- L'utilisation de procédés techniques similaires,
- Des matières premières identiques,
- Des intérêts communs pouvant conduire à la mise en place de services partagés (recherche, achats, vente) ou à la création de filiales communes.

2. Classification selon la taille

Les entreprises varient considérablement en fonction de leur dimension, allant de la microstructure à la grande firme.

a. Effectif du personnel

Le nombre de salariés constitue un critère couramment utilisé pour évaluer la taille d'une entreprise. On distingue ainsi :

- **Très petites entreprises (TPE)** : moins de 5 salariés.
- **Petites entreprises (PE)** : entre 5 et 10 salariés.
- **Moyennes entreprises (ME)** : entre 10 et 100 salariés, pouvant aller jusqu'à 500 selon certains critères spécifiques.
- **Grandes entreprises** : plus de 500 salariés.

b. Le chiffre d'affaires

Le chiffre d'affaires représente le volume total des ventes réalisées par l'entreprise sur une période donnée. Il constitue un indicateur clé pour évaluer l'importance économique d'une structure. Il joue plusieurs rôles :

- Il permet de mesurer l'évolution de l'entreprise dans le temps,
- Il sert à la hiérarchisation des entreprises en fonction de leur volume d'activité,
- Il constitue un outil de gestion : une baisse du chiffre d'affaires peut signaler une défaillance stratégique ou commerciale,
- Il permet également des comparaisons entre entreprises d'un même secteur.

1. Classification juridique

Sur le plan juridique, le terme **entreprise** fait référence à une activité économique exercée par une ou plusieurs personnes, qu'elles soient physiques ou morales. La **personne morale**, entité juridique distincte des individus qui la composent, dispose d'un patrimoine propre et de droits similaires à ceux d'une personne physique.

On distingue deux grandes formes juridiques :

- **Entreprises sans personnalité morale (personnes physiques)**

Ces structures sont directement liées à la personne de l'entrepreneur :

- Entreprise individuelle,
- Société civile de personnes,
- Société en nom collectif (SNC),
- Société en commandite simple,
- Société en participation.

- **Entreprises dotées de la personnalité morale**

Ce sont des entités juridiques autonomes, responsables devant la loi :

- **Société par actions** (ou compagnie, à but lucratif),
- **Organisme à but non lucratif**,
- **Coopérative**.

En Algérie, la législation commerciale est comparable à celle appliquée dans de nombreux autres pays. Elle repose sur la liberté d'entreprendre et l'accès au statut de commerçant pour toute personne, physique ou morale, nationale ou étrangère. L'enregistrement au registre du commerce est obligatoire, sauf dans le cas de l'ouverture d'un bureau de représentation. Toutefois, seules les sociétés (y compris les EURL) peuvent légalement pratiquer des activités d'import/export, à condition de disposer d'un capital social minimum de 2 millions de dinars[3]**.**

Parmi les principales formes juridiques utilisées :

- **La société à responsabilité limitée (SARL)** : adaptée aux petites et moyennes entreprises. Le capital social minimum est de 100 000 DA, réparti en parts sociales égales d'une valeur minimale de 1000 DA. Elle peut compter de 1 à 7 associés, commerçants ou non, et est dirigée par un gérant (algérien ou étranger).
- **L'entreprise unipersonnelle à responsabilité limitée (EURL)** : forme simplifiée de la SARL à un seul associé. Elle permet aux entrepreneurs individuels d'exercer en limitant leur responsabilité au capital investi, protégeant ainsi leur patrimoine personnel.

- **La société en nom collectif (SNC)** : ici, tous les associés sont commerçants et responsables de manière indéfinie et solidaire des dettes sociales. Les parts sont nominatives et ne peuvent être cédées qu'avec l'accord unanime des associés.
- **La société en commandite simple** : composée de commandités (associés gérants responsables indéfiniment) et de commanditaires (responsables dans la limite de leurs apports).
- **La société en commandite par actions** : structure hybride entre la société en nom collectif et la société par actions.
- **Le groupement** : constitué sans capital entre plusieurs personnes morales, pour une durée déterminée, il vise à mutualiser les moyens et améliorer la performance de ses membres à travers la coopération économique [3]**.**

I.3 Les spécificités des PME

I.3.1 Fondements théoriques de la spécificité des PME

Une véritable théorie de la petite et moyenne entreprise (PME) et de son mode de gestion a été élaborée par la communauté des **PMistes** un ensemble de chercheurs spécialisés en management des PME, rassemblés notamment au sein d'organismes internationaux comme l'**ICSB** (International Council for Small Business) et l'**AIREPME** (Association Internationale de Recherche en PME) (Torrès O., p.48) **[1].**

Cette approche repose sur une relecture critique des concepts classiques, en mettant en évidence non plus les économies d'échelle, de champ et d'apprentissage traditionnellement associées à la grande entreprise mais plutôt leurs contreparties inverses, soit les déséconomies d'échelle, de champ et d'expérience, qui caractérisent les PME selon les travaux de Marchesnay et d'autres chercheurs[5]**.**

1. Les déséconomies d'échelle

Lorsque la taille d'une entreprise augmente, elle peut être confrontée à des surcoûts organisationnels. Passé un certain seuil, la complexité structurelle génère des rigidités : bureaucratisation excessive, communication défaillante, lenteur décisionnelle… Autant de facteurs qui peuvent inverser les bénéfices initialement apportés par l'agrandissement[5].

Les très grandes entreprises sont ainsi adaptées à la production de masse et à la standardisation, tandis que les très petites entreprises trouvent leur avantage dans des productions originales, à forte valeur ajoutée, bien que coûteuses. Dans de nombreux secteurs, notamment les services, la taille réduite devient même un atout. De plus, les innovations technologiques comme l'automatisation et l'informatisation ont réduit l'importance stratégique des économies d'échelle.

2. Les déséconomies de champ

La grande entreprise tire souvent parti d'une diversification de ses produits, ce qui lui permet d'amortir les risques et de mutualiser certaines charges. En revanche, cette logique peut se retourner contre elle : trop de diversification peut entraîner une perte d'identité, une dispersion des ressources et un affaiblissement des compétences-clés.

À l'inverse, la spécialisation des PME leur confère une maîtrise approfondie de leur savoir-faire. En se concentrant sur des niches spécifiques, certaines PME atteignent un quasi-monopole sur des marchés hautement ciblés. C'est le cas des "PME champions", leaders mondiaux dans leur domaine grâce à une adéquation fine entre une technologie de pointe et des besoins précis à l'échelle globale[5]**.**

3. Les déséconomies d'expérience

La théorie de l'apprentissage stipule que plus une tâche est répétée, plus son exécution devient efficace, réduisant ainsi les coûts. Cette logique est toutefois valable en environnement stable. Lorsque le contexte devient instable et évolutif, l'expérimentation, l'agilité et la capacité à innover deviennent les nouveaux leviers de performance.

Les PME, souvent peu formalisées, dotées d'équipes polyvalentes et d'une grande souplesse organisationnelle, sont ainsi mieux préparées à naviguer dans l'incertitude que certaines grandes entreprises[5]**.**

I.3.2 Caractéristiques spécifiques des PME

Les observations précédentes permettent d'identifier plusieurs traits distinctifs des petites et moyennes entreprises[6]**,** regroupés ici en points clés :

- ✓ **Une gestion centralisée et personnalisée**, avec un dirigeant fortement impliqué dans toutes les décisions stratégiques et opérationnelles.
- ✓ **Une faible division du travail**, où dirigeants et collaborateurs sont appelés à remplir plusieurs fonctions, renforçant la polyvalence.
- ✓ **Une logique décisionnelle intuitive**, basée sur une séquence rapide : intuition – décision – action. La stratégie est souvent informelle et flexible.
- ✓ **Un système d'information interne simplifié**, favorisant la communication directe entre la direction et les employés.
- ✓ **Un système d'information externe peu structuré**, du fait de la proximité géographique et relationnelle avec le marché.
- ✓ **Une faible influence sur l'environnement**, en raison de leur taille, les PME subissent davantage les changements qu'elles ne les provoquent.
- ✓ **Une ouverture forte à la concurrence**, avec peu de barrières à l'entrée ou à la sortie, ce qui explique les taux élevés de création et de disparition d'entreprises.
- ✓ **Un faible niveau de formalisation** dans les PME de proximité (commerçants, particuliers), tandis que les structures opérant sur des marchés plus complexes (B2B, administration) développent une organisation plus formelle.
- ✓ **Une formalisation croissante selon l'ampleur du marché** : les PME locales sont peu structurées, mais celles visant des marchés nationaux ou internationaux doivent renforcer leur organisation pour répondre aux exigences de performance et d'efficacité[6]**.**

I.3.3 Avantages et inconvénients des PME

a. Atouts des PME

Malgré leur vulnérabilité, de nombreuses PME parviennent à s'adapter et à prospérer grâce à certains avantages structurels et stratégiques :

- Une capacité d'adaptation élevée, qui leur permet de suivre les évolutions rapides de l'environnement.
- Deux compétences distinctives majeures **:**
  - ✓ La flexibilité**,** dans l'utilisation des ressources et la prise de décision,
  - ✓ L'interactivité**,** liée à leur position dans la chaîne de valeur et à leur proximité avec les acteurs économiques.

- Un rôle de moteur économique**,** en tant que source de croissance, de création d'emplois et de réponse aux besoins sociaux.
- Des charges salariales réduites, ce qui atténue les impacts des crises économiques.
- Une réactivité stratégique**,** leur permettant de saisir des opportunités rapidement, notamment sur des marchés à cycles courts.
- Une ouverture naturelle à la productique, en tant que levier d'adaptation technologique.
- Un fort potentiel d'innovation**,** notamment dans les domaines de haute technologie (High Tech).

b. Faiblesses des PME

Cependant, les PME sont également confrontées à des limites structurelles et organisationnelles importantes, qui expliquent un taux de mortalité élevé :

- Des difficultés financières chroniques, souvent dues à un manque de fonds propres, un faible capacité d'autofinancement, et une forte dépendance aux retards de paiement.
- Une gestion commerciale et RH peu structurée**,** nuisant à la compétitivité et à la pérennité.
- Des compétences entrepreneuriales parfois insuffisantes, liées à un manque de formation ou d'expérience.
- Une instabilité des résultats, rendant la PME vulnérable aux fluctuations conjoncturelles.
- Un accès limité aux financements de marché, notamment en raison de leur forme juridique, ce qui les exclut des outils réservés aux grandes sociétés.
- Une dépendance forte à la sous-traitance, qui les rend sensibles à la réduction des commandes des entreprises donneuses d'ordre.

I.4. Organisation d'Enterprise

I.4.1 Introduction

La structure d'une entreprise désigne l'ensemble des mécanismes et des règles par lesquels celle-ci répartit les tâches, organise les flux d'information, coordonne les actions et supervise les résultats. Cette organisation est généralement représentée à l'aide d'un organigramme**,**

outil graphique illustrant la hiérarchie, la répartition des responsabilités et les relations de dépendance entre les différentes entités internes, avec la direction générale positionnée à son sommet.

La forme organisationnelle d'une entreprise est étroitement liée à sa taille et à la nature des produits ou services qu'elle propose. Ainsi, l'évolution d'un produit au sein de la chaîne de valeur depuis la conception jusqu'à la distribution mobilise plusieurs fonctions commerciales, techniques et économiques, dont l'agencement varie selon l'envergure de l'entreprise. Dans les grandes structures, ces fonctions sont confiées à des services spécialisés. À l'inverse, dans les petites entreprises, elles sont souvent centralisées au sein d'un même service ou prises en charge par un nombre restreint de collaborateurs polyvalents[7]**.**

I.4.2 Définition d'une entreprise industrielle

Une entreprise industrielle est une entité économique spécialisée dans la production de biens ou de services issus d'une transformation physique ou chimique de matières premières ou de composants. Ces entreprises, de tailles variées allant de la PME artisanale aux groupes industriels internationaux, opèrent dans plusieurs secteurs clés, parmi lesquels :

- L'aéronautique, le spatial et la défense,
- L'industrie automobile,
- La fabrication d'équipements mécaniques (machines, pièces, systèmes de production…),
- La construction navale,
- Le ferroviaire,
- La métallurgie (sidérurgie, fonderie, etc.),
- Les équipements énergétiques,
- L'électrique, l'électronique, le numérique et l'informatique.

Chacun de ces domaines repose sur un processus de fabrication complexe et structuré, nécessitant des compétences techniques avancées et une organisation rigoureuse [2].

I.4.3 Fonctionnement d'une entreprise industrielle

Dans le domaine de la **construction mécanique**, les composants entrant dans la constitution de systèmes techniques ou de biens de consommation sont obtenus par une série d'opérations successives, parmi lesquelles on distingue notamment :

- L'élaboration des matériaux, étape initiale visant à obtenir la matière première adaptée,
- La mise en forme, qui permet de produire des pièces brutes par déformation ou moulage,
- L'usinage, consistant à enlever de la matière afin d'obtenir des pièces aux dimensions et états de surface souhaités.

La réalisation d'un produit fini mobilise diverses fonctions clés, parmi lesquelles :

- La conception et le développement, assurant l'étude technique du produit,
- La préparation de la fabrication, visant à planifier et optimiser les moyens de production.

Le temps, les ressources et les compétences alloués à chacune de ces fonctions dépendent de la complexité du produit**,** du volume de production (petite, moyenne ou grande série), ainsi que des exigences de qualité. Les principaux services impliqués dans cette chaîne de valeur sont :

- Le Bureau d'Études (BE), chargé de la conception technique et des plans,
- Le Bureau des Méthodes (BM)**,** responsable de la planification des procédés de fabrication,
- Les ateliers de production, où s'effectue la fabrication proprement dite.

I.4.4 Structure d'une entreprise industrielle

Une entreprise industrielle se structure autour d'une mission principale : **produire des biens ou services dans le but de générer une valeur ajoutée**, traduite par des bénéfices. Cette organisation repose sur un organigramme hiérarchique distinguant plusieurs types de services, répartis selon leur rôle dans la chaîne de valeur [7] **:**

1. Services transversaux

Ces services, bien qu'indirectement liés au produit, sont indispensables au fonctionnement global de l'entreprise. Ils agissent en soutien de toutes les autres entités fonctionnelles. On y retrouve notamment :

- La direction générale et administrative**,**
- Les services de comptabilité (générale et analytique),
- Le secrétariat exécutif**,**
- Le service juridique**,** etc.

2. Services de support

Ces unités assurent la gestion des ressources matérielles, humaines et financières. Elles garantissent le bon déroulement des opérations internes. Cela inclut :

- La gestion des ressources humaines**,**
- La gestion patrimoniale et financière**,**
- La maintenance et la sécurité**,**
- Les systèmes d'information**, etc.**

3. Services opérationnels « de réalisation »

Ces services sont directement impliqués dans la création de valeur à travers la conception, la production et la commercialisation du produit. On peut les regrouper ainsi :

- **Marketing et analyse du marché** : identification des besoins, veille concurrentielle, positionnement du produit,
- **Conception et recherche** : développement technique, innovation,
- **Production industrielle** : industrialisation, fabrication, contrôle qualité,
- **Commercialisation** : stratégie de vente, service client, SAV (interne),
- **Distribution** : logistique, livraison, suivi client (externe).

I.4.5. Organigramme d'organisation d'entreprise :

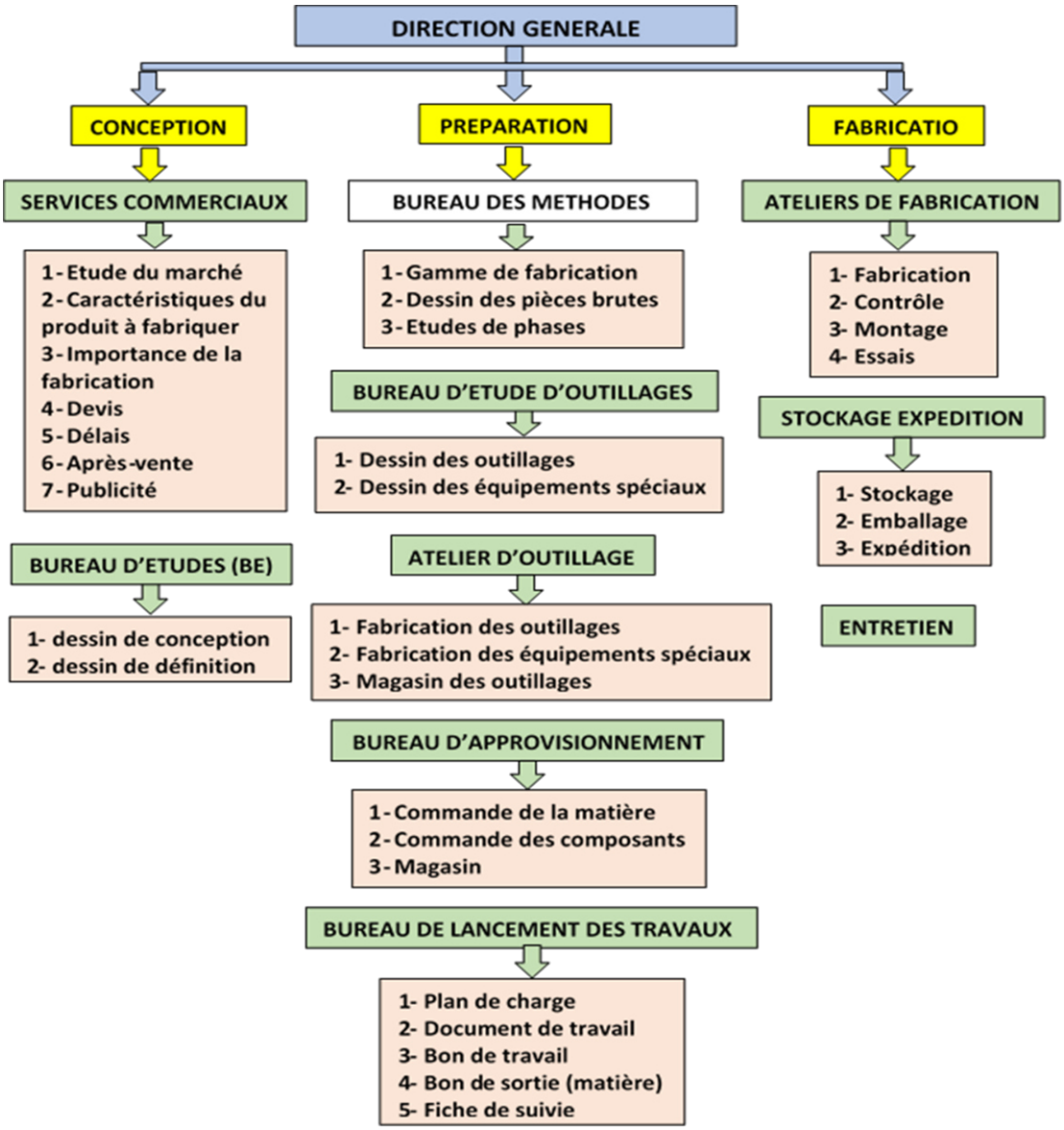


Figure 1 : *Organigramme de l'Organisation d'une entreprise.*

I.5 Présentation des services techniques de l'entreprise

Dans le cadre d'une production industrielle organisée et efficiente, les services techniques représentent un levier stratégique fondamental, assurant l'articulation cohérente entre les phases de conception, de fabrication et de contrôle qualité des produits. Ces entités comprennent notamment le bureau d'études, le bureau des méthodes ainsi que le bureau de contrôle et métrologie. Chacun de ces services joue un rôle complémentaire au sein du processus industriel global.

Le bureau d'études intervient dès l'amorce du projet, en transformant les idées en solutions techniques concrètes. Il conçoit et élabore les plans en tenant compte des exigences fonctionnelles. Le bureau des méthodes, pour sa part, est chargé d'organiser et d'optimiser les opérations de fabrication en prenant en compte les ressources humaines et matérielles, les capacités des machines-outils et les contraintes liées à la production. Enfin, le bureau de contrôle et métrologie assure le respect rigoureux des normes de qualité à travers le contrôle dimensionnel et fonctionnel des pièces produites. En travaillant de manière coordonnée, ces services assurent à l'entreprise une performance industrielle durable, renforçant sa compétitivité, son innovation et sa réactivité face aux exigences du marché en matière de qualité, de délais et de productivité.

I.5.1 Le Bureau d'Études : Missions et Responsabilités

Le bureau d'études **BE** désigne une unité spécialisée dans l'interprétation de données techniques, regroupant généralement des ingénieurs et des techniciens qualifiés. Sa mission principale consiste à réaliser des études et analyses visant à orienter et à justifier les choix techniques et structurels d'un projet. Ces prestations, à forte valeur ajoutée intellectuelle, comprennent la formulation de recommandations basées sur des calculs avancés, la proposition de solutions techniques adaptées à la réalisation des ouvrages, ainsi qu'un accompagnement expert dans l'évaluation de la qualité des résultats.

Les bureaux d'études interviennent dans des secteurs variés tels que l'industrie, le génie civil, l'environnement, les technologies de l'information ou encore l'organisation des processus. On se concentrera ici sur les BE du domaine du bâtiment, qui collaborent étroitement avec les maîtres d'ouvrage ou les équipes de maîtrise d'œuvre. Ces bureaux sont multiples, chacun étant spécialisé selon une discipline de l'ingénierie.

I.5.2 Définition du Bureau d'Études

Un bureau d'études se définit comme une entité de service réunissant des spécialistes techniques – ingénieurs et techniciens – ayant pour mission d'interpréter des données afin de proposer des solutions techniques fiables et adaptées aux projets. Dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, ces bureaux apportent un soutien technique à la maîtrise d'ouvrage en collaborant avec les architectes sur des projets de construction, de réhabilitation ou d'aménagement.

Ils réalisent des études de faisabilité et d'exécution, basées sur des analyses structurelles, des dimensionnements et des chiffrages, et accompagnent ainsi les décisions du maître d'ouvrage. Ces éléments sont ensuite traduits en plans détaillés et documents techniques pour permettre la mise en œuvre des travaux. Le bureau est dirigé par un ingénieur qui supervise l'analyse des besoins, coordonne les équipes et valide les études produites. Le dessinateur-projeteur, quant à lui, élabore les plans d'exécution à partir des données calculées par les ingénieurs.

I.5.3 Missions du Bureau d'Études

Le bureau d'études est composé d'un personnel pluridisciplinaire : ingénieurs, techniciens, architectes, consultants spécialisés dans divers domaines (mécanique, électricité, environnement, etc.). Il intervient à la demande des professionnels en charge de la coordination de projets (architectes, maîtres d'œuvre…), leur apportant une expertise technique approfondie pour mener à bien les travaux.

Les principales missions du BE sont :

- Analyser et comparer les données techniques à travers des méthodes de calcul rigoureuses ;
- Proposer des solutions opérationnelles et un accompagnement technique pour la mise en œuvre du projet ;
- Fournir, le cas échéant, une évaluation qualitative des réalisations en aval.

I.5.4 Typologie des Bureaux d'Études

Pour couvrir l'ensemble des dimensions d'un projet, plusieurs types de bureaux d'études coexistent, chacun répondant à des problématiques spécifiques :

1. **BE Structure** : Évalue la stabilité de la structure du bâtiment, en optimisant sa résistance selon les conditions climatiques, l'emplacement géographique et les matériaux utilisés.
2. **BE Géotechnique** : Analyse la nature des sols afin de déterminer les fondations les plus adaptées et assurer leur bon dimensionnement.
3. **BE Assainissement** : Étudie les caractéristiques du terrain pour recommander le système d'assainissement le plus approprié à l'ouvrage.

4. **BE Infiltrométrie** : Évalue la performance à l'air du bâtiment, en portant une attention particulière aux points sensibles (portes, fenêtres, joints).
5. **BE Acoustique** : Conçoit des solutions pour limiter les nuisances sonores, notamment dans les bâtiments publics ou mitoyens.
6. **BE Fluides** : Gère les réseaux d'électricité, d'eau et de données numériques. Il veille à l'installation conforme des systèmes énergétiques et de communication.
7. **BE Thermique** : Propose des solutions techniques pour améliorer la performance énergétique, en conformité avec la réglementation thermique RT 2012.

I.5.5 Fonctionnement des Bureaux d'Études

Les bureaux d'études fonctionnent selon un modèle de prestation de service. Ils recherchent des partenariats avec des entreprises ou des collectivités pour lesquelles ils réalisent des études techniques. Le processus débute par l'établissement d'un cahier des charges détaillé et l'étude de faisabilité du projet. Une fois validé, le projet est confié à une équipe d'ingénieurs-conseils qui assurent son développement.

Les tarifs appliqués varient en fonction de la complexité de l'étude, de sa durée et de la nature des prestations. La TVA applicable est généralement de 20 %, sauf pour les auto-entrepreneurs qui en sont exonérés.

I.5.6 Intérêt du Recours à un Bureau d'Études

Qu'il s'agisse de projets de construction neuve ou de rénovation, l'intervention d'un bureau d'études s'avère essentielle dans de nombreux cas. Elle est parfois exigée par des assureurs pour valider certaines garanties, comme l'assurance dommages-ouvrage. Pour la mise en place d'un système d'assainissement non collectif (ANC), un dossier doit être soumis au SPANC ; l'intervention préalable d'un BE assainissement permet de garantir sa conformité. De même, une étude thermique réalisée par un BE certifié est requise pour l'obtention d'un permis de construire, notamment dans les démarches d'éco-construction.

En outre, faire appel à un bureau d'études permet de limiter les risques de malfaçons, ses recommandations engageant sa responsabilité professionnelle. C'est donc une garantie pour les différents intervenants quant au respect des réglementations en vigueur.

I.5.7 Rôle stratégique du Bureau d'Études

Le bureau d'études intervient à divers niveaux pour garantir la réussite des projets :

- **Études de faisabilité** : Validation des concepts à travers des analyses techniques approfondies ;
- **Élaboration de cahiers des charges** : Définition des besoins du client et formalisation des spécifications techniques ;
- **Pilotage de projet** : Gestion complète du développement technique, de l'idéation jusqu'à l'industrialisation ;
- **Implémentation d'automatisations** : Accompagnement dans l'intégration de solutions automatisées en milieu industriel ;
- **Calculs mécaniques et simulations** : Réalisation de modélisations et analyses mécaniques par outils de simulation numérique ;
- **Conseil en industrialisation** : Optimisation du passage à la production en série.

I.5.8 Le Dessin Technique et les Normes Associées

Le dessin technique, ou dessin industriel, est un langage figuratif pour la représentation, la communication technique, la conception et de l'analyse systématique. Il est utilisé principalement en génie mécanique (bureau d'études, bureau des méthodes), en génie civil (architecture) ainsi qu'en électronique pour la représentation des différentes composantes et de leur structure. Il s'agit d'un ensemble de conventions pour représenter des objets ; ces conventions assurent que l'objet produit est tel qu'il est imaginé par le dessin par son concepteur.

Le dessin technique répond à deux besoins essentiels du processus de conception technique : formaliser les idées pour valider des concepts, et communiquer. La représentation par le dessin ne doit donc pas se limiter à une simple description de formes ; Il doit respecter plusieurs règles strictes telles que le respect d'une échelle, la correspondance des vues, l'utilisation de trait continu ou en pointillé, etc.

Le dessin technique doit être compris par tous. Pour cela il doit il y avoir quelques règles de présentation conventionnelles qui font l'objet de normes officielles, en France par l'AFNOR[8], au Canada par l'ACNOR et en Suisse les normes VSM (éditées par le bureau des normes suisse des constructeurs de machines).

C’est à partir de ce dessin que l’on pourra fabriquer réellement notre objet. Il y a autant de dessins de définition que de pièces à fabriquer. Sur le dessin de définition, l’objet est représenté en deux dimensions afin de pouvoir le représenter en vraie grandeur. Les différentes faces de l’objet sont représentées séparément sous forme de projection qu’on appelle les vues.

Un dessin de définition représente d’une manière complète, détaillée et précise une pièce de d’un produit. Comme son nom l’indique, il définit toutes les formes, les dimensions, les spécifications et toutes les informations nécessaires à la fabrication de la pièce qu’on appelle la cotation. La figure 1 illustre la gestion spécifique du produit par la cotation linéaire, géométrique et surfacique avec toutes les exigences techniques et le tolérancement adopté par les exigences du bureau d’étude[9]

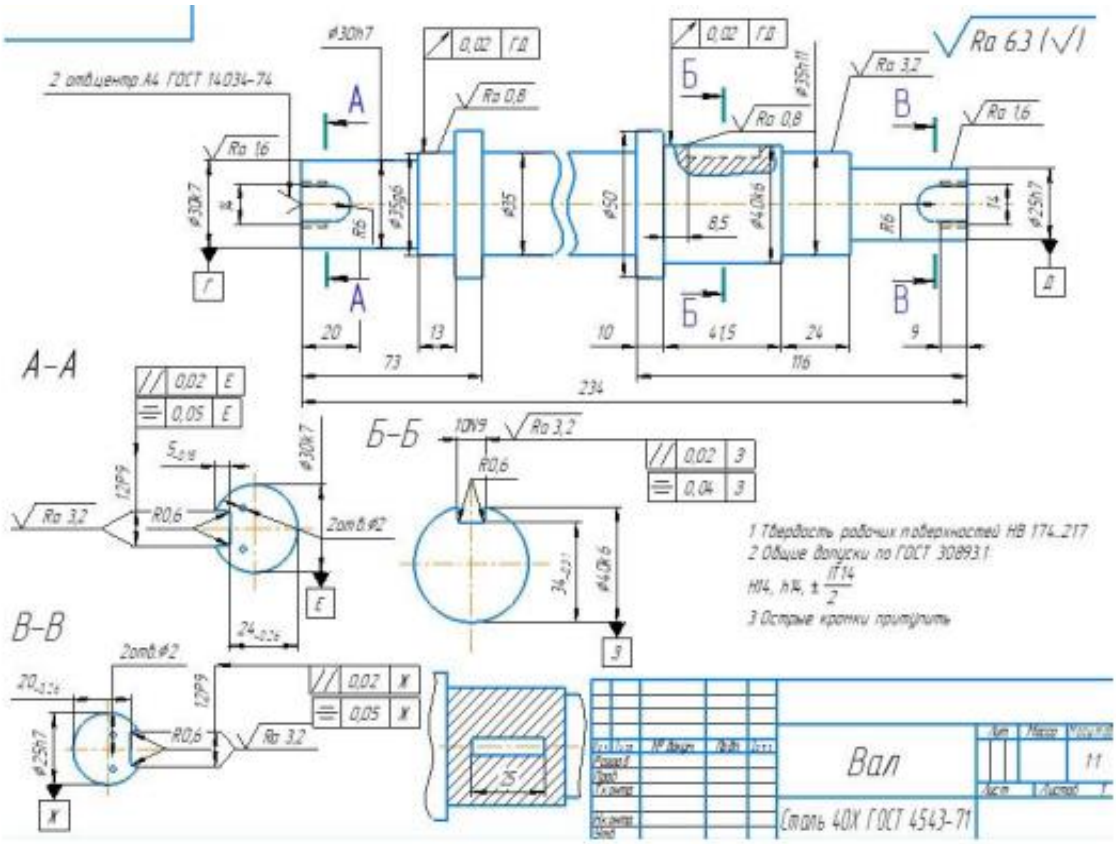


Figure 2 : Dessin de définition du produit fini

I.5.9 Cotation et Spécification Géométrique des Produits (GPS)

Le système de Spécification Géométrique des Produits, connu sous l'acronyme **ISO GPS** (Geometrical Product Specifications)**,** constitue une méthode normalisée permettant de définir de manière précise les exigences géométriques applicables aux pièces mécaniques. Ces spécifications couvrent à la fois les aspects dimensionnels, les tolérances géométriques et les états de surface, tout en incluant les critères associés à leur contrôle et vérification[10]**.**

Le système ISO GPS est administré par le comité technique **ISO/TC 213**. Il fonctionne en complémentarité avec les normes relatives à la documentation technique des produits (TPD), régies par le comité **ISO/TC 10**, afin de produire des spécifications techniques de produits (TPS) claires et cohérentes.

La norme internationale ISO GPS propose un cadre général décrivant la structure du système, en s'appuyant notamment sur deux référentiels fondamentaux :

- **ISO 8015**, qui établit les principes généraux et les règles fondamentales en matière de spécification géométrique ;
- **ISO 14253-1**, qui introduit les règles par défaut pour la prise de décision lors des vérifications de conformité aux spécifications.

Dans le contexte du dessin technique, la cotation joue un rôle central : elle permet d'indiquer avec rigueur les dimensions exactes, les tolérances admissibles, les positions relatives ainsi que les caractéristiques géométriques des différents éléments constitutifs d'une pièce. Ainsi, toute cotation technique est régie par les règles du système ISO GPS, englobant le dimensionnement linéaire**,** géométrique et surfacique**,** et garantissant une interprétation uniforme à l'échelle internationale[10]**.**

I.5.10 Recommandations ISO en matière de GPS

La spécification géométrique des produits, telle que définie par les normes internationales, vise à formaliser — directement sur les dessins de définition — la **forme**, les **dimensions**, les **tolérances géométriques** et les **caractéristiques de surface** qui conditionnent le bon fonctionnement d'une pièce ou d'un assemblage. Elle permet également d'encadrer les variations acceptables autour de la configuration idéale, tant que la fonction technique reste assurée, comme l'indique le rapport technique **ISO/TR 14638**[10].

Ce document, considéré comme une norme de référence fondamentale dans l'écosystème ISO GPS, expose les fondements conceptuels du système et introduit un schéma directeur facilitant la compréhension de l'articulation entre les normes existantes et celles à venir. Il permet ainsi aux concepteurs, techniciens, ingénieurs et métrologues d'intégrer dans leurs processus de conception et de fabrication une approche harmonisée, centrée sur la performance fonctionnelle et la conformité aux spécifications géométriques.

L'application rigoureuse des normes ISO GPS est essentielle dans un contexte industriel où la précision, la qualité et l'interchangeabilité des pièces représentent des enjeux stratégiques. Grâce à cette approche normalisée, les entreprises peuvent garantir la **compatibilité** de leurs productions**,** réduire les risques d'erreur d'interprétation entre les différents intervenants (conception, fabrication, contrôle) et améliorer l'efficacité des processus de validation[10].

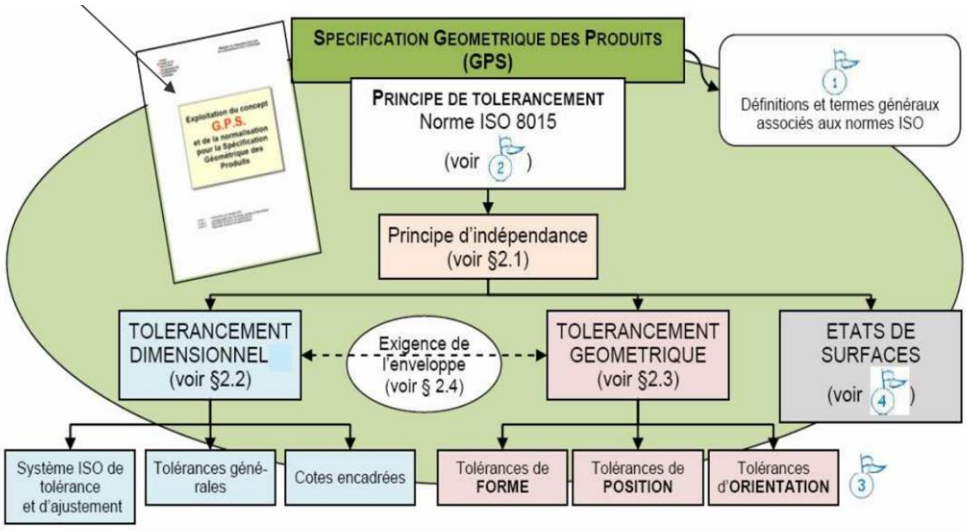


Figure 3 : *Organigramme de GPS*

Le schéma directeur établi dans le cadre du système ISO GPS joue un double rôle crucial. D'une part, il guide les utilisateurs en présentant de manière synthétique l'étendue et les limites d'application des différentes normes ISO GPS. D'autre part, il sert de repère structurant pour l'élaboration et la coordination des futures normes au sein du comité technique **ISO/TC 213**.

Dans la pratique industrielle, il est admis qu'aucun produit manufacturé ne peut être parfaitement conforme à son modèle théorique. Les objets fabriqués présentent toujours de

légères déviations par rapport à l'intention initiale du concepteur. Le schéma directeur prend en compte cette réalité en proposant un cadre tolérant et rigoureux, où une marge de liberté contrôlée est accordée à la fabrication, tout en garantissant la fonctionnalité et l'interchangeabilité des pièces produites.

I.5.11 Principes fondamentaux du système GPS

Dans une démarche de standardisation internationale**,** l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) a mis en place un ensemble de normes GPS (Geometrical Product Specifications), visant à établir un langage technique commun pour assurer une transmission claire et rigoureuse des exigences entre tous les acteurs du cycle de vie du produit de la conception à la fabrication, en passant par le contrôle[10]**.**

Parmi les principes fondamentaux qui régissent ce système, on distingue :

1. Le principe d'indépendance

Formalisé dans la norme **ISO 8015**, ce principe stipule que chaque exigence dimensionnelle ou géométrique portée sur un dessin technique doit être respectée de manière autonome, sans dépendre des autres spécifications, sauf indication contraire.

Autrement dit, une tolérance géométrique doit être interprétée indépendamment de la cote dimensionnelle associée. Lorsqu'une interdépendance entre la dimension et la géométrie est requise (comme la forme**, l'**orientation ou la position), elle doit être explicitement précisée sur le dessin technique. Cette relation peut être spécifiée à l'aide de symboles normalisés tels que :

- **E** : exigence d'enveloppe (réf. ISO 8015 et ISO 1101),
- **M** : principe du maximum de matière (réf. ISO 2692).

2. Le principe de tolérancement général (ISO 8015)

Ce principe établit la relation systématique entre les tolérances dimensionnelles (linéaires et angulaires) et les tolérances géométriques, assurant une cohérence globale dans la définition des pièces. Il garantit que l'interprétation des spécifications reste uniforme et sans ambiguïté, indépendamment des personnes ou des outils impliqués dans la lecture du plan.

3. Le principe de tolérancement géométrique

Chaque tolérance géométrique s'applique à un élément réel de la pièce (sauf cas particuliers, tels que les projections de surface). Elle définit un espace de tolérance, souvent représenté sous forme de zone tridimensionnelle, dans lequel la surface ou la forme doit impérativement se situer.

Cette notion de tolérance permet de maîtriser la variation géométrique des pièces tout en assurant leur fonctionnalité. L'analyse d'exemples concrets illustrés dans les normes ISO permet de mieux comprendre la mise en œuvre pratique de ces principes[8]**.**

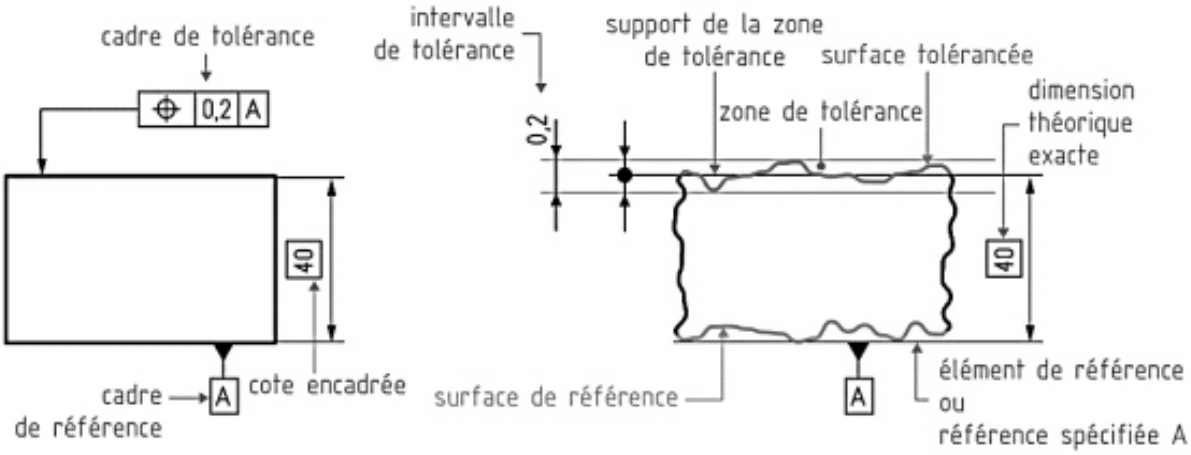


Figure 4 : *Principes du tolérancement géométrique*

Dans le domaine de la construction mécanique, il est communément admis que les pièces manufacturées ne sont jamais absolument parfaites. Elles présentent inévitablement des variations géométriques par rapport à la forme idéale conçue, tant d'une pièce à l'autre que vis-à-vis du modèle théorique initial. Face à cette réalité, il devient essentiel d'établir un lien cohérent entre trois éléments fondamentaux :

- La pièce conceptualisée par le concepteur, traduisant l'intention fonctionnelle et géométrique ;
- La pièce effectivement fabriquée, résultant du processus de production ;
- La connaissance de l'état réel de la pièce, obtenue par des méthodes métrologiques précises.

Dès la phase de conception, l'ingénieur définit les plages de tolérances admissibles sur un ensemble de caractéristiques géométriques, assurant que la pièce remplira correctement sa fonction, même en présence de certaines déviations. Il s'agit également de fixer un niveau de qualité cible, compatible avec les capacités du procédé de fabrication retenu, et de spécifier les critères d'acceptation permettant une prise de décision rigoureuse lors du contrôle qualité.

Ainsi, le dessin de définition, accompagné d'un tolérancement normalisé, joue un rôle central en exprimant simultanément :

- Les tolérances appliquées à la géométrie réelle, c'est-à-dire les écarts admissibles (tolérancement dimensionnel et géométrique) ;
- La géométrie théorique ou nominale, correspondant à la forme idéale imaginée par le concepteur.

Cette double représentation constitue la base d'un langage technique universel, garantissant une compréhension partagée entre les fonctions de conception, de fabrication et de contrôle.

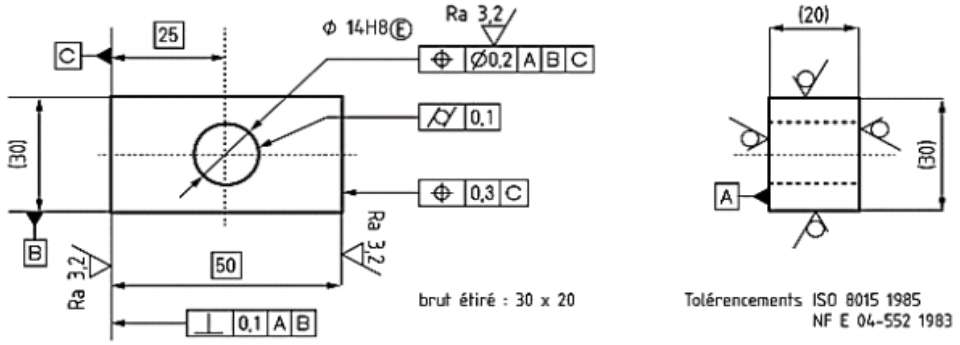


Figure 5 : *Dessin de définition et tolérancement normalisé d'une pièce.*

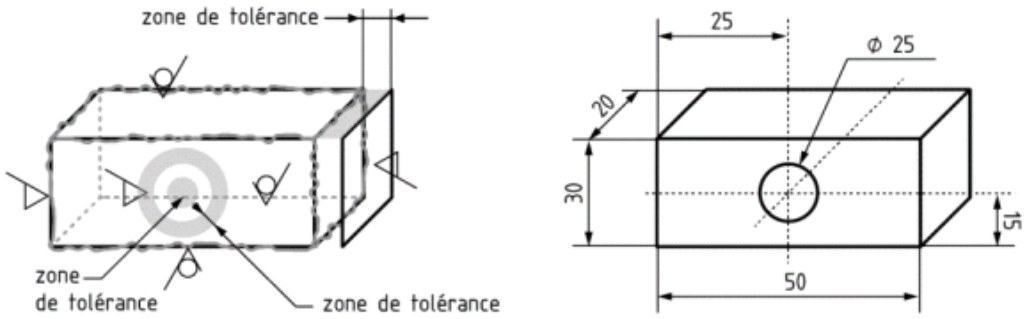


Figure 6 : *Zones de tolérance et écarts admissibles*
(À gauche) géométrie nominale - (à droite) forme et dimensions

Conformément aux prescriptions des normes ISO relatives à la cotation fonctionnelle, il est fondamental de distinguer clairement les notions de tolérance et d'écart, bien qu'elles soient souvent confondues dans l'usage courant. En effet, la tolérance désigne l'amplitude admissible des variations dimensionnelles ou géométriques d'un élément, telle que spécifiée sur le dessin technique. Elle définit la largeur de la zone de tolérance, c'est-à-dire l'intervalle dans lequel la géométrie réelle d'un objet peut varier tout en restant conforme aux exigences fonctionnelles. À l'inverse, l'écart qualifie un défaut ou une déviation mesurée sur une pièce fabriquée par rapport à sa géométrie nominale. Sa définition dépend étroitement du type de spécification géométrique considérée :

- **Écart de forme** : représente la largeur de la zone à l'intérieur de laquelle la surface réelle doit s'inscrire, sans référence à l'orientation ou à la position. Il traduit les déformations propres à la géométrie intrinsèque de la pièce (planéité, circularité, etc.).
- **Écart d'orientation** : mesure la dispersion angulaire d'une surface réelle par rapport à une référence, c'est-à-dire dans quelle mesure l'élément tolérance s'écarte de l'orientation idéale spécifiée.
- **Écart de position** : caractérise l'écart spatial maximal entre l'élément réel et sa position théorique, mesurée par rapport à une surface ou un axe nominal déterminé.

Afin de comprendre et d'appliquer correctement ces notions, quelques **principes fondamentaux** doivent être rappelés :

- **La référence** est une entité géométrique idéale (plan, axe ou surface) associée à un élément réel de la pièce, servant de base à la définition des tolérances.
- **La surface nominale** correspond à la géométrie parfaite imaginée lors de la conception, située, par exemple, à une distance précise de 40 mm de la référence dans un cas typique.
- **La zone de tolérance** est l'espace tridimensionnel défini par deux plans parallèles à la référence, distants de 0,2 mm, et centrés autour de la surface nominale. Elle représente la marge autorisée de variation pour la surface réelle.
- **La surface réelle**, obtenue après fabrication, doit impérativement rester contenue à l'intérieur de cette zone de tolérance, faute de quoi la pièce serait considérée comme non conforme.

Ce système rigoureux permet de garantir la fonctionnalité, l'interchangeabilité et la qualité des pièces dans un contexte industriel où la précision géométrique est essentielle.

I.6 Bureau de méthode « BM »

Dans cette section, nous présentons le **bureau des méthodes « BM »**, en mettant en lumière ses missions essentielles ainsi que les différents documents qu'il élabore et utilise. La maîtrise de ces documents, combinée à une bonne compréhension de l'organigramme de réalisation d'un produit, constitue un prérequis fondamental pour la conception et l'amélioration d'une documentation technique de fabrication fiable et cohérente**.** C'est à travers cette documentation que le programme de fabrication peut être planifié de manière rigoureuse, en mobilisant les ressources techniques et humaines les plus pertinentes disponibles au sein de l'entreprise[11]**.**

I.6.1 Mission du Bureau des Méthodes d'Usinage

Le bureau des méthodes occupe une place stratégique dans l'organisation industrielle. Il est chargé de l'étude, la planification et la supervision des procédés d'usinage**,** en vue de fabriquer des pièces conformes aux exigences du cahier des charges, tel que défini par le dessin technique. Son action s'inscrit dans une triple logique technique, économique et organisationnelle, en tenant compte à la fois des contraintes de production et des ressources disponibles.

La mission fondamentale du BM consiste à orchestrer l'ensemble des moyens de fabrication et de conception afin d'assurer une production optimale. Cela signifie réaliser chaque pièce au coût de revient global le plus bas possible, tout en garantissant le respect strict des spécifications fonctionnelles définies en phase de conception[11]**.**

Pour atteindre cet objectif, le bureau des méthodes déploie généralement deux approches selon la nature de la production :

- Dans le cas des unités ou petites séries, il réalise une étude détaillée du processus d'usinage**,** sur la base des dessins techniques émis par le bureau d'études.
- Pour le**s** grandes séries, il participe en amont à l'élaboration du dessin de définition en coordination avec le bureau d'études, avant de développer ensuite les procédés d'usinage adaptés à la production.

I.6.2 Les Paramètres Clés dans l'Élaboration d'un Processus de Fabrication

Une fois la pièce définie, le concepteur engage un travail d'optimisation du cycle de fabrication, qui s'avère souvent complexe et évolutif. Cette optimisation nécessite parfois des ajustements progressifs, réalisés sur le long terme, pour aboutir à une version performante et adaptée du processus.

Plusieurs facteurs influencent directement cette démarche, parmi lesquels :

- Le niveau de qualité attendu pour le produit fini,
- La taille de la série de production (unitaire, petite ou grande série),
- Les délais de fabrication imposés par le planning de production,
- Le coût de revient du produit à l'issue du processus.

C'est en prenant en compte simultanément ces éléments que le bureau des méthodes conçoit une gamme de fabrication cohérente et économiquement viable, garantissant la performance du produit tout en maîtrisant les contraintes industrielles.

Voici une version reformulée, académique, professionnelle, originale et sans plagiat de votre texte, tout en gardant les mêmes idées et la même structure **:**

I.6.3 Documents utilisés par le Bureau des Méthodes

Le bureau des méthodes s'appuie sur plusieurs documents fondamentaux pour organiser efficacement la production. Parmi les plus importants, on retrouve :

1. **Le dessin de définition du produit**
   Ce document, élaboré en étroite collaboration avec le bureau d'études « BE », constitue la base technique décrivant les spécifications fonctionnelles de la pièce à fabriquer. À partir de ces indications, le bureau des méthodes détermine les solutions de fabrication les plus économiques possibles, tout en respectant les exigences de performance. Ce même document servira de référence principale lors du contrôle qualité final**.**
2. **Le répertoire des moyens disponibles**
   Ce registre contient l'ensemble des ressources techniques mobilisables pour la production, notamment :

- Les caractéristiques du parc machines (type, disponibilité, précision, etc.).
- Les équipements standards et spécifiques nécessaires aux opérations.
- Les données relatives à la main-d'œuvre (effectifs, niveaux de compétence, qualifications techniques).

I.6.4 Documents produits par le Bureau des Méthodes

En se basant sur les informations fournies par le bureau d'études à travers les dessins de définition, le bureau des méthodes élabore à son tour une documentation technique structurée**,** précisant les différentes étapes de fabrication du produit[11]**.** Ces documents incluent :

- **L'avant-projet d'étude de fabrication « APEF »**
  Il s'agit d'un document prévisionnel dans lequel sont définies les phases successives de fabrication, organisées dans un ordre chronologique précis. Il prend en compte les spécifications techniques de chaque phase ainsi que les surfaces de mise en position choisies.
- **Le dessin de la pièce brute**
  Ce schéma représente l'état initial de la pièce avant toute opération d'usinage. Elle est considérée comme une ébauche**,** qui sera ensuite progressivement transformée par les phases de semi-finition et de finition.
- **La feuille d'étude de phase « ou contrat de phase »**
  Rédigée pour chaque opération spécifique, cette fiche fournit toutes les informations nécessaires à la mise en œuvre pratique : réglage des machines, lancement des opérations, temps d'usinage alloués, choix des outils, etc.

I.6.5 Analyse du Dessin de Définition

L'analyse du dessin de définition constitue une étape cruciale dans la planification des processus de fabrication. Elle doit être effectuée avec rigueur et précision, afin d'identifier et d'interpréter correctement toutes les annotations techniques**.**

1. **Désignation du produit**
   Cette mention donne des informations essentielles sur la fonction de la pièce dans l'ensemble mécanique ou le système auquel elle appartient.

2. **Matière première**

   Le matériau utilisé influe directement sur de nombreux paramètres de fabrication, notamment :

   - Le mode de fabrication initial (forgeage, moulage, etc.),
   - L'usinabilité de la matière,
   - Les traitements thermiques requis,
   - Le comportement de la pièce après traitement (risques de déformation),
   - Les méthodes de fixation et de maintien lors des opérations d'usinage.

3. **Niveau de qualité exigé**

   Le niveau de qualité défini par le bureau d'études implique le respect strict des exigences techniques, notamment en ce qui concerne le tolérancement géométrique (GPS)**.** Cela comprend :

   - Les définitions et terminologies normalisées,
   - Les critères d'acceptation,
   - Les symboles et indications des états de surface,
   - Les méthodes de contrôle dimensionnel**,**
   - Les procédures de mesure et les équipements utilisés.

Tous ces éléments sont encadrés par un ensemble cohérent de normes ISO, conçues pour garantir l'harmonisation des pratiques à l'échelle internationale.

I.7 Bureau de Contrôle et Métrologie

Le bureau de contrôle constitue un maillon stratégique du système de qualité dans le domaine de la fabrication mécanique. Loin de se limiter à une simple fonction de vérification dimensionnelle, il s'inscrit comme un garant de la conformité globale des produits, en veillant scrupuleusement au respect des spécifications techniques, fonctionnelles et normatives. Ce service a pour mission de contrôler chaque pièce usinée afin de s'assurer qu'elle respecte les tolérances dimensionnelles, les exigences géométriques, l'état de surface, ainsi que toutes les prescriptions critiques inscrites sur les plans techniques ou définies dans le cahier des charges.

En parallèle, la métrologie**,** science de la mesure, joue un rôle fondamental dans l'évaluation précise des caractéristiques physiques des pièces produites. Elle permet d'assurer la fiabilité des résultats, d'optimiser les procédés industriels, de maintenir la traçabilité des produits et de garantir leur conformité aux normes en vigueur. Dans les environnements industriels où la rigueur et la précision sont des impératifs, la métrologie est omniprésente.

I.7.1 Le Bureau de Contrôle

Le bureau de contrôle est une unité spécialisée dans l'exécution des opérations de contrôle et de validation tout au long du processus de fabrication. Il intervient notamment dans les environnements industriels à forte exigence de qualité et de précision, et ce, dès les premières étapes de production jusqu'à la vérification finale des produits.

1. Missions et Responsabilités du Bureau de Contrôle

Le rôle essentiel de cette structure est de déployer des outils de mesure et des techniques d'inspection fiables pour valider la conformité des pièces par rapport aux tolérances spécifiées, aux critères géométriques, ainsi qu'aux exigences de qualité définies. Ses interventions couvrent plusieurs niveaux :

1. **Contrôle dimensionnel**
   Mesure des dimensions linéaires, angulaires ou géométriques telles que le diamètre, la longueur ou la profondeur à l'aide d'instruments de haute précision (micromètres, pieds à coulisse, machines à mesurer tridimensionnelles - CMM).
2. **Contrôle géométrique**
   Évaluation de la forme, de l'orientation et de la position des surfaces fonctionnelles à travers des critères comme la planéité, la perpendicularité, la concentricité ou le parallélisme, garantissant ainsi le bon fonctionnement et l'assemblage correct des composants mécaniques.
3. **Contrôle visuel**
   Inspection manuelle ou assistée (microscopes, caméras haute définition) pour repérer d'éventuelles anomalies superficielles telles que des rayures, des bavures, des porosités ou autres défauts d'apparence.
4. **Contrôle par équipements spécialisés**
   Utilisation d'outils spécifiques tels que les tampons, les gabarits ou les comparateurs à

cadran pour vérifier des caractéristiques précises, notamment le respect des normes de filetage ou la géométrie des alésages.

Au-delà de ses fonctions techniques, le bureau de contrôle assure également la traçabilité des pièces en conformité avec les référentiels ISO (ex : ISO 9001 pour le système de management de la qualité, ISO 2768 pour les tolérances générales, etc.). Il joue aussi un rôle proactif dans l'amélioration continue des processus**,** en contribuant à la réduction des non-conformités, à l'optimisation de la production et à l'instauration d'une démarche qualité orientée vers le zéro défaut.

I.7.2 Moyens et Instruments Métrologiques

Pour répondre aux exigences de mesure et de contrôle, les techniciens du bureau de contrôle disposent d'une panoplie d'outils métrologiques spécialisés, soigneusement sélectionnés en fonction des caractéristiques à vérifier et du niveau de précision requis. Ces équipements permettent de garantir des résultats fiables, reproductibles et traçables dans l'ensemble du processus de fabrication [12]**.**

Tableau 1 : Instrument Fonction Précision typique

Instrument	Fonction	Précision
Pied à coulisse numérique	Mesure rapide des dimensions extérieures et intérieures	± 0,02 mm
Micromètre extérieur/intérieur	Mesure des diamètres et épaisseurs avec haute précision	± 0,01 mm
Comparateur à cadran	Contrôle de faux-rond, battement axial et concentricité	± 0,01 mm
Calibre à mâchoires	Contrôle des alésages et ajustements mécaniques	± 0,01 mm
Tampons filetés	Contrôle du diamètre et pas des filetages	Conforme ISO
Table de mesure + marbre	Vérification de la planéité et orthogonalité	Précision micrométrique
Machine à mesurer tridimensionnelle (CMM)	Mesure 3D et contrôle de formes complexes	± 0,005 mm

1.7.3 Importance du bureau de contrôle dans la démarche qualité

Le bureau de contrôle ne se contente pas de "rejeter ou valider" une pièce. Il proposer et renseigne des directives susceptibles de contribuer à la réussite du produit finie dans les domaines suivant :

- Améliorer les gammes de fabrication en détectant des dérives répétitives ;
- D'éviter des non-conformités coûteuses en aval (montage ou assemblage final) ;
- De garantir la traçabilité de chaque pièce contrôlée (fiche de contrôle, numéro de lot) ;
- De contribuer activement à une logique de zéro défaut.

Le contrôle effectué se base sur les normes suivantes :

- **ISO 2768 :** Tolérances générales – dimensions linéaires et angulaires.
- **ISO 1101 :** Spécification géométrique des produits (GPS).
- **ISO 9001 :2015 :** Système de management de la qualité.
- **AFNOR NF E 04-515 :** Métrologie – instruments de mesure[8]**.**

I.8 La Métrologie.

La métrologie, définie comme la science de la mesure, joue un rôle fondamental dans la validation des produits industriels, l'optimisation des procédés et l'assurance qualité. Elle consiste à évaluer avec précision une grandeur physique et à estimer l'incertitude qui lui est associée. Dans le contexte de la production mécanique, la métrologie ne se limite pas à la vérification de conformité : elle constitue un levier essentiel d'amélioration continue et de maîtrise des procédés.

En effet, toute action corrective ou préventive dans un processus industriel ne peut être validée sans une mesure rigoureuse du résultat obtenu. La métrologie devient ainsi un outil décisionnel indispensable, intégrant à la fois les aspects techniques, fonctionnels et normatifs[13].

En génie industriel, qui vise à optimiser la conception et la production dans divers secteurs, et plus particulièrement en génie mécanique – orienté vers la conception, la fabrication et le

contrôle des produits mécaniques (automobile, aéronautique, machines-outils, instrumentation médicale, etc.) – la métrologie trouve une application omniprésente. Elle permet d'évaluer des caractéristiques dimensionnelles, fonctionnelles ou physiques, en comparant les grandeurs mesurées à des références ou étalons.

La métrologie dimensionnelle, quant à elle, traite plus spécifiquement des mesures de longueurs et de formes. Elle intervient à toutes les étapes de fabrication et de contrôle des pièces mécaniques, constituées d'éléments de base tels que vis, pignons, carters, roulements, etc. Ces pièces, conçues pour remplir des fonctions précises, nécessitent une maîtrise rigoureuse de leurs dimensions et tolérances.

Le champ d'application de la métrologie dépasse largement l'industrie mécanique. Elle est essentielle dans des disciplines aussi variées que la biologie médicale, la chimie, l'électronique, la physique ou l'environnement, sans oublier les institutions spécialisées en métrologie qui garantissent l'exactitude et l'uniformité des mesures au niveau national et international[13]**.**[14]

I.8.1 Généralités sur la Métrologie

Étymologiquement, la métrologie signifie "science de la mesure"**.** Elle a pour objectif la détermination quantitative de caractéristiques physiques appelées *grandeurs*. Ces grandeurs peuvent être fondamentales (longueur, masse, temps…) ou dérivées (surface, vitesse, volume…).

Dans le contexte des essais industriels, certaines caractéristiques, bien que mesurées, ne sont pas directement liées aux grandeurs fondamentales. C'est le cas, par exemple, de la dureté, de la rugosité ou de la viscosité. Ces mesures peuvent impliquer des interprétations complexes, car elles ne reposent pas toujours sur une comparaison directe à une unité de base.

Mesurer une grandeur revient à lui attribuer une valeur numérique en la comparant à une unité de même nature, appelée étalon. Cette notion de comparaison est centrale en métrologie : "Mesurer, c'est comparer" est un principe fondamental partagé par tous les praticiens de la discipline.

Les résultats des mesures sont exploités dans divers contextes décisionnels, notamment pour :

- L’acceptation ou le rejet d’un produit en fonction de sa conformité ;
- Le réglage ou la calibration d’instruments de mesure ;
- Le contrôle ou l’ajustement de procédés de fabrication ;
- La validation de modèles ou d’hypothèses techniques ;
- La surveillance environnementale ;
- L’évaluation des conditions de sécurité d’un produit ou d’un système technique.

Pour mieux appréhender la diversité de ses applications, la métrologie est souvent divisée en plusieurs branches.

1.8.2 La métrologie fondamentale (MF)

La métrologie fondamentale, également désignée sous le terme de métrologie scientifique, constitue le socle de l’ensemble du système de mesure mondial. Elle est dédiée à la définition, à la réalisation, à la conservation et à l’amélioration des unités de mesure, en assurant leur stabilité et leur universalité à travers le temps et l’espace. À l’échelle internationale, cette mission est assurée principalement par le Bureau international des poids et mesures (BIPM)**, en coopération avec les** laboratoires nationaux de métrologie**.**

La métrologie fondamentale se charge ainsi :

- De définir les unités du Système International (SI) ;
- De réaliser physiquement ces unités sous forme d'étalons primaires ;
- De coordonner leur diffusion auprès des pays membres via des comparaisons inter-laboratoires ;
- D’assurer la cohérence globale des mesures scientifiques et industrielles.

En parallèle, **le BIPM** assure également la gestion du Temps Atomique International **(TAI)** et du Temps Universel Coordonné **(UTC)**, qui constituent les références temporelles mondiales, essentielles aux communications, aux réseaux GPS et à l’industrie de précision.

Les institutions de gouvernance de cette métrologie comprennent :

- ***La Conférence Générale des Poids et Mesures « CGPM » ;***
- ***Le Comité I*nternational des Poids et Mesures « CIPM »** ;

Les responsabilités du BIPM englobent :

- L'établissement et la conservation des étalons fondamentaux ;
- La comparaison des étalons nationaux et internationaux ;
- La coordination des techniques de mesure et l'harmonisation des constantes physiques
- L'organisation de réunions scientifiques sur les évolutions métrologiques ;
- La diffusion d'informations à la communauté scientifique et au grand public.

Les domaines couverts par les laboratoires du BIPM incluent notamment la masse, le temps, la longueur**,** l'électricité, la thermométrie, la photométrie**,** la radiométrie, les rayonnements ionisants**,** et la quantité de matière**.**



Figure 7 : *Sceau original du BIPM*

1.8.3 La métrologie industrielle (MI)

La métrologie industrielle, omniprésente dans les environnements de production, a pour vocation d'assurer la fiabilité et la traçabilité des mesures tout au long du processus de fabrication. Elle s'intègre pleinement dans une démarche qualité et joue un rôle central dans le pilotage des procédés, la validation des produits, et la conformité aux exigences normatives.

Cette discipline technique constitue un, permettant : outil stratégique pour la performance industrielle

- La maîtrise des tolérances dimensionnelles ;
- La détection rapide des dérives de production ;
- La réduction des rebuts et des non-conformités ;
- L'assurance qualité des produits livrés.

En garantissant une mesure exacte, répétable et traçable, la métrologie industrielle contribue directement à la compétitivité des entreprises, en particulier dans des secteurs de haute précision comme l'aéronautique, l'automobile, ou la mécanique de pointe.

1.8.4 La métrologie légale (ML)

La métrologie légale concerne l'ensemble des activités de mesurage soumises à des obligations réglementaires. Elle veille à la protection des consommateurs, à l'équité des échanges commerciaux, et à la sécurité publique. Sa vocation est d'assurer que les instruments de mesure utilisés dans des contextes sensibles soient conformes à des normes strictes de fiabilité et d'exactitude.

Parmi les cas typiques de mesures réglementées, on peut citer :

- Les volumes de carburants délivrés en station-service ;
- Le pesage de produits alimentaires ;
- La consommation électrique mesurée par les compteurs ;
- Les cinémomètres (radars routiers), les éthylomètres ;
- Les dispositifs de mesure environnementale (analyseurs de gaz) ;
- Les instruments médicaux et pharmaceutiques.

Les missions de la métrologie légale comprennent :

- L'établissement des exigences techniques et légales ;
- L'évaluation de la conformité des instruments et des pratiques ;
- La supervision du respect de la réglementation par les utilisateurs ;
- La mise en place des infrastructures de traçabilité.

Elle fait appel à des moyens de contrôle sophistiqués : mécaniques, optiques, électroniques intégrant systématiquement une évaluation des incertitudes liées à chaque mesure. Aucun dispositif ne permettant d'atteindre une exactitude absolue, la métrologie légale agit donc pour encadrer les tolérances admissibles et fiabiliser les mesures dans un cadre juridiquement reconnu.

1.8.5 Les erreurs de contrôle

Les erreurs de mesure constituent une composante inévitable du processus de contrôle qualité. Elles peuvent être classées selon deux catégories principales :

- **Erreurs systématiques** : elles sont reproductibles et liées à un biais spécifique dans l'instrument ou la méthode de mesure ;
- **Erreurs aléatoires** : elles résultent de variations imprévisibles, souvent dues à l'environnement ou à l'opérateur.

Plusieurs facteurs influencent la précision des mesures :

- Les défauts géométriques ou cinématiques de la machine-outil **;**
- La géométrie inadaptée ou l'usure de l'outil coupant ;
- Les défauts de réglage ;
- La flexion de la pièce, de l'outil ou du support « problème de rigidité mécanique » ;
- Les conditions climatiques, notamment les effets de dilatation thermique.

En raison de ces incertitudes, il est impossible de produire des pièces aux dimensions parfaitement exactes. C'est pourquoi les ingénieurs utilisent des cotes fonctionnelles accompagnées de tolérances géométriques pour assurer la compatibilité entre les pièces assemblées.

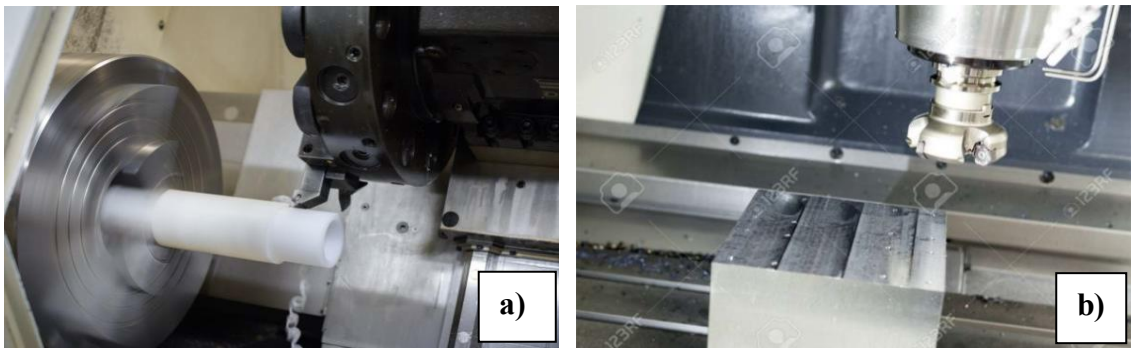


Figure 7 : *Fabrication de pièces ; a) tournage : b) fraisage.*

1.8.6 Utilité de la métrologie

La métrologie joue un rôle transversal et stratégique dans les systèmes de production modernes. Son utilité ne se limite pas à une simple fonction de mesure ; elle participe activement à l'amélioration de la performance industrielle, à la protection des utilisateurs, et à la pérennité des processus[15]. Ses apports majeurs peuvent être résumés comme suit :

1. **Maîtrise des processus de fabrication**

La métrologie permet d'assurer la reproductibilité et la stabilité des procédés industriels. Elle fournit des données précises qui facilitent le contrôle statistique, le réglage des équipements et la détection des dérives.

2. **Évaluation de la conformité**

Elle garantit que les produits finis répondent aux spécifications techniques, réglementaires et contractuelles. Les mesures permettent de vérifier les dimensions, la géométrie, et les performances exigées par le cahier des charges.

3. **Contrôle de la qualité**

La métrologie est un outil fondamental pour la qualité. Elle permet d'identifier les défauts, d'en analyser les causes et d'instaurer des actions correctives en amont ou en aval de la production.

4. **Validation des résultats analytiques**

Dans les laboratoires et les procédés nécessitant une haute précision, la métrologie assure la fiabilité des données expérimentales et des mesures critiques.

5. **Équité dans les échanges commerciaux**

En assurant l'exactitude des instruments utilisés dans les transactions, elle protège les consommateurs et garantit une concurrence loyale entre opérateurs économiques.

6. **Protection de la santé et de la sécurité**

Elle est essentielle dans les secteurs sensibles (médical, agroalimentaire, aéronautique…) pour valider la conformité des équipements, prévenir les risques, et garantir des normes de sécurité élevées.

7. **Préservation de l'environnement**

Les mesures précises des rejets, des émissions ou des consommations énergétiques permettent de mieux surveiller l'impact environnemental des activités industrielles et de s'aligner sur les exigences réglementaires.

Ainsi, la métrologie s'impose comme une fonction transversale incontournable, à l'interface entre production, qualité, réglementation et innovation.

I.9 Conclusion

Ce premier chapitre a constitué une base essentielle pour appréhender l'univers complexe et stratégique des Petites et Moyennes Entreprises **« PME »** dans le contexte industriel contemporain. À travers une approche analytique et structurée, nous avons mis en évidence leur rôle déterminant dans le tissu économique, social et technologique, tant à l'échelle locale qu'internationale.

Nous avons commencé par classifier les entreprises selon divers critères juridiques**,** économiques et structurels tout en mettant en lumière les spécificités distinctives des PME face aux grandes entreprises. Leur flexibilité managériale, leur capacité d'innovation, ainsi que leur proximité avec les clients sont autant d'atouts qui leur confèrent une réactivité et une agilité uniques. Cependant, elles demeurent confrontées à plusieurs défis, notamment en matière de financement**,** de gestion des compétences et de résilience face aux crises.

L'exploration s'est ensuite concentrée sur la structure organisationnelle des entreprises industrielles**,** avec un accent particulier sur les fonctions techniques clés **:** bureau d'études, bureau des méthodes, et bureau de contrôle et métrologie. Ces entités assurent une coordination optimale entre la conception, la fabrication et la qualité, tout en garantissant la conformité du produit aux normes fonctionnelles et réglementaires.

Un approfondissement particulier a été consacré à la documentation technique, notamment le dessin de définition, la cotation dimensionnelle et géométrique, ainsi que les principes de

« GPS ». Ces outils de communication technique sont indispensables spécification géométrique des produits pour traduire l'intention de conception en exigences de fabrication et de contrôle, tout en assurant la qualité, la précision et l'interchangeabilité des composants.

Enfin, une analyse détaillée de la métrologie a permis de souligner son rôle stratégique dans le pilotage de la qualité, la maîtrise des procédés, la sécurité des utilisateurs, et la compétitivité des entreprises. À travers ses différentes branches — fondamentale, industrielle et légale la métrologie s'affirme comme une discipline transversale indispensable à l'efficacité des systèmes industriels.

En résumé, ce chapitre offre une charpente intellectuelle et méthodologique indispensable pour comprendre l'environnement dans lequel évolue une PME industrielle. Il jette les bases nécessaires à l'analyse des problématiques concrètes que nous développerons dans les chapitres suivants, à travers des études de cas, des observations en atelier, et une mise en œuvre pratique dans le cadre de notre projet de fin d'études**.**

CHAPITRE II

DIMENSIONNEMENT MECANIQUE ET PREPARATION D'UN PRODUIT EN MECANIQUE

II.1. Introduction

Les structures mécaniques qui nous entourent (automobile, avion, ponts…), se déforment sous l'effet de chargements extérieurs. Le rôle du concepteur est de faire en sorte que ces déformations ne nuisent pas au bon fonctionnement des structures. Pour cela, il dispose de différents outils de dimensionnement tel que :

- La théorie des pièces mécaniques permet, dans le cas où les solides possèdent des géométries élancées, d'obtenir rapidement des dimensions adaptées aux différents critères du cahier des charges.
- La mécanique des milieux continus permet de dépasser ces restrictions sur la géométrie mais possède l'inconvénient majeur de conduire à des problèmes mathématiques complexes dont on ne peut extraire la solution.
- La simulation numérique, via la méthode des éléments finis, permet de fournir une solution approchée au problème de mécanique des milieux continus et donc de finaliser le dimensionnement.

L'objectif principal est de présenter et de mettre en œuvre les différents outils de dimensionnement. L'originalité est de mettre en évidence les atouts de ces outils, tout comme leurs limites, au travers d'un même support qui constituera un fil conducteur.

II.1.1 Définition d'un système technique

Un système technique est un ensemble structuré de constituants et de composants dont le but est la réalisation de fonctions permettant de soulager l'homme dans son activité quotidienne (automobile, robot, ...).

Le souci du technicien doit être d'améliorer constamment les performances de ces systèmes en optimisant ses constituants et leur architecture.[16]

II.1.2 Bref historique

La notion de système technique remonte aux origines mêmes de l'homme. Cependant on peut distinguer plusieurs étapes récentes et marquantes dans l'évolution de celui-ci**.**[16]

Le début du XIXe siècle est toujours présenté comme une étape décisive qui marque l'avènement du machinisme. En effet, c'est à cette époque que l'on est passé de la force motrice provenant de l'homme et de l'animal à celle créée par la machine à vapeur.[16]

Depuis, et jusqu'au milieu du XXe siècle, c'est surtout la mécanique qui domine dans les systèmes techniques.[16]

A l'heure actuelle, surtout depuis une vingtaine d'années, on distingue dans un système technique une partie opérative toujours basée sur des notions mécaniques, mais aussi une partie commande de plus en plus complexe et de plus en plus intégrée afin d'optimiser l'aide apportée par le système technique. Nous n'aborderons pas la partie commande dans ce mémoire, qui se limitera à l'étude du système mécanique inclus dans la partie opérative.

Parallèlement au développement spectaculaire de la partie commande, on assiste à une amélioration continue mais plus discrète des performances purement mécaniques. Pour s'en convaincre, il n'est que de constater l'évolution des performances d'une automobile au cours de ces trente dernières années. En effet l'évolution du seul critère global de puissance massique est édifiante...[16]

Le souci d'améliorer les performances purement mécaniques des systèmes techniques nécessite une compréhension accrue des phénomènes qui se déroulent au sein de ces systèmes[16]**.**

II.2. Modèles technologiques d’un système mécanique

Le réel étant toujours très complexe, le souci primordial du technicien doit être l'élaboration de modèles afin d'appréhender celui-ci. Le degré de complexité du modèle est lié à l'état de l'art de la période de sa conception. [16]

II.2.1 Théorie des systèmes mécaniques

Un modèle étant élaboré, il est généralement soumis à un traitement mathématique, afin d'établir des relations entre les paramètres qui le caractérisent. Le développement des méthodes numériques, liées elles-mêmes à celui des ordinateurs permet le traitement de modèles à paramètres multiples et cernant la réalité de plus en plus près.[16] L'ensemble de ces méthodes de modélisation et de calcul à l'aide de l'ordinateur constitue ce qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui la Conception Assistée par l'Ordinateur.[16]

Nous allons montrer que la théorie des systèmes mécaniques doit être le premier maillon d'une CAO mécanique. En effet, que penser du projeteur qui, sur une pièce, fait une étude des contraintes à l'aide d'un logiciel d'éléments finis alors que les torseurs d'efforts extérieurs ne sont pas maîtrisés. Le système mécanique, composante de la partie opérative d'un système technique, est un ensemble organisé de pièces reliées par des liaisons.[16] Nous devons donc associer un modèle à chacune de ces composantes. Il nous faut tout d'abord préciser le langage employé :

On parlera de mécanisme lorsque la description d'un système mécanique sera orientée « liaisons ». On suppose souvent que les pièces sont indéformables ; On parlera de structure lorsque cette description sera orientée « pièces ». On suppose souvent que les liaisons sont rigides. Le vocable système mécanique englobe les deux définitions précédentes. On peut proposer les grandes familles de modèles ci-dessous :

Modèle des pièces :

- rigides ou déformables (petites déformations, ou grandes déformations)

Modèle des liaisons :

- jeu (avec ou sans jeu)

- dissipation d'énergie (avec ou sans)

- déformables (oui ou non déformation)

Nous distinguerons dans ce qui suit la déformation volumique de la pièce et la déformation

surfacique de la liaison. En effet, on considère souvent la première comme linéaire par rapport aux efforts alors que la seconde ne l'est que très rarement (contact hertzien par exemple).[16]

II.2.2 Modèles technologiques possible d'un système mécanique

Parmi la multiplicité des combinaisons possibles à partir des paramètres énoncés ci-dessus, on peut retrouver un certain nombre de modèles utilisés actuellement. D'autres ne le sont pas encore à cause de la complexité de leur mise en œuvre. Pour notre part nous distinguerons les modèles suivants :[16]

Modèle 1 : Orienté liaisons

- ✓ Pièces rigides,
- ✓ Liaisons à surfaces parfaites, à jeu nul, à frottement nul et non déformables.

C'est le modèle couramment employé en bureau d'études lors du calcul d'avant-projet.

Modèle 2 : Orienté structures

- ✓ Pièces déformables en petites déformations,
- ✓ Liaisons déformables (appuis élastiques) ou non, à jeux nuls.

C'est le modèle employé en résistance des matériaux et en calcul des structures.

Modèle 3 :

- ✓ Pièces rigides en volumes,
- ✓ Liaisons déformables et sans jeux.

Modèle 4 :

- ✓ Pièces déformables,
- ✓ Liaisons déformables et sans jeux.

Ce dernier modèle, le plus complexe, s'avère notamment indispensable pour la simulation des systèmes mécaniques articulés. En effet la position du préhenseur est liée à la déformation de la structure mais aussi à celle de ses liaisons.[16]

II.2.3 Étude géométrique des systèmes mécanique

L'étude géométrique des systèmes mécaniques a pour but de définir en fonction de paramètres (temps, paramètres linéaires ou angulaires imposés,), la position de chaque pièce composant le système mécanique. Cette position est généralement recherchée dans un repère privilégié appelé bâti.[17]

Cette étude nécessite d'avoir recherché au préalable les cycles indépendants associés au système mécanique. Elle conduit à un système d'équations non linéaires qui ne possède pas de solution analytique dans le cas général. Seules les méthodes numériques peuvent permettre la résolution de tels systèmes. On privilégiera donc une description géométrique adaptée à une résolution par l'ordinateur.[17]

II.3. Dimensionnement en statique

II.3.1 Liaison dans un mécanisme

- **Position du problème**

Un mécanisme est un ensemble de pièces assemblées par l'intermédiaire de surfaces de contact (liaisons), les efforts sont transmis par ces surfaces de contact.[18]

-Fonctionnement global du système,

-Comportement de chaque liaison

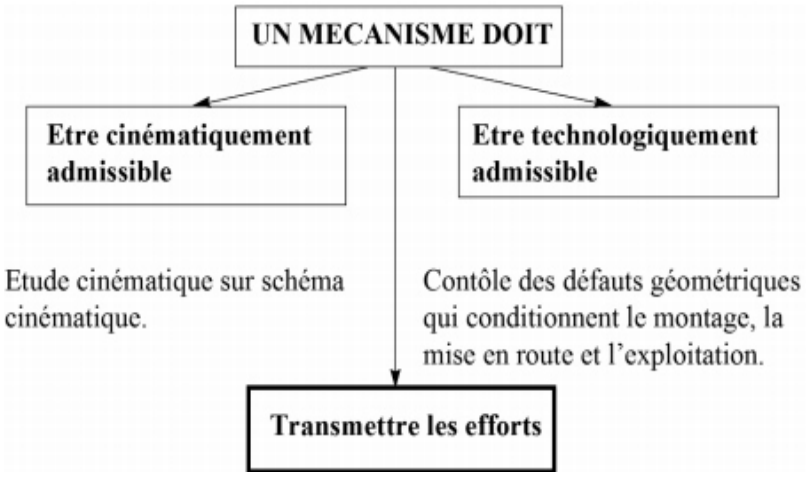
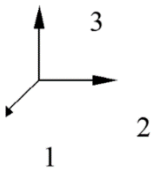


Figure 8: *Illustration schématique d'un mécanisme statique*

II.3.2 Torseurs associés aux liaisons

• A chaque liaison, on associe un torseur cinématique et un torseur des efforts. Liaisons supposées parfaites (pas de frottement, un mouvement libre = pas d'effort suivant ce mouvement).[18]



Cinématique	Liberté de mouvement	Translation Rotation	T_1, T_2, T_3 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$
Efforts	Torseur de liaison	$\overrightarrow{R}$ $\overrightarrow{G}$	X, Y, Z L, M, N

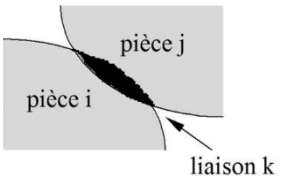


Figure 9 : *Illustration Torseurs associés aux liaisons*

La liaison k entre les 2 pièces i et j, permet n_c mouvements (inconnues cinématiques) et impose n_s efforts de liaison (inconnues d'efforts). [18]

II.3.3 Liaison complètes / Partielles

Liaison k entre 2 pièces i et j **nc : mouvements, ns : efforts de liaison**

- **Notion cinématique** :

- **Liaison complète** = 6 degrés de liberté supprimés entre 2 pièces => mobilité m = 0 (Soudure, collage, emmanchement)

- Liaison partielle = 1 ou plusieurs degrés subsistent => mobilité m ≥ 1 (Rotation, Translation).

- **Notion de transmission d'efforts (P = k.δ)**

- **Liaison déformable** = très déformables (petits mvts), élastique ou viscoélastique

- **Liaison rigide** = peu déformables (petites déformations et petits déplacements)

- **Aspects technologiques des liaisons rigides**

- **Liaison permanente** = définitive (pas de retour à la géométrie initiale des pièces)

- **Liaison démontable** = temporaire[18]

II.3.4. Matériaux constitutifs :

- **Classification**

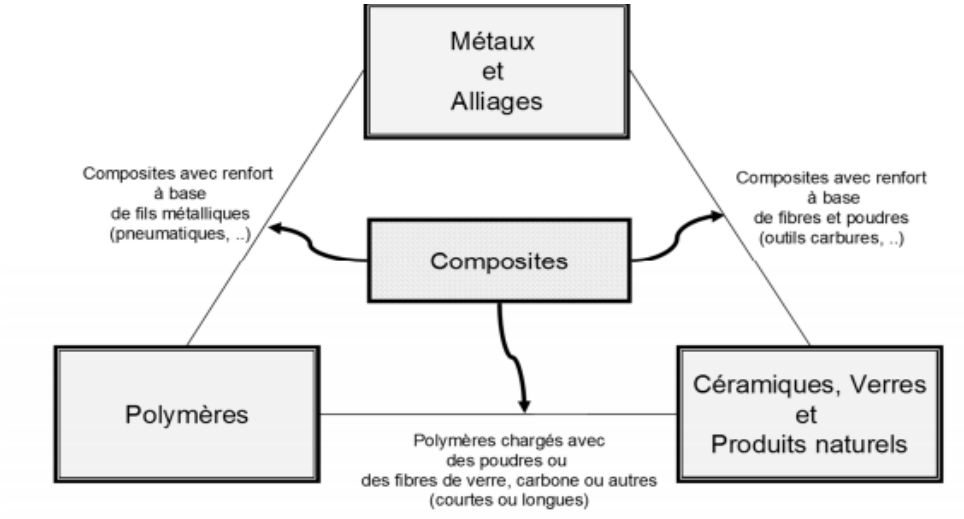


Figure 10 : *Classification des matériaux constitutifs*

- **Classification coût**

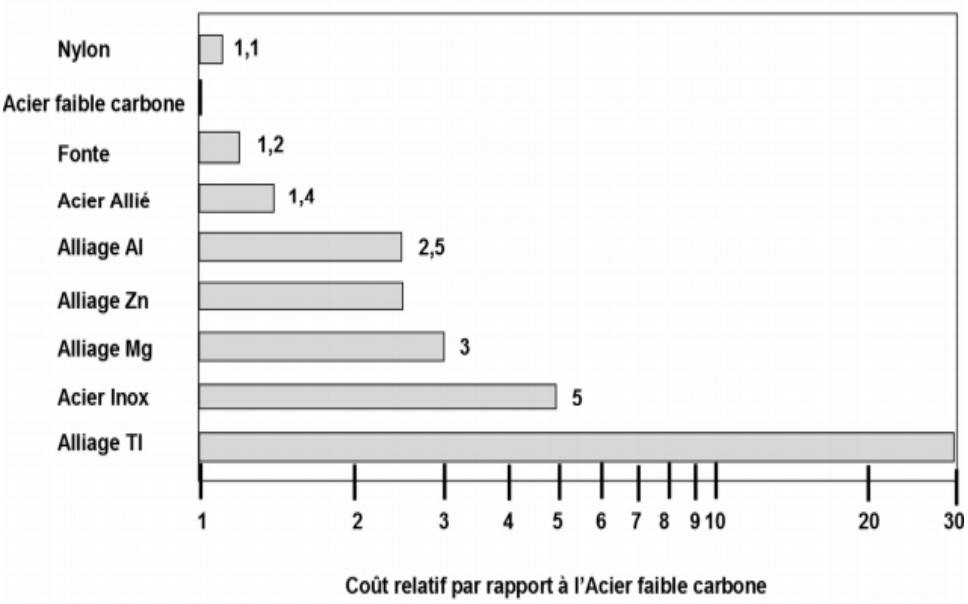


Figure 12 : *Classification des matériaux en fonction du coût.*

- **caractéristique :**

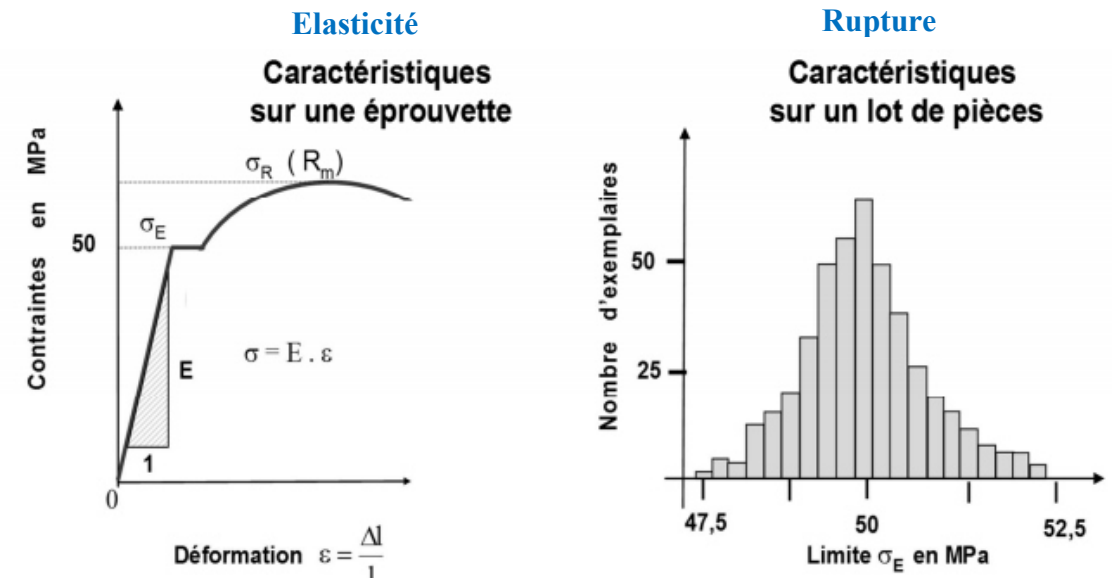


Figure 11 : *Classification des matériaux en fonction de l'élasticité et la rupture*

- **Résistance des pièces en statique**

- Limite élastique **σE** - Résistance à la rupture **σr**

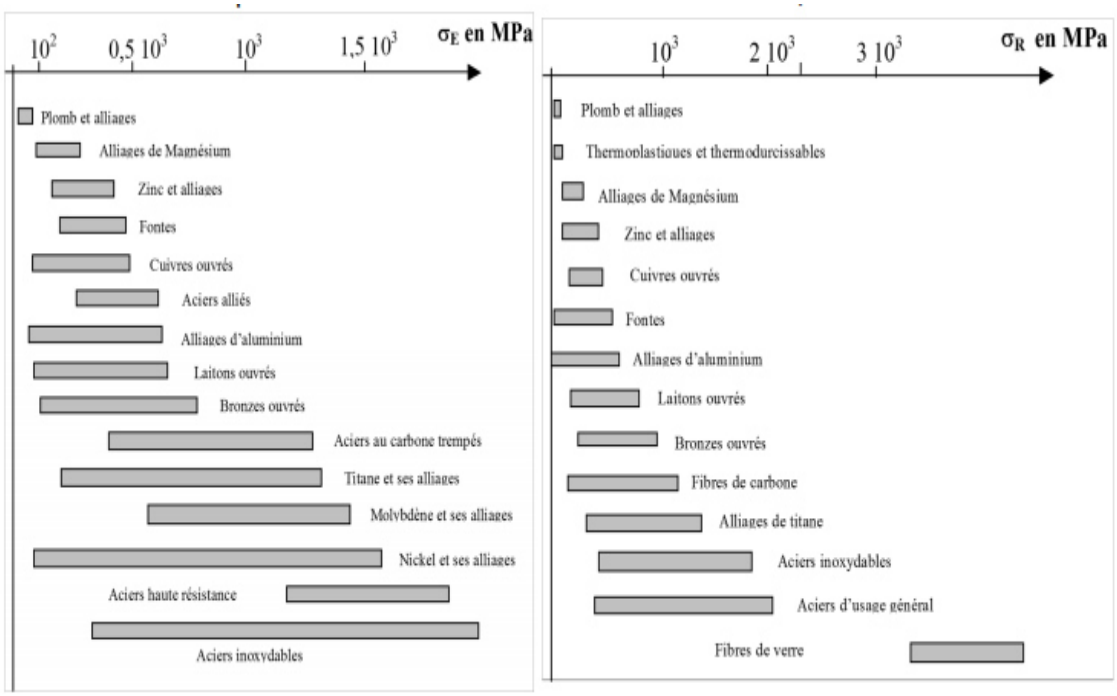


Figure 12 : *Classification des matériaux en fonction de la résistance des pièces en statique*

- **Ténacité Kic .... Rupture, fissure...**[19]

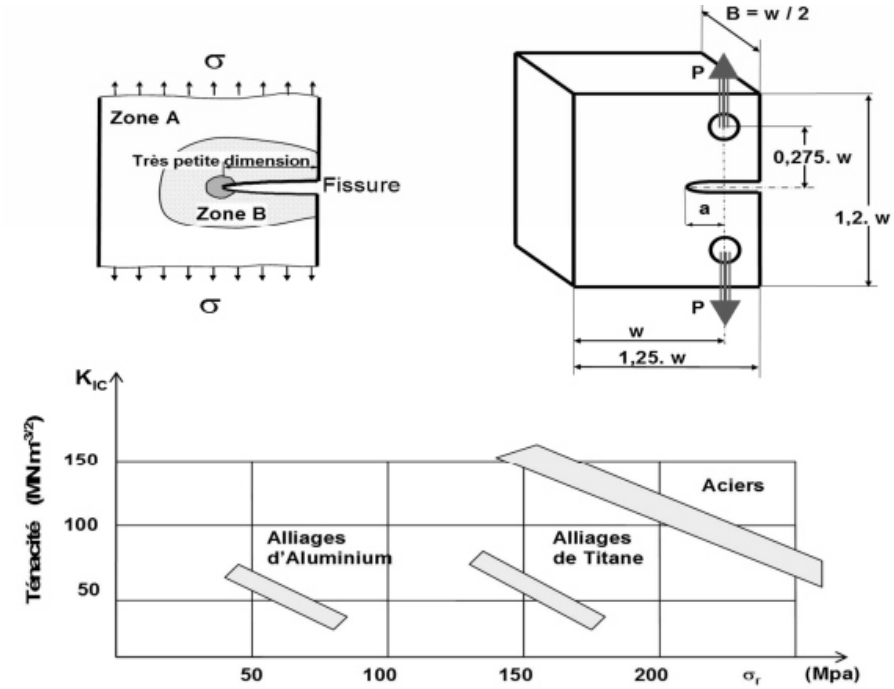


Figure 13 : *Classification des matériaux en fonction de la ténacité, rupture et fissure [19]*

II.4. Détermination des forces et moments dans un système mécanique

• Le dimensionnement des pièces et sous-ensembles d'un mécanisme qui nécessite la connaissance des efforts qui lui sont appliqués

• Les pièces sont isolées et les différents types de sollicitations analysés.

• L'utilisation de critères de résistance sur les zones critiques permet de définir des dimensions minimums assurant la tenue du système[18]

II.5. Détermination des efforts dans un système mécanique

• Si les vitesses des éléments sont constantes écritures d'équilibres quasi statiques (pas de balourd et pièces parfaitement symétriques).

• Le poids des pièces est parfois négligé, cela dépend des valeurs des forces en jeu. Néanmoins il convient de toujours le considérer et de décider si au regard des autres efforts en présence il peut ne pas être pris en compte**.**[18]

Différents cas de chargements

	Charges constantes	*Charges variables*
Eléments sans mouvement	Cas 1	Cas 2
Eléments en mouvement	Cas 3	**Cas 4**

II.6. Méthode de résolution des problèmes en statique

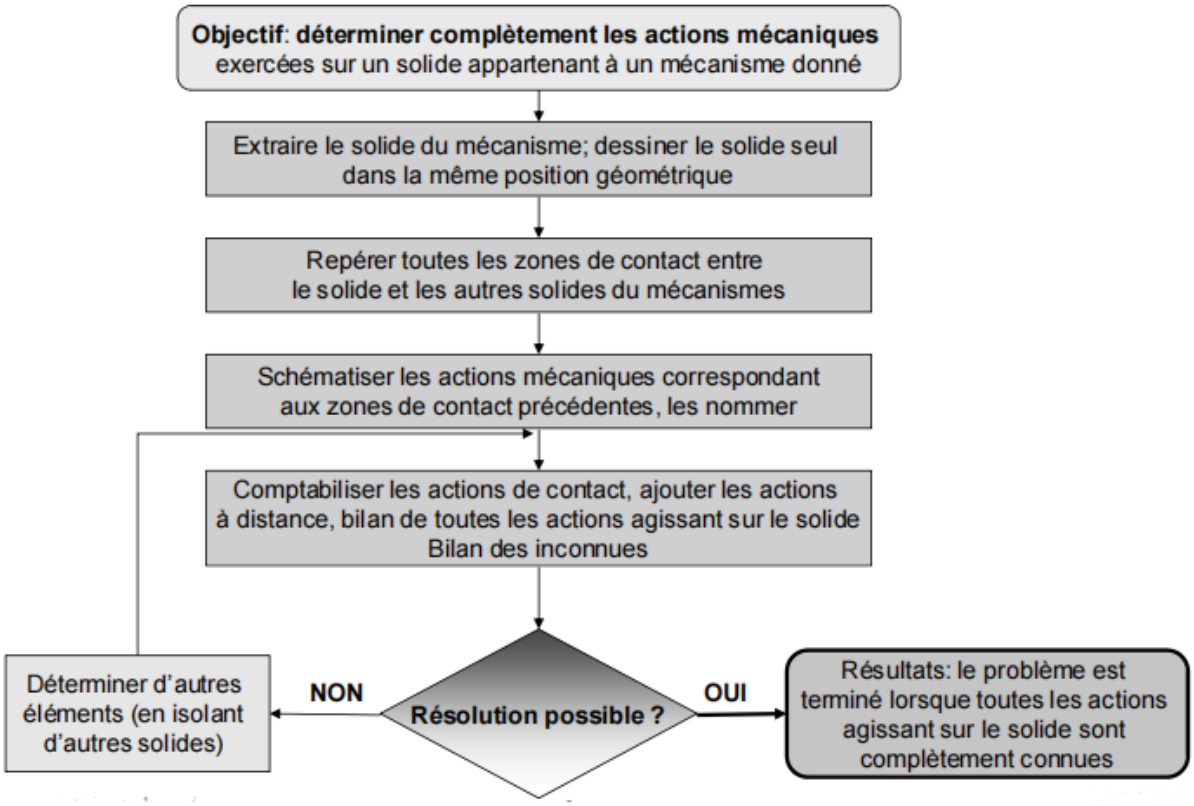


Figure 14 : *Illustration de la méthode de résolution des problèmes en statique*

II.7. Méthode générale de résolution des problèmes en statique par torseurs

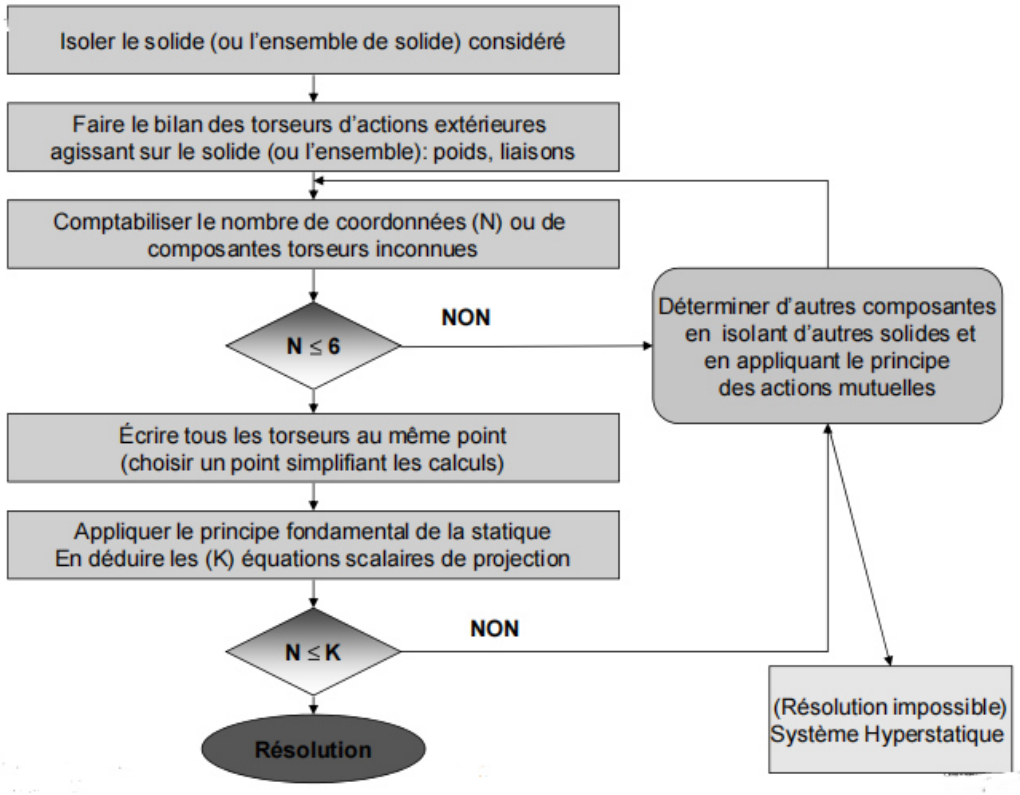


Figure 15 : *Illustration de la méthode de résolution des problèmes en statique*

II.8. Résistance des pièces en statique

- **Propriétés des Matériaux**

• Limite élastique Re

• Résistance à la rupture Rm

• Module d'élasticité, E

• Module de cisaillement, G

• Coefficient de poisson, ***v***

- **Résistance des surfaces**

$$P_{max} < P_{ADM}$$

➢ **Résistance des volumes**

• Critères

$$\sigma_{eq-MAX} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \frac{\sigma E}{\alpha}$$

• Von Mises

$$\sigma_{eq-MAX} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq \frac{\sigma E}{\alpha}$$

II.9. Contraintes dans la section critique A, contrainte équivalente

Le dimensionnement consiste à vérifier :

• Si dimensions connues – vérification $\sigma_{VM \leq \frac{\sigma}{\alpha}}$

• Si non, on calcul la dimension (diamètre) minimum

α est un coefficient de sécurité dépendant de plusieurs facteurs:

- Type de fonctionnement (intermittent, continu), régularité (à coups, chocs),

- Domaine industriel : automobile, aéronautique, etc…[18]

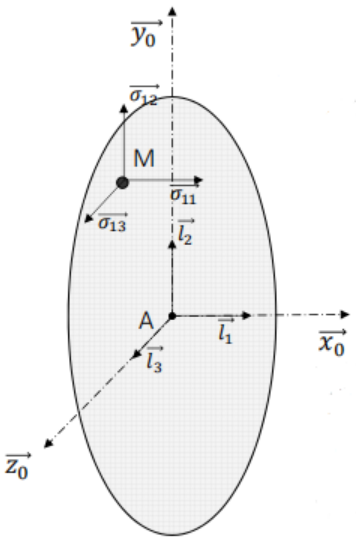


Figure 16 : *Illustration des contraintes dans la section critique A*

II.10. Rupture par fatigue-Historique

Phénomène remarqué vers 1800 sur les essieux de wagon de train après un temps de service limité

• Notion de chargement variable complètement réversible appliqué sur ces axes (flexion rotative)

• August Wöhler publie en 1870 ses recherches :

• Limite d'endurance, Nombre de Cycles, Diagramme (σ-N)

• Fatigue : terme employé pour désigner ce phénomène par Poncelet en 1839[18]

II.10.1. Introduction

Une pièce soumise à des charges variables se brise à un niveau de contrainte inférieur à celui de la contrainte de rupture statique du matériau : **phénomène de fatigue** [18]

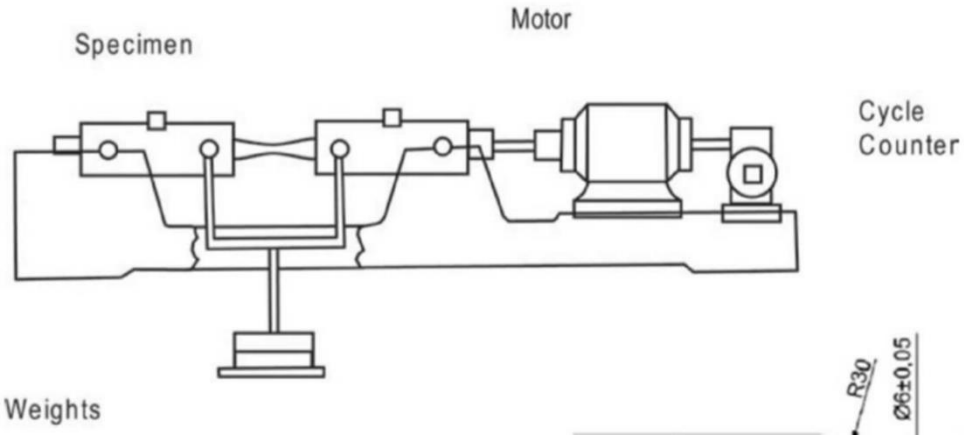


Figure 17 : Représentation schématique du phénomène de fatigue

• 90% des ruptures en service sont dues à de la fatigue

• La recherche de performance ou de diminution des impacts environnementaux demande de plus en plus de dimensionner les pièces en fatigue afin soit de les alléger, soit d'en prolonger l'usage.[18]

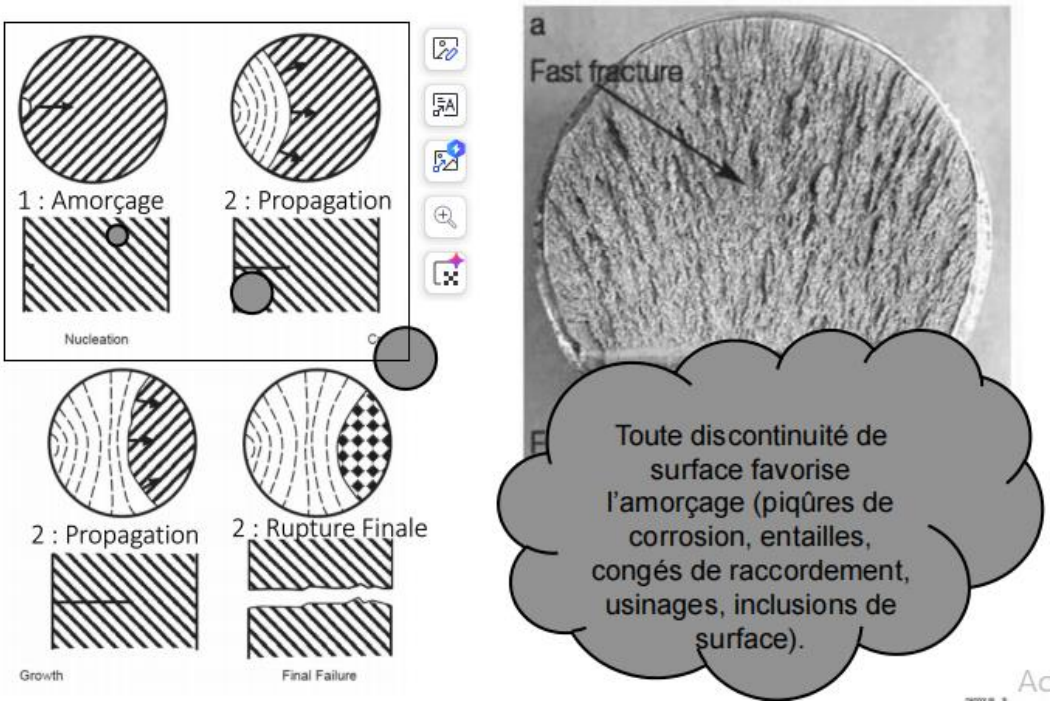


Figure 18 : *Illustration des phases de rupture*

II.10.2. Les 3 phases de la rupture

II.10.3. Modélisation des essais de Wöhler

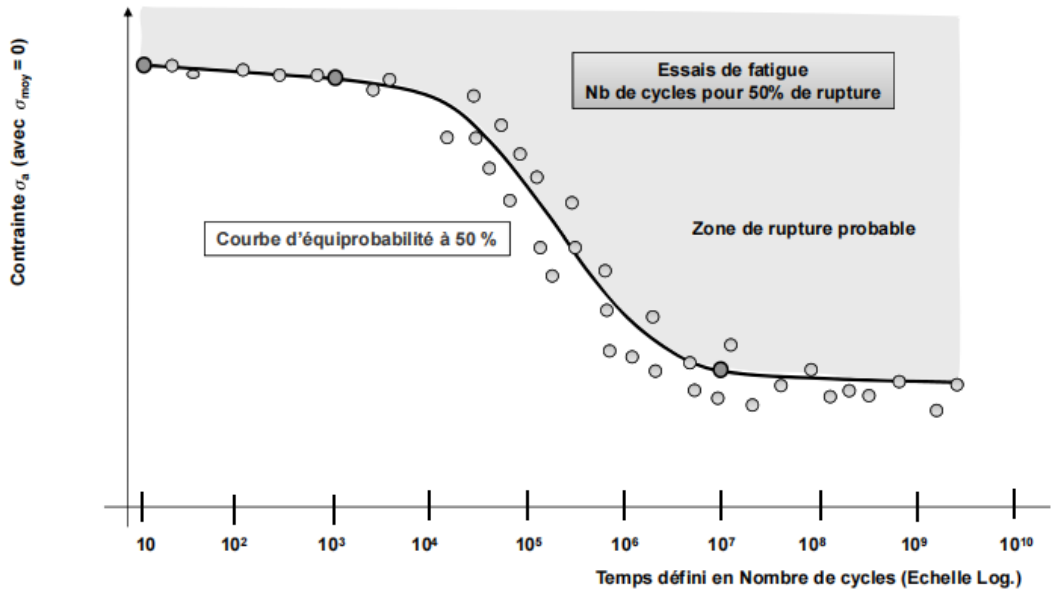


Figure 19 : *Modélisation des essais de Wöhler*

II.10.4. Mise en évidence de la limite en fatigue pour les aciers

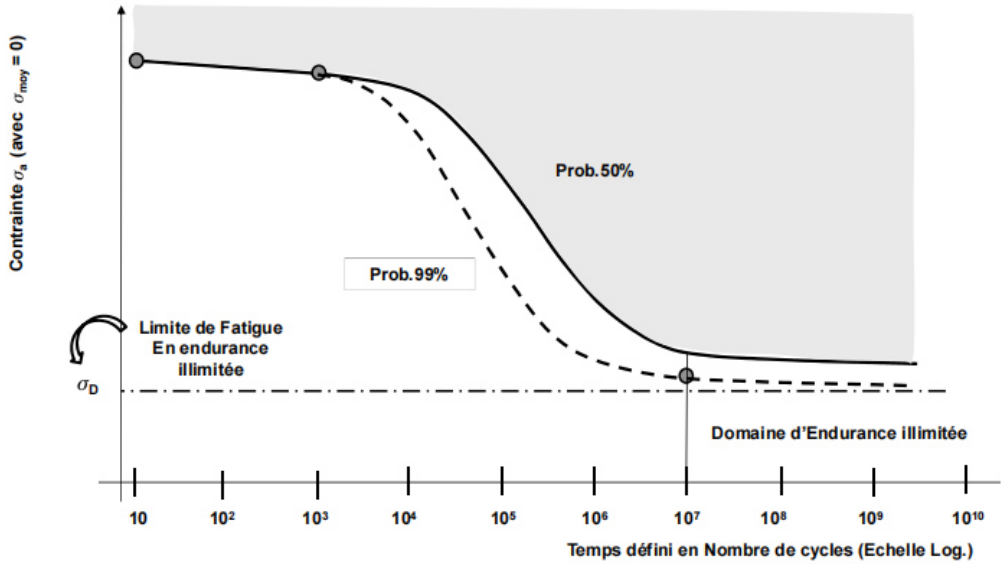


Figure 20 : *Illustration de la limite en fatigue pour les aciers[18]*

II.10.4. Dimensionnement avec Wöhler

• Pour les aciers, nous pouvons maintenant obtenir un dimensionnement simple à l'aide de la limite en fatigue : M.Wöhler

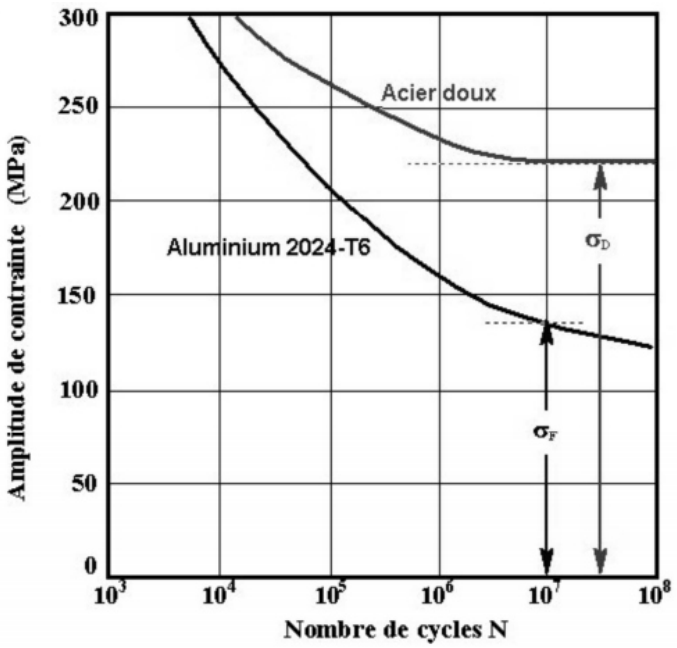


Figure 21 : *Dimensionnement avec Wöhler*

• Ce dimensionnement n'est valable que dans les conditions des essais : $\sigma_a \neq 0$ et $\sigma_m = 0$, ce qui limite fortement les cas d'applications.

• Ce dimensionnement n'est valable que pour les matériaux présentant une asymptote horizontale quand N tend vers l'infini. Ce n'est pas le cas des aluminiums.

II.10.5. Calcul de résistance à la fatigue Endurance une pièce (limite de la fatigue)

Recherche d'une loi représentative des essais

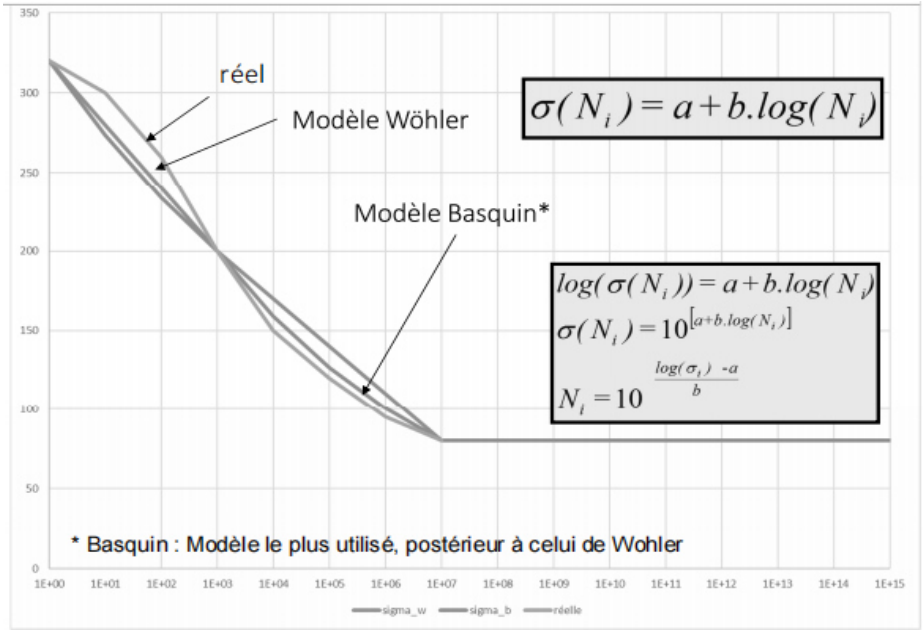


Figure 22 : *Etude comparative entre le modèle de Wöhler, réel et Basquin*

II.11 Conclusion

Dimensionner les éléments d'un système mécanique afin de garantir sa production et de prédire la durabilité de ces composants mécanique avec précision est encore difficile en raison du nombre élevé de paramètres d'influence, de leurs interdépendances, et des mécanismes de défaillance complexes associés. La prise en compte de plus de paramètres d'influence permet d'optimiser la géométrie afin d'obtenir des pièces légères, financièrement rentables et avec de hautes performances.

Cette contribution met en exergue les différents paramètre et sollicitation à prendre en compte ainsi que leurs interactions pour pouvoir nous inspirer de tous les phénomènes agissant dans le but de pouvoir dimensionner notre dispositif qui va faire sujet d'un brevet

innovant qu'on doit déposer à l'INAPI incessamment, et en même temps il va nous servir de thème pour notre mémoire de fin d'étude dans le but de l'obtention du diplôme de master-2 en fabrication mécanique et productique. Par ailleurs, ce projet intitulé Dispositif de Guidage pour Travaux de Filetage est sujet d'un modèle d'ingéniosité et de créativité pour la création d'un projet d'entreprise Startup.

CHAPITRE III

USINAGE DE FILETAGE : TYPE DE PROCESSUS ET APPLICATION

III.1. Généralités

Le filetage est l'un des procédés d'usinages avec ou sens enlèvement de matière et d'un point de vue industriel et commercial, la connaissance des filetages et des éléments filetés est importante. Une quantité innombrable d'assemblages démontables sont réalisés au moyen de la visserie boulonnerie. Tous ces éléments sont interchangeables, facilement disponibles dans des milliers de références (les fabricants proposent de nombreux catalogues), normalisés internationalement et économiques. Ils peuvent sans difficulté être fabriqués à la demande et sur mesure avec une grande précision et une grande qualité [20]**.**

Les filetages sont également utilisés comme organe de manœuvre pour transmettre le mouvement et l'énergie (vis de manœuvre, vis pour la robinetterie industrielle...). Il existe des vis à billes fonctionnant sans frottement pour des applications exigeantes (commande numérique...). Ingénieurs, concepteurs et techniciens de toutes disciplines doivent donc être familiarisés avec ces éléments, leur emploi, leur implantation et les représentations graphiques normalisées.

Un filetage est un procédé qui permet entre autres d'assembler deux pièces de manière démontable à l'aide d'une vis et un écrou, pour la vis, il s'agit d'un filetage extérieur tandis que pour l'écrou, il s'agit d'un filetage intérieur appelé taraudage.

Le filet est la partie en saillie obtenue en creusant une rainure hélicoïdale sur un cylindre pour la vis ou dans un trou pour l'écrou. Cette rainure présente les caractéristiques d'une hélice qui est une courbe qu'on pourrait tracer avec un crayon se déplaçant en translation le long du cylindre lui-même en rotation autour de son axe de révolution ; ces mouvements s'effectuant de façon constante [20]**.**

III.2 Techniques d’usinage du filetage

Les fils sont un élément important et indispensable dans le monde complexe de la fabrication moderne. Ils facilitent la connexion entre les pièces à faible coût et peuvent être trouvés partout, de votre téléphone portable à un ensemble moteur. Pour fabriquer des produits durables et de haute qualité, nous devons comprendre les nuances du filetage. Dans la fabrication moderne, la gestion efficace de plusieurs threads est cruciale pour optimiser la production et garantir des résultats de haute qualité. L'objectif principal d'un filetage est de servir d'agent de couplage entre deux composants. Il permet la fixation grâce à l'interaction du filetage mâle et femelle.

L'usinage de filetages englobe une variété de méthodes et d'outils conçus pour produire des filetages précis sur des pièces. Le choix entre ces méthodes, principalement le filetage et le formage du filetage, dépend du matériau, de l'application et de la finition souhaitée du filetage.

Dans ce chapitre, nous aborderons les subtilités de l'usinage des filetages, en explorant différents types de filetages, la terminologie et les principales technologies d'usinage. Nous aborderons également le processus d'usinage étape par étape, les applications de filetage et bien plus encore [21]**.**

III.2.1 Usinage du filetage par enlèvement de matière

L'usinage de filetages par enlèvement de matière est un processus soustractif vital qui consiste à retirer de la matière pour créer des filetages sur une pièce. Les fabricants utilisent une gamme d'outils d'usinage pour créer différents diamètres de filetages internes et externes, gérant souvent plusieurs filetages simultanément pour améliorer l'efficacité. Au fur et à mesure que l'outil de filetage tourne, il retire progressivement du matériau formant une crête hélicoïdale continue appelée filetage de vis [22]**.**

III.2.1.1 Usinage du filetage sur un tour



Figure 23 : *Illustration de la technique d'usinage du filetage au tour*

Le filetage au tour est une opération exigeante dans laquelle un bon contrôle des copeaux, une bonne durée de vie des outils et une bonne qualité des pièces peuvent être difficiles à obtenir. L'outil de filetage effectue plusieurs passes pour produire le filet. En divisant la profondeur totale du filet en plusieurs coupes de faible profondeur, le rayon de bec de la plaquette qui crée le profil n'est pas surchargé. Le tour parallèle permet l'exécution des divers filetages. L'outil à fileter a un profil conforme à la section du filet et sa partie active engendre un filetage de section déterminée suivant un plan axial. L'arête de l'outil épouse le contour totalement ou par fractions successives. Le filetage extérieur au tour est souvent plus facile et moins exigeant pour l'outil que le filetage intérieur au tour et les résultats escomptés peuvent être obtenus de différentes manières. Le filetage intérieur au tour est plus exigeant que le filetage extérieur car l'évacuation des copeaux doit être efficace et l'outil est souvent plus long et mince [22]**.**

III.2.1.2 Filetage à la fraise

Le filetage à la fraise en intérieur est un procédé d'usinage qui, sur le plan cinématique, est rigoureusement identique au procédé de tourbillonnage intérieur. L'environnement d'utilisation de ces deux procédés est toutefois différent (type de machine, type de pièce, nature des outils) et le filetage à la fraise en extérieur diffère légèrement, ce qui justifie de garder la distinction entre ces deux procédés. Le filetage à la fraise s'utilise essentiellement

sur centre d'usinage. La fraise possède un ou plusieurs profils du filet sans hélice et la broche lui donne le mouvement de coupe. La machine déplace l'axe de l'outil suivant une trajectoire hélicoïdale égale au pas du filet pour réaliser l'hélice de celui-ci. La **Figure 2** décrit un cycle avec une fraise filetée sur toute sa hauteur. Le cycle comporte un déplacement suivant une hélice sur un demi-tour pour engager l'outil dans la matière, puis un tour entier pour usiner complètement le filet, et enfin un second demi-tour pour dégager l'outil. En pratique, l'engagement radial est souvent trop important, à la vue du pas du filet et de la dureté du matériau, pour usiner le filet avec une interpolation hélicoïdale sur un seul tour. En général, deux ou trois interpolations avec un engagement progressif sont nécessaires. Cette technique est utilisable à l'identique pour usiner un filet intérieur ou un filet extérieur [23]**.**



Figure 24 : *Technique de filetage à la fraise*

Il existe différentes technologies d'outils comme le montre la Figure 2. Il y a les fraises en carbure monobloc avec plusieurs dents qui permettent une bonne productivité. Il existe aussi les fraises à plaquette amovible munie d'un seul peigne fileté ou de plusieurs pour les fraises de grande dimension et l'outil monograin. Dans le cas de l'utilisation de ce dernier, il faut évidemment faire une interpolation hélicoïdale sur un grand nombre de tours afin d'usiner le filet sur toute sa hauteur. Cette configuration est quasi identique à celle du tourbillonnage[24]**.**

La réalisation d'un filetage intérieur nécessite forcément l'usinage préalable de l'avant- trou. Des constructeurs proposent donc des outils étagés assurant différentes fonctions qui peuvent être chanfreinage + filetage ou perçage + chanfreinage + filetage. L'utilisation de ce type d'outil, expliqué à la Figure 16, permet de réduire le nombre et les changements d'outil sur

machine donc de diminuer les temps de cycle associés aux opérations. Toutefois, de tels outils sont adaptés uniquement aux matériaux qui posent peu de problèmes d'usinage. Cette technique a pour avantage de permettre d'avoir une vitesse de coupe constante et donc importante, contrairement au taraudage. Elle est donc intéressante pour le filetage dans des matériaux à faible usinabilité comme les alliages de titane par exemple. Le bris d'un outil s'avère beaucoup moins critique qu'en taraudage pour la broche de la machine car le travail ne s'effectue pas suivant l'axe Z. Le taraudage engendre aussi davantage de maintenance sur les broches du fait des nombreuses inversions de rotation. Une fraise à fileter, en plus, permet d'usiner des filets de grands diamètres nominaux et une même fraise peut faire des filets de même pas et de diamètre différent. Par contre, les cycles à la fraise à fileter sont longs et il faut une machine avec trois axes numérisés. Le filetage à la fraise est notamment utilisé dans l'industrie de la mécanique générale pour la réalisation de filets de grand diamètre, supérieur à 40 mm, et dans l'industrie de l'horlogerie pour l'obtention de filet de très petit diamètre, inférieur à 1 mm [24]

III.2.1.3 Usinage du filetage à matrice (filière et taraud)

Le filetage à matrice est utilisé pour couper des filetages externes sur des pièces cylindriques, telles que des boulons et des tiges. Les matrices sont des outils circulaires dotés de filetages internes qui coupent la pièce lorsqu'ils tournent autour d'elle. Les matrices réglables permettent des ajustements mineurs de taille, permettant un ajustement serré de la partie filetée [22].



Figure 27 : *Technique d'usinage à matrice*

Cette méthode d'usinage du filetage est couramment utilisée en mécanique. Elle présente beaucoup d'avantages, car l'opérateur n'est pas contraint de régler le régime de coupe par rapport aux caractéristiques géométriques du filetage. L'outil les par sa forme va copier le filetage sur la pièce systématiquement, sauf que cette méthode présente des inconvénients majeurs, car dans la majorité des cas le travail se fait manuellement ce qui engendre des défauts de positionnement et d'alignement de l'outil par rapport à la pièce. De plus le couple de force n'est pas contrôlable et pourrais provoquer la casse de l'outil. Pour rentabiliser cette méthode d'usinage nous avons pensé à fabriquer un dispositif de guidage qui va faciliter l'usinage et garantir une qualité optimale [20]**.**

III.2.2 Usinage du filetage par déformation plastique

Cette technique d'usinage exploite la plasticité (propriété d'un matériau qui se déforme de façon irréversible à l'application d'une contrainte donnée) des métaux et autres solides. Le formage par déformation plastique est principalement utilisé pour façonner l'acier, dans le secteur automobile par exemple[25]**.**

Le laminage du fil est un processus de déformation plastique, qui consiste à presser le haut de



Figure 25 : *Illustration de la technique d'usinage par déformation plastique*

la roue de roulement du fil ou de la plaque de roulement du fil dans le matériau vierge des pièces à température ambiante de sorte que tous les matériaux au bas du fil soient pressés vers le haut de la dent du fil pour forme le fil sur la pièce. Le filetage roulant est traité selon le principe du volume invariable, de sorte que la précision du filetage est liée à la taille de l'ébauche de vis[26]**.**

III.3 Caractéristiques technique du filetage

Dans le domaine de l'usinage de filetage, plusieurs terminologies clés sont essentielles à la compréhension et à l'exécution efficace du processus. Le pas fait référence à la distance entre les filetages adjacents, ce qui est crucial pour assembler les composants de manière transparente. L'angle du filetage, un autre terme essentiel, est l'angle formé par les côtés du filetage, qui influence la résistance et la capacité de charge de la connexion filetée. De plus, les diamètres majeurs et mineurs jouent un rôle important ; le diamètre primaire est le plus grand diamètre d'un filetage, tandis que le diamètre nominal est le plus petit. Ces dimensions sont essentielles pour garantir un ajustement parfait des filetages, offrant ainsi un assemblage sûr et fiable dans diverses applications mécaniques. Pour concevoir et créer efficacement un filetage, nous devons comprendre les paramètres géométriques clés du filetage [20]**.** Ils comprennent ;

- **Crête** : Comme son nom l'indique, la crête fait référence au point supérieur d'un fil. Il relie les flancs d'un même filetage et peut être plat ou arrondi.
- **Racine** : C'est la surface inférieure de la rainure. Il rejoint les flancs au fond des rainures filetées.
- **Flanc** : En termes simples, le flanc est le côté d'un fil. Il relie la crête à la racine et fait office de surface de contact lors des assemblages.
- **Pas** : Le pas de filetage peut être défini comme la distance entre un point sur une structure filetée et un point équivalent sur un filetage adjacent. Par exemple, la distance entre les crêtes de deux fils successifs.
- **Axe du fil** : C'est une ligne imaginaire qui passe par le milieu d'une vis filetée.
- **Diamètre principal** : Il s'agit du diamètre du cylindre majeur, un cylindre imaginaire (concentrique à l'axe du filetage) qui lie les crêtes d'un filetage externe ou les racines d'un filetage interne.
- **Diamètre mineur** : C'est le diamètre du cylindre mineur, qui est un cylindre

imaginaire qui touche les racines d'un filetage externe ou les crêtes d'un filetage interne.

- **Angle d'hélice** : C'est l'angle entre l'axe du filetage et l'hélice sur un filetage droit. Sur un filetage conique, l'angle d'hélice fait référence à l'angle entre l'axe du filetage et la spirale conique du filetage [27]**.**

III.3.1 Caractéristiques de l'hélice

La caractéristique du mouvement d'une vis ou du vissage est la création simultanée des mouvements de rotation et de translation. L'hélice (fig.1) est décrite par un point qui se déplace à une vitesse constante sur une droite, qui, elle-même, tourne à vitesse constante autour d'un cylindre de rayon r. La translation P, pour un tour complet, est appelée pas. L'angle de l'hélice o est donné par : tg=P/2πr[20]**.**

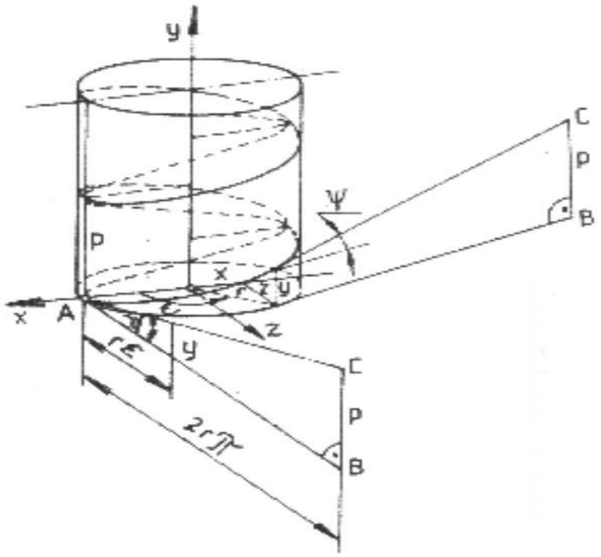


Figure 26 : *Production d'une hélice*

L'hélice représentée par la figure 4 est dite tournante à droite, car elle monte dans le sens de Z en tournant de gauche vers la droite. Si elle montait dans le sens de Z en tournant de la droite vers la gauche, elle serait qualifiée de tournante à gauche. L'angle d'hélice, pour le filetage d'assemblage, est à choisir assez petit pour que l'auto blocage soit assuré

La fabrication peut être effectuée à l'aide d'un taraud (filetage interne) ou d'une filière (filetage

externe) et pour une meilleure qualité sur un tour à vis-mère avec un outil à fileter à plaquette rapportée, ou avec un outil-peigne ou bien encore sur une fraiseuse à l'aide d'une fraise disque (filet long pour broche) ou d'une fraise de filet court en forme de développante ou encore d'un outil de forme frappant (tourbillonnage de filet). Les filets des outils de coupe et de mesure en acier dur sont produits avec des meules d'un ou de plusieurs profils. Pour la production de filets en masse, les procédés d'usinage sans enlèvement de copeaux se sont imposés (déformation à froid)[28].

III.3.2 Profils de filetage et domaine d'applications

La plupart du temps, on distingue les profils de filetage suivants : filetage pointu, filetage trapézoïdal, filetage à la scie, filetage plat et filetage rond. Le filet métrique ISO, très répandu en Europe, est également appelé **filet pointu**. Un **filetage trapézoïdal** ou TR se caractérise par le profil des filets qui lui a donné son nom et qui, vu de côté, a la forme d'un trapèze symétrique. Les **filets de scie** se caractérisent par un profil qui ressemble à une dent de scie[29]. Ils ont un angle de flanc compris entre 30 et 45 degrés et se distinguent par leur profil asymétrique qui rappelle les dents de scie. Leur forme permet de transmettre des forces élevées dans le sens axial, le long de la vis, de la tige filetée ou du boulon. Les **filets ronds**, ou Rd en abrégé, appartiennent au groupe des filets coulissants et sont capables d'absorber des forces importantes. Le pas d'un filet rond est généralement indiqué en pouces. Les **filets plats** ont un profil plat par rapport aux autres types de filets et présentent un angle de flanc de 0 degré, ce qui fait que les flancs du filet sont parallèles entre eux. Le profil du filet peut être triangulaire (appelé aussi métrique), trapézoïdal ou rond. Le choix d'un profil est conditionné par l'utilisation. On présentera dans ce qui suit les profils les plus utilisés [30]

Profil métrique ou « triangulaire » (Symbole M) qui est le plus répandu - visserie courante du commerce (vis d'assemblage)

Profil Trapézoïdal (Symbole Tr) - transformation du mouvement avec efforts importants

Profil Gaz conique ou cylindre (respectivement Symboles RC et Rp) – bonne étanchéité

Profil Dissymétrique ou « dents de scie » - transmission d'efforts importants dans un seul sens.

Profil Rond (Symbole Rd) - efforts importants et chocs (axe d'attache de wagons).

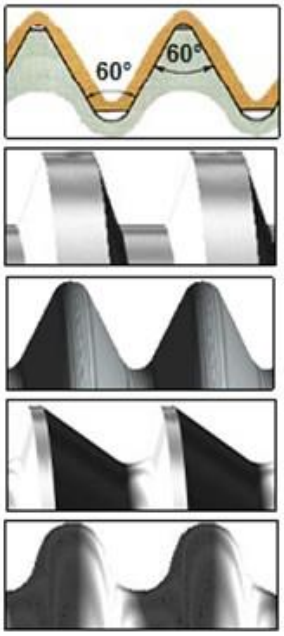


Figure 27 : *Différents profils du filetage[30]*

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes méthodes d'usinage des filetages, qu'elles soient manuelles ou réalisées sur des machines-outils. Chaque procédé présente des avantages et des inconvénients selon le type de pièce, la précision demandée et les moyens disponibles.

Nous avons également identifié les principales difficultés rencontrées lors de ces opérations, comme la casse de l'outil, l'évacuation des copeaux et la précision de l'alignement.

Afin de répondre à ces problématiques et d'améliorer la qualité du filetage dans notre cas d'étude, nous avons conçu un dispositif spécifique qui permet de résoudre ces problèmes et de garantir de meilleures conditions de réalisation.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre les contraintes liées aux opérations de filetage et de proposer une solution adaptée à notre environnement de travail.

CHAPITR IV

PROCESSUS DE FABRICATION ET PREPARATION DES EQUIPEMENTS

IV.1 Introduction

Dans le domaine de l'usinage de précision, chaque étape du processus de fabrication mécanique doit répondre à des exigences strictes en termes de qualité, de sécurité et de productivité. Parmi les opérations les plus délicates, figure le filetage, une tâche qui demande non seulement un contrôle rigoureux de l'alignement mais aussi une stabilité parfaite de l'outil et de la pièce à usiner. En atelier, les défaillances courantes telles que le désalignement de l'axe de coupe, les vibrations parasites ou encore la fragilité des petits tarauds entraînent fréquemment des arrêts de production, des casses d'outils et des pertes matérielles considérables.

Face à cette problématique récurrente observée lors de nos travaux pratiques, nous avons jugé essentiel d'apporter une réponse technique adaptée et ciblée. C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet : la conception d'un dispositif de guidage dédié aux opérations de filetage. Ce dispositif a été pensé comme une solution innovante, ergonomique et simple à intégrer dans les environnements de production existants.

Ce chapitre se consacre ainsi à la description méthodique de notre démarche de conception. Nous allons y détailler les choix techniques adoptés, justifiés par une analyse fonctionnelle précise, ainsi que les étapes de modélisation et d'élaboration des plans d'ensemble et de définition. Chaque composant du dispositif a été réfléchi de manière à optimiser l'alignement axial, réduire les efforts de coupe et améliorer la durée de vie des outils, tout en garantissant la sécurité de l'opérateur.

Notre approche s'est appuyée sur une double exigence : la faisabilité en atelier d'une part, et l'efficacité technique mesurable d'autre part. Ce dispositif, bien que simple dans son principe, repose sur une logique de conception robuste, centrée sur les besoins réels du terrain.

IV.1 Etude et réalisation du dispositif de guidage pour travaux de filetage.

Ce projet a représenté pour nous bien plus qu'un simple exercice académique. Il a été une véritable immersion dans le monde de l'ingénierie appliquée, où nous avons pleinement assumé **le rôle d'un bureau d'études industriel**, en menant une démarche structurée, rigoureuse et ancrée dans la réalité de la conception mécanique.

Nous avons commencé par analyser le besoin technique spécifique lié aux opérations de filetage, en identifiant les lacunes des méthodes classiques : manque de guidage, alignement imprécis, ruptures fréquentes des outils, et faible adaptabilité. À partir de ce diagnostic, nous avons suivi une démarche structurée, allant de la définition des besoins à la validation du produit fini. Cette démarche concerne plusieurs phases clés, incluant la pré-étude, la conception conceptuelle, la conception détaillée, la fabrication et la validation du prototype, centrées sur la fiabilité, la précision et la sécurité tout en respectant les normes en vigueurs.

Cette phase de conception nous a amenés à réaliser une série d'études techniques :

- Choix des matériaux,
- Définition des tolérances fonctionnelles,
- Détermination des jeux d'ajustement,
- Analyse des efforts mécaniques.
- Adaptabilité aux mécanismes de montage disponible sur les machines-outils

À partir de l'exploitation de solutions informatiques de conception assistée par ordinateur, une étude de faisabilité, les plans de définition et nomenclatures associées. Une analyse des performances du produit ou du système conçu en simulant son fonctionnement toujours à l'aide de logiciels spécifiques et de solutions informatiques adaptées, afin d'en vérifier la fonctionnalité mais également de déceler d'éventuelles contraintes, déformations ou fatigue mécanique

A partir de l'idée au produit fini, Nous avons généré plusieurs dessins préliminaires figure…, que nous avons itérés, corrigés, validés. Chaque trait sur ces plans traduisait une contrainte réelle, une fonction mécanique à assurer.

Nous avons ainsi appris à faire des choix techniques fondés : adapter une cote, revoir une liaison, repositionner un perçage non pas de manière arbitraire, mais dans une logique fonctionnelle et industrielle. Cette rigueur nous a conduits à produire les dessins de définition finaux, des plans techniques complets et normalisés, intégrant toutes les mentions nécessaires à la fabrication : **tolérances, ajustements, références normalisées, spécifications de matériaux, finitions, états de surface**…

Ces dessins finaux (**dessins de définitions)** représentent la version industrialisable du prototype : ce sont les documents que l'on transmet directement au **bureau des méthodes** pour élaborer le routage d'usinage de chaque élément du produit pour enfin lancer la fabrication. Ils ne sont pas de simples schémas ; ce sont des traductions techniques concrètes de tout un processus de conception, d'étude, d'expérimentation, et de décision.

Ce travail nous a également permis de faire le lien entre la conception mécanique (CAO) et la production numérique (CFAO). Nous avons réfléchi à la programmation des parcours outils, à la lecture des tolérances par la machine, à la conversion des dessins en codes ISO exploitables sur centres d'usinage à commande numérique.

Ainsi, à travers cette démarche complète de l'analyse du besoin à la modélisation, puis à la définition finale, nous avons exercé, de manière concrète, le rôle d'un bureau d'études : **concevoir, tester, décider, formaliser et préparer la fabrication.** Ce fut une expérience profondément formatrice, où nous avons développé à la fois nos compétences techniques, notre autonomie, notre sens critique, et notre capacité à travailler dans un cadre d'ingénierie exigeant et professionnel.

IV.2 Origine du besoin et analyse fonctionnelle

Le besoin a émergé suite à des observations sur le terrain : lors des travaux manuels ou semi-automatisés de filetage, l'opérateur doit souvent guider manuellement l'outil, ce qui engendre des défauts d'alignement. Cela est particulièrement vrai pour les pièces cylindriques de petit diamètre, où le moindre décalage angulaire provoque un effort latéral excessif sur le taraud. Nous avons donc procédé à une **analyse fonctionnelle** du besoin. Le dispositif devait :

- Permettre un **guidage axial linéaire** et fluide,
- Être compatible avec les systèmes de fixation sur les machines-outils existantes dans l'atelier,
- Résister aux efforts mécaniques tout en restant compact et facile à manipuler.

IV.3 Objectif de la conception

L'objectif de cette invention est de développer un dispositif simple, efficace et fiable pour guider l'outil de filetage ou de taraudage avec une précision maximale. Ce dispositif de guidage permet de réduire les erreurs d'alignement, d'éviter les risques de rupture des outils (filière et tarauds) par le contrôle du couple de torsion, et de garantir une meilleure qualité d'usinage tout en restant facile à intégrer dans les machines-outils conventionnelles.

Pour ne pas rater l'opération de filetage et gaspiller la matière à usiner ou de faire recours à des systèmes complexes, le mécanisme proposé agit directement sur le bon positionnement et la stabilité de l'outil durant toute l'opération d'usinage. Cela permet un usinage optimal, de gagner le temps des réglages et permettre la répétabilité des opérations de filetage dans un environnement sécurisé.

C'est une solution technique intelligente et accessible, qui répond à un vrai besoin industriel sans compliquer les processus existants.

- Réduire la difficulté de l'opération de filetage manuelle.
- Assurer une rapidité et une facilité d'exécution du filetage.
- Offrir un bon guidage de l'outil (taraud ou filière).
- Illuminer risques de dommage de l'outil en cas d'effort excessif.
- Améliorer la qualité et la sécurité lors des opérations de filetage.

IV.4 Présentation du dispositif.

Le dispositif est un mécanisme télescopique universel adaptable au machines-outils

conventionnelles qui peut prendre en charge des filières ou des tarauds de différents modèles et de dimensions variables. Il permet un bon guidage et une stabilité remarquable pour exécuter des travaux de filetage à des cadences exigeantes.

Cette invention se compose de sept pièces, dont trois sont spécialement conçues et fabriquées, tandis que les quatre autres peuvent être achetées sur le marché à des prix dérisoires. Grâce à ce produit complètement innovant, la production de filetage est devenue une opération rentable et peu couteuse par les avantages sous cités :

- Réalisation d'opérations de filetages et taraudage avec le même dispositif sans préréglage des paramètres du filetage ;
- Précision dans le guidage à partir de l'engagement de l'outil ;
- Réduction de l'usure de l'outil grâce à un guidage optimal ;
- Montage et démontage des outils de filetage rapide ;
- Fixation de dispositif sur n'importe quelle machine-outil.

IV.5 Description de l'essence technique et fonctionnelle de dispositif.

Le dispositif proposé est conçu pour les travaux de filetage sur un tour parallèle. Il permet de guider avec une meilleure précision un taraud ou une filière afin de réaliser des filetages internes ou externes avec une stabilité et un alignement optimal. L'élément principal du dispositif est constitué d'un arbre constitué d'un cône Morse standard, selon les normes universelles MK4, permettant ainsi son montage direct dans la poupée mobile de n'importe quel tour. Ce cône est prolongé par un corps cylindrique usiné avec précision sur lequel se loge une bille en acier poussée par un ressort à boudin dont la pression est réglée par une vis sans tête.

La pression exercée sur la bille est ajustée par la vis (M10) grâce au ressort afin assurer un déclenchement de sécurité une foi la force du couple de torsion dépasse la résistance de l'outil (filière ou taraud) en relâchant en rotation le fourreau par rapport à l'arbre. Aussi pour assurer un positionnement stable et un bon guidage dans l'axe tout le long de la cour de la rainure

oblong sur le fourreau pendant l'opération de filetage.

L'ajustement glissant 35H7g6 pour pièces avec guidage précis ayant des mouvements de faibles amplitudes est retenue pour le montage de la partie cylindrique de l'arbre avec l'alésage du fourreau pour permettre une translatassions harmonieuse et sans frottement tout le long de la course prévue par le trou oblong du fourreau sans relâche tant que le couple de rotation ne dépasse pas la résistance a la rupture de l'outil.

Sur la partie chambrée du fourreau, il est possible de monter différentes filières standard de modules variés, en fonction du type de filetage à exécuter. Ces filières sont fixées en rotation à l'aide de quatre vis M8, assurant ainsi une liaison rigide et fiable entre le dispositif et la filière.

En alternative, la filière peut être remplacée par un adaptateur spécifique permettant d'effectuer des travaux de taraudage. Cet adaptateur est conçu pour recevoir un mandrin de perceuse standard, fixé à l'aide d'un filetage métrique M12 usiné en bout de l'adaptateur, offrant ainsi une grande polyvalence au dispositif.

Ce système permet d'alterner rapidement entre les opérations de filetage par filière ou par taraud, selon les besoins de l'usinage, tout en conservant la stabilité, l'alignement et la modularité du mécanisme.

Ce système mécanique simple, mais ingénieusement conçu, permet un contrôle rigoureux de l'alignement entre l'outil et la pièce à usiner, réduisant ainsi le rebut de fabrication, les risques de casse des outils, et améliorant la qualité finale du filetage.

L'ensemble du mécanisme est monté dans la poupée mobile de n'importe quelle machine-outil par l'insertion de son cône morse. Après avoir monté l'outil de filetage (taraud ou filière) selon le type de filetage à réaliser, la pièce est fixée dans le mandrin du tour.

Une fois l'outil sélectionné et monté sur le dispositif de guidage, on règle la vitesse de rotation à un régime optimal, adapté au filetage. Ensuite, on engage l'outil (filière ou taraud) en le mettant en contact avec la pièce à usiner pré dimensionnée.

Une fois la mise au point effectuée on doit immobiliser la poupée mobile. La rotation de la pièce à fileter permet l'entrainement de l'outil fixé sur le fourreau qui à son tour doit suivre en translation à la vitesse du pas du filetage défini par le type d'outil choisis.

Si l'effort de coupe devient important, et pour éviter les risques de casse de l'outil ou d'endommagement de la pièce, la bille de guidage compressé par le ressort **« Ressort de compression à section rectangulaire (ISO 10243) »,** et réglé par une vis permet d'absorber cet effort. Ce mécanisme de sécurité agit en cas de surcharge.

IV.6. Processus de réalisation du dispositif.

IV.6.1 Choix de la matière d'œuvre

Lorsqu'il s'agit d'usinage de haute précision, la sélection minutieuse du matériau brut est une étape cruciale. Imaginez-vous en train de sculpter une œuvre d'art : chaque détail compte, chaque choix influence le résultat final. Cette analogie s'applique parfaitement à la fabrication des pièces usinées sur mesure.

L'usinage, processus fondamental dans la conception de pièces usinées, repose sur une préparation méticuleuse du matériau brut. Avant de tailler, forer ou façonner, il est essentiel de choisir soigneusement le matériau en fonction de son usage final. Cette étape, souvent négligée, est pourtant cruciale pour garantir la qualité et la durabilité des pièces usinées. On commence par sélectionner le matériau le plus approprié, en tenant compte de ses propriétés mécaniques et chimiques. Vient ensuite la phase de préparation, où le matériau est coupé aux dimensions standard et soumis à un traitement de surface rigoureux pour enlever toute impureté.

Les tests et inspections jouent également un rôle central, permettant de vérifier que le matériau est bien compatible avec les exigences de l'usinage. À travers cette étude, nous explorerons chaque étape, de la sélection initiale à la vérification finale, afin d'assurer une préparation optimale du matériau qui va servir pour la réalisation de notre projet en tenant compte des critères intournables permettant un choix judicieux.

Le choix du matériau dépend en grande partie de l'application finale de la pièce usinée. Par exemple, dans l'industrie aéronautique, les matériaux doivent résister à des contraintes extrêmes tout en étant légers. En revanche, pour des applications industrielles comme les engrenages ou les axes rotatifs, on privilégiera des matériaux robustes et durables tels que l'acier trempé ou les alliages spécifiques. Les propriétés mécaniques telles que la dureté, la résistance à la traction et la ductilité sont essentielles. De plus, il faut également considérer les propriétés chimiques comme la résistance à la corrosion ou aux hautes températures. Chaque application a ses exigences spécifiques qui dictent le choix du matériau adéquat.

L'étape suivante après cette sélection attentive consiste à préparer ces matériaux bruts pour l'usinage proprement dit. Mais avant cela, prenons un moment pour comprendre comment ces matériaux sont prétraités afin d'assurer leur compatibilité avec les machines-outils avancées utilisées dans ce processus complexe.

IV.6.2 Mode d'obtention de l'ébauche

Le choix de la méthode de préparation de l'ébauche dépend de principalement de la cadence de la production qui prend en considération le coefficient d'utilisation de ma matière, suivit des caractéristique géométrique et mécanique de la pièce fini. La première étape consiste à découper le matériau brut en fonction des dimensions requises pour l'application finale. Que ce soit de l'acier, de l'aluminium ou tout autre alliage, chaque bloc doit être préparé avec précision. Les coupes initiales sont réalisées à l'aide de scies industrielles ou de machines de découpe laser pour obtenir les dimensions standards nécessaires. Par exemple, dans la fabrication d'une rotule d'articulation des axes, il est impératif que le bloc initial soit parfaitement dimensionné pour éviter tout gaspillage de matière et optimiser les coûts.

IV.6.3 Préparation de l'ébauche

Une fois découpé, le matériau brut doit passer par une phase de nettoyage approfondi. Ce processus élimine toutes les impuretés telles que les huiles, graisses ou particules métalliques qui pourraient compromettre l'intégrité du produit fini. Dans certains cas, un traitement de

surface peut également être appliqué pour améliorer les propriétés mécaniques ou chimiques du matériau. Par exemple, un traitement thermique peut être utilisé pour renforcer la dureté d'un acier avant son usinage sur une machine-outil à commande numérique 5 axes.

Avant même que le matériau ne soit introduit dans les machines-outils, il doit subir une série de tests rigoureux pour vérifier ses propriétés mécaniques et chimiques. Ces contrôles incluent :

- **Tests de traction** : ils mesurent la résistance du matériau à l'étirement, garantissant ainsi qu'il pourra supporter les contraintes mécaniques auxquelles il sera soumis.
- **Analyses chimiques** : elles déterminent la composition exacte du matériau, assurant qu'il répond aux normes spécifiques requises pour l'application finale.
- **Tests de dureté** : ils évaluent la capacité du matériau à résister à l'usure et aux déformations.

Afin de garantir une compatibilité d'usinage, l'étape suivante consiste en une inspection minutieuse pour s'assurer que le matériau brut est compatible avec les procédés d'usinage envisagés. Cela inclut :

- **Contrôle dimensionnel** : vérification des dimensions initiales du bloc brut pour s'assurer qu'elles correspondent aux exigences de la machine-outil.
- **Inspection visuelle** : détection de défauts superficiels tels que fissures, inclusions ou porosités qui pourraient affecter le processus d'usinage.
- **Tolérances géométriques** : mesure de paramètres comme la planéité, la perpendicularité et le parallélisme pour garantir une usinabilité optimale.

Ces étapes de préparation peuvent avoir une influencer majeur sur la qualité finale du produit, La négligence de cette étape aura des répercussions sur l'intégrité des surface usinées comme elle peut entraîner des défauts microscopiques. C'est pourquoi chaque étape doit être réalisée avec rigueur et expertise.

IV.6.4 Chois des outils de coupe

Les outils de coupe se diffèrent en fonction de plusieurs paramètres, à savoir selon le type de machine utilisé, la nature des matériaux mise en œuvre et encore le type d'opération d'usinage envisagée. Le choix judicieux de l'outillage contribue grandement dans la réussite de l'opération d'usinage à des couts compétitifs. L'utilisation d'outils spécialisés comme les fraiseuses UGV (Usinage Grande Vitesse) permet non seulement d'assurer une coupe précise mais aussi d'optimiser le temps nécessaire à cette préparation. La sélection minutieuse des outils en fonction des caractéristiques spécifiques du matériau – par exemple, une broche adaptée au micro fraisage – joue un rôle déterminant dans la réussite globale du processus.

L'étape préliminaire n'est donc pas simplement une formalité ; elle constitue le socle sur lequel repose toute la chaîne de production en usinage. En maîtrisant parfaitement cette phase préparatoire, vous optimisez non seulement vos coûts mais surtout vous assurez une qualité irréprochable à vos clients exigeants.

IV.6.5 Métrologie et contrôle de qualité

Dans le domaine de l'usinage de haute précision, la **qualité** du matériau brut est essentielle pour garantir la conformité aux spécifications techniques et assurer la durabilité des pièces finies. Les tests et les inspections qualité jouent un rôle crucial à chaque étape du processus de préparation du matériau brut et fini. Le contrôle systématique et le suivie pendant et après l'usinage avec des équipements adéquats permet d'éviter les défauts qui pourraient compromettre l'intégrité des pièces usinées.

IV.7 Choix de la matière à usiner

Dans le cadre de la conception de notre **dispositif de guidage pour travaux de filetage**, le choix du matériau s'est révélé être une étape décisive. Ce dispositif, destiné à faciliter et sécuriser les opérations de filetage, doit résister à des efforts mécaniques modérés tout en assurant une stabilité dimensionnelle et une précision d'usinage. Ces exigences nous ont

conduits à sélectionner l'acier XC38, un matériau déjà bien maîtrisé au sein de l'entreprise **Ferrovial,** où nous avons pu observer ses performances dans un contexte industriel réel.

L'acier XC-38 selon la norme française (AFNOR), également appelé C35 selon la norme européenne (NF EN/EN), appartient à la famille des aciers non alliés, avec une teneur en carbone avoisinant 0,38%, ce qui lui confère une résistance mécanique suffisante, une bonne ductilité et une excellente aptitude à l'usinage. Ce compromis entre dureté et facilité de mise en œuvre est crucial pour les pièces de guidage, qui doivent supporter des sollicitations mécaniques tout en restant simples à fabriquer.

Les qualités de cet acier se sont confirmées lors des opérations d'usinage : tournage, perçage et fraisage ont été réalisés sans difficultés majeures, avec une usure contrôlée des outils et une bonne qualité de finition. De plus, sa stabilité dimensionnelle après usinage a permis d'assurer la précision nécessaire à l'alignement et au bon fonctionnement du dispositif. Ce matériau offre également la possibilité de recevoir un traitement thermique (trempe et revenu), permettant d'adapter ses propriétés à des exigences plus sévères si besoin. Cependant, dans le cadre de notre application, ses caractéristiques initiales ont suffi à garantir les performances attendues[31]

Tableau 1 : : *Caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier C35*

Composition chimique				**Caractéristiques mécaniques**
C	0,37	**Ni**	0,010	Dureté : 95 HRB 210 HB
Mn	0,63	**Cr**	0,013	
Si	0,30	**Mo**	0,002	
P	0,003	**V**	0,003	Résistance max : 69 dN/mm^2
S	0,010	**Sn**	0,001	
Cu	0,020	**B**	-	
Al	0,015	**W**	-	Allongement : 9 %
Ti	0,001	**N**	-	
Nb	0,000	**Co**	-	

L'acier C35 pouvant être livré à l'état naturel : recuit ou normalisé, pour la réalisation par usinage de pièces de toutes dimensions nécessitant des caractéristiques mécaniques moyennes. L'état normalisé permet d'obtenir une meilleure homogénéité de structure et de

caractéristiques mécaniques. A l'état trempé revenu : par trempe à l'huile, pour des pièces de petites et moyennes dimensions, à caractéristiques mécaniques élevées, mais n'exigeant pas une forte pénétration de trempe et ne tolérant qu'un minimum de déformation au cours du traitement [31]**.**



Figure 31 : *Etat de livraison de l'acier C35ETR60 (60mm de diamètre)*

Les ébauches ont été découpé sur une scie mécanique à des longueurs de 150 mm, Pour l'usinage du fourreau pièce numéro 02 et a la longueur de 250 mm, pour l'usinage de l'arbre pièce numéro 01, tandis que la pièce numéro 03 l'adaptateur son ébauches a été découpé a la longueur de 45 mm

IV.8 Choix des outils de coupe

La diversité des outils de coupe selon la forme, la matière et le domaine d'application est un domaine très vaste. Le choix de la matière des outils de coupe et en étroite relation avec la dureté de la matière à usiner selon différents modèles. Pour notre cas nous avons choisis des plaquettes en carbure métallique ayant des formes géométriques différentes selon le besoin géométrique de la forme de la pièce.



Figure 32 : *Illustration des plaquettes en carbure métallique*

IV.9 Choix de la machine-outil

La maîtrise des principaux critères de choix d'une machine-outil permet ainsi de contribuer à aboutir à une prédétermination efficace d'un processus techniquement et économiquement viable afin d'être concurrentiel et compétitif. Le choix d'une machine-outil n'est pas un processus purement objectif, mais est souvent plutôt une affaire de jugement déterminé par des considérations et des situations propres. De nombreux facteurs déterminent et compliquent de facto le processus de décision.

La société FERROVIAL ou nous avons pu effectuer notre stage pratique, dispose d'une gamme de machine très diversifie qu'on peut distinguer en machine-outil dite classiques comme les tours, les fraiseuses et perceuses de tous types ainsi qu'une gamme de machine à commande numérique dite CNC a trois jusqu'à cinq axes. Notre projet innovant a pu être réalisé sur les machines classique, mais pour profiter de l'opportunité d'apprendre à programmer les machines à commande numérique et en accord avec notre parrain, il a été décidé' de réaliser l'usinage de notre prototype de modelé sur une CNC trois axes. Les programmes d'usinage seront présents dans le chapitre étude et réalisation du prototype de notre projet innovant soit un dispositif de guidage pour travaux de filetage



Figure 28 : *Illustration d'un tour CNC 3 axes modèle*

IV.10. Conclusion

La conception du dispositif guide porte-mandrin pour les travaux de filetage a représenté une étape essentielle dans notre démarche de résolution des problèmes identifiés en atelier. À travers une analyse fonctionnelle rigoureuse et un processus de conception méthodique, nous avons pu traduire une idée simple en une solution technique concrète, fiable et adaptée aux exigences du terrain.

Chaque décision prise qu'il s'agisse du choix des matériaux, de la géométrie des pièces, ou de la méthode d'assemblage a été motivée par un objectif clair : améliorer la précision de l'alignement, limiter les vibrations et faciliter le guidage de l'outil lors de l'opération de filetage. Le dispositif développé répond ainsi efficacement aux contraintes rencontrées en production tout en restant facile à utiliser et à intégrer dans un environnement d'usinage existant.

Ce chapitre marque donc l'aboutissement d'une phase de conception fondée sur l'observation, l'analyse et l'ingénierie pratique. Il ouvre la voie à la prochaine étape de notre travail, à savoir la fabrication des pièces constitutives et l'évaluation expérimentale des performances du dispositif dans un contexte réel d'usinage.

CHAPITRE V

MODELISATION ET ETUDE DU ROUTAGE D'USINAGE DU DISPOSITIF DE GUIDAGE POUR TRAVAUX DE FILETAGE

V.1. Introduction

Ce travail a été réalisé au sein de l'Entreprise Nationale de Constructions de Matériels et Équipements Ferroviaires « FERROVIAL ». Le thème de ce mémoire porte sur la modélisation et la conception d'un dispositif de guidage pour les travaux de filetage, un système ingénieux visant à améliorer la qualité, la sécurité et la précision des opérations de filetage en milieu industriel, notamment dans les contextes où l'alignement axial entre l'outil et la pièce est difficile à garantir.

La démarche adoptée s'est déroulée en plusieurs étapes structurées relevant des prérogatives d'un bureau d'étude. Après une étude approfondis mis en exergue par différents types de dessins d'avant-projet qui a aboutis_à une modélisation 3D complète à l'aide du logiciel SolidWorks, afin de concevoir l'ensemble des composants mécaniques du dispositif. Cette étape nous a permis de produire les dessins de définitions de tous les composants du produit, de s'assurer de la compatibilité de tous les éléments pour un montage correct et de simuler le fonctionnement du dispositif toute en respectant les fondements du GPS définis par l'étude.,

Ayant comme données de départ les dessins de définitions, l'adoption d'un routage d'usinage optimal relève des compétences du bureau des méthodes. En s'appuyant sur les caractéristiques mécaniques et les exigences techniques un choix rigoureux de la machine outils et de l'outillage mis en œuvre s'impose. Notre dispositif est un prototype d'un projet innovant représente une production unitaire faisable sur des machines conventionnelles. Du fait que nous avons eu à notre disposition des machines à commande numérique dans le cadre du déroulement de notre stage pratique au sein de la société Ferrovial Annaba, nous avons décidé d'un tour CNC 3 axes DMG MORI CLX 350, en utilisant le programme d'usinage **ShopTurn**. Ce logiciel, développé par Siemens pour les commandes numériques **Sinumerik,**

permet une programmation conversationnelle intuitive, adaptée aux cycles de tournage complexes. Son intégration dans notre processus via **CAMWorks** nous a permis de simuler l'ensemble du cycle d'usinage, d'optimiser les trajectoires outils, de prévenir les collisions et de valider la gamme opératoire. Les outils de coupe chargés dans la tourelle de machine de différents types selon l'opération d'usinage engagé son munies de plaquette en carbure métallique revêtu PVD.

V.2. Description du dispositif de guidage pour travaux de filetage

Le dispositif est un mécanisme télescopique universel adaptable au machines-outils conventionnelles qui peut prendre en charge des filières ou des tarauds de différents modèles et de dimensions variables. Il permet un bon guidage et une stabilité remarquable pour exécuter des travaux de filetage à des cadences exigeantes.

Cette invention se compose de sept pièces, dont trois sont spécialement conçues et fabriquées, tandis que les quatre autres peuvent être achetées sur le marché à des prix dérisoires. Grâce à ce produit complètement innovant, la production de filetage est devenue une opération rentable et peu couteuse par les avantages sous cités :

- Réalisation d'opérations de filetages et taraudage avec le même dispositif sans préréglage des paramètres du filetage ;
- Précision dans le guidage à partir de l'engagement de l'outil ;
- Réduction de l'usure de l'outil grâce à un guidage optimal ;
- Montage et démontage des outils de filetage rapide ;
- Fixation de dispositif sur n'importe quelle machine-outil.

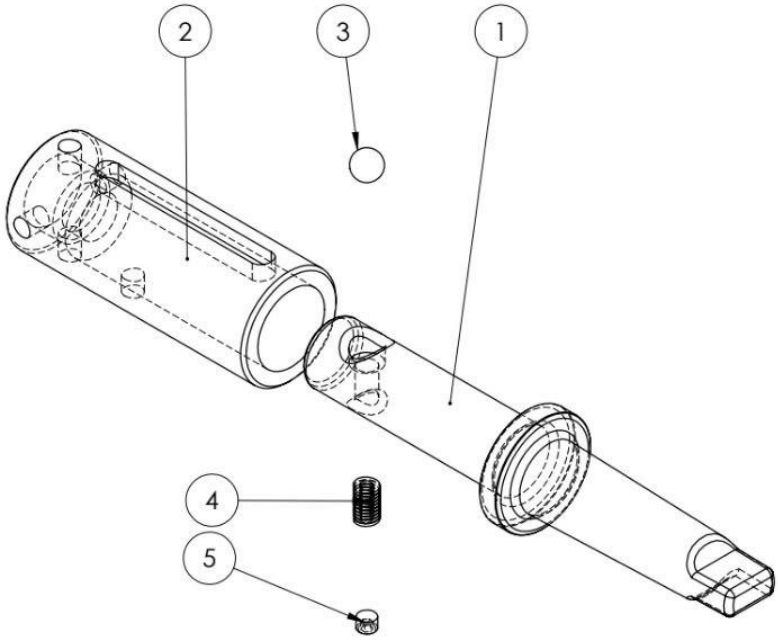


Figure 29 : *Représentation dessin éclatée du dispositif de guidage pour travaux de filetage*
1- Arbre, 2-Foureau, 3-Bille métallique, 4- Ressort, 5-Vis sans tête M10

V.3. Modélisation des pièces mécaniques sous SolidWorks.

Dans le domaine de la fabrication mécanique, la modélisation 3D est bien plus qu'un simple outil de dessin : c'est un langage universel qui permet de visualiser, concevoir, corriger et valider virtuellement un produit avant sa fabrication réelle. Elle offre à l'ingénieur la capacité de transformer une idée, souvent encore abstraite, en un objet concret, avec toutes ses caractéristiques fonctionnelles, dimensionnelles et esthétiques[32]**.**

Cette étape est devenue indispensable dans toute démarche de conception, surtout lorsqu'on travaille avec des tolérances serrées ou des assemblages complexes.

Pour notre projet, nous avons utilisé SolidWorks, un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) reconnu mondialement pour sa puissance et sa flexibilité. Il nous a permis de modéliser chaque composant du dispositif de guidage de manière précise, en respectant les contraintes mécaniques, les normes industrielles et les principes de conception fonctionnelle.

Généralités sur la modélisation[33]

V.3.1 la modélisation dans l'ingénierie mécanique

La modélisation est un processus fondamental en ingénierie mécanique. Elle consiste à représenter numériquement une pièce ou un système mécanique sous forme d'un modèle tridimensionnel (3D), avant sa fabrication réelle. Grâce à cette démarche, les ingénieurs peuvent concevoir, tester, corriger et valider virtuellement un produit.

Dans un environnement industriel moderne, la modélisation joue plusieurs rôles essentiels :

- Visualiser les pièces avec précision, sous différents angles et coupes.
- Vérifier l'assemblage de plusieurs composants avant même la fabrication.
- Évaluer la faisabilité technique et économique d'un produit.
- Communiquer efficacement entre les différents services (études, production, qualité).

V.3.2 Avantages de la modélisation 3D

Le passage de la 2D à la 3D a révolutionné la conception mécanique. La modélisation 3D offre plusieurs avantages notables :

- **Visualisation réaliste :** Le modèle peut être tourné, coupé, coloré ou animé pour mieux comprendre la forme et le fonctionnement de la pièce.
- **Détection d'interférences :** Lorsqu'on assemble plusieurs pièces, le logiciel détecte automatiquement les zones de collision ou de contact anormal.
- **Calculs précis :** Les dimensions, tolérances, masses et volumes peuvent être calculés automatiquement, ce qui aide dans le choix des matériaux et l'estimation des coûts.
- **Simulation de fonctionnement :** On peut simuler les mouvements, les forces, ou encore les déformations, avant même l'usinage.
- **Génération automatique des plans de fabrication :** La mise en plan est directement extraite du modèle 3D, assurant une cohérence parfaite.

V.3.3 Choix de l'outil numérique

Parmi les logiciels numériques habilités a modéliser notre projet être compatible avec le machines CNC à notre disposition le choix du logiciel SolidWorks est justifié. Logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) en trois dimensions, développé par la société Dassault Systèmes. Il est l'un des outils les plus utilisés dans les domaines de l'ingénierie mécanique, du design industriel, de l'aéronautique, de l'automobile et de la fabrication de pièces techniques. Sa force réside dans sa capacité à modéliser des pièces mécaniques complexes, à gérer des assemblages, à produire des mises en plan normalisées et à simuler des comportements physiques.

Lancé pour la première fois en 1995, SolidWorks a été conçu dès le départ pour tourner sur des plateformes Windows, avec une interface intuitive, ce qui le rend plus accessible que d'autres logiciels de CAO plus lourds ou techniques. Aujourd'hui, il est utilisé par des milliers d'entreprises et d'étudiants dans le monde entier par sa puissance qui s'inscrit dans ce qui suit :

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise.
- Développer des produits
- Vérifier la conception des fichiers créés
- Détenir une bibliothèque des fichiers 3D
- Mettre en place des mises en plan 2D
- Créer des images et animations des objets 3D
- Estimer le coût de la fabrication des objets 3D[34]

Grâce à SolidWorks, nous avons pu construire un modèle numérique complet et fidèle du dispositif. Cette étape de modélisation ne se limite pas à l'esthétique : elle joue un rôle clé dans la réussite du projet en permettant d'anticiper les erreurs, d'optimiser la géométrie, et de préparer efficacement la fabrication. Elle représente la passerelle entre la théorie et la réalité,

entre l'idée du concepteur et l'objet final, prêt à être usiné[33]**.**

V.3.4 Simulation et visualisation du modèle CAO[35]

1. **Assemblages**

Les assemblages ont été réalisés sous SolidWorks à l'aide de contraintes mécaniques réalistes (coïncidence, concentricité, alignement, distance fixe). Cela permet de vérifier le bon comportement cinématique du dispositif.

2. **Animation et validation fonctionnelle**

Une animation de mouvement a été générée pour visualiser le fonctionnement du dispositif lors de l'insertion et du retrait de la filière. Cette simulation permet :

- ✓ La vérification des jeux fonctionnels entre les pièces ;
- ✓ L'analyse de la cinématique globale ;
- ✓ La validation du principe mécanique de guidage.

3. **Détection des interférences**

L'outil de détection d'interférences intégré dans SolidWorks a permis d'identifier et de corriger les zones de chevauchement ou d'assemblage incorrect. Ce contrôle est indispensable avant la fabrication.[35]

V.4 Elaboration du routage d'usinage du produit

Les différentes opérations d'usinage prévues pour l'usinage des composants du dispositif de guidage son géré par le logiciel CAMWorks par la planification des commandes grâce au code G. sur un tour CNC 3axes de types DMG MORI CLX 550.

Les caractéristiques géométriques sont définies par une représentation 3D de la pièce et un dessin de définition préparés grâce au logiciel SolidWorks. L'intégration du programme CAMWorks avec le logiciel SolidWorks permet le transfert de données automatiquement.

En utilisant une base de données technologique, nous pouvons créer des conditions qui appliquent des stratégies d'usinage aux caractéristiques de nos pièces. Cela réduit considérablement le temps et la pénibilité de la programmation manuelle ou interactive des opérations sur les pièces. Le fait de disposer de cette opportunité, SolidWorks offre aux concepteurs et aux machinistes une polyvalence, une cohérence et une rapidité inégalées dans un environnement de production intégré.

La machine incluse les informations qui identifie quoi usiner, comment l'usiner, et le format de sortie du code C.N. L'usinage a été réalisé à l'entreprise FERROVIAL (Unité B3), Cette étape illustre les taches et les limite avec les quelle notre machine peut fonctionner. Le type de machine définit les formes usinables correspondantes qui peuvent être reconnues



Figure 30 : *Tour CNC modèle DMG MORI CLX 550[36]*

Cette machine est un tour CNC à banc incliné qui se distingue par sa robustesse, sa précision, ainsi que par ses capacités adaptées à l'usinage en série de pièces mécaniques complexes. Elle est particulièrement utilisée dans les environnements industriels exigeants, comme celui de l'entreprise **Ferrovial,** où notre projet a été développé. Doté d'une capacité de tournage de diamètre maximum usinable d'environ 550 mm pour une longueur maximale usinable allant jusqu'à 1 250 mm, la puissance à la broche est de 25Kw avec une fréquence de rotation pouvant atteindre 3250 tr/min. Equipée d'une tourelle porte outille (figure…) et d'une capacité de 12 postes avec changement automatique. Ces options motorisées pour opérations

de fraisage/perçage sont :

- Commande numérique : Siemens ou Fanuc (selon configuration choisie)
- Précision de répétabilité : de l'ordre de ±0,005 mm
- Système de lubrification et arrosage intégré
- Interface ergonomique avec écran tactile et programmation ISO simplifiée

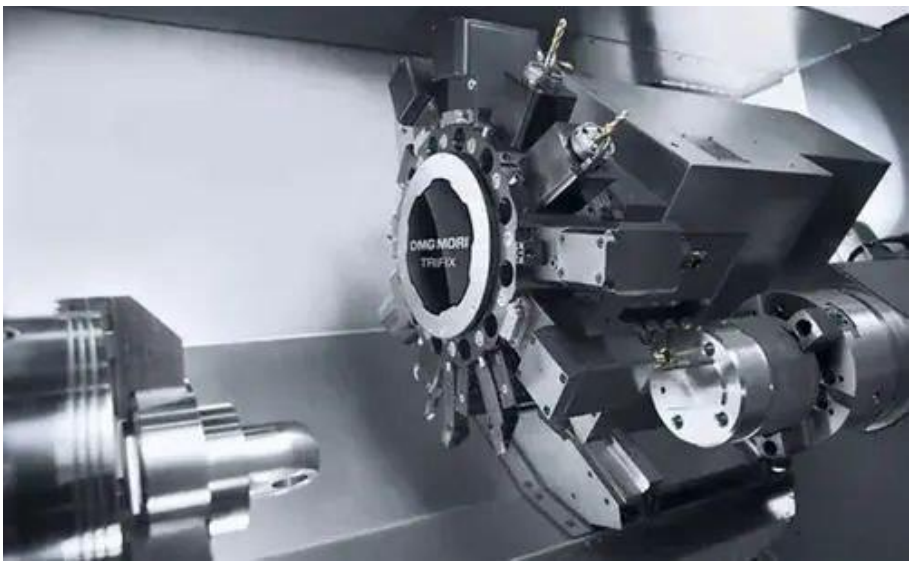


Figure 31 : *Tourelle porte outil du tour CNC modèle DMG MORI CLX 550*

Elle offre un usinage complet sur 6 faces de pièces complètes avec contre-broche et axes Y. L'entraînement de la broche hautement dynamique avec 33 kW (40 % DC) et 630 Nm (40 % DC) et un couple maximal allant jusqu'à 3250 U/min, une contre-broche en tant que broche motorisée intégrée avec une puissance de 14 kW (40% DC), 192 Nm (40% DC) et max. vitesse jusqu'à 5.000 tr / min avec possibilité d'usinage de la face arrière. L'axe Y avec une course de ± 60 mm pour un meilleur fraisage pour par ex. un usinage complet de la surface de revêtement[36].

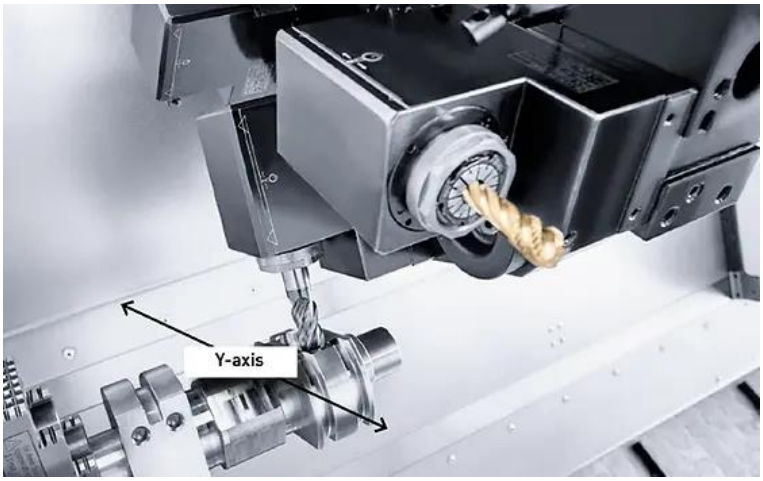


Figure 32 : *Tourelle porte outil du tour CNC modèle DMG MORI CLX 550*

Usinage plus efficace grâce à un chargeur de barres avec un passage de barre ø 80 mm par défaut (ø 102 mm en option), un dispositif de décharge de la pièce à usiner en option pour les pièces de max. ø 80 x 200 mm et max. 4 kg, avec une interface en option selon la norme DMG MORI compatible avec la plupart des ravitailleurs.

Design compact avec un grand espace de travail pour l'usinage des pièces spécifiques au client :

- Usinage de pièces d'un diamètre allant jusqu'à 480 mm
- Course dans l'axe Z 1 200 mm
- Peu encombrant avec seulement 7,4 m2

En plus des caractéristiques techniques, la machine est dotée d'un système de mesure directe en standard et une commandes 3D avec un écran tactile SLIMline 19" avec la commande FANUC pour simulation 3D et vérification des contours simplifiée de capacité 8 Go additionnelles de stockage personnalisée[36]**.**

V.5 Choix des conditions de coupe

Le choix des paramètres de coupe est important pour obtenir une pièce usinée de bonne qualité. Les paramètres de coupe doivent être adaptés à la machine, à la pièce, à l'opération d'usinage et aux outils de coupe utilisés[31]

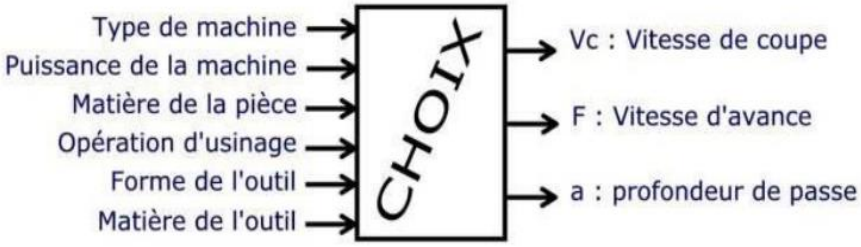


Figure 38 : *Représentation schématique du système d'usinage*

V.5.1 Choix des critères de coupe pour le cas du tournage :

Le choix des principaux paramètres de coupe en mécanique, tels que la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (Vf) et la profondeur de passe (ap), est cruciale pour l'efficacité et la qualité des opérations d'usinage. Ces paramètres influencent la durée de vie de l'outil, la qualité de la pièce et le coût de production. Il est donc important de les choisir en fonction de la machine, du matériau usiné, du type d'outil et de l'opération effectuée. Il en est de même pour le cas des machines à commander numérique (CNC).

- **La vitesse de coupe (Vc)**

La vitesse de coupe (Vc) est un paramètre incontournable en usinage, représentant la vitesse linéaire d'une surface usinée par rapport à un élément usiné. Elle est exprimée en mètres par minute (m/min) et est calculée à partir du diamètre de la pièce ou de l'outil et de sa vitesse de rotation. Les valeurs usuelles des vitesses de coupe, fonction de la matière à usiner et de la matière de l'outil, sont données dans des abaques.

- **Vitesse d'avance (Vf)**

La vitesse d'avance, en usinage, est la vitesse à laquelle l'outil de coupe avance par rapport à la pièce à travailler. Elle est exprimée en millimètres par minute (mm/min) pour les opérations de fraisage, et en millimètres par tour (mm/rev) ou en pouces par tour (ipr) pour les opérations de tournage et d'alésage. L'avance détermine principalement la rugosité de la surface. Elle est prise plus grande en ébauche qu'en finition, les valeurs des avances sont également données par des abaques.

- **Profondeur de passe (ap)**

La profondeur de passe, en usinage, est la quantité de matière enlevée par l'outil de coupe lors d'un passage, c'est-à-dire lors d'une passe. Elle est exprimée en millimètres (mm) et varie en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance de l'outil. La profondeur de passe est un paramètre clé pour déterminer la performance de l'usinage, la durée de vie de l'outil et l'état de surface de la pièce.

Finalement tous ces paramètres principaux avec et d'autres vont contribuer pour décider de la valeur de la fréquence de rotation de la broche appelée vitesse de rotation (N), pour usiner dans des conditions optimales. Elle représente le nombre de tours complets effectués par une entité en rotation (broche, moteur, etc.) en une unité de temps donnée, généralement par minute. Elle est exprimée en tours par minute (tr/min) ou en tours par seconde (tr/s) influençant directement la vitesse de l'outil de coupe par rapport à la pièce à usiner. Quelle que soit l'opération ou la machine utilisée, la vitesse de rotation de la broche d'une machine-outil dépend toujours de la vitesse de coupe. Cependant, selon que l'opération est réalisée en tournage ou en fraisage, le diamètre à prendre en compte est soit le diamètre de la pièce à usiner, dans le cas du tournage, soit le diamètre de l'outil de coupe, pour le fraisage et elle s'exprime par la relation empirique suivante :

$$\boldsymbol{n = \frac{1000 * Vc}{\pi D}} \qquad \textbf{(1)}$$

Avec :

n : Fréquence de rotation (tr/min).

Vc : Vitesse de coupe (m/min)

D : Diamètre de la fraise en mm.

V.6 Programmation du routage d'usinage sur tour CNC sous CAMWorks

CAMWorks est un système 3D de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) qui aide les industriels à accroitre leur productivité et leur rentabilité grâce à des technologies de renommée mondiale et des outils d'automatisation adaptables perfectionnant l'usinage.

CAMWorks est une solution FAO intelligente et intuitive qui élimine le coté fastidieux et les contraintes de la programmation CN traditionnelle. La production industrielle se doit d'être rentable tout en respectant des délais toujours plus courts et des budgets contraignants. Pour atteindre ces objectifs CAMWorks propose la programmation intelligente basée sur l'automatisation[37].

V.6.1 Le rôle du logiciel CAMWorks

Logiciel CAM intelligent pour une intégration fluide de l'usinage CNC avec SOLIDWORKS, pour générer des trajectoires et des G-code sans changer de logiciel. Il réduit les temps de cycle et améliore la durée de vie des outils grâce à des stratégies de trajectoire efficaces. Doté d'une capacité à usinez automatiquement les caractéristiques des pièces grâce à une automatisation basée sur des règles, il peut supporter l'usinage 2,5 axes à 5 axes, le tournage, le fraisage-tournage et bien plus, assurant une flexibilité maximale. Les avantages offerts par le logiciel sont :

- ✓ **Minimiser les efforts :**

CAMWorks a ouvert la voie à la "reconnaissance des formes". Cette technologie analyse la topologie du modèle solide et identifie les formes de fraisage telles que trous, rainures, poches et bossages sont reconnus automatiquement. La reconnaissance automatique des formes est applicable à tous les fichiers 3D indépendamment de leur origine.

- ✓ **Automatiser et contrôler de façon intelligente :**

La technologie innovante de Geometric TechDB (Base de Données Technologique) a été conçue pour diminuer de manière significative le temps requis pour définir et paramétrer les stratégies d'usinage. Basée sur le savoir-faire et la connaissance, la base de données associe l'outillage, les stratégies d'usinage ainsi que le paramétrage des machines aux formes à usiner reconnues automatiquement. Lors des générations des opérations, CAMWorks applique automatiquement les paramètres requis. La base de

données TechDB est entièrement personnalisable de façon à incorporer le savoir-faire de votre entreprise. Les automatismes de CAMWorks s'ils permettent des gains de temps, peuvent à tout moment encore être optimisé par une intervention interactive par l'utilisateur[37].

- ✓ **L'usinage associatif :**

La connexion « intelligente » entre le modèle solide et le parcours d'outil permet l'associativité entre les fonctions CAO et FAO. CAMWorks identifie et recalcule les parcours d'outils en fonction des modifications du modèle 3D. Si par exemple la profondeur d'une poche est modifiée, CAMWorks remet à jour les parcours d'outils automatiquement[37].

V.6.2 Démarrage de CAMWorks

CAMWorks est complètement intégré à SolidWorks et peut-être démarré automatiquement chaque fois que vous démarrez SolidWork. Une foi le logo CAMWorks s'affiche pour signaler que CAMWorks est démarré, sélectionner nouveau dans menu fichier et sélectionner pièce dans la boîte de dialogue ou sélectionner ouvrir dans le menu fichier et ouvrir un fichier Pièce.

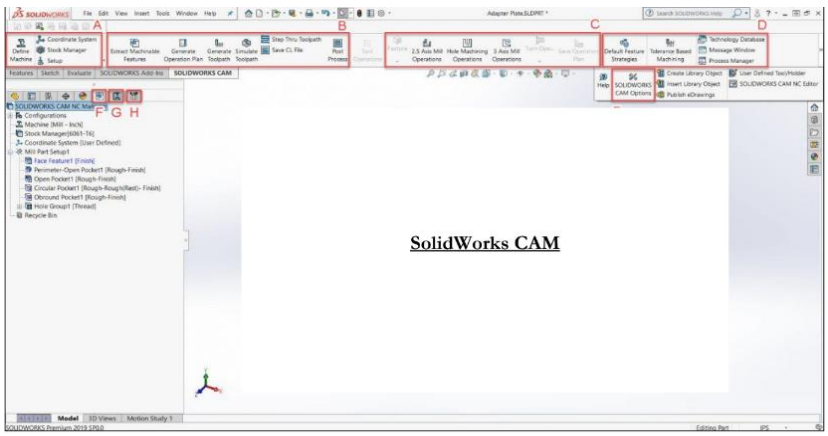


Figure 33 : *Interface utilisateur de CAMWorks*

Les étapes à suivre pour générer des parcours d'outil et le code CN en mode pièce:

1. Modélisez la pièce dans SolidWorks ou ouvrir un fichier Pièce

2. Allez au volet de l'arbre CAMWorks
3. Définir la machine et la CN
4. Définir le brut
5. Définir les formes d'usinage
6. Générer le plan d'opération
7. Ajuster les paramètres d'usinage
8. Générer les parcours d'outils
9. Exécuter le post-processus des parcours d'outil
10. Simuler les parcours des outils et générer le programme CN
11. Transférer le fichier vers la machine CN

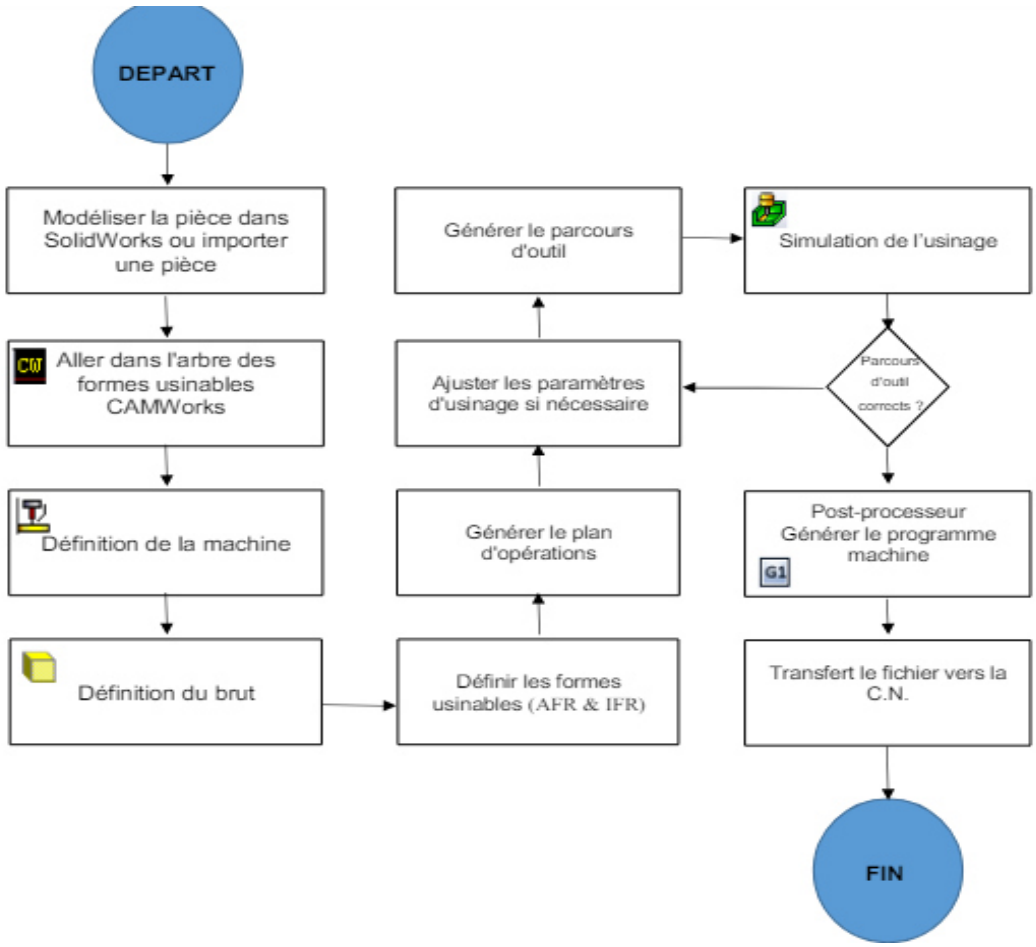


Figure 34 : *Schéma des étapes de création d'une gamme de fabrication*

L'arbre des formes usinables vous permet de :

- Renommer une forme usinable

- Changer les paramètres des formes usinables
- Supprimer ou refouler une forme usinable
- Insérer une forme de tournage
- Effacer une forme usinable
- Changer l'ordre d'usinage
- Générer le plan d'opération

L'arbre des opérations permet de :

- Renommer une opération
- Changer les paramètres d'opération
- Editer la liste des formes
- Refouler une opération
- Effacer une opération
- Insérer une opération

V.6.3 Description du logiciel ShopTurn

ShopTurn est un logiciel de programmation conversationnelle développé par Siemens pour les tours CNC SINUMERIK, permettant une programmation intuitive et facile, spécialement conçue pour les opérations de tournage. Il simplifie la création de programmes pour les tours, offrant une interface graphique et des fonctionnalités guidées pour faciliter la tâche des opérateurs, même ceux qui sont moins expérimentés[38].

- **Comment passer plus rapidement du dessin à la pièce** ?

Jusqu'à présent, la fabrication CN relevait essentiellement de programmes CN complexes, au codage abstrait. Autrement dit c'est un travail réservé aux spécialistes. Cependant, chaque ouvrier qualifié connait bien son métier et grâce à son expérience dans le domaine de l'usinage conventionnel, est capable de maîtriser à tout moment les tâches les plus

difficiles, même si c'est souvent au détriment de la rentabilité. Il fallait donc trouver pour ces techniciens un moyen de valoriser ce savoir-faire en s'appuyant sur des machines-outils à commande numérique.

Avec ShopTurn, SIEMENS propose aux techniciens une nouvelle approche de la fabrication qui leur épargne tout codage [38]**.**

- La solution : élaborer une gamme d'usinage au lieu de programmer.

En créant une gamme d'usinage à partir de séquences opératoires simples adaptées à son métier, l'utilisateur de ShopTurn peut de nouveau exploiter pleinement son véritable savoir faire et ses connaissances en matière d'usinage.

Grâce aux fonctions intégrées très performantes de création de trajectoires, Shop Turn permet de réaliser facilement les contours et pièces les plus complexes. Conclusion :

Avec ShopTurn, passez plus facilement et plus rapidement du dessin à la pièce.

Même si l'apprentissage de ShopTurn est vraiment très simple, le présent manuel de formation vous permettra de vous familiariser encore plus rapidement avec ce nouvel univers. Avant de passer à l'utilisation proprement dite de ShopTurn, le manuel commence par un rappel

de quelques notions fondamentales. Au cours des premiers chapitres, sont présentés :

- Les avantages de ShopTurn
- Les bases de son utilisation
- Pour les débutants, un rappel des bases géométriques et techniques de la fabrication
- Une brève introduction à la gestion des outils[38]

- Après la théorie, la pratique :

- A l'aide de cinq exemples de complexité croissante, le manuel explique les possibilités d'usinage offertes par ShopTurn. Au début, vous serez guidé pas à pas, puis vous serez progressivement amené à devenir autonome.

- Ensuite, vous apprendrez comment usiner avec ShopTurn en mode automatique.
- Enfin, si vous le souhaitez, vous pourrez tester votre niveau de maîtrise de ShopTurn.

V.6.4 Les avantages de ShopTurn

Ce chapitre présente tous les avantages spécifiques liés à l'utilisation de ShopTum. :

1. Gain de temps d'apprentissage

- Parce que dans ShopTum, vous n'avez aucun terme de langue étrangère à apprendre. Toutes les données à saisir sont demandées en clair [38].

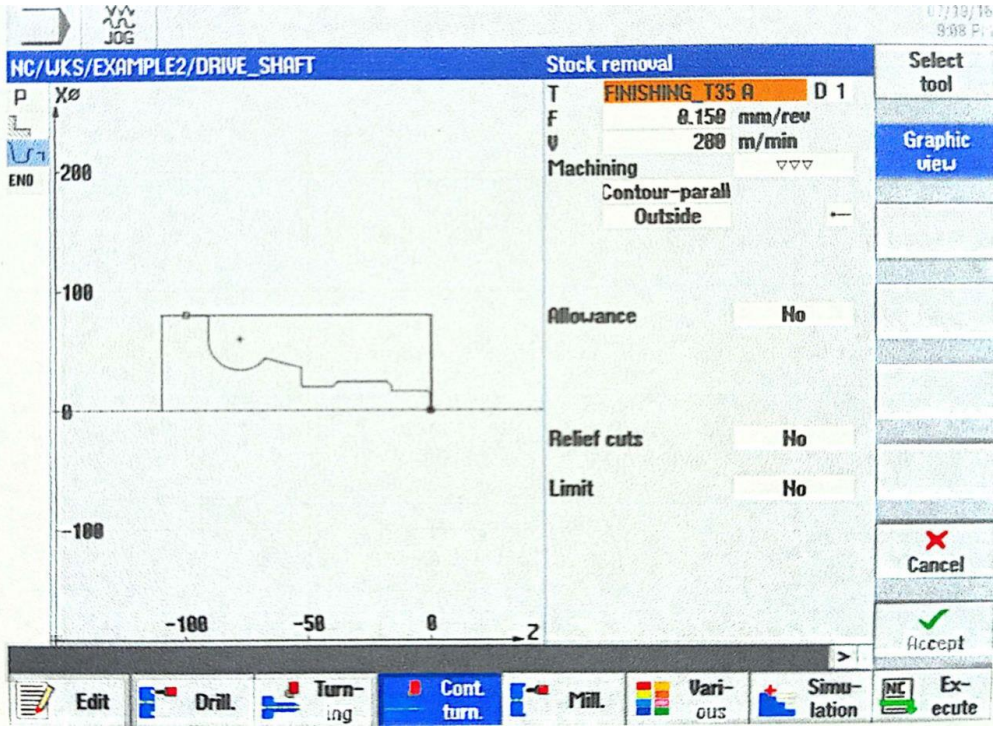


Figure 41 : *Interface du logiciel ShopTum*

- Parce que ShopTurn vous offre une assistance optimale en affichant des images d'aide en couleur.

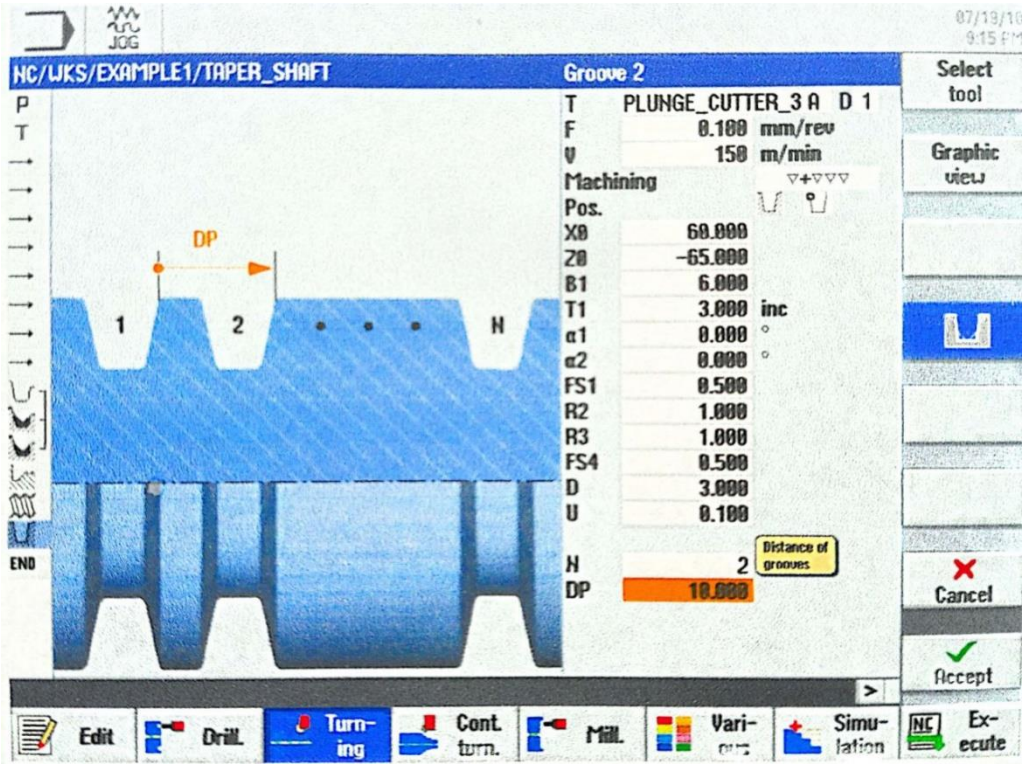


Figure 35 : *Assistance optimale par affichant des images d'aide en couleur*

Vous ne devez pas perdre de vue qu'en raison des nombreuses spécificités propres à un atelier de fabrication, les données technologiques utilisées dans le présent document ne sont que de simples exemples. A l'instar de ShopTurn qui est le fruit d'une coopération avec des spécialistes. Parce que la gamme d'usinage graphique de ShopTurn permet d'intégrer des instructions DIN/ISO. Vous pouvez programmer aussi bien en DIN/ISO 66025 qu'à l'aide de

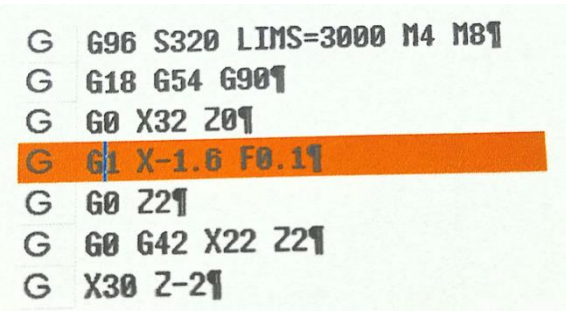


Figure 36 : *Interface du choix de la norme*

cycles DIN.

Pendant la création de la gamme d'usinage, vous pouvez à tout moment aller et venir entre une opération et le graphique de la pièce (représentation par traits).

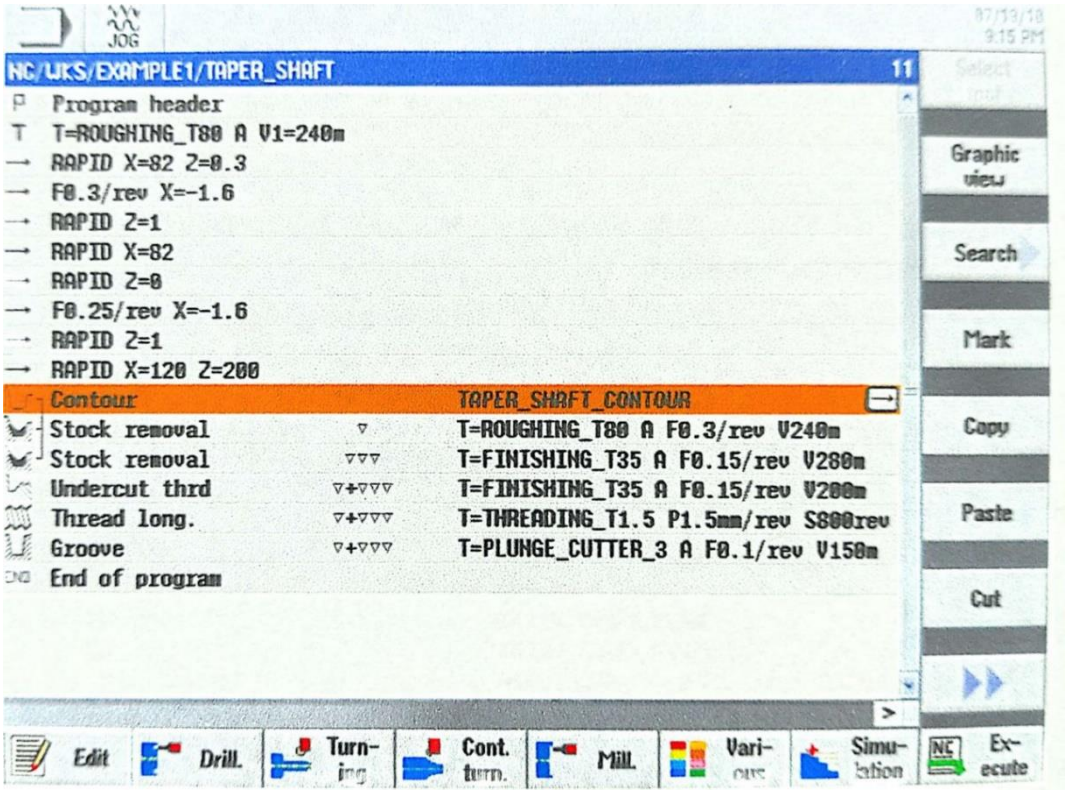


Figure 37 : *Interface du programme d'usinage*

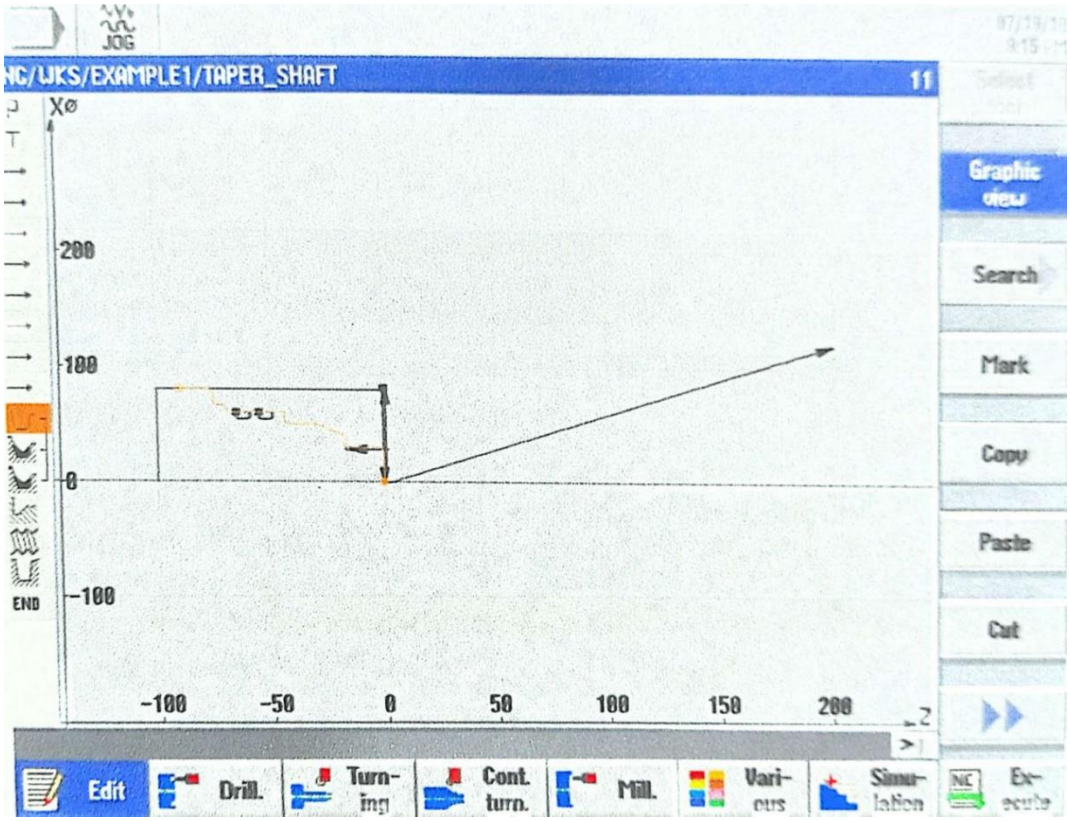


Figure 38 : *Représentation des trajectoires du parcours de l'outil*

2. Gain de temps de programmation

- Parce que Shop Turm vous apporte une assistance optimale dès la saisie des valeurs technologiques : il vous suffit de saisir les valeurs du guide de poche Vitesse d'avance (ou Avance) et Vitesse de coupe, et ShopTum calcule automatiquement la vitesse de rotation

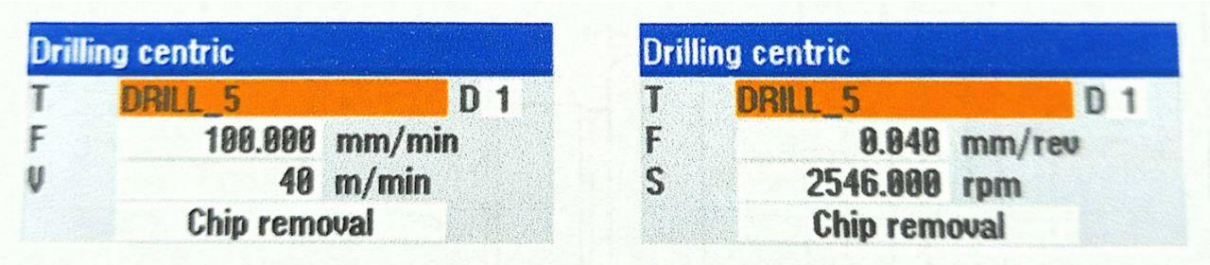


Figure 39 : *Interface de calcul automatique de la fréquence de rotation*

- Parce qu'avec ShopTum, vous pouvez décrire un usinage complet en une seule opération et générer automatiquement les mouvements de positionnement nécessaires (dans cet exemple, du point de changement d'outil à la pièce et retour).

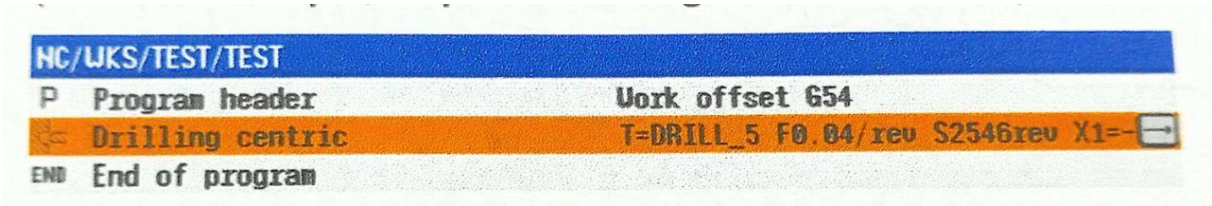


Figure 40 : *Interface de gestion des mouvements de positionnement*

- Parce que dans la gamme d'usinage graphique de ShopTum, toutes les opérations d'usinage sont représentées de façon claire et compacte. Vous disposez ainsi d'une vue d'ensemble complète qui facilite les corrections et les modifications, même dans le cas de séquences d'usinage complexes **[38]**.

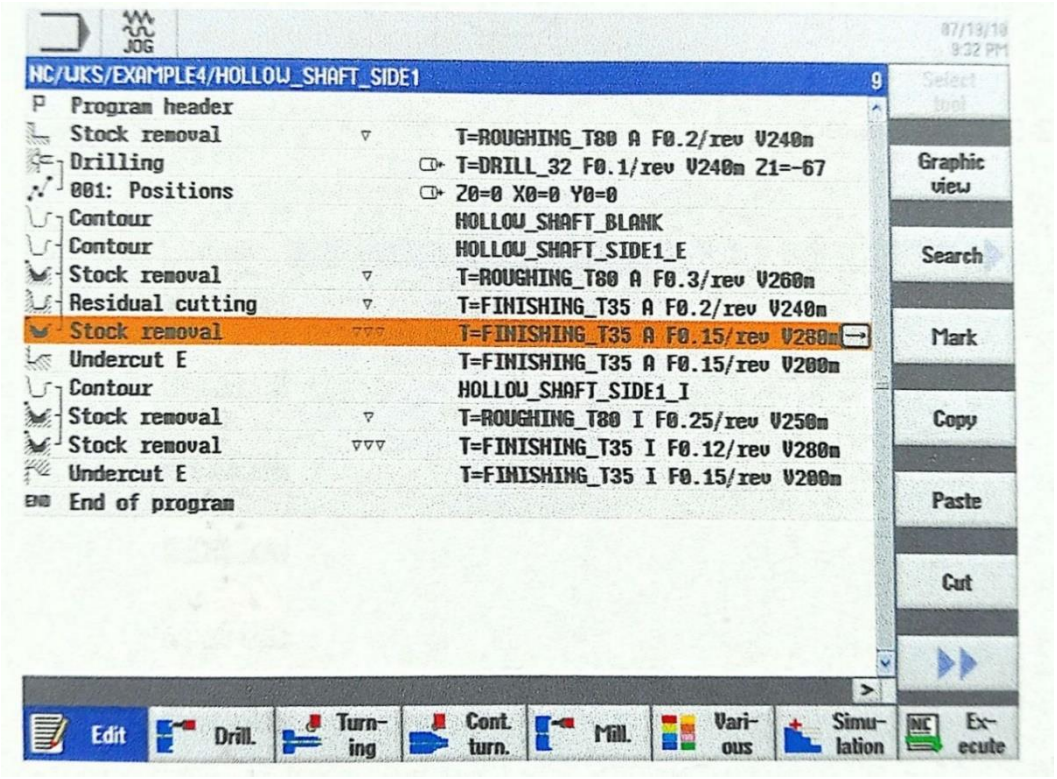


Figure 41 : *Interface d'affichage du routage complet*

- Parce que, par exemple pour un chariotage, vous pouvez concaténer plusieurs opérations d'usinage et contours.

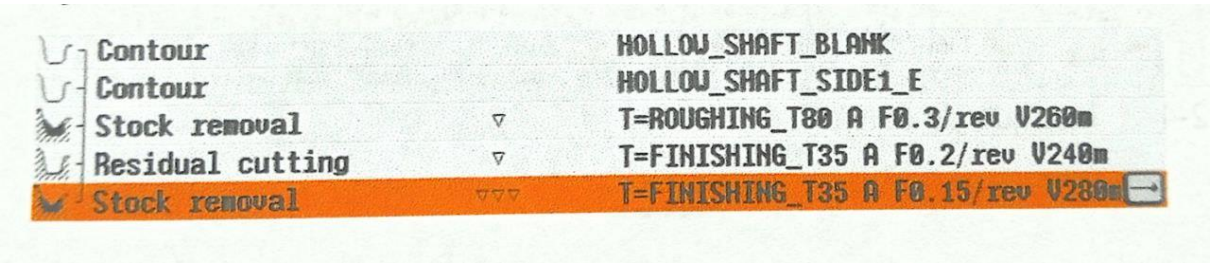


Figure 42 : *Interface de caractérisation des opérations en cours*

- Parce que le calculateur de contours intégré est capable de traiter toutes les cotations d'usage (cartésiennes, polaires) tout en restant très clair et très simple d'emploi grâce à la saisie en langage courant et à l'assistance graphique.

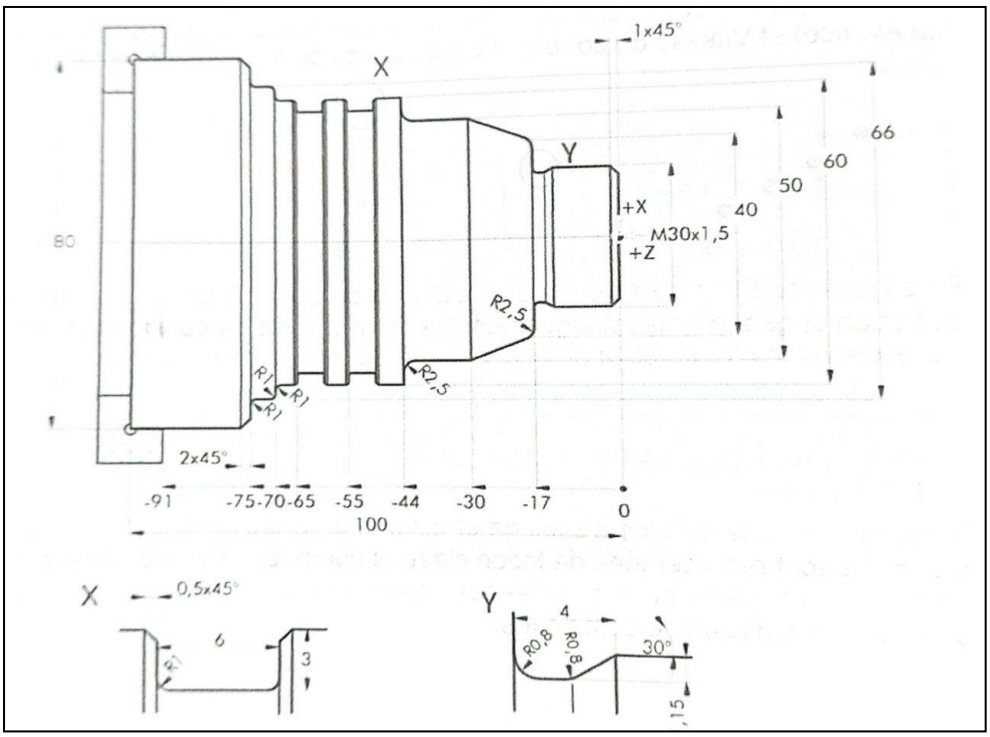


Figure 43 *: Affichage du dessin technique.*

- Parce qu'à tout moment, vous pouvez aller et venir entre la vue graphique dynamique et le masque de paramétrage avec image d'aide.

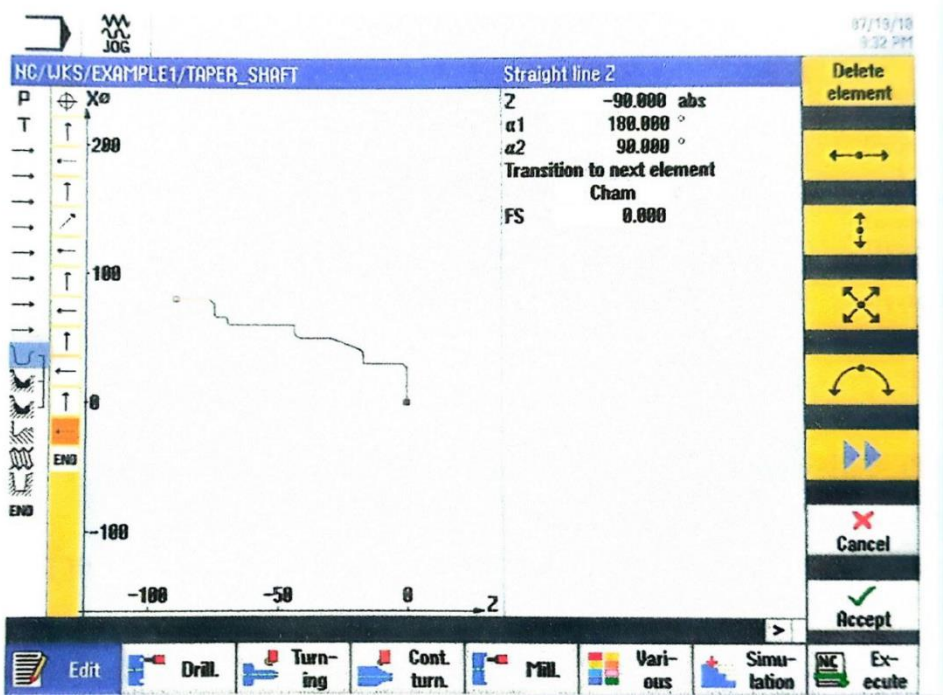


Figure 51 : *Illustration du masque de saisie*

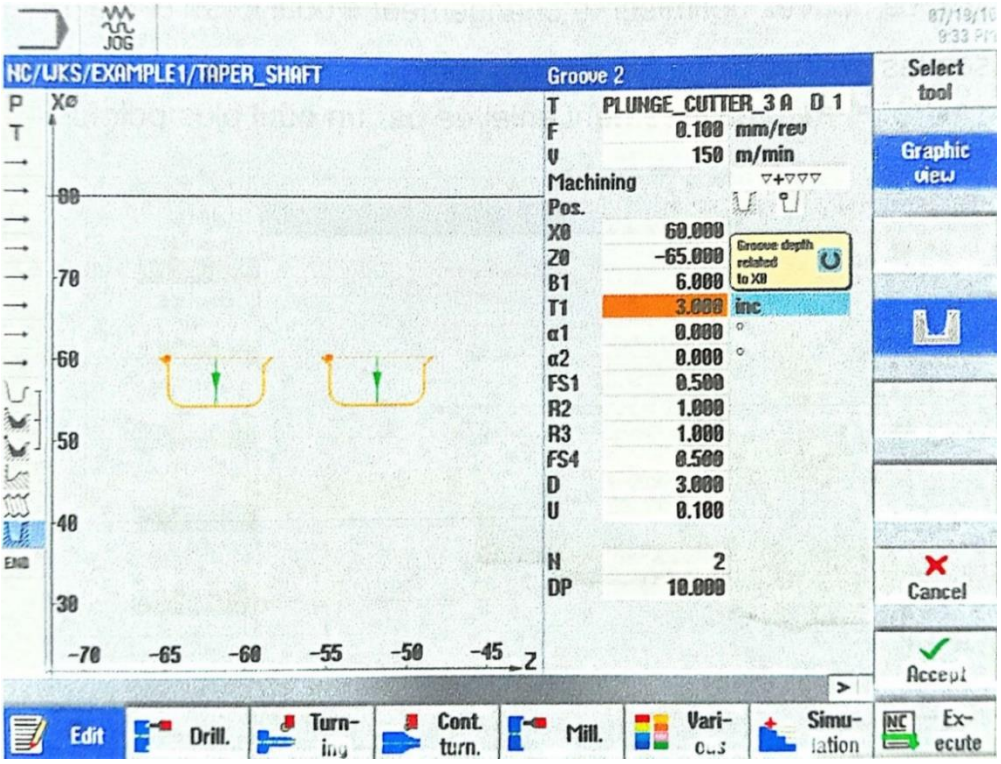


Figure 52 : *Représentation de la vue graphique*

Parce que création d'une gamme d'usinage et fabrication ne s'excluent pas mutuellement. Avec Shop Turn, vous pouvez élaborer une nouvelle gamme d'usinage pendant la fabrication **[38].**

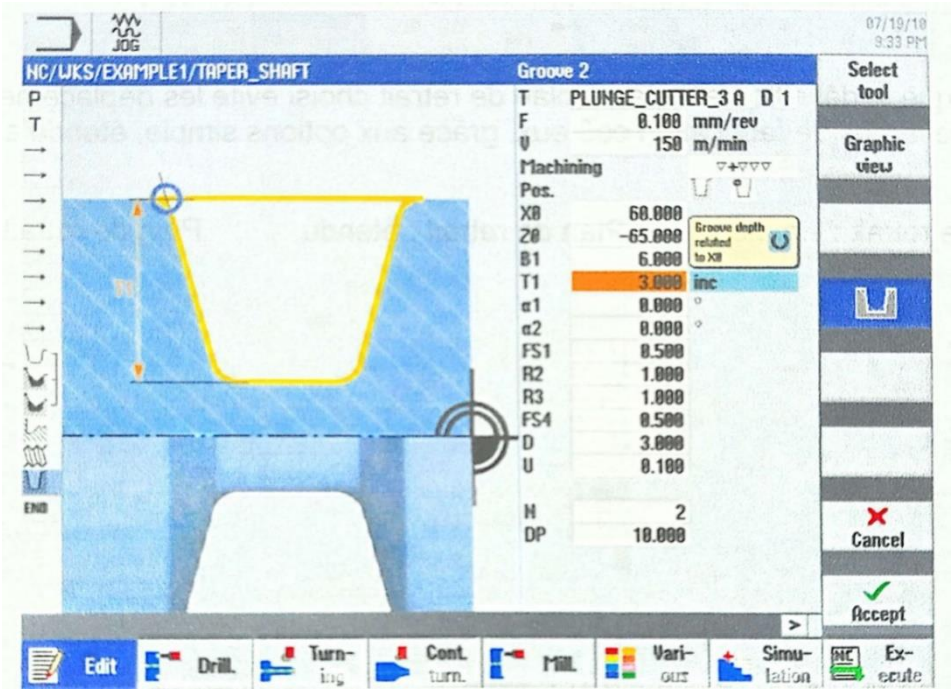


Figure 53 : *Image d'aide pour élaboration de nouvelle gamme d'usinage*

3. Gain de temps de fabrication

Parce que vous pouvez optimiser le changement d'outil lors du chariotage de contours vous utilisez les outils d'ébauche pour enlever les gros volumes, puis la matière restante 1 est détectée et automatiquement enlevée par un outil plus pointu

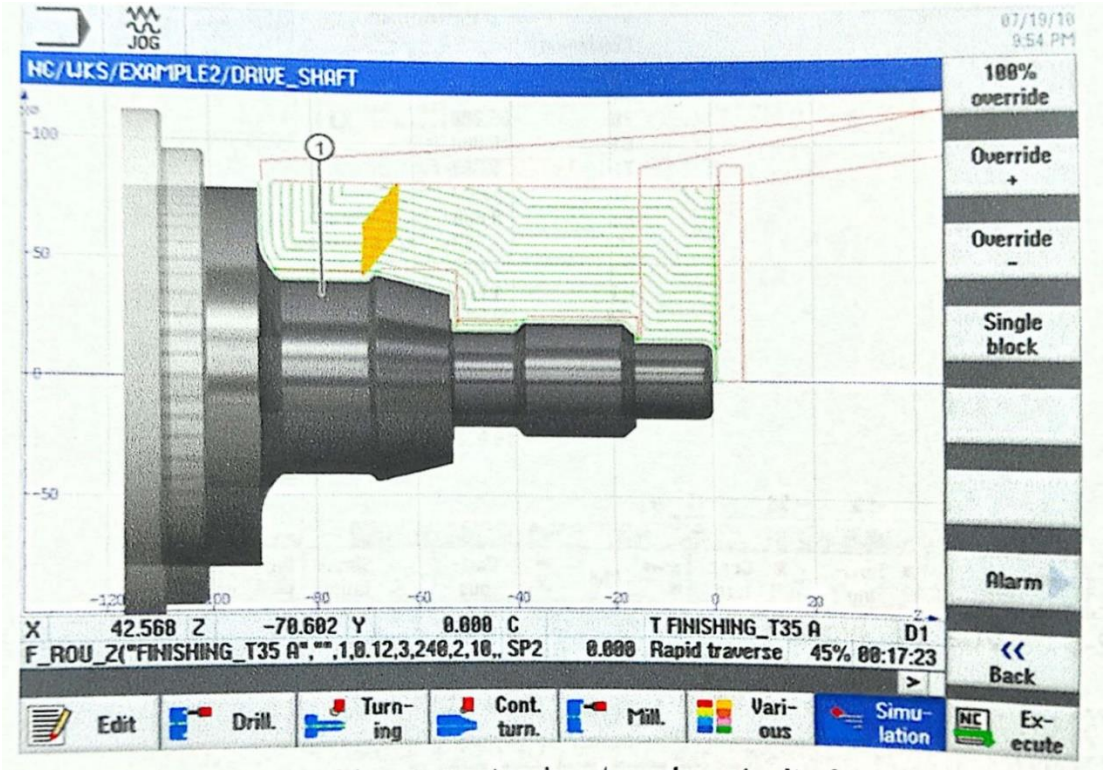


Figure 44 : *Illustration de la possibilité de changement d'outil en cours d'usinage*

- Parce que la définition exacte du plan de retrait choisi évite les déplacements inutiles et réduit le temps de fabrication coûteux. Grâce aux options simple,

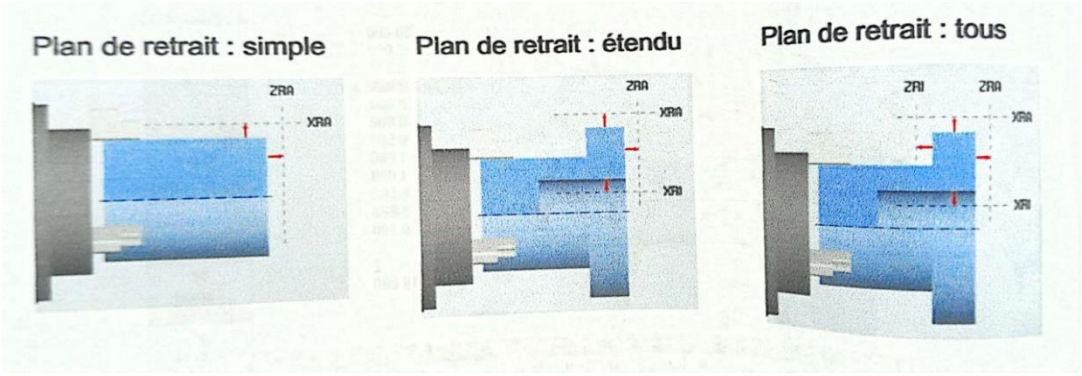


Figure 45 : *Illustration de la définition des plans de retrait*

- Parce que la structure compacte de la gamme d'usinage vous permet d'optimiser votre séquence d'usinage à moindre effort (par exemple, ici, en évitant un changement d'outil).

Parce que ShopTum vous permet d'atteindre des vitesses d'avance maximales avec une répétabilité optimale en recourant à la technique numérique classique (des entraînements SINAMICS aux commandes SINUMERIK).

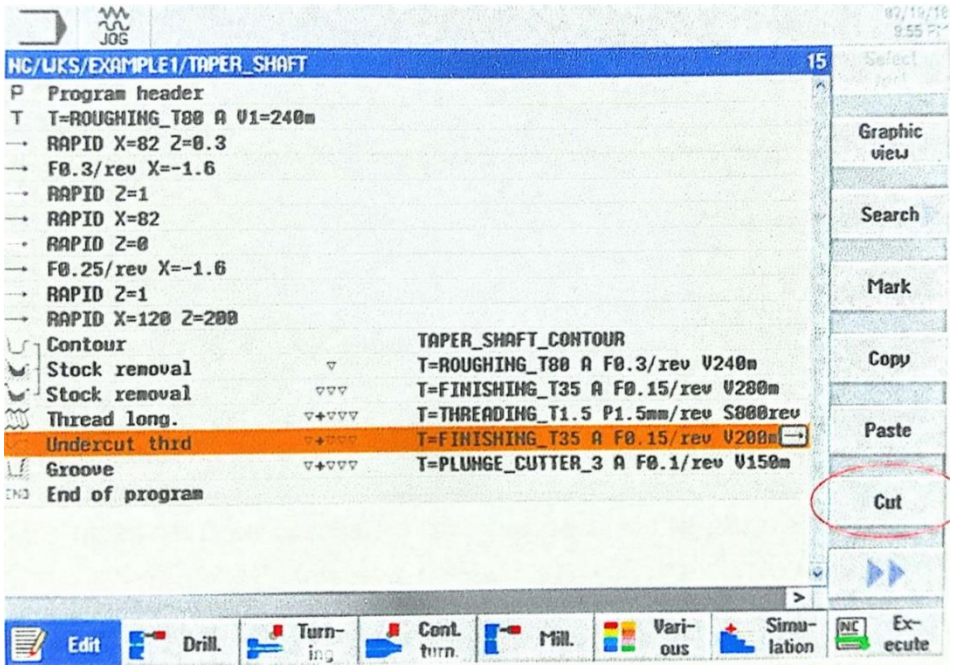


Figure 46 : *Séquence d'usinage d'origine*

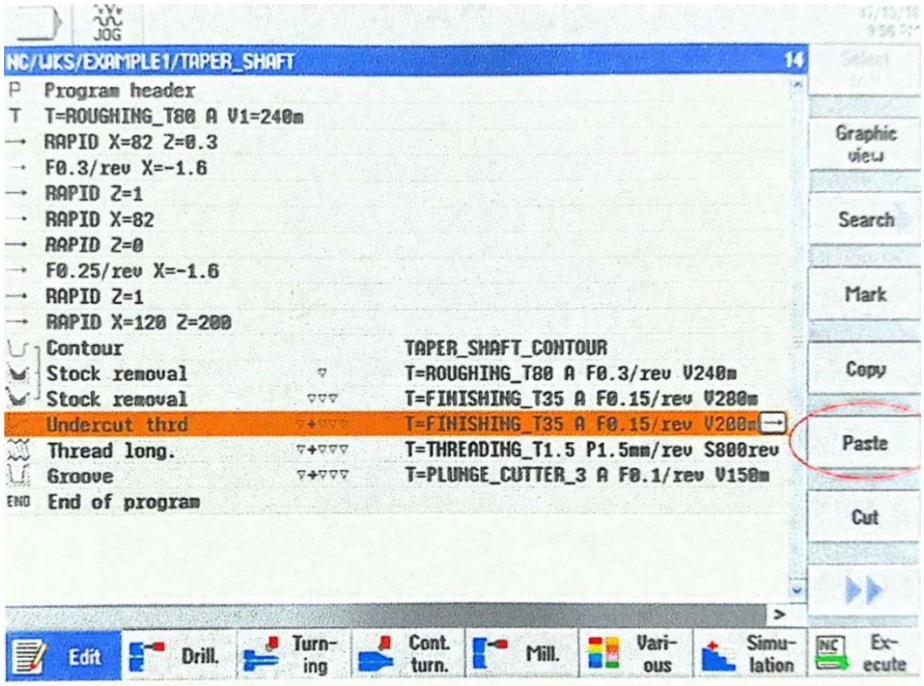


Figure 57 : *Séquence d'usinage optimisée par couper et insérer*

V.7. Modélisation et étude du routage d'usinage des composants du dispositif

Le dispositif de guidage pour travaux de filetage est un projet innovant, émis pour être expertisé et validé par l'Institut *National Algérien de la Propriété Industrielle* (INAPI). L'etude et la modélisation des différentes pièces composantes de se produit a été élaboré par nos soin. En se servant de la documentation technique mis au point par cette étude, on s'est lancé dans la conception et la réalisation du prototype appuyé sur les dessins de définition de chaque élément du dispositif. les figure représentent les dessins d'assemblage en 2D et 3D, ainsi que l'ensemble des pièces composantes sous forme de dessin éclaté pour les deux cas de figure du prototype (avec filière et avec adaptateur) afin de mieux voir la configuration et le montage du prototype.

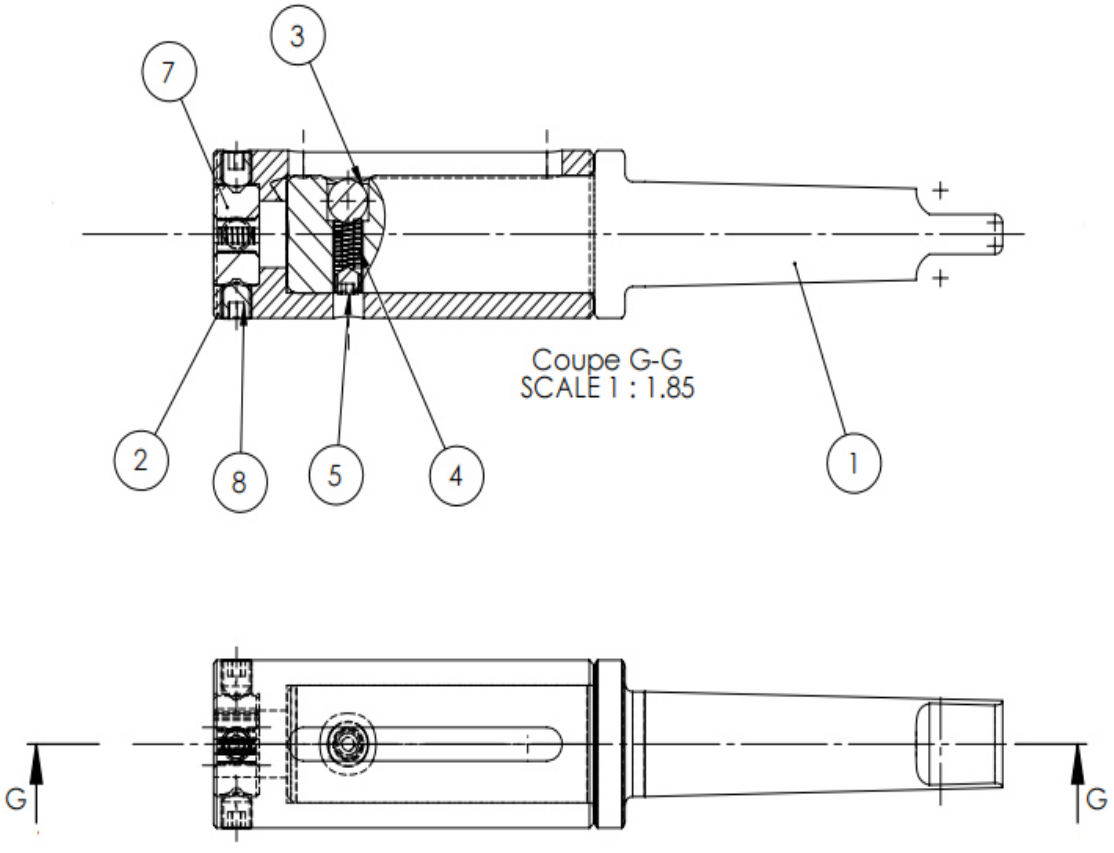


Figure 47 : *Dessin d'ensemble du dispositif avec filière*

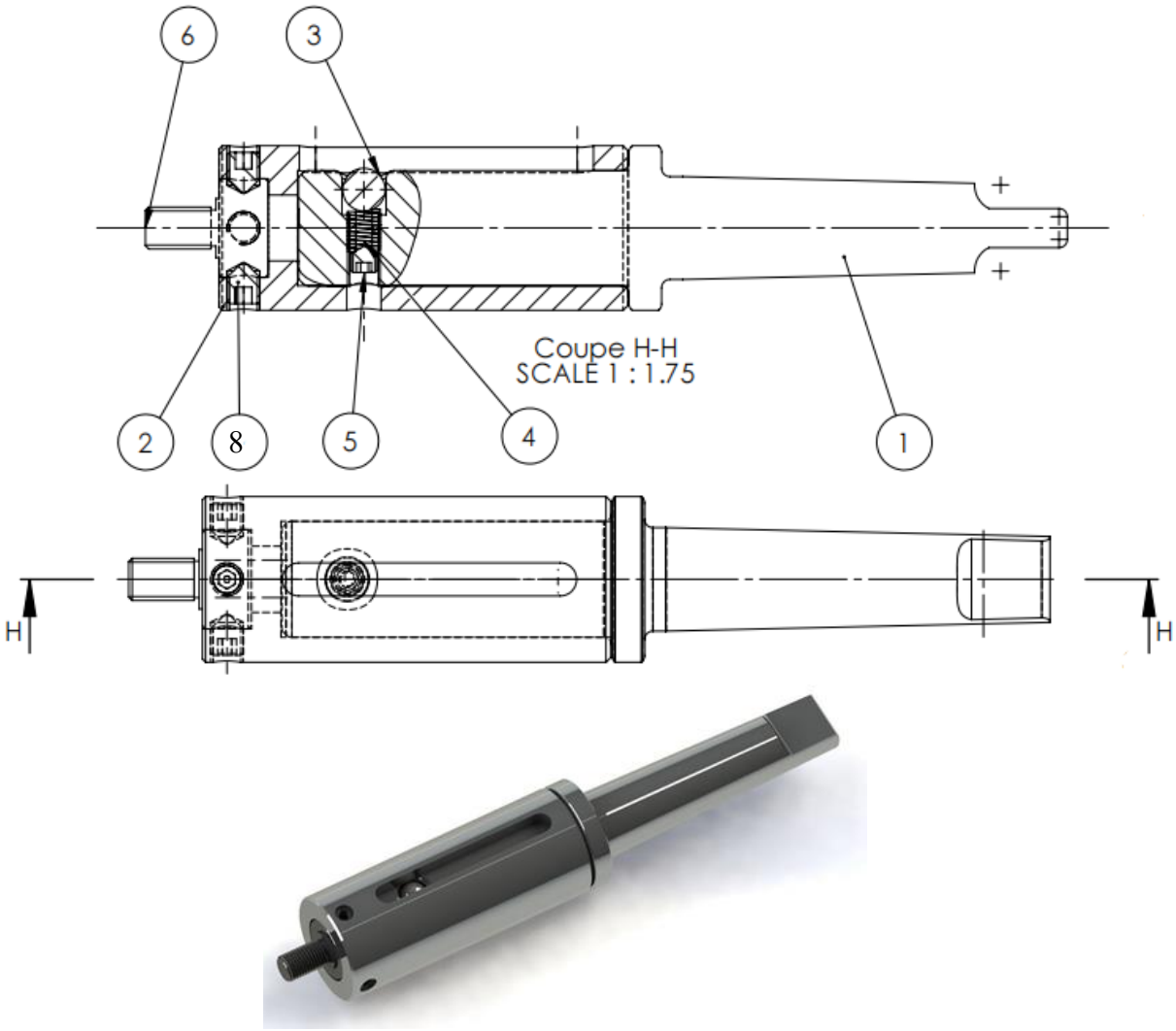


Figure 59 : *Dessin d'ensemble du dispositif avec adaptateur*

Tableau 3 : Nomenclature des différents composants du dispositif

N°	Non de la pièce	Matériaux	Qté
1	Arbre	XC-38	1
2	Fourreau	XC-38	1
3	Bille	Acier trempé (HRC 60+)	1
4	Ressort (ISO 10243)	Acier ressort spécial (allié, haue limite élastique)	1
5	Vis sans tête (M10)	Acier zingué ou inoxydable	1
6	Adaptateur	XC-38	1
7	Filière	Acier rapide HSS ou carbure	1
8	Vis sans tête (M8)	Acier zingué ou inoxydable	4

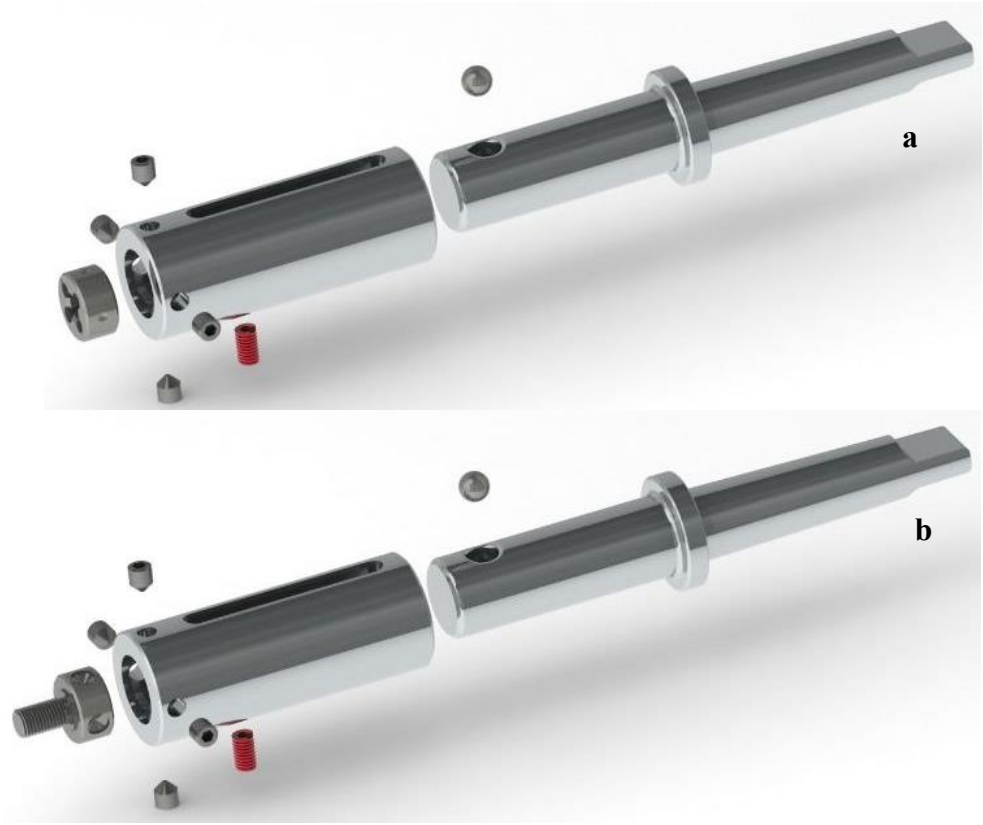


Figure 60 : *Dessin éclaté du dispositif (a, avec filière, b : avec adaptateur)*

V.7.1. Routage d'usinage de l'arbre de guidage (pièce n°1)

Pièce principale du dispositif, usinée en acier XC38 traité pour résister aux couples de torsion. Doté d'un cône Morse (MK4) pour montage direct dans la poupée mobile, il intègre une bille guidée par un ressort de compression réglable, assurant la sécurité en cas de surcharge et garantissant un alignement précis de l'outil.

V.7.1.1 Dessin de définition de l'arbre et préparation du brut

Le mode d'obtention du brute et le programme du routage d'usinage de l'arbre sont établies essentiellement sur les recommandations technique et graphiques du dessin de définition après étude a l'aide du logiciel SolidWorks.

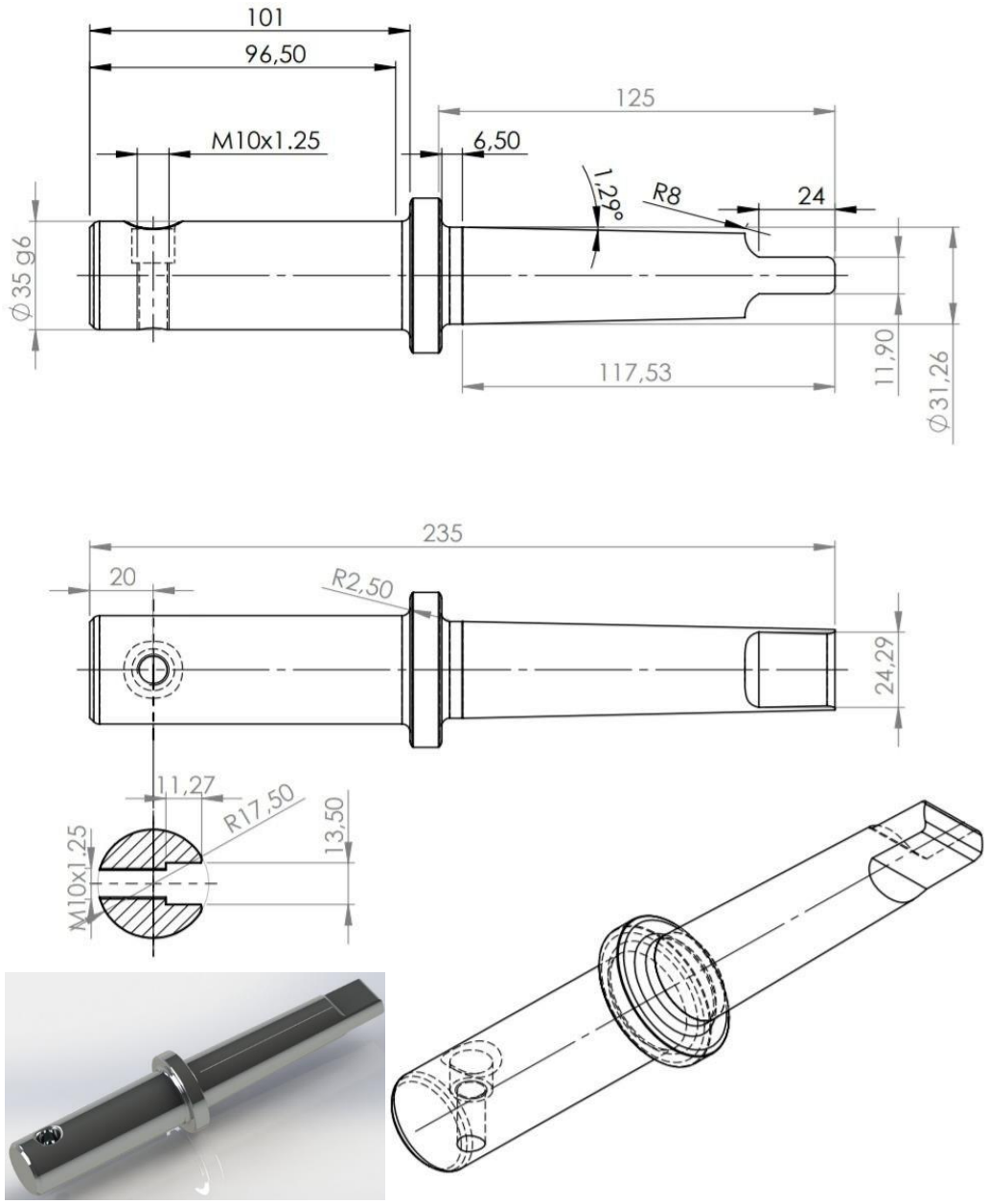


Figure 48 : *Dessin de définition de l'arbre de guidage (pièce n°1)*

L'ébauche de la 'arbre a été découpée par une scie mécanique sur une longueur de 250mm et de diamètre de 60mm à partir d'une barre laminée de longueur de 6 m et de diamètre de 60mm à l'état de livraison.

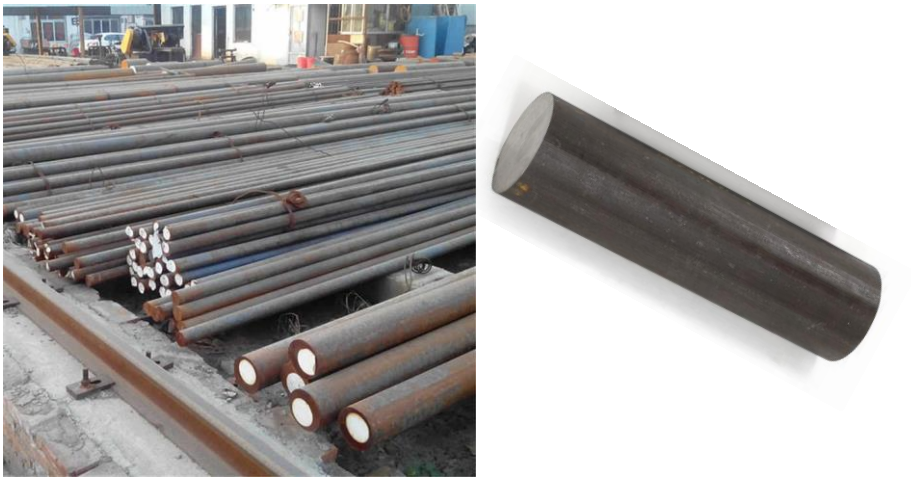


Figure 62: *Mode d'obtention du brute pour usinage de la pièce n°1*

V.7.1.2 Elaboration du programme d'usinage de l'arbre

Le programme d'usinage de l'arbre a été réalisé sur un tour à commande numérique CNC modèle DMG MORI CLX 550 sous le logiciel ShopTurn logiciel de programmation conversationnelle développé par Siemens pour les tours CNC SINUMERIK. Les figures suivantes décrivent la succession des opérations d'usinage selon le programme adapté.

- **<u>Sous phase 1</u>** : Programme de la première face de l'arbre (coté cylindrique)

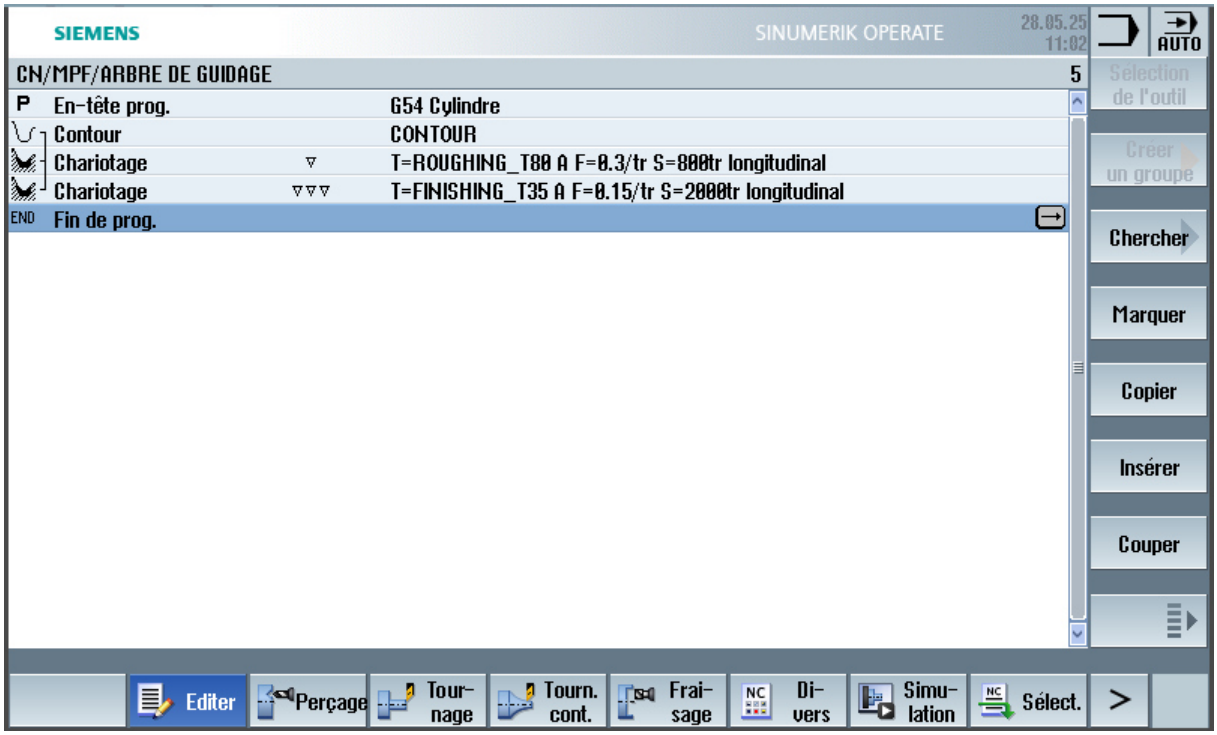


Figure 49 : *Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères*

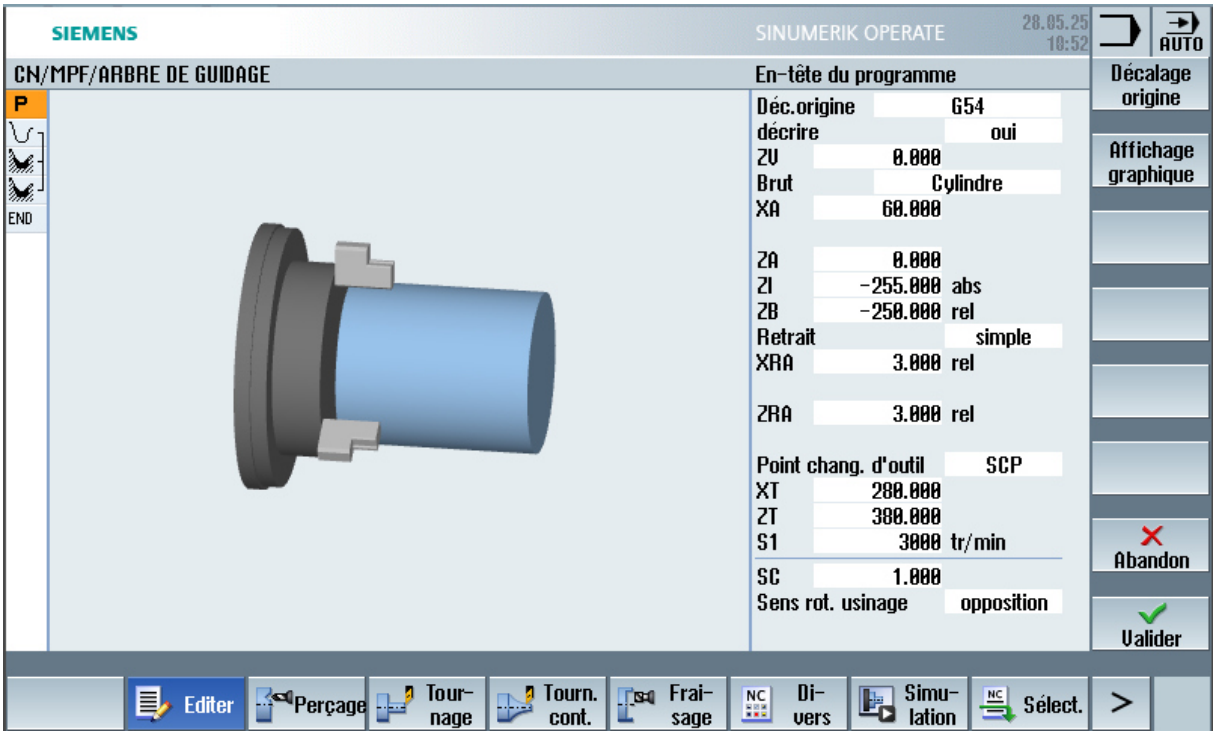


Figure 50 : *Dressage de dimensionnement de la brute de la première face*

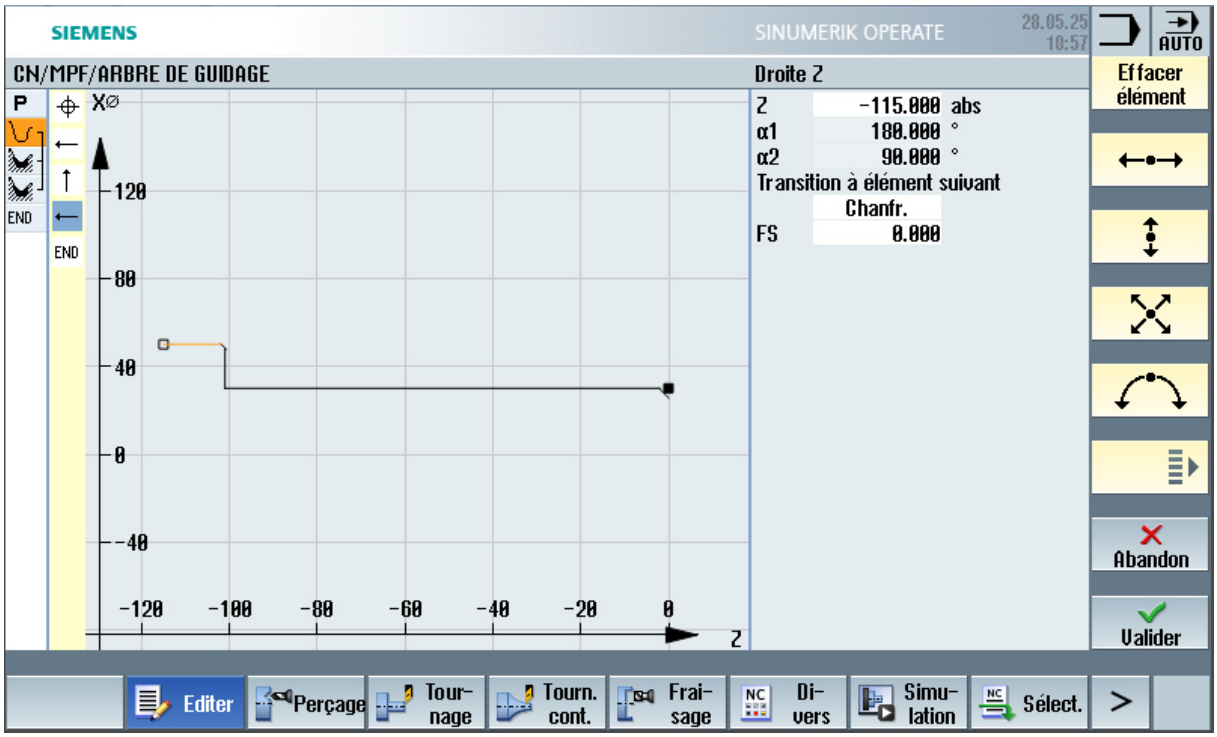


Figure 51 : *Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la première face*

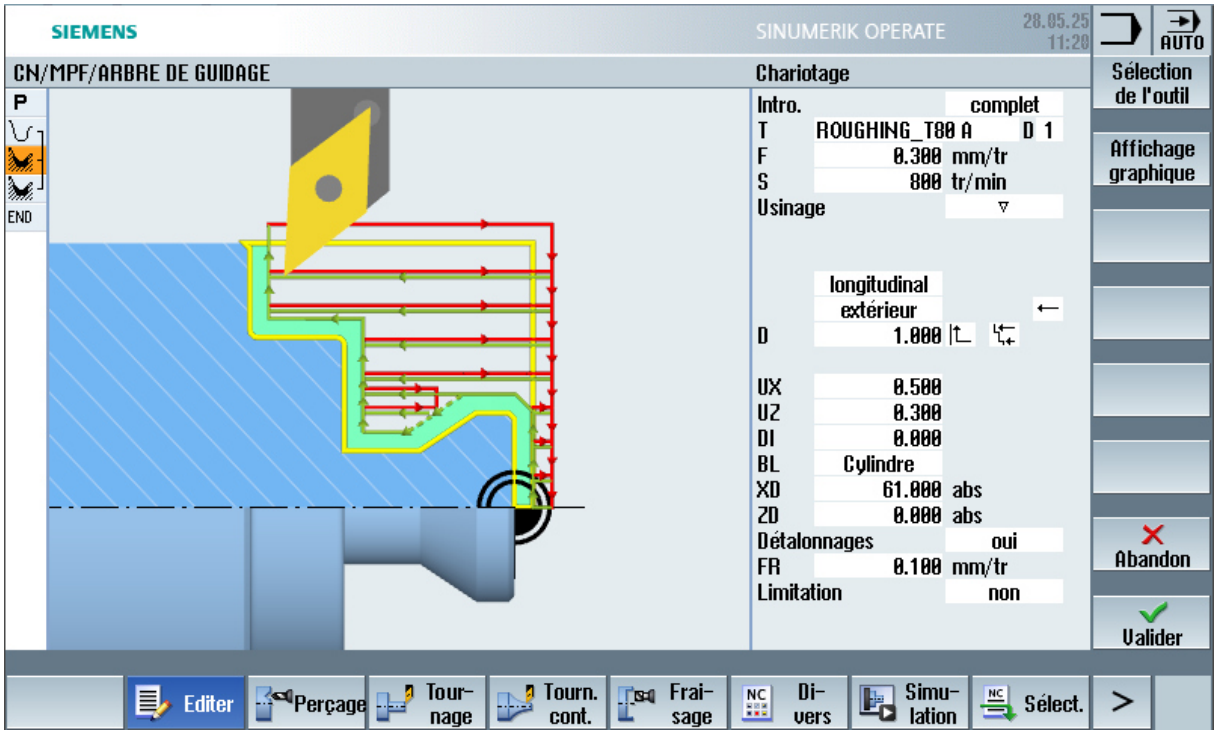


Figure 52 : *Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de l'arbre*

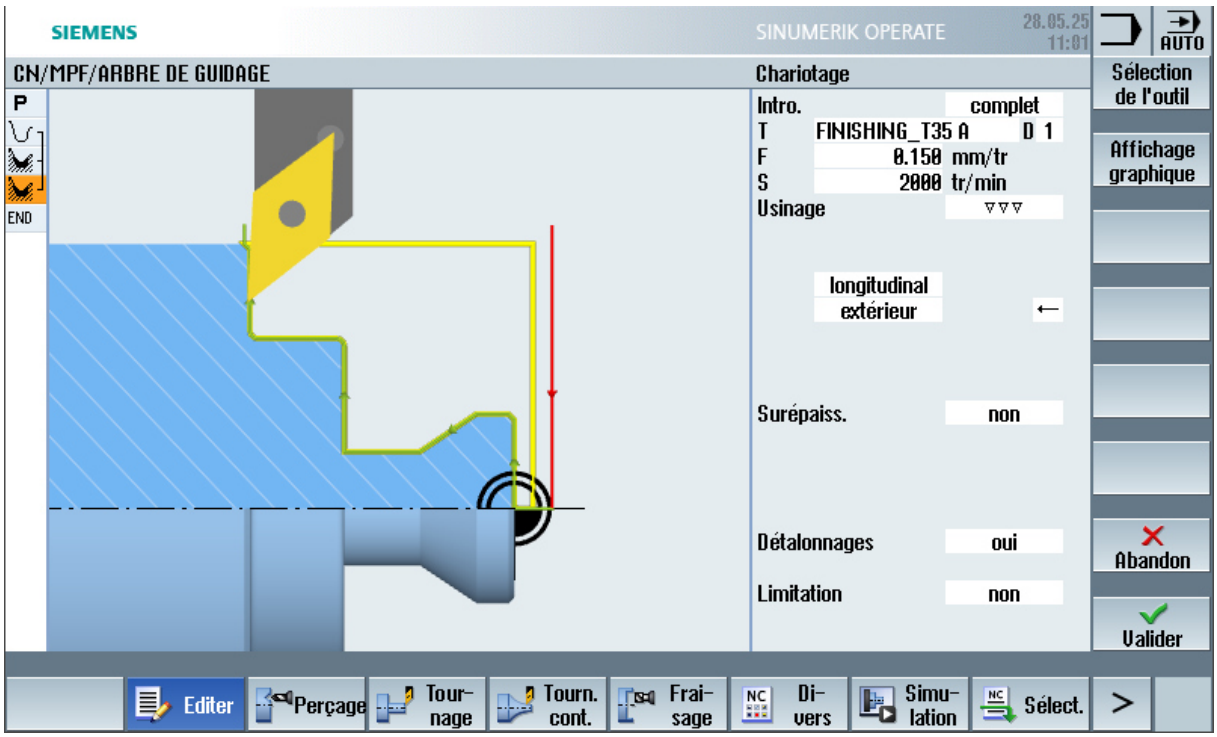


Figure 67 : *Chariotage du contour de la première face de l'arbre*

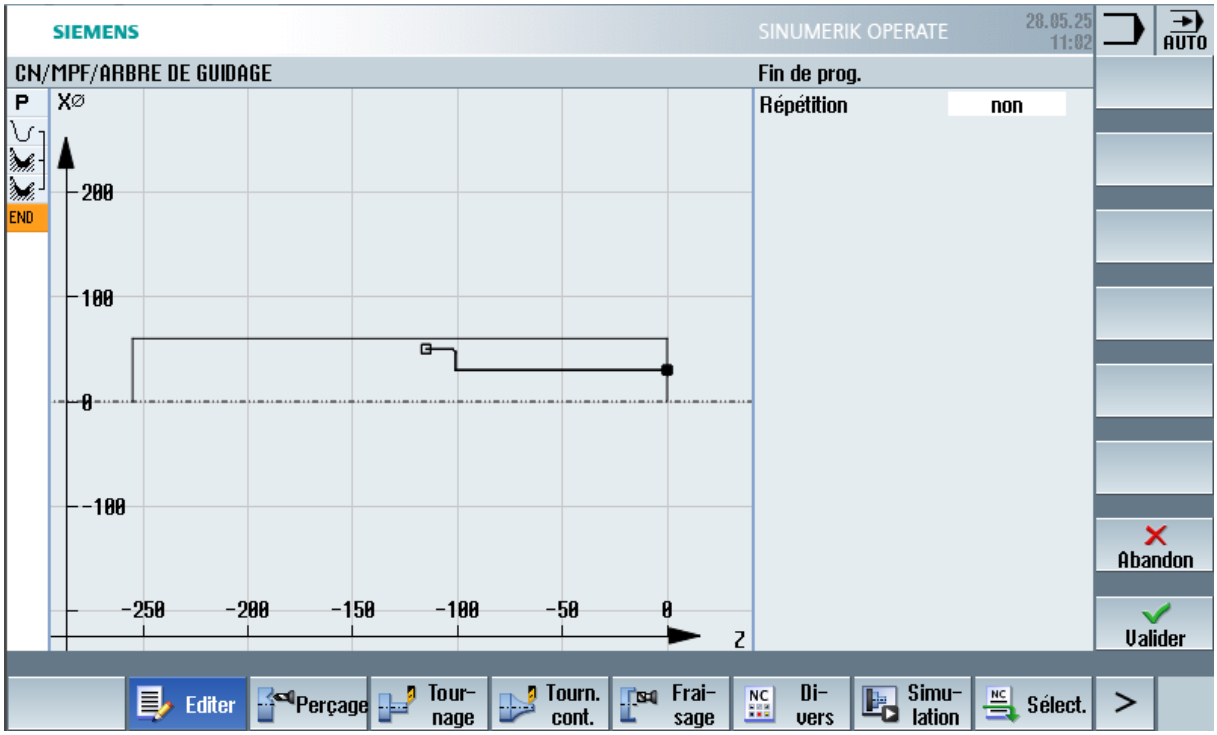


Figure 54 : *Fin de programme de la première partie*

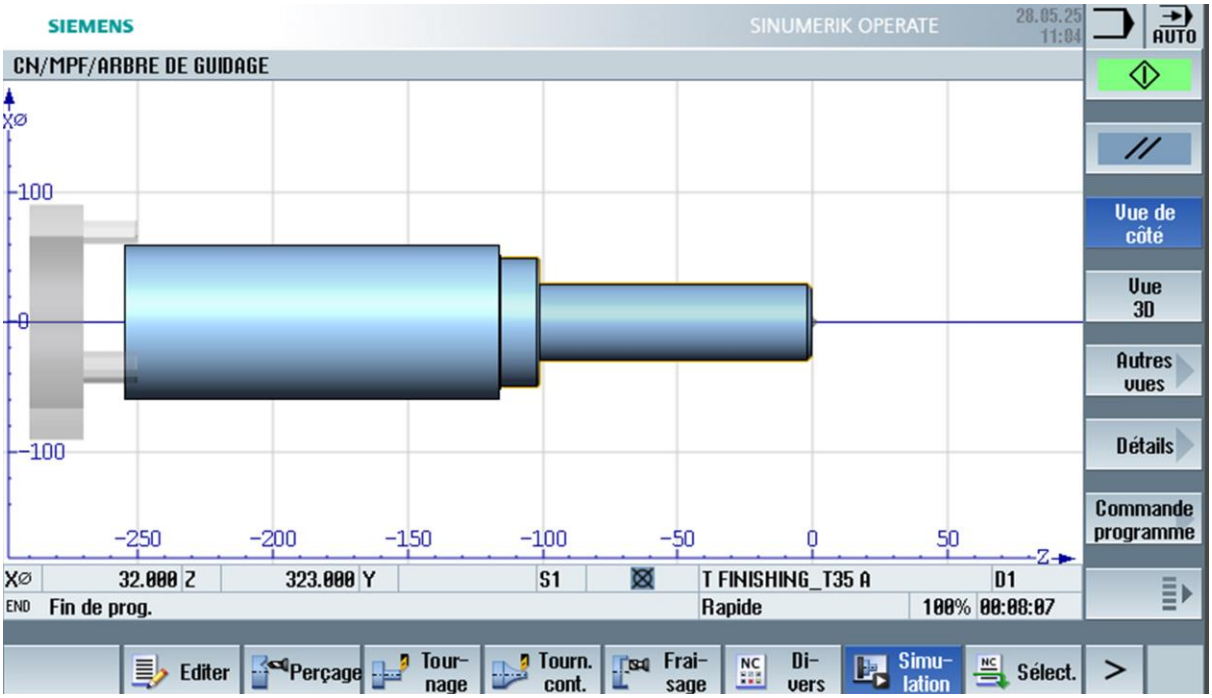


Figure 53 : *Simulation 2D du programme de la première partie*

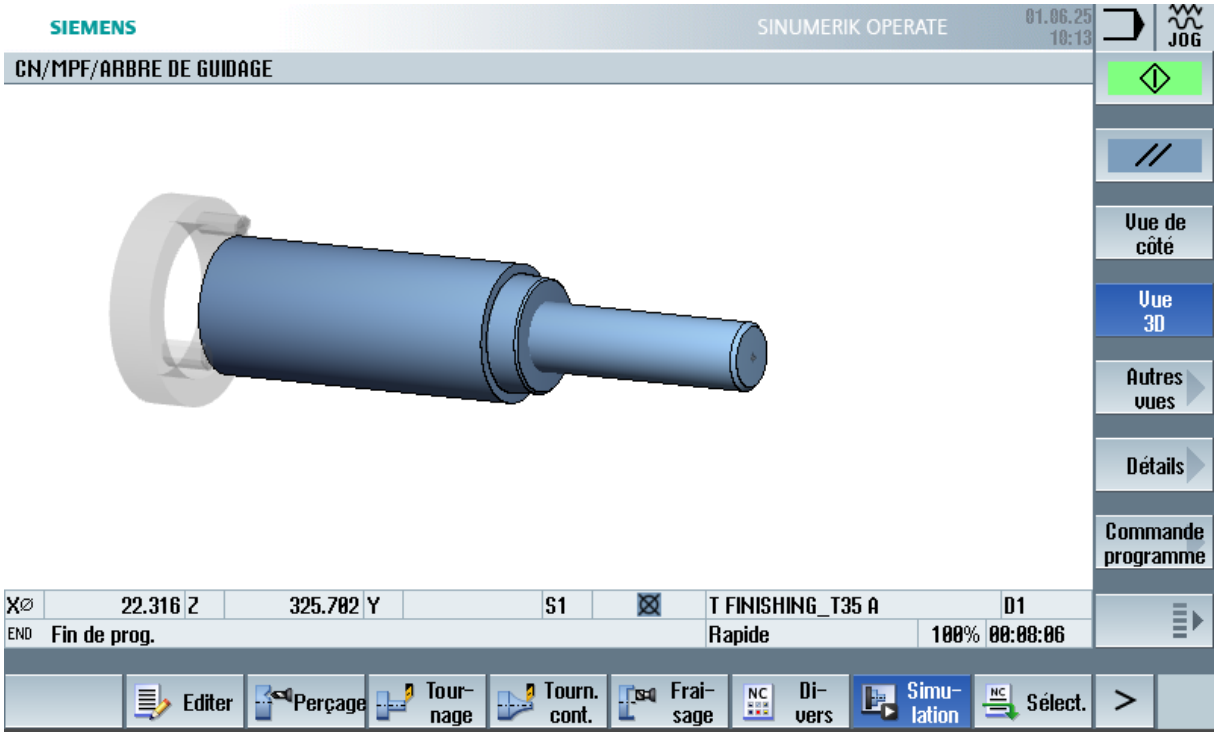


Figure 55 : *Simulation 3D du programme de la première partie*

- **<u>Sous phase 2</u> :** Programmation de l'usinage de la deuxième face de l'arbre (coté conique).

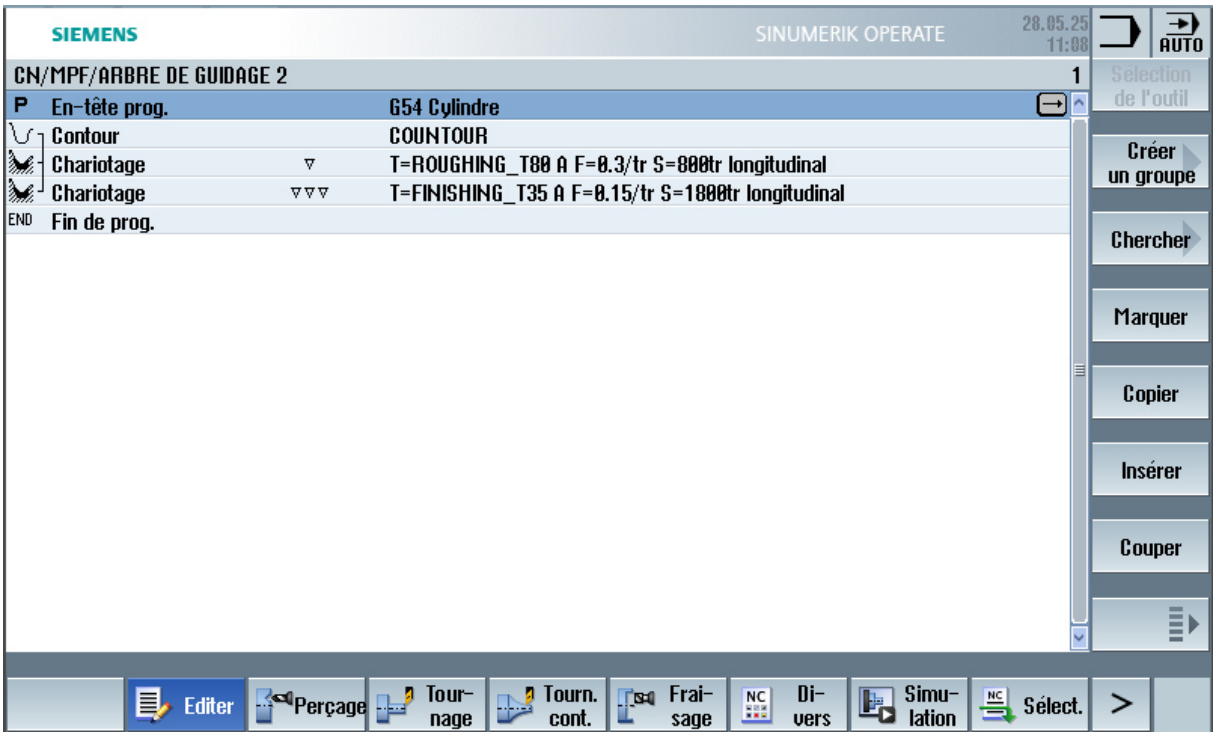


Figure 56 : *Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères*

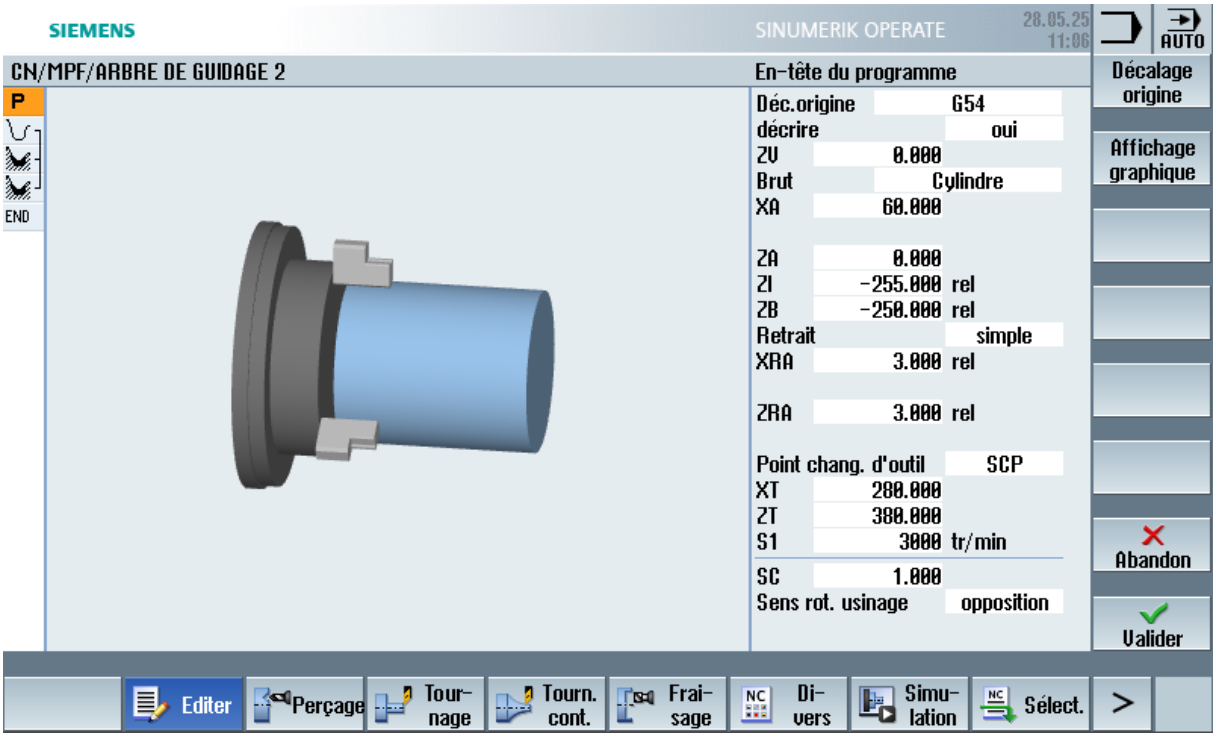


Figure 58 : *Dressage de dimensionnement de la brute de la deuxième face*

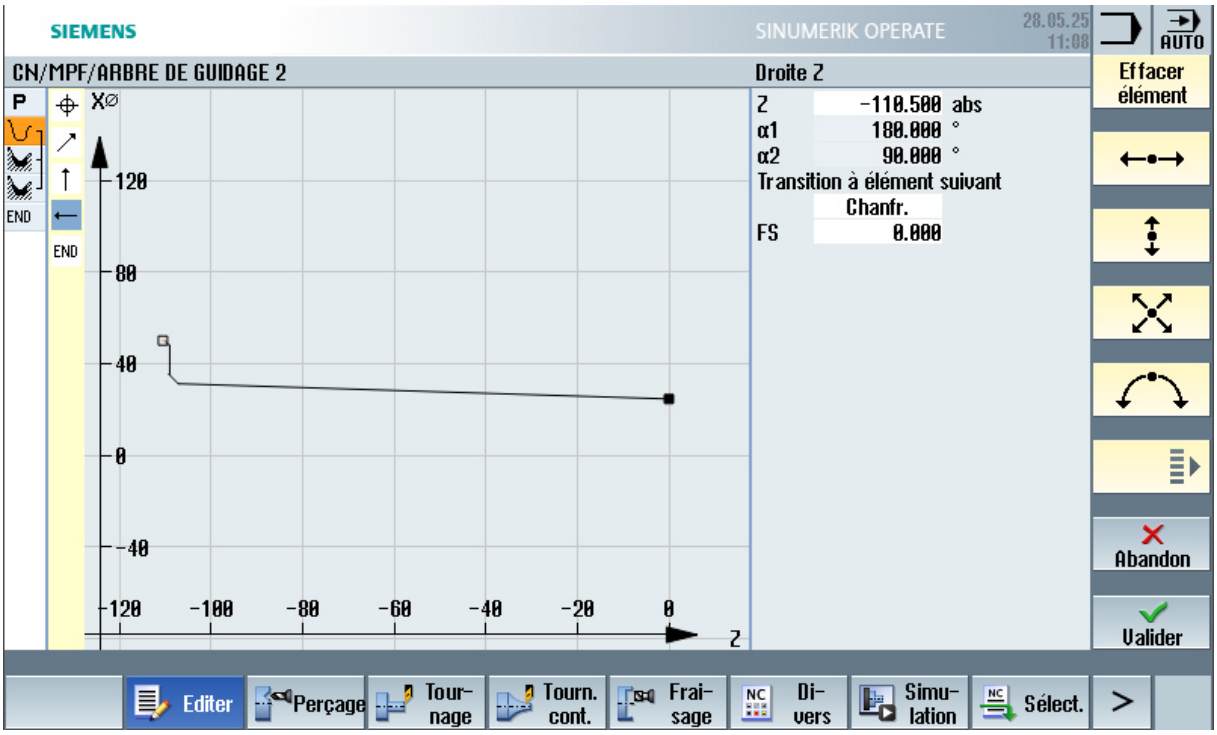


Figure 57 *: Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la deuxième face*

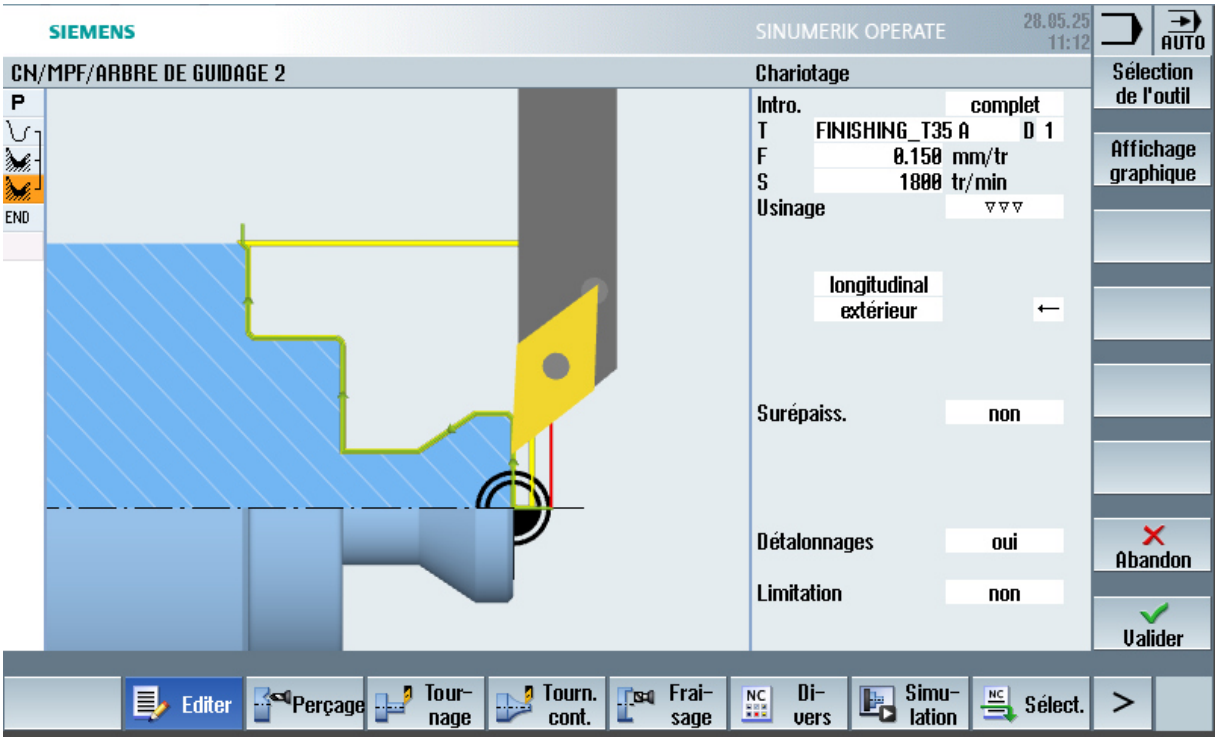


Figure 59 : *Chariotage du contour de la deuxième face de l'arbre*

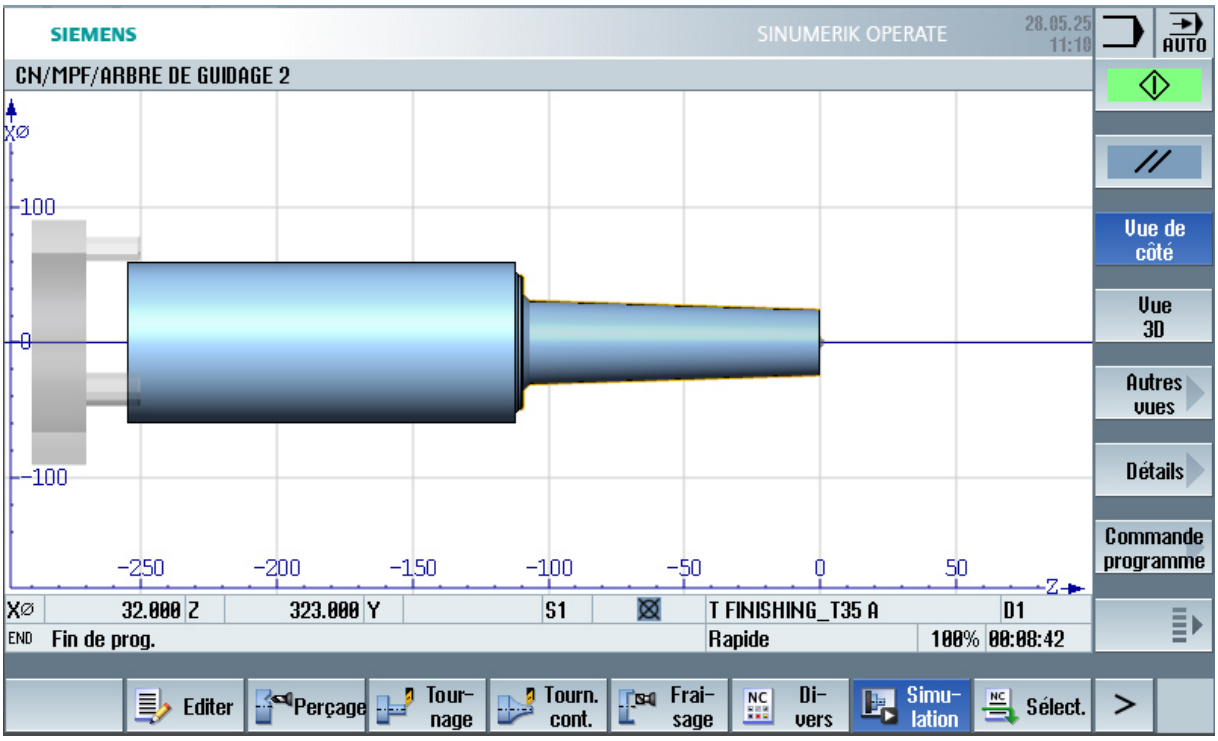


Figure 60 : *Simulation 2D du programme de la deuxième partie*

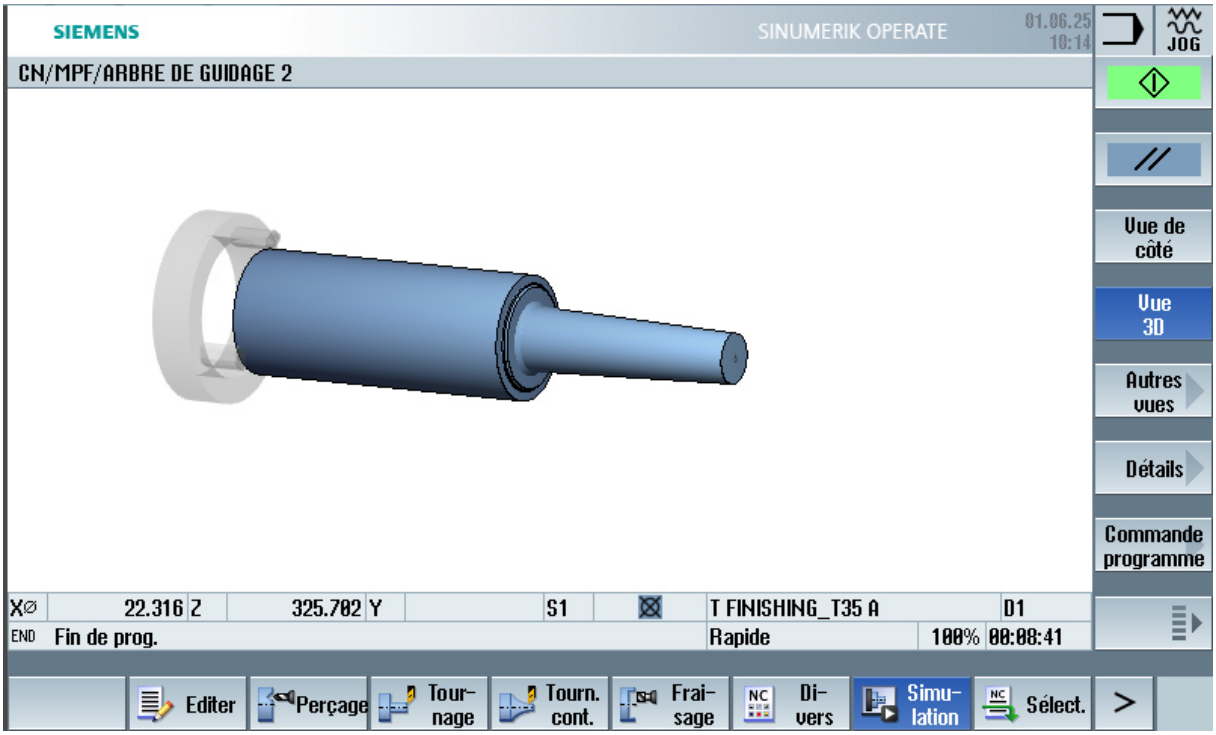


Figure 61 : *Simulation 3D du programme de la deuxième partie*

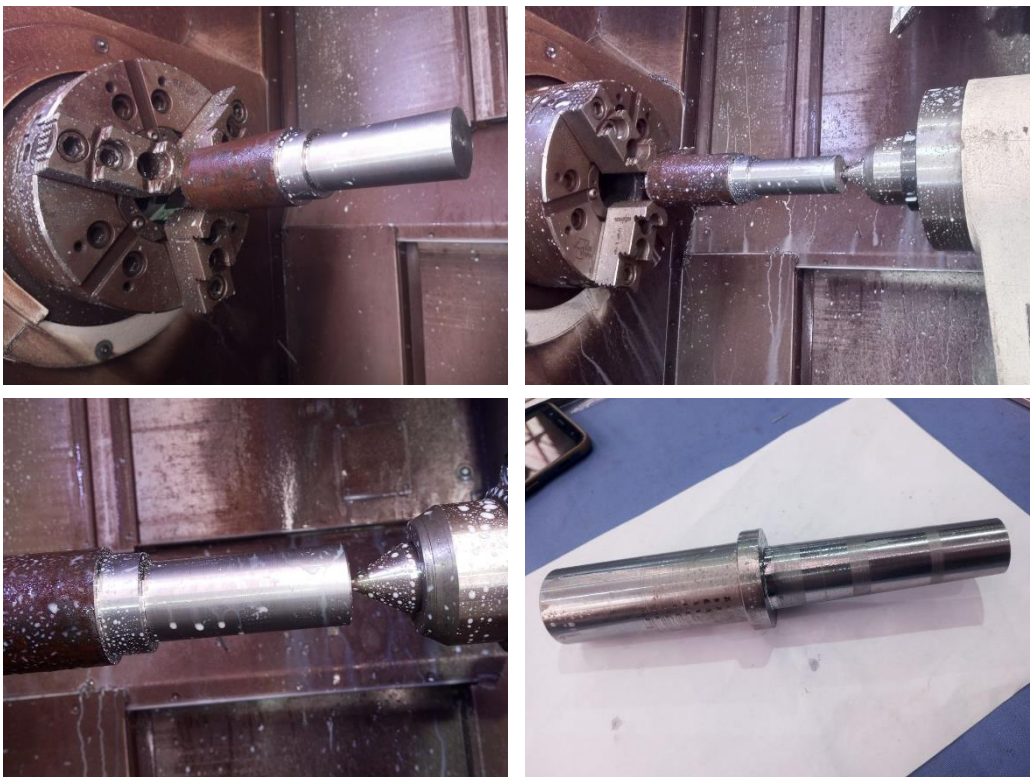


Figure 62 : *Illustration des opérations d'usinage des deux faces de l'arbre*

V.7.2. Routage d'usinage de l'arbre de guidage (pièce n°2)

Composant cylindrique en acier, assurant le guidage axial de l'outil de coupe. Il coulisse sur l'arbre avec un ajustement **35H7 g6** et reçoit les filières standard via quatre vis M8. Son alésage et sa rainure oblong garantissent une translation sans jeu et un bon maintien en rotation.

- Alésage ajusté 35H7 pour glissement sans jeu.
- Rainure oblongue pour guidage de la bille.
- Surface chambrée pour montage de la filière et adaptateur.

➢ **Caractéristiques techniques :**

Type : Pièce cylindrique symétrique.

Matière : L'acier XC-38 s aciers non alliés, avec une teneur en carbone avoisinant 0,38%,.

V.7.2.1 Dessin de définition du fourreau et préparation du brut

Le mode d'obtention du brute et le programme du routage d'usinage de Le fourreau sont établies essentiellement sur les recommandations technique et graphiques du dessin de définition après étude a l'aide du logiciel SolidWorks

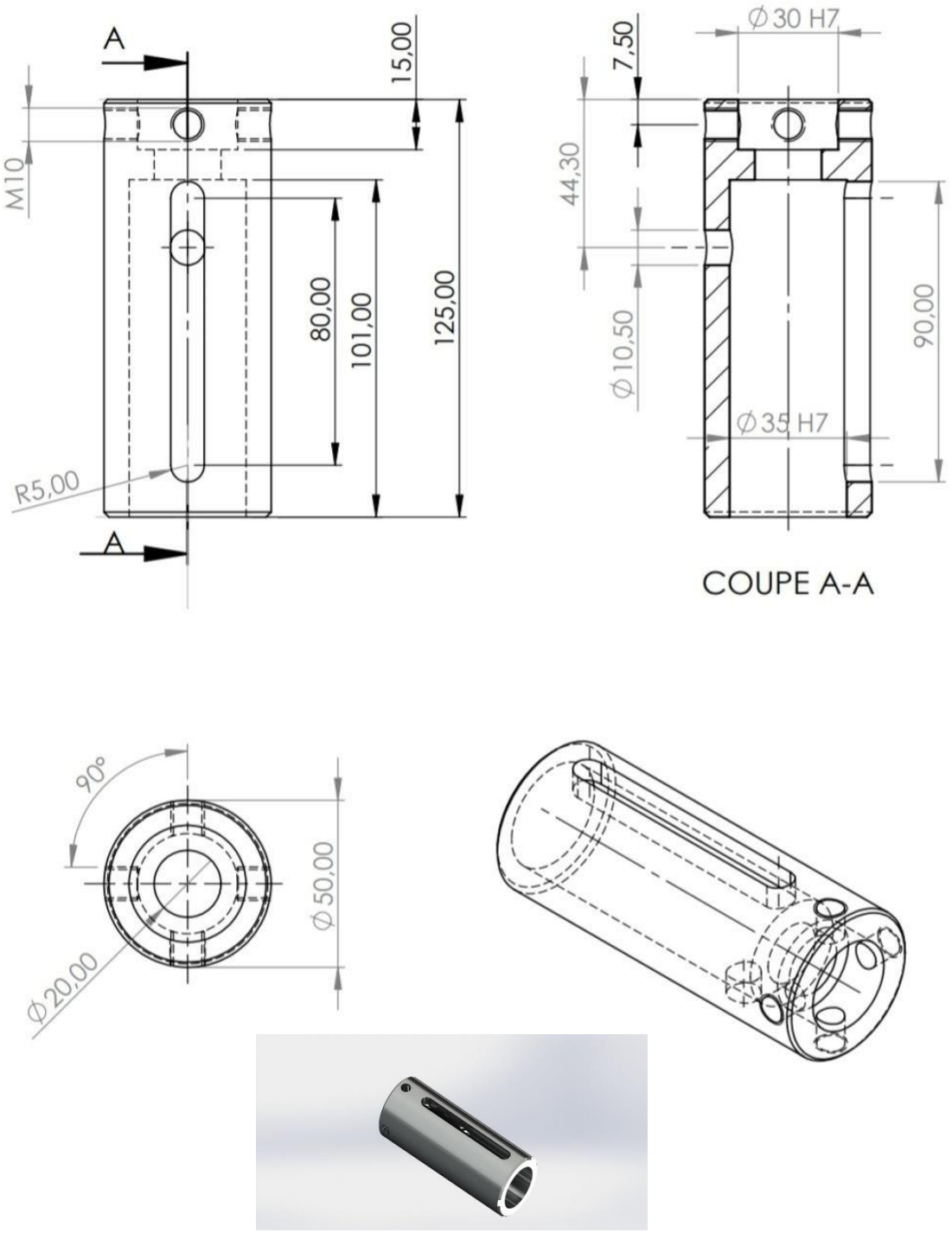


Figure 78 : *Dessin de définition de fourreau (pièce n°2)*

L'ébauche de fourreau a été découpée par une scie mécanique sur une longueur de 150mm et de diamètre de 60 mm à partir d'une barre laminée de longueur de 6 m et de diamètre de 60 mm à l'état de livraison



Figure 63 : *Mode d'obtention de la brute pour usinage de la pièce n°2*

V.7.2.2 Elaboration du programme d'usinage de fourreau

Le programme d'usinage de fourreau a été réalisé sur un tour à commande numérique CNC modèle DMG MORI CLX 550 sous le logiciel ShopTurn logiciel de programmation conversationnelle développé par Siemens pour les tours CNC SINUMERIK. Les figures suivantes décrivent la succession des opérations d'usinage selon le programme adapté.

- **Programme de fourreau**

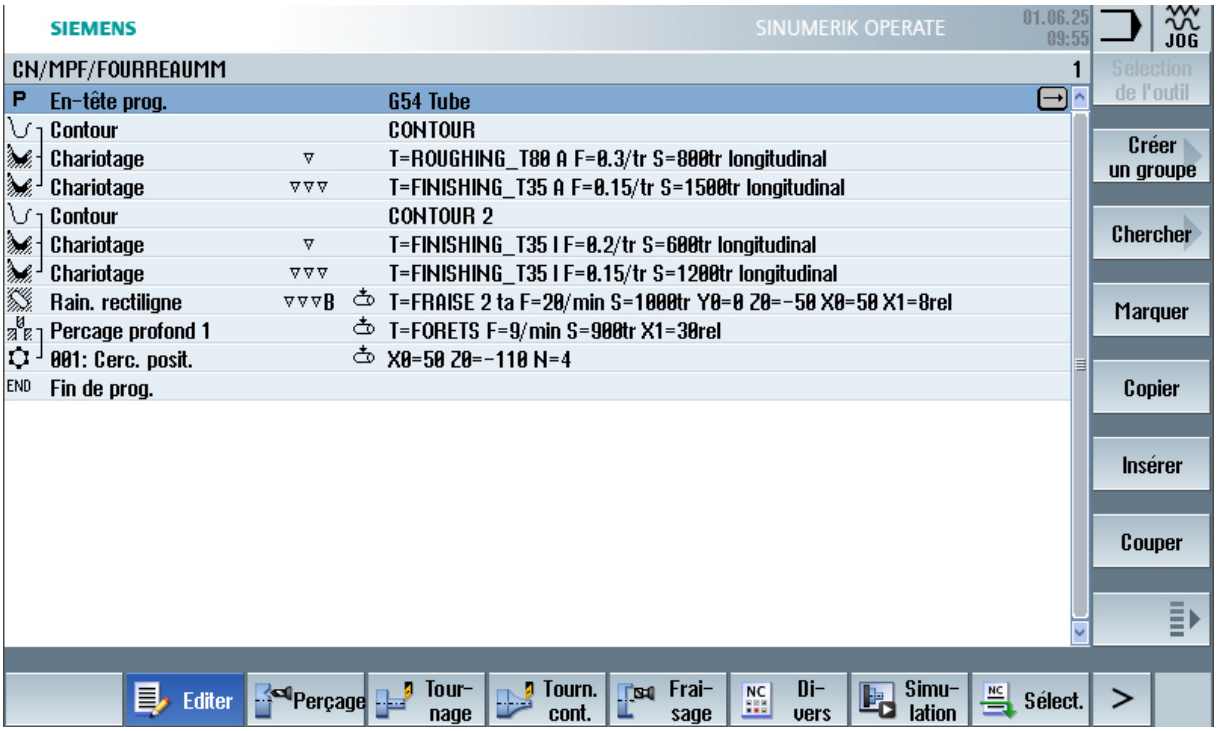


Figure 64 : *Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères*

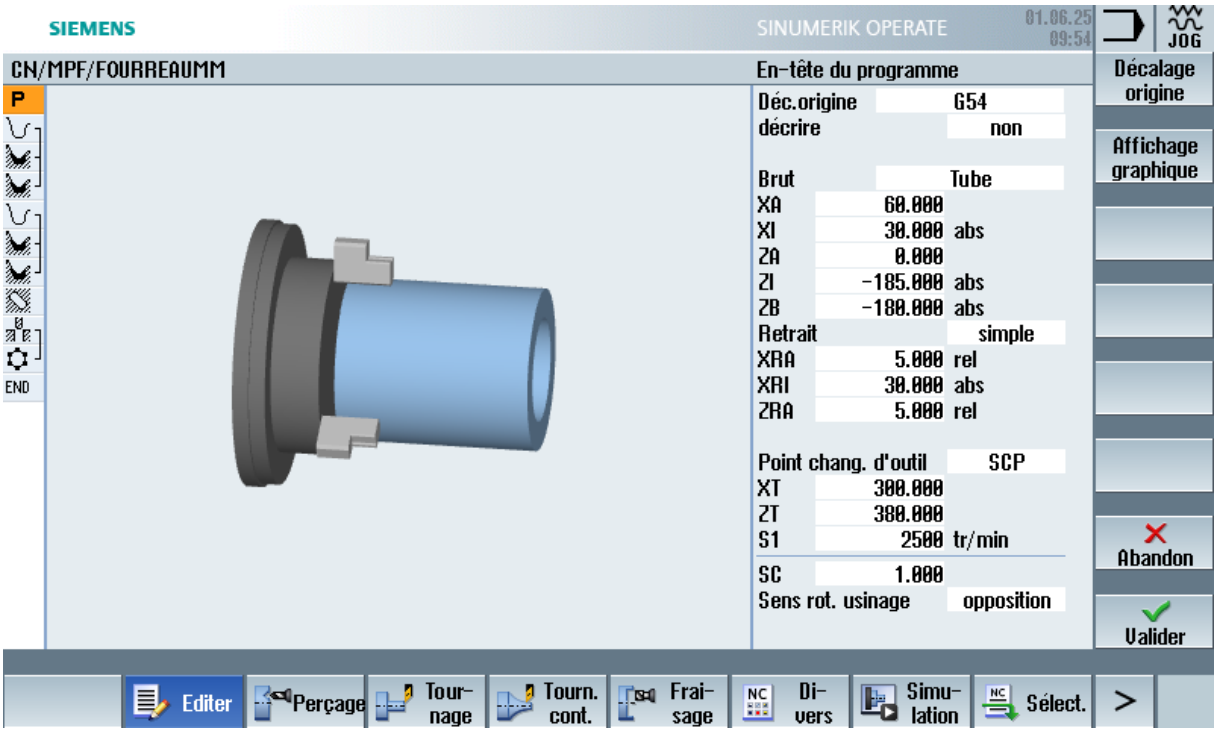


Figure 65 : *Dressage de dimensionnement de la brute de la première face*

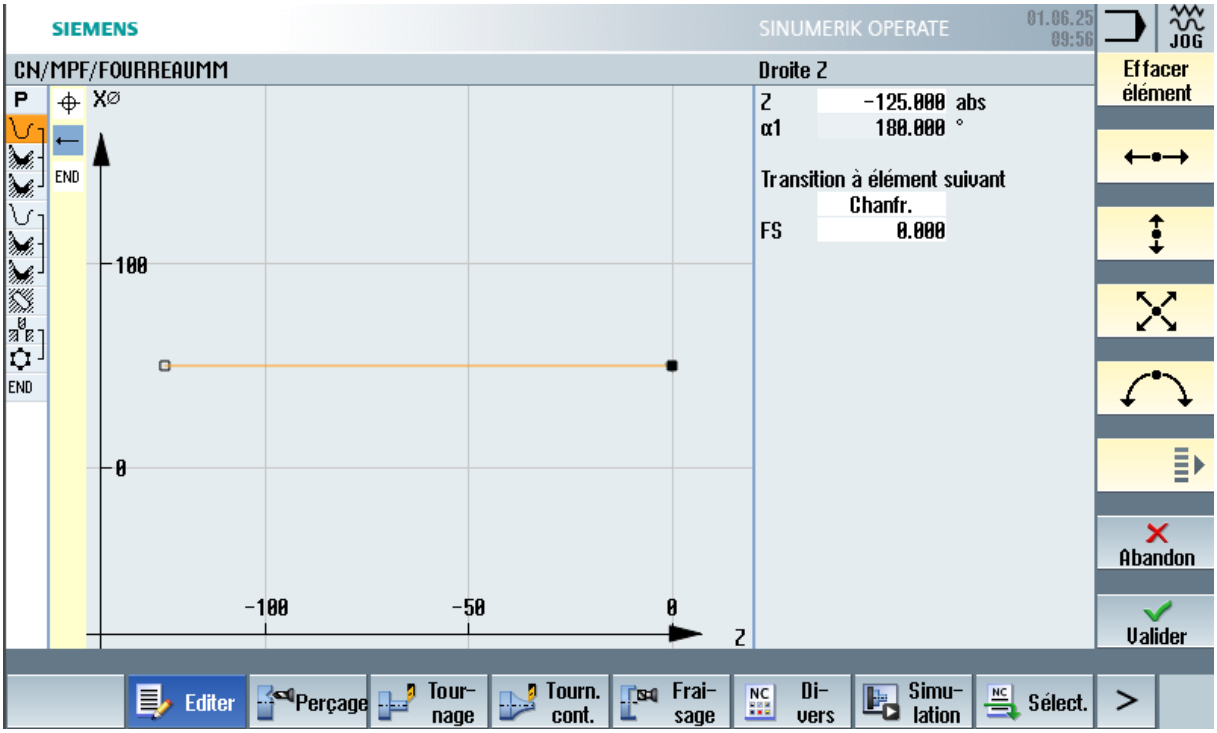


Figure 66 : *Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la première face*

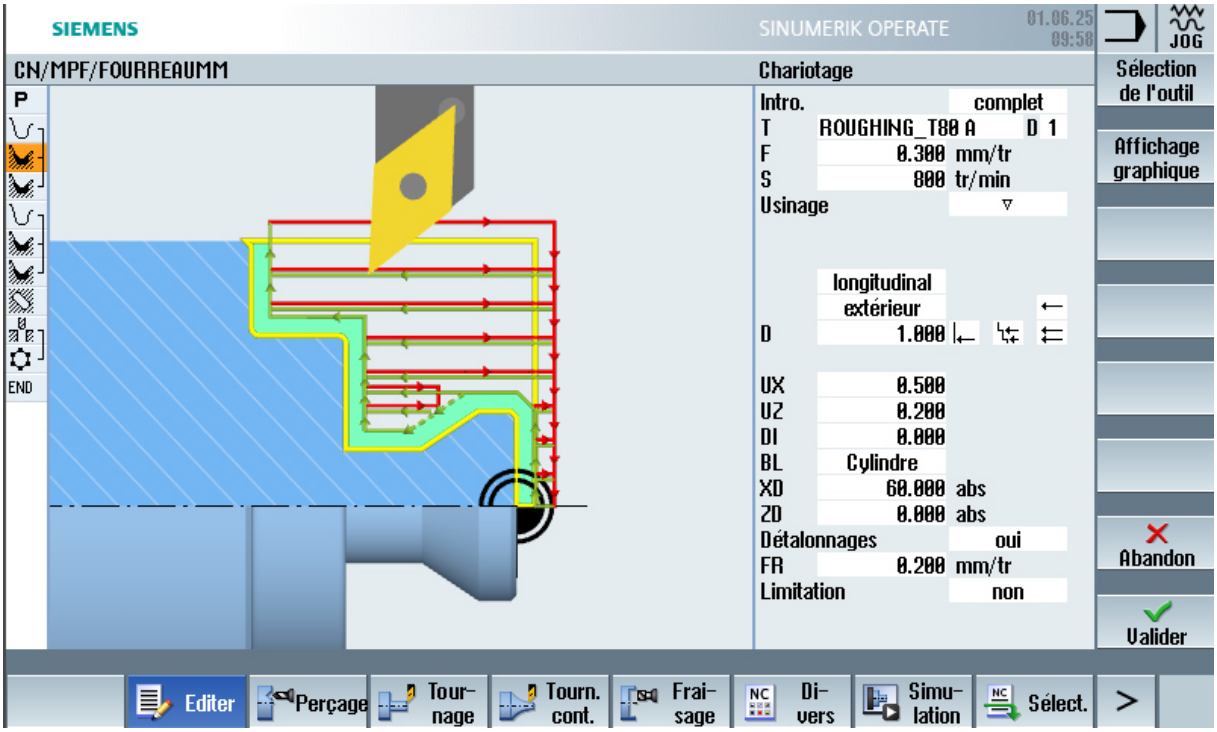


Figure 67 : *Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de fourreau*

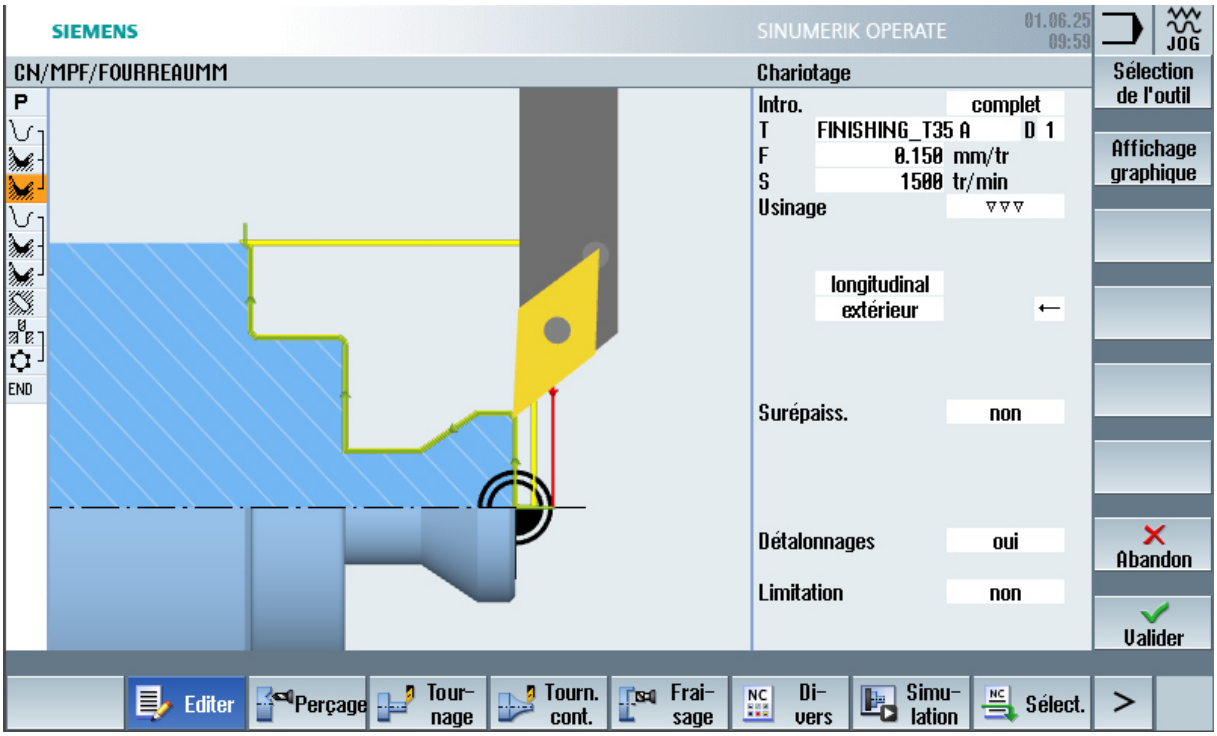


Figure 68 : *Chariotage du contour de la première face de fourreau*

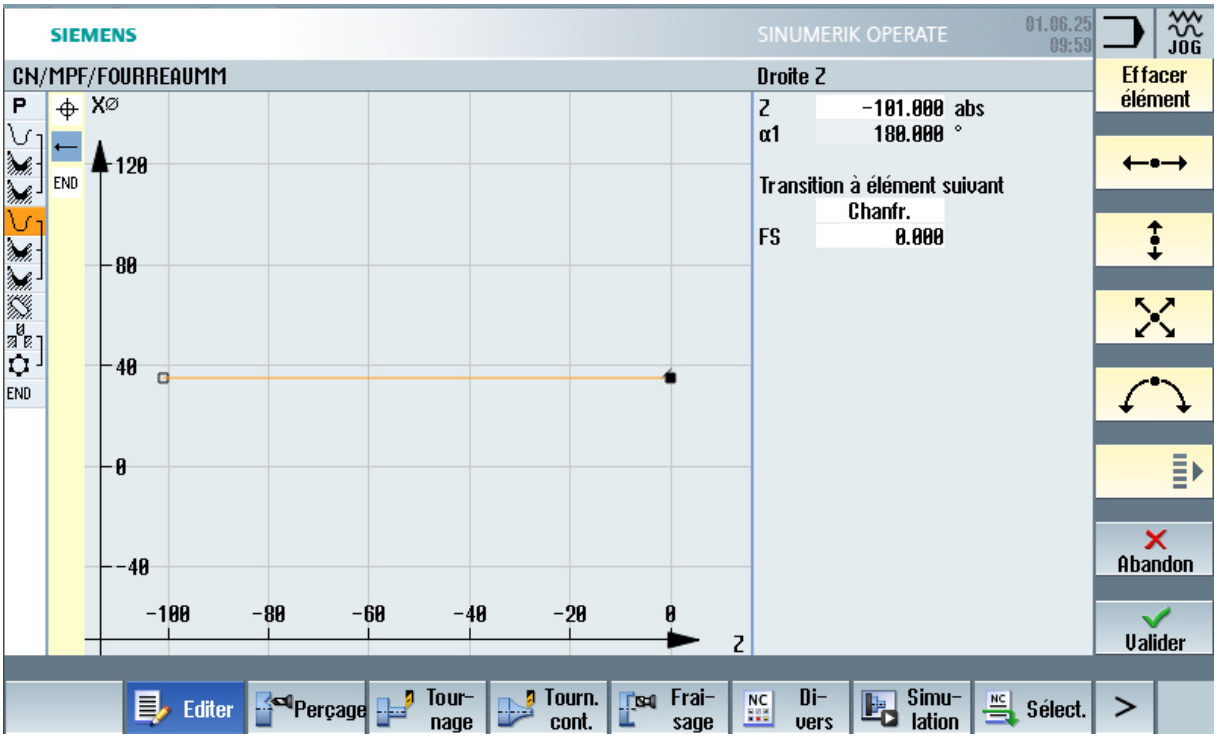


Figure 69 : *Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la deuxième face*

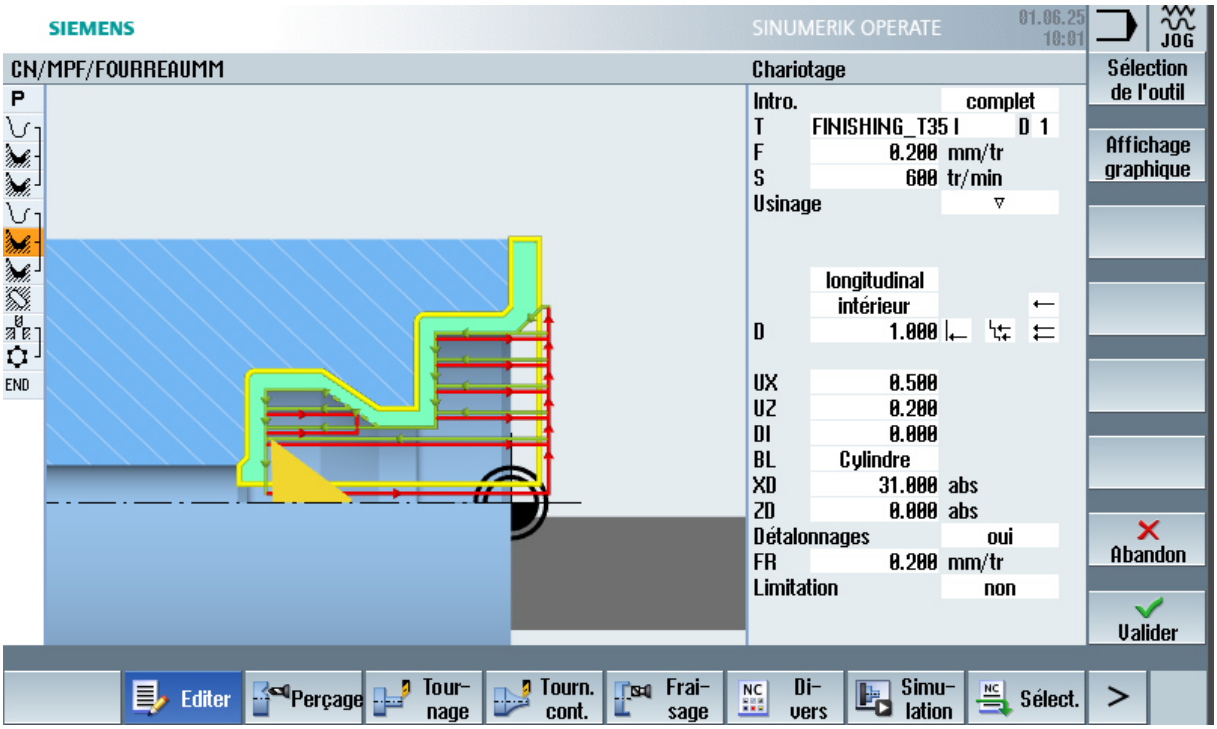


Figure 70 *: Chariotage du contour de la deuxième face de fourreau*

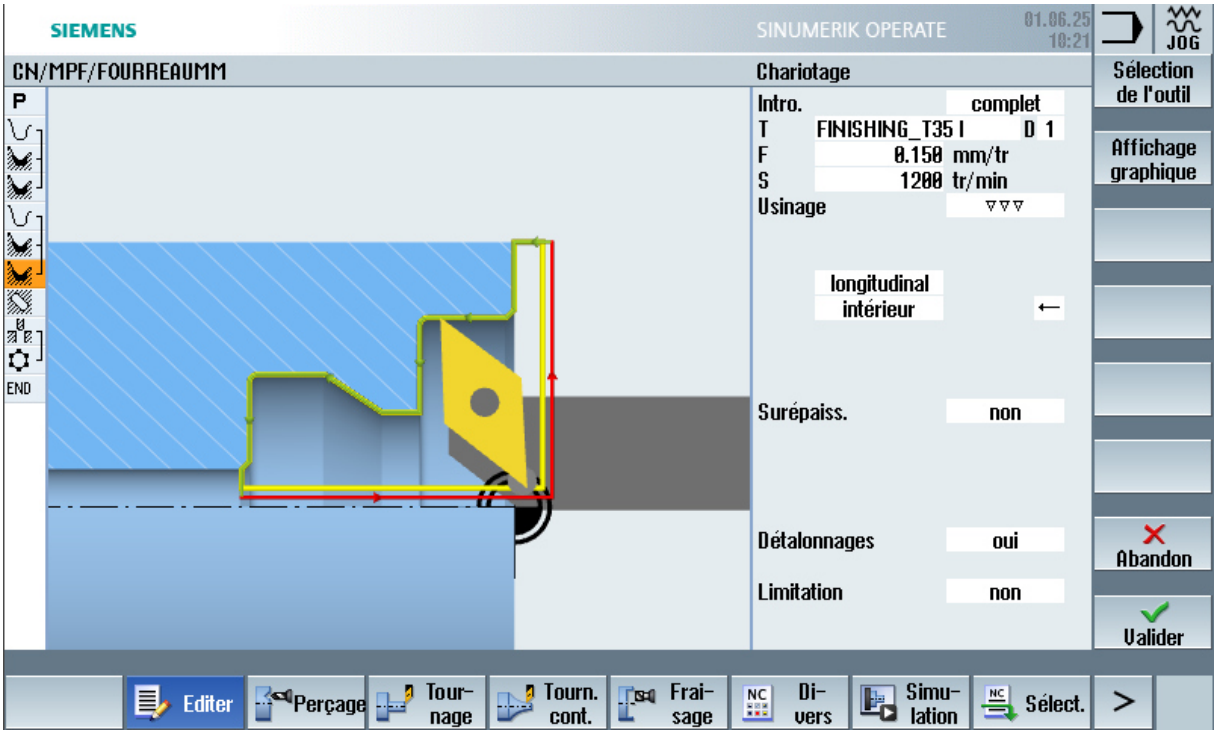


Figure 71 : *Chariotage du contour de la deuxième face de fourreau*

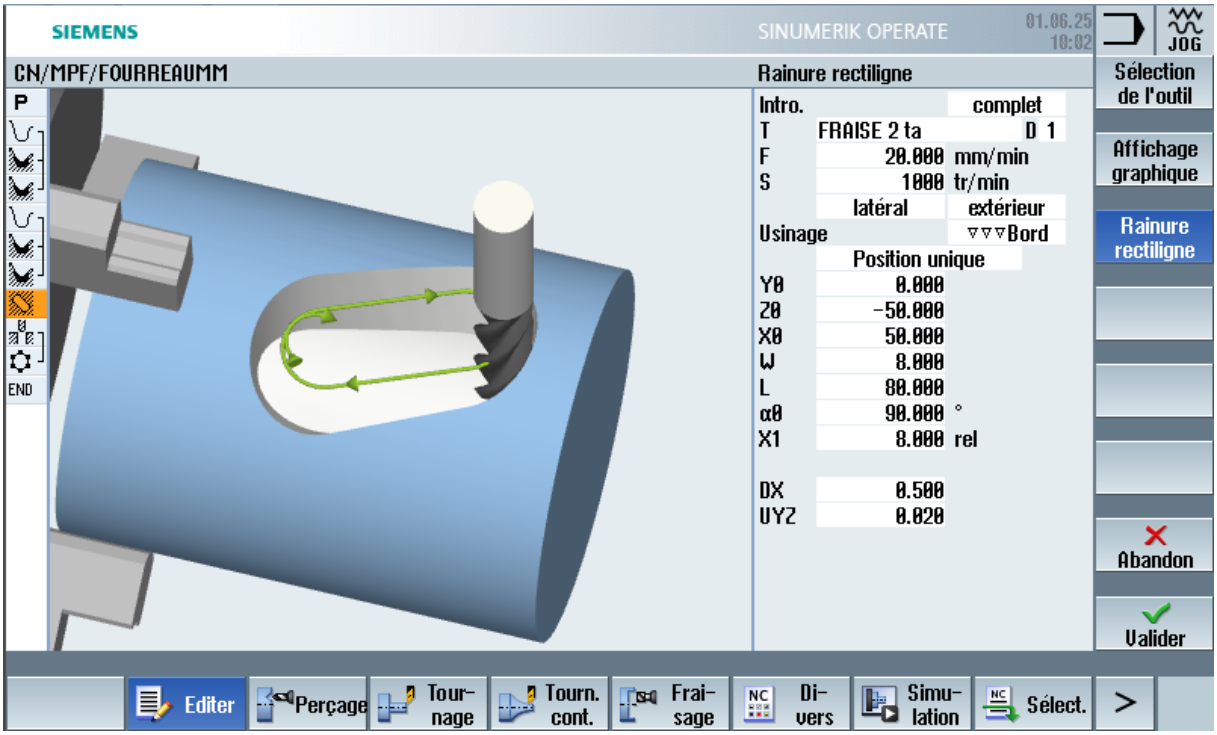


Figure 72 : *Illustration de l'opération du rainure rectiligne*

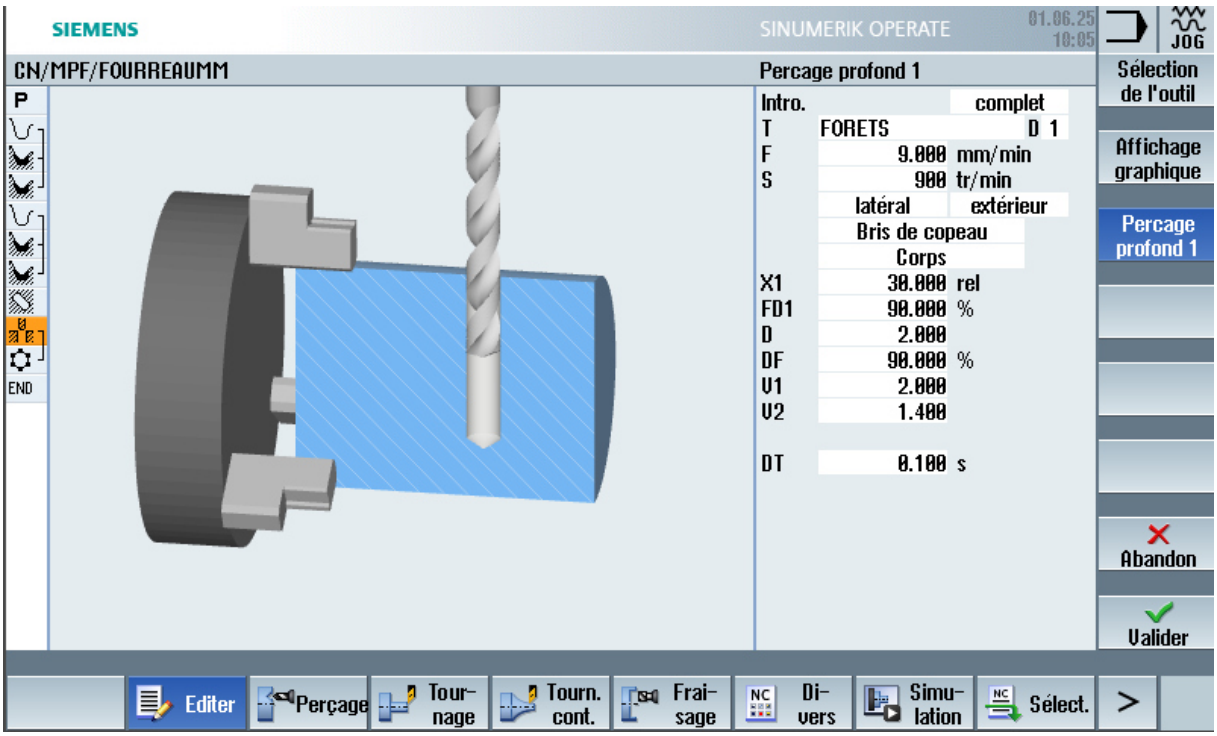


Figure 73 : *Illustration de l'opération du perçage profond*

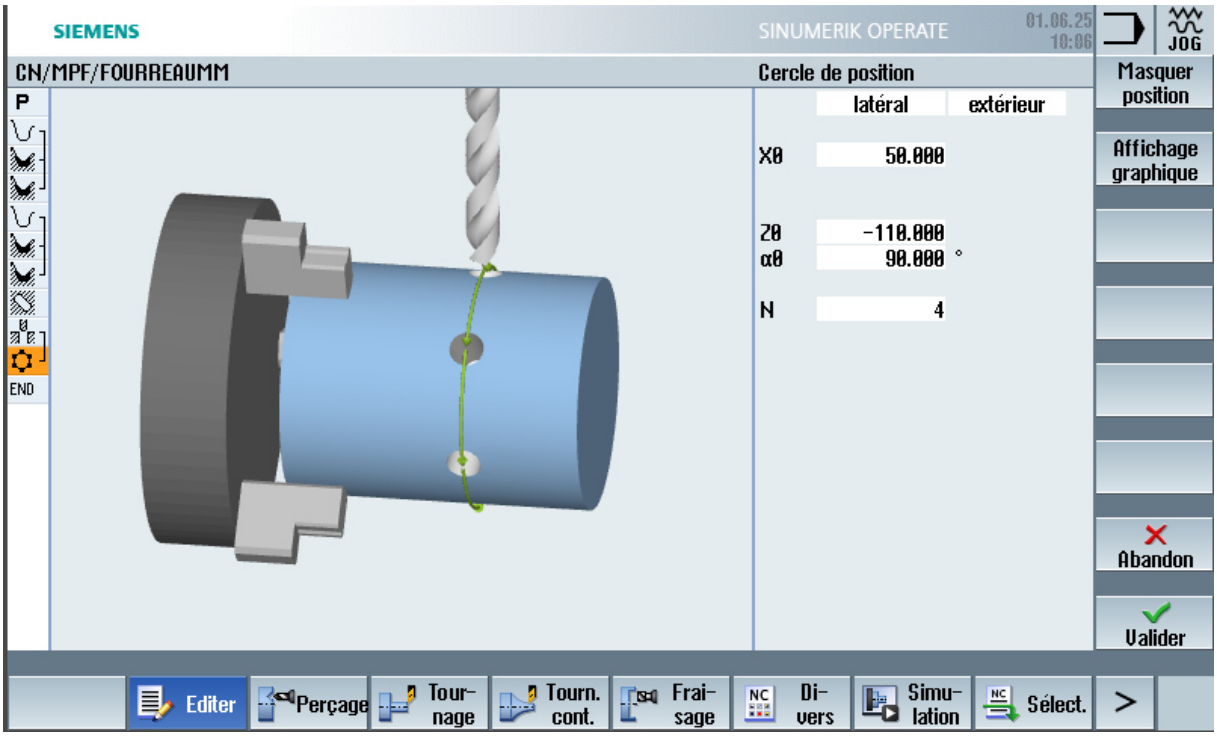


Figure 74 : *Illustration des cercles de position*

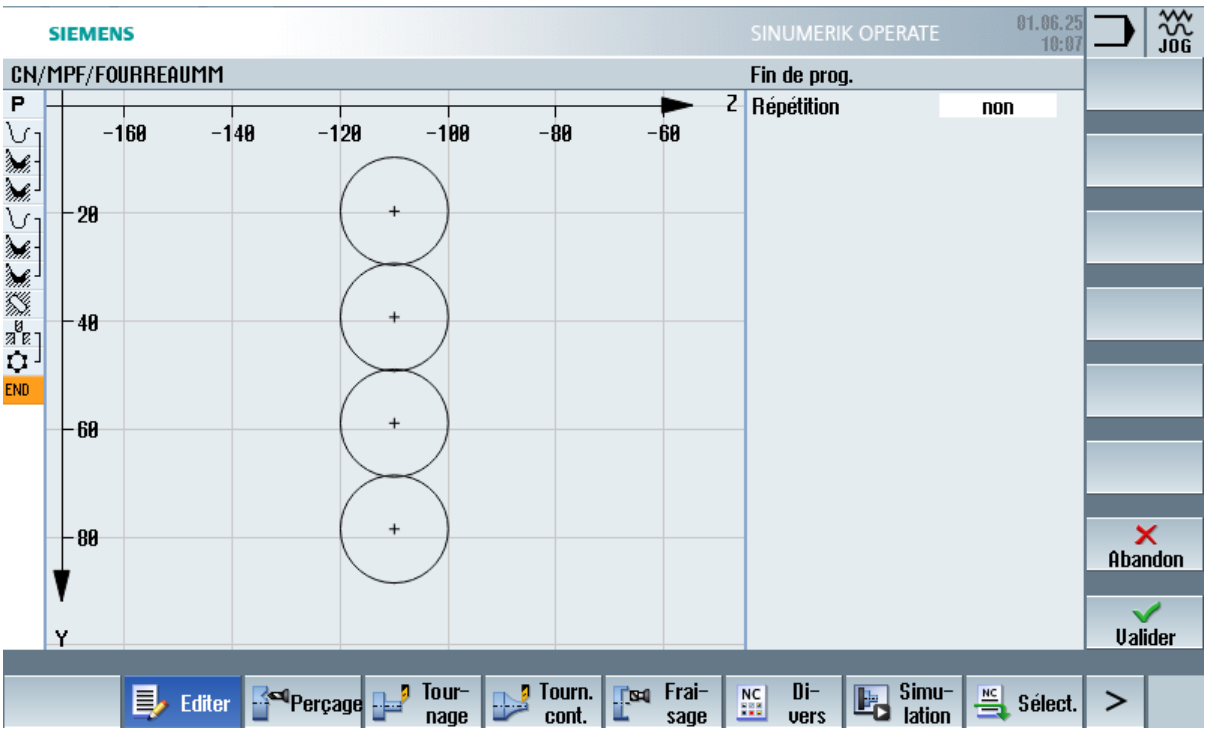


Figure 75 : *Fin de programme de la deuxième pièce*

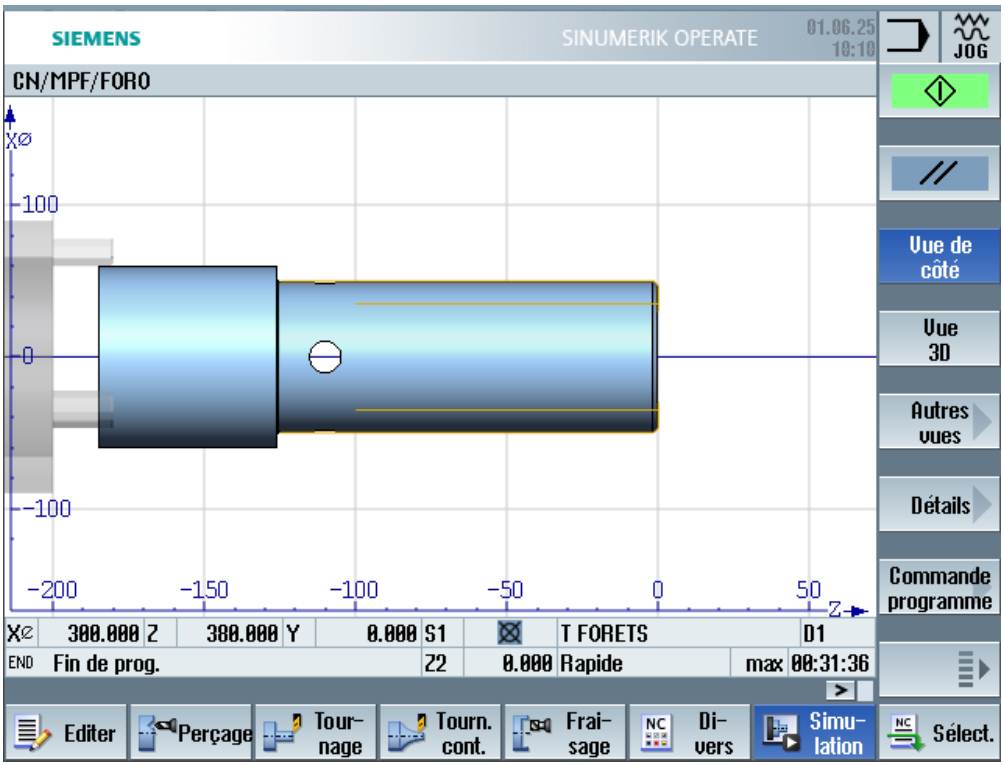


Figure 76 : *Simulation 2D du programme de la deuxième partie*

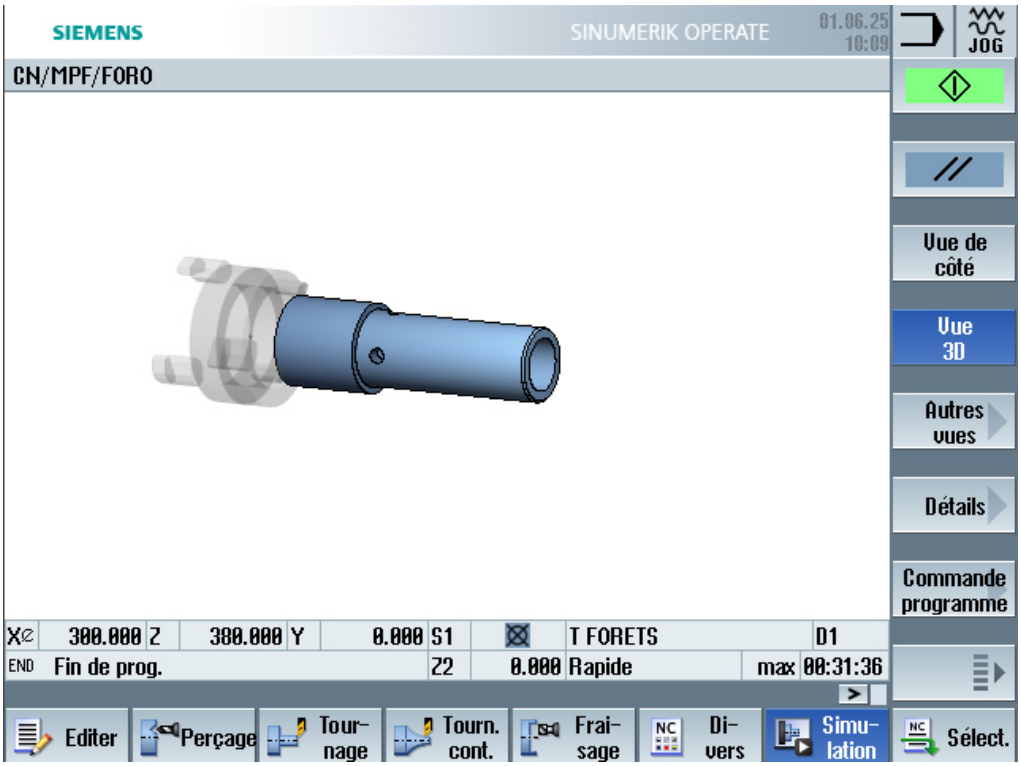


Figure 77 : *Simulation 3D du programme de la deuxième partie*



Figure 78 : *Illustration des opérations d'usinage des deux faces de fourreau*

V.7.3. Routage d'usinage de l'adaptateur de guidage (pièce n°3)

Pièce usinée permettant le taraudage en remplaçant la filière. Elle se fixe sur le fourreau et reçoit un mandrin de perceuse par filetage M12. L'adaptateur conserve la modularité et les exigences d'alignement du dispositif.

- **Caractéristiques techniques :**

Matière : L'acier XC-38 s aciers non alliés, avec une teneur en carbone avoisinant 0,38%.

Forme : corps cylindrique avec filetage en extrémité

V.7.3.1 Dessin de définition de l'adaptateur et préparation du brut

Le mode d'obtention du brute et le programme du routage d'usinage de l'adaptateur sont établies essentiellement sur les recommandations technique et graphiques du dessin de définition après étude a l'aide du logiciel SolidWorks

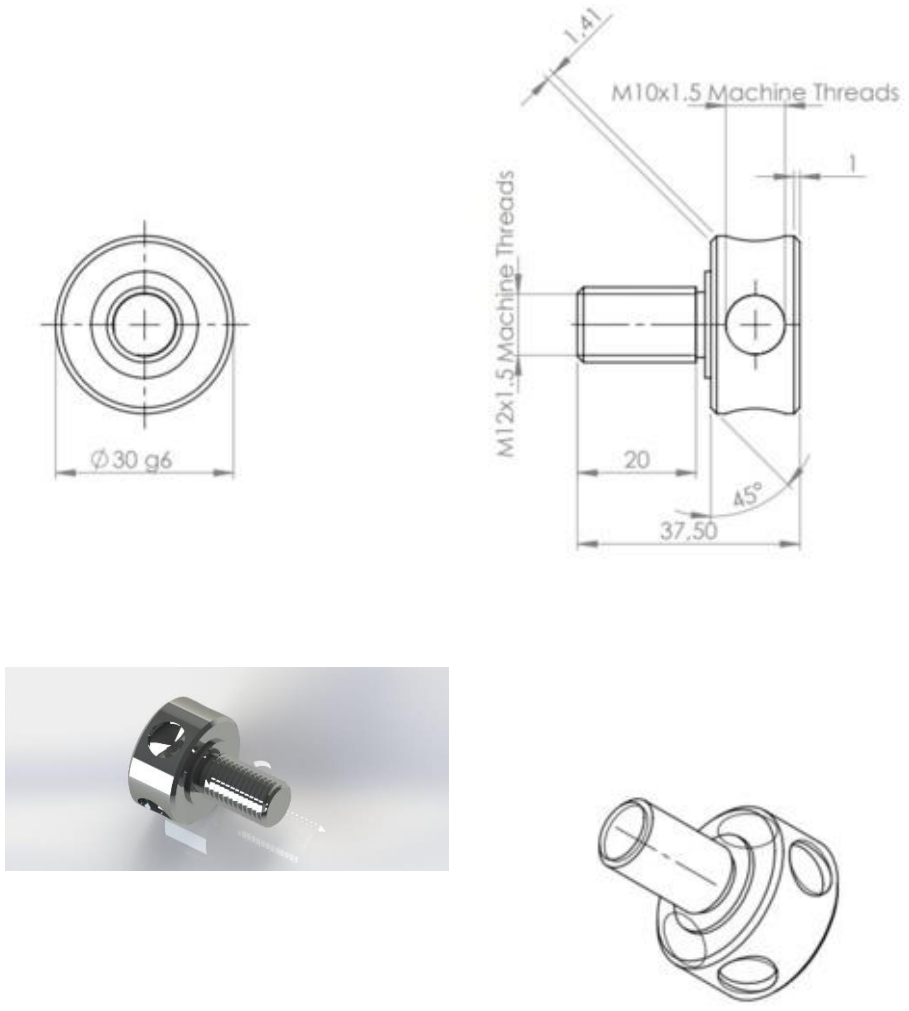


Figure 79 : *Dessin de définition de l'adaptateur (pièce n°3)*

L'ébauche de l'adaptateur a été découpée par une scie mécanique sur une longueur de 250 mm et de diamètre de 60mm à partir d'une barre laminée de longueur de 6 m et de diamètre de 60 mm à l'état de livraison.



Figure 80 : *Mode d'obtention du brute pour usinage de la pièce n°3*

V.7.3.2 Elaboration du programme d'usinage de l'adaptateur

Le programme d'usinage de l'adaptateur a été réalisé sur un tour à commande numérique CNC modèle DMG MORI CLX 550 sous le logiciel ShopTurn logiciel de programmation conversationnelle développé par Siemens pour les tours CNC SINUMERIK. Les figures suivantes décrivent la succession des opérations d'usinage selon le programme adapté.

- **Programme adaptateur**

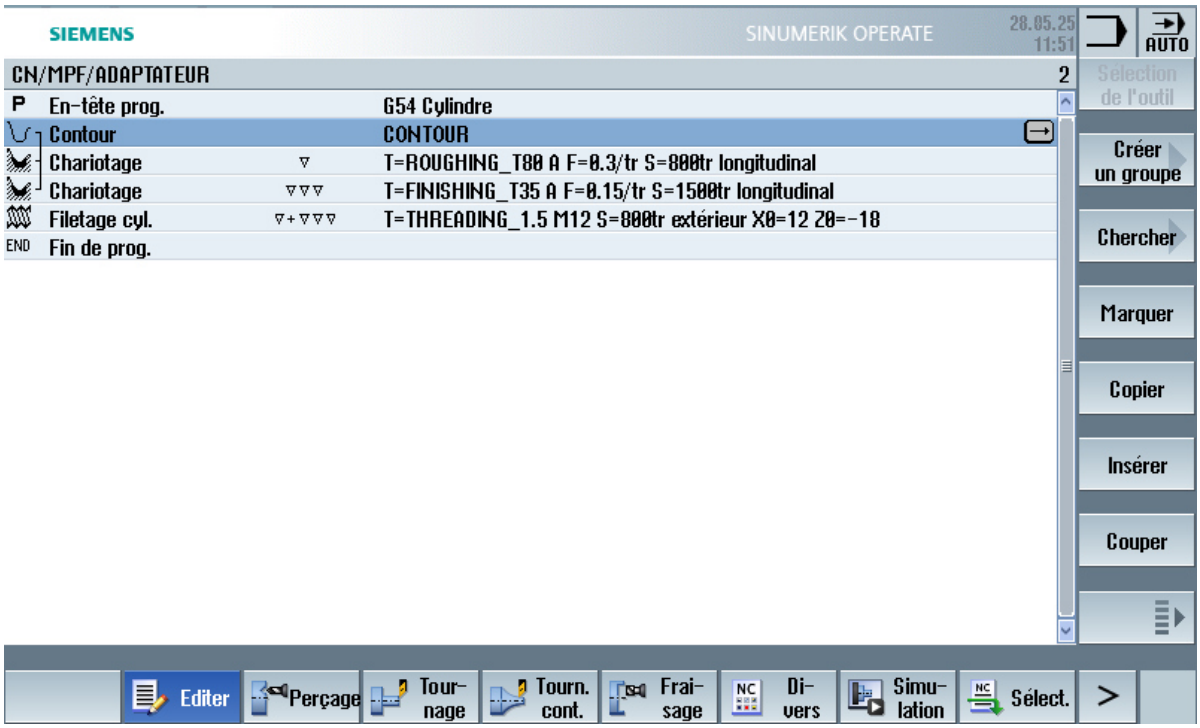


Figure 81 : *Mise au pont de la machine tour CNC et calibrage des repères*

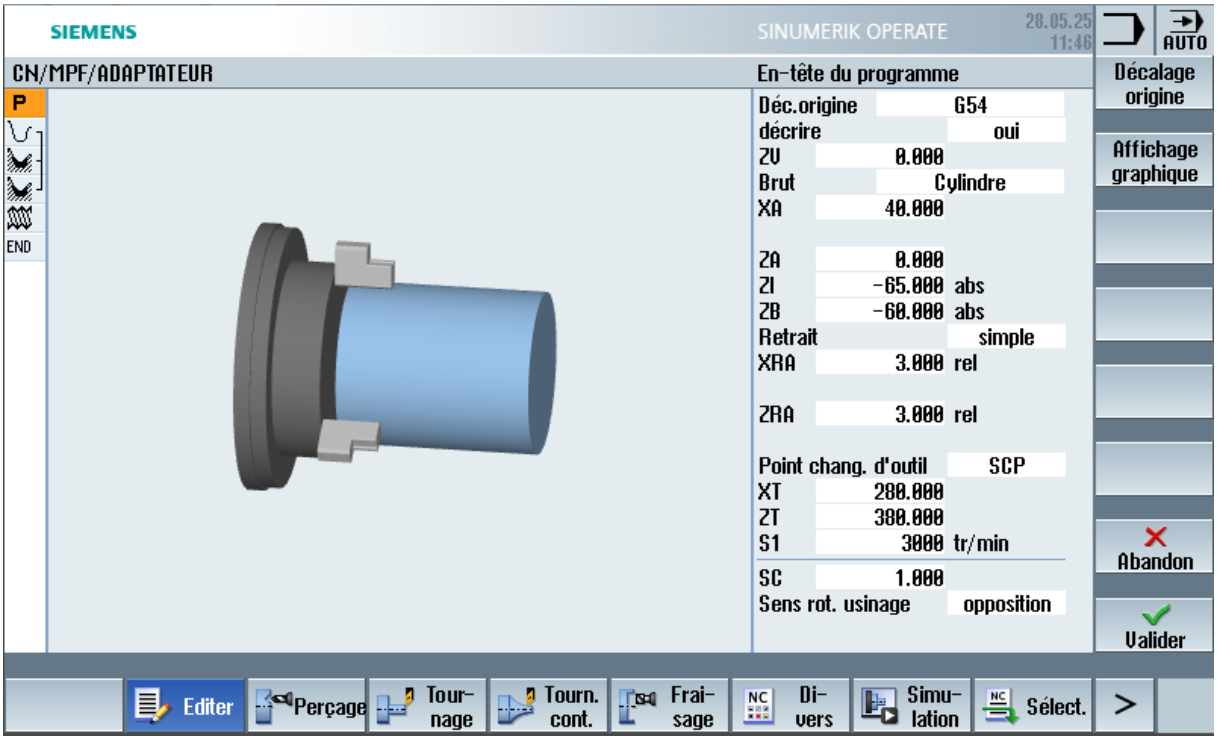


Figure 82 : *Dressage de dimensionnement de la brute*

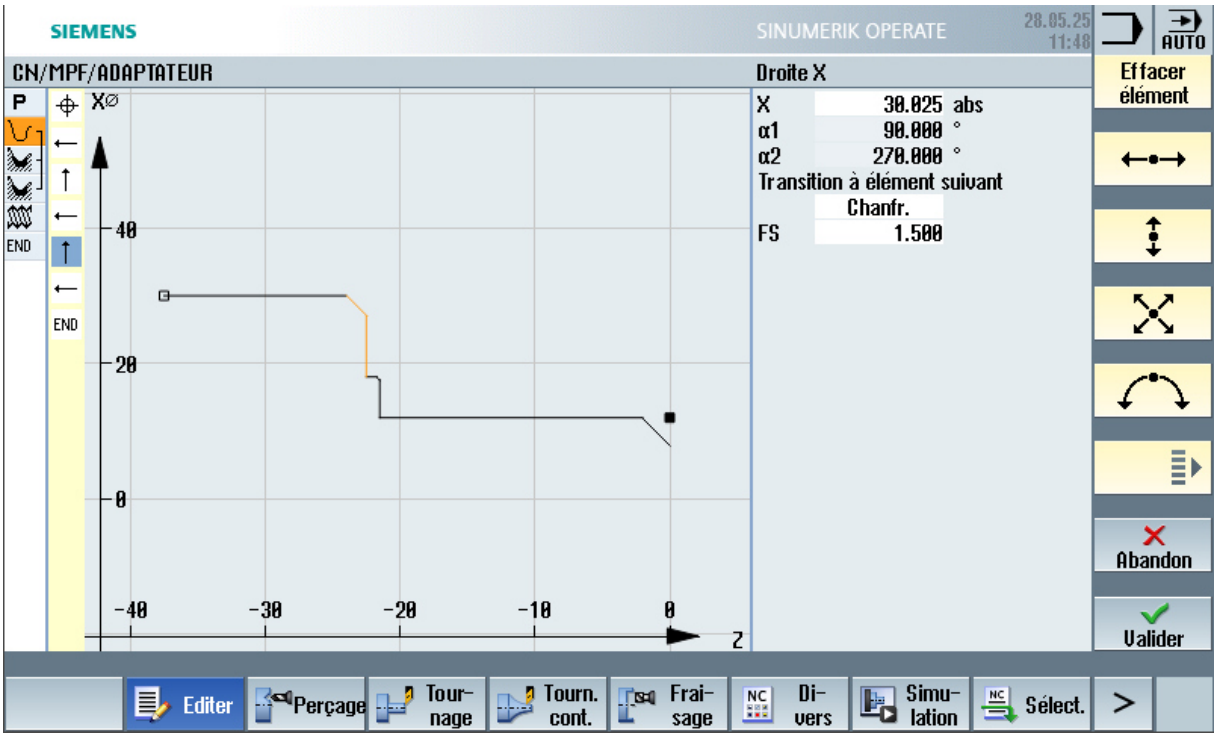


Figure 83 : *Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage de la première face*

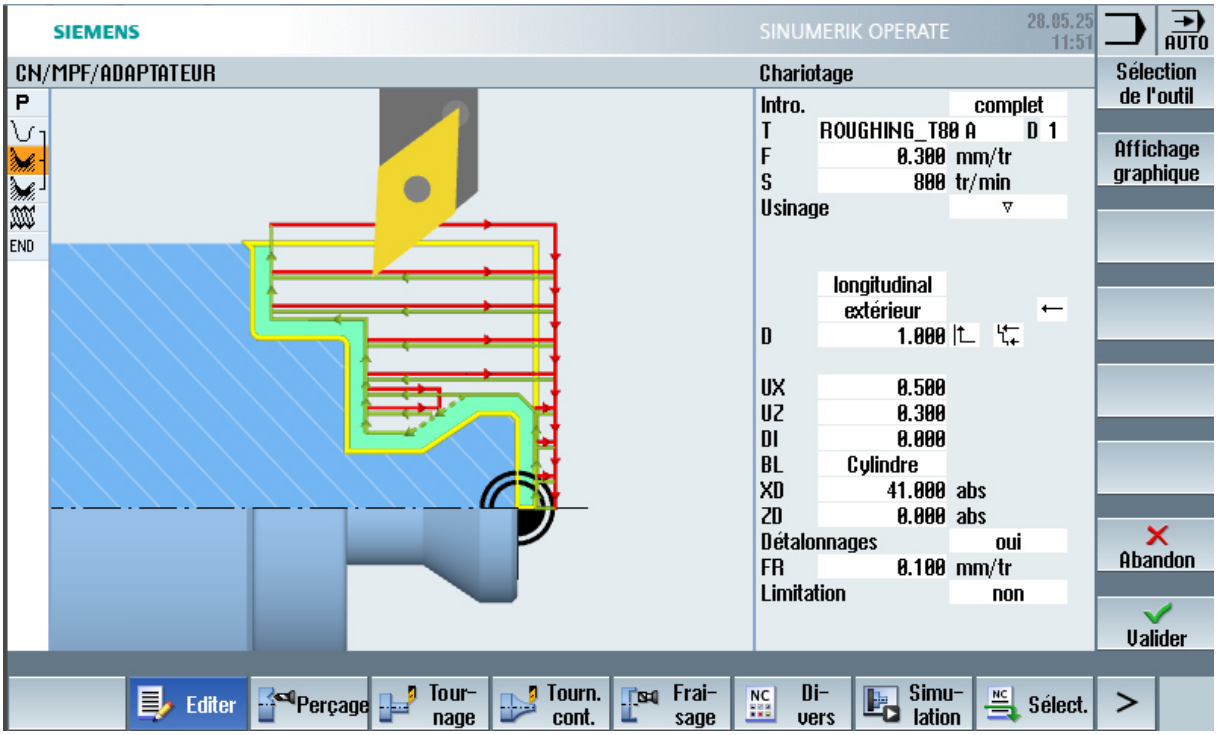


Figure 84 : *Programmation du nombre de passe pour l'ébauche sur le contour de la première face de l'adaptateur*

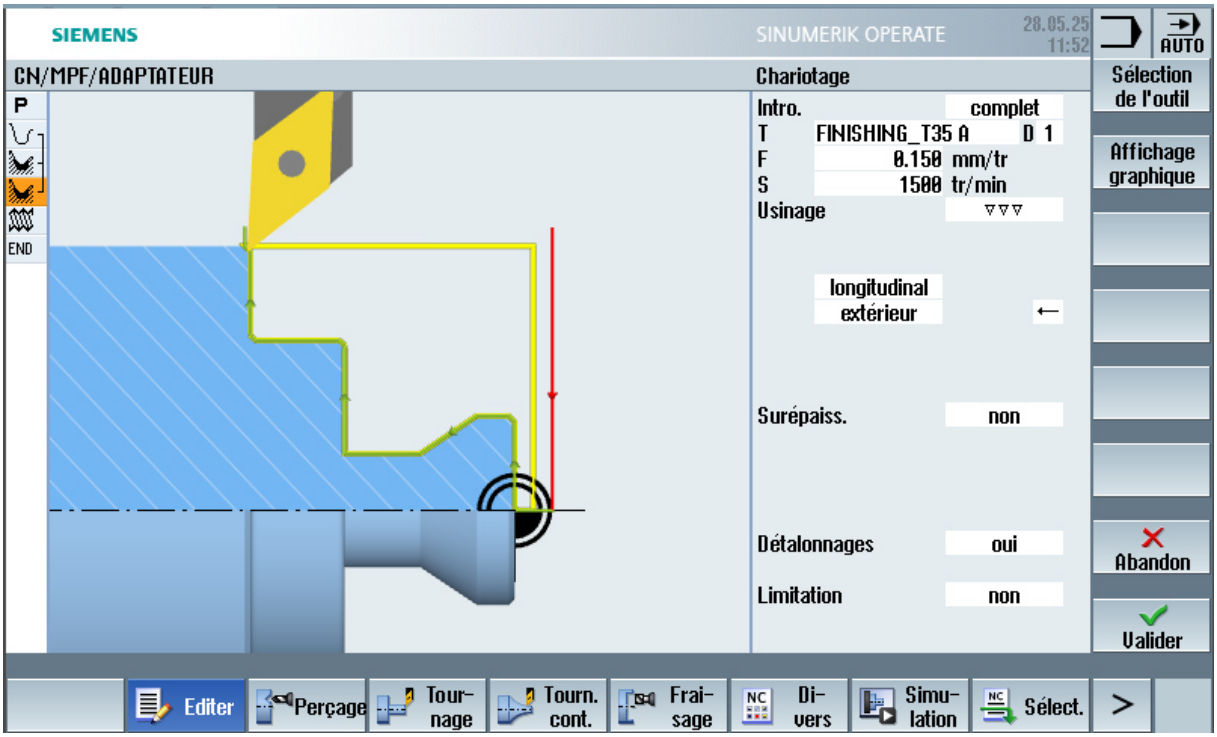


Figure 85 : *Chariotage du contour*

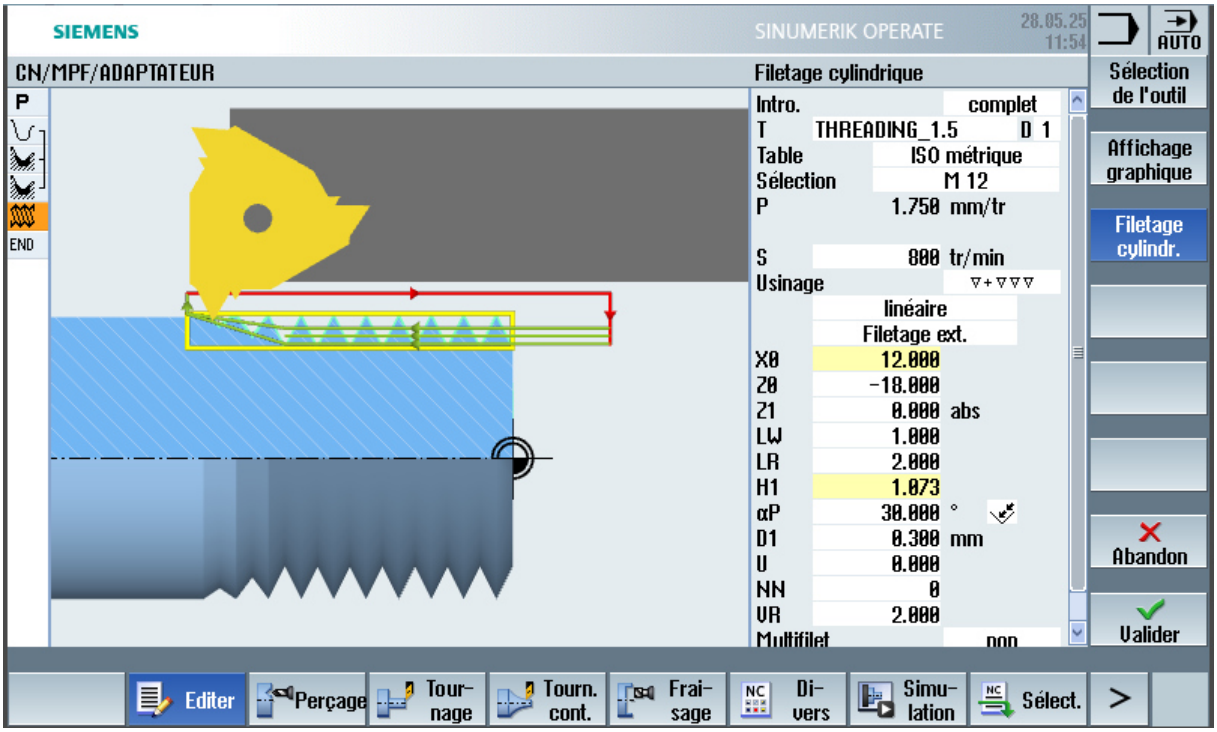


Figure 86 : *Illustration de l'opération de filetage*

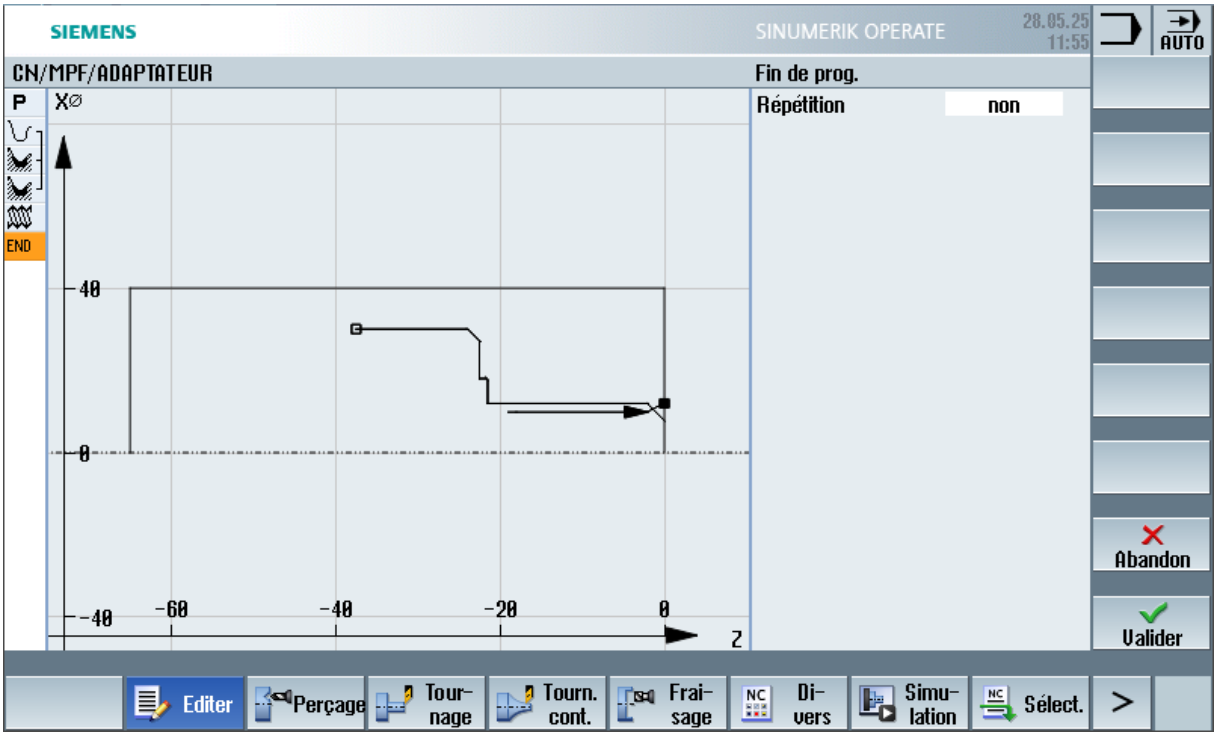


Figure 87 : *Mise au point de la trajectoire du contour d'usinage*

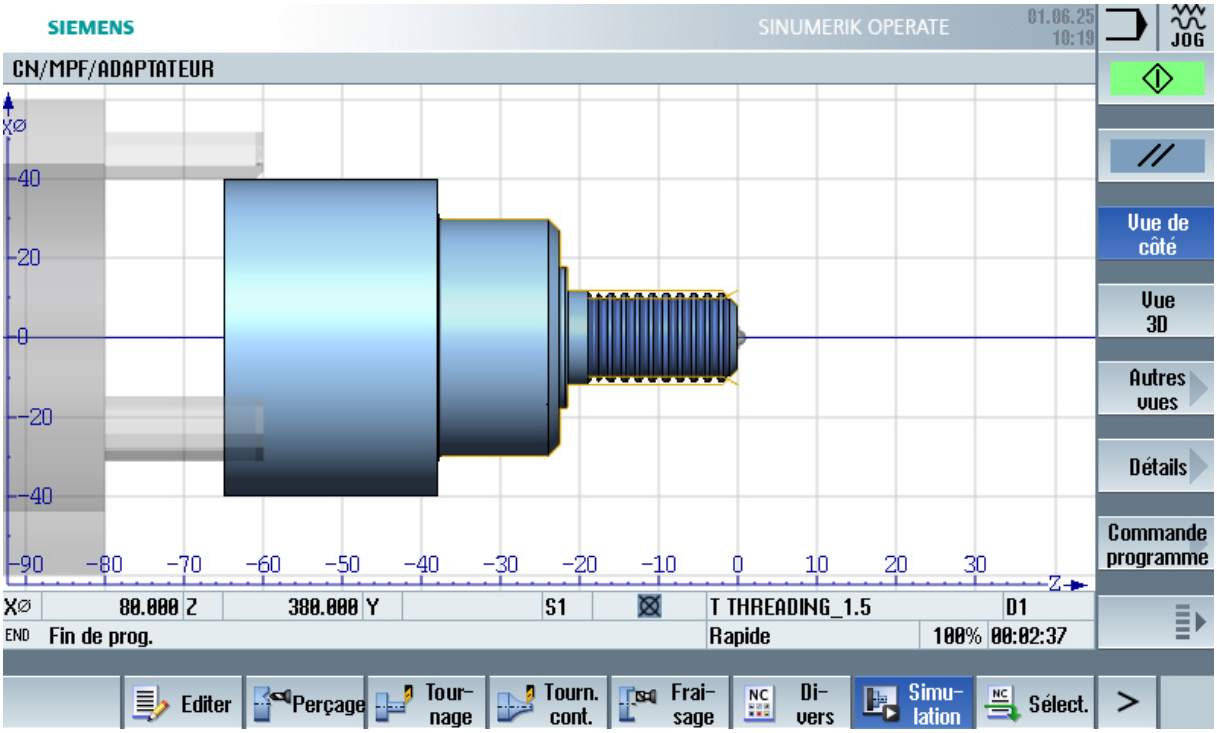


Figure 88 : *Simulation 2D du programme*

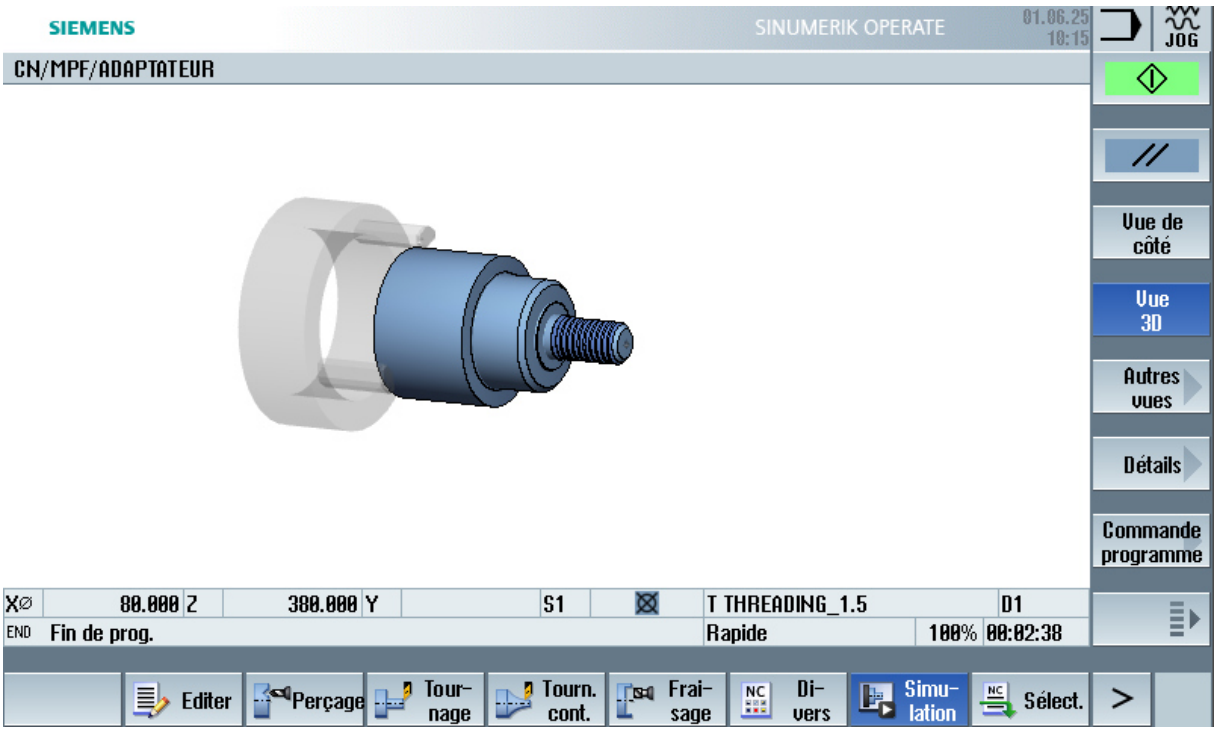


Figure 89 : *Simulation 3D du programme*

V.7.4. Pièces d'achat et intégration

1. La Filière

- **Fonction principale :**

Outil de filetage externe. Fixée sur le fourreau, elle est entraînée en rotation par la pièce à fileter.

- **Caractéristiques techniques :**

Type : standard, selon pas et diamètre à usiner

Fixation : 4 vis M8 sur chambrage du fourreau

Matériau : acier rapide HSS ou carbure

- **Rôle mécanique :**

- Usinage de filet externe
- Remplaçable selon besoin

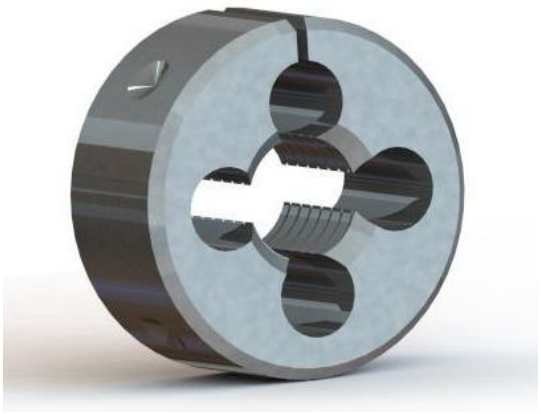


Figure 90 : *Illustration de la filière*

1. Bille de guidage / sécurité

- **Fonction principale :**

Élément de sécurité permettant de désolidariser le fourreau de l'arbre en cas de couple excessif. Elle agit comme déclencheur mécanique pour préserver l'outil contre les ruptures.

- **Caractéristiques techniques :**

Type : bille sphérique pleine

Matière : Acier trempé (HRC 60+)

Diamètre : Ø8 à Ø10 mm

Position : logée dans une cavité entre arbre et fourreau, poussée par un ressort

- **Rôle mécanique :**

Support de transmission de couple jusqu'à une limite réglée

Sécurité passive en cas de surcharge



Figure 91 : *Illustration de la bille*

2. **Ressort de compression**

- **Fonction principale :**

Maintien de la bille en pression contre la rainure. Il assure le seuil de déclenchement du système de sécurité.

- **Caractéristiques techniques :**

Norme : ISO 10243

Type : ressort à section rectangulaire

Matière : acier ressort spécial (allié, haute limite élastique)

Longueur libre : calibrée selon la force désirée



Figure 92 : *Illustration de resort*

Position : comprimé par la vis de réglage dans un logement transversal

- **Rôle mécanique :**

- Contrôle du seuil de rupture du couple
- Réglage fin de la sensibilité du mécanisme

3. **Vis de réglage.**

- **Fonction principale :**

Permet de régler la compression du ressort, et donc la force transmise à la bille. Elle ajuste indirectement le seuil de couple maximal admissible.

- **Caractéristiques techniques :**

Type : vis sans tête

Filetage : M10

Matière : Acier zingué ou inoxydable

Position : perpendiculaire à l'axe de la pièce, à l'arrière du logement de bille



Figure 93 : *Vis sans tête à six pans creux - STHC - DIN 914 - M 10 x 10*

- **Rôle mécanique :**

- Ajustement du couple de rupture
- Maintenance et reconfiguration facile du dispositif

V.8. Phase de contrôle dimensionnel et validation fonctionnelle.

V.8.1. Introduction.

Dans tout processus de conception et de fabrication mécanique, la phase de contrôle constitue une étape essentielle et incontournable. Elle intervient après l'usinage des pièces et vise à vérifier la conformité des dimensions réelles par rapport aux exigences du plan de définition, telles que les cotes nominales, les tolérances et les ajustements fonctionnels.

Cette phase ne se résume pas à une simple formalité. Elle représente un moment critique de validation, où l'on s'assure que les efforts investis dans la conception, le choix des matériaux, les calculs d'ajustement et la programmation CN ont bien produit un résultat fiable, cohérent et fonctionnel. En d'autres termes, c'est le passage du "virtuel" (CAO et plans) au "réel" (pièce usinée).

Elle représente enfin un apprentissage essentiel pour tout futur ingénieur : apprendre à lire, interpréter et contrôler un plan, mais aussi à comprendre les conséquences concrètes des choix de conception sur la réalité de l'usinage.

V.8.2 Objectifs de la phase de contrôle :

Le but de cette étape était double :

- Garantir la qualité géométrique des pièces usinées (diamètres, longueurs, perçages, états de surface),
- Assurer la compatibilité entre les pièces assemblées, notamment dans le cas d'ajustements normalisés comme H7/g6,
- Prévenir les défauts de fonctionnement liés à des jeux trop importants ou des interférences mécaniques,
- Valider la conformité aux standards industriels avant passage à l'étape d'assemblage ou de production en série.

V.8.3 Moyens de contrôle utilisés :

Pour effectuer ce contrôle, nous avons utilisé des outils de métrologie conventionnels mais de haute précision **[12]** :

- **Pied à coulisse de précision 1/50eme :** utilisé pour (longueur, diamètre extérieur, rainures, logements de vis…),
- **Palmer micrométrique (0,01 mm de précision) :** utilisé pour critiques, notamment celles soumises à des ajustements fonctionnels.
- **Jauge de profondeur de précision de 0,02mm :** pour contrôle des profondeurs des alésages et épaulements.
- **Jauge à filetage métallique :** pour contrôle du pas de filetages et taraudages.

Chaque mesure a été consignée dans une fiche de contrôle dimensionnel afin de pouvoir comparer les valeurs mesurées aux cotes théoriques extraites du plan.

1) Ajustements contrôlés :

Parmi les éléments clés de cette phase figurait la vérification des ajustements normalisés ISO, particulièrement ceux permettant le guidage coulissant sans jeu excessif, mais aussi sans blocage. Deux ajustements ont été spécifiquement mesurés et vérifiés :

- Ø35 H7 / g6 entre l'alésage du fourreau et la portée de l'arbre**.[31]**

- Ø30 H7 / g6 entre l'adaptateur et son logement dans le fourreau.**[31]**

Calcul détaillé des ajustements H7/g6

Les calculs détaillés des ajustements normalisés H7/g6 pour deux diamètres utilisés dans le dispositif de guidage pour travaux de filetage.

Les données sont issues du Guide du dessinateur industriel – Chevalier, et sont interprétées pour garantir la conformité des jeux fonctionnels dans les assemblages coulissants.

a. Ajustement Ø35 H7/g6[31]

Diamètre nominal : Ø35 mm

Tolérances H7 (alésage) : 0.000 mm / +0.025 mm → 35.000 mm à 35.025 mm

Tolérances g6 (arbre) : -0.009 mm / -0.025 mm → 34.991 mm à 34.975 mm

Élément	Tolérances
Alésage H7	0.000 mm / +0.025 mm
Arbre g6	-0.009 mm / -0.025 mm

Calcul des jeux :

→ Jeu minimum = 35.000 mm - 34.991 mm = 0.009 mm

→ Jeu maximum = 35.025 mm - 34.975 mm = 0.05 mm

Représentation graphique :

Zone de tolérance :

|---------- H7 (alésage) ----------|

35.000 mm ---------- 35.025 mm

↑ Zone de tolérance = 0.025 mm

|---------- g6 (arbre) ----------|

34.975 mm ---------- 34.991 mm

↑ Zone de tolérance = 0.016 mm

⇒ Jeu minimal : 0.009 mm

⇒ Jeu maximal : 0.05 mm

b. Ajustement Ø30 H7/g6[31]

Diamètre nominal : Ø30 mm

- Tolérances H7 (alésage) : 0.000 mm / +0.025 mm → 30.000 mm à 30.025 mm
- Tolérances g6 (arbre) : -0.009 mm / -0.025 mm → 29.975mm à 29.991mm

Élément	Tolérances
Alésage H7	0.000 mm / +0.025 mm
Arbre g6	-0.009 mm / -0.025 mm

Calcul des jeux :

→ Jeu minimum = 30.000 mm - 29.991 mm = 0.009 mm

→ Jeu maximum = 30.025 mm – 29.975 mm = 0.05mm

Représentation graphique :

Zone de tolérance :

|---------- H7 (alésage) ----------|

30.000 mm ---------- 30.025 mm

↑ Zone de tolérance = 0.025 mm

|---------- g6 (arbre) ----------|

29.975 mm ---------- 29.991 mm

↑ Zone de tolérance = 0.016 mm

⇒ Jeu minimal : 0.009 mm

⇒ Jeu maximal : 0.05 mm

Cet ajustement offre un jeu compris entre 0.009 mm et 0.05 mm, il s'agit d'un ajustement glissant avec faible jeu, idéal pour les pièces devant se mouvoir librement tout en maintenant un alignement précis. C'est un choix particulièrement adapté aux dispositifs de

guidage, où la liberté de mouvement ne doit pas compromettre la stabilité mécanique.

Finalement les deux ajustements analysés **(Ø35 H7/g6 et Ø30 H7/g6)** présentent des jeux qui respectent les critères de glissement maîtrisé. Ces ajustements sont donc cohérents avec la fonction de guidage prévue dans le dispositif, et garantissent un comportement mécanique fiable lors des opérations de filetage. Ils ont été choisis pour garantir un guidage fluide, précis et fiable de l'outil pendant l'opération de filetage, sans perturbation de l'alignement ni risque de grippage. La compatibilité de ces ajustements avec les tolérances d'usinage et les jeux de fonctionnement a été validée par mesure directe, puis comparée aux valeurs théoriques issues des tableaux ISO.

- **Discutions**

La conformité des pièces usinées, à l'exception de légères variations admissibles dans les plages de tolérance. Aucune non-conformité critique n'a été détectée. Cela nous a permis de valider l'assemblage fonctionnel du système, dans le respect de la philosophie du dispositif breveté, qui repose sur un guidage axial rigoureux et un couple contrôlé.

La phase de contrôle nous a également permis de prendre conscience de l'importance de la précision dans le processus de fabrication : un simple écart de quelques centièmes de millimètre peut compromettre le bon fonctionnement d'un système mécanique.

V.8.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de traduire la conception théorique du dispositif en une représentation numérique complète et fonctionnelle, grâce à une modélisation 3D précise réalisée sur SolidWorks. Chaque composant a été modélisé en respectant les contraintes géométriques, les ajustements mécaniques (H7/g6), ainsi que les interfaces d'assemblage nécessaires à la fonctionnalité du système de guidage. Cette étape a permis non seulement de valider la faisabilité géométrique du dispositif, mais aussi de préparer efficacement la phase de fabrication assistée par ordinateur.

L'élaboration de la gamme d'usinage, combinée à la génération des programmes CN via CAMWorks et ShopTurn, a mis en évidence les contraintes de fabrication réelles et la

nécessité d'optimiser les séquences d'opérations, les conditions de coupe, ainsi que les outils de production adaptés à chaque pièce. Le choix des conditions d'usinage a été établi en prenant en compte les spécificités du matériau (acier XC36), la nature des opérations (tournage, perçage, fraisage) et la compatibilité avec la machine CNC DMG MORI CLX 350.

Le routage a donc été construit selon une logique rigoureuse et industrielle, intégrant à la fois des impératifs de précision (tolérances serrées sur les pièces de guidage), le temps de cycle, et de qualité de surface. Une attention particulière a été portée à la phase de contrôle dimensionnel, avec vérification des cotes critiques à l'aide du pied à coulisse et du palmer micrométrique, permettant de confirmer la conformité aux ajustements spécifiés et d'assurer la fonctionnalité mécanique des liaisons.

En définitive, cette phase de modélisation et de préparation à l'usinage a constitué le pont entre la conception virtuelle et la réalisation matérielle du prototype. Elle a démontré notre capacité à intégrer des outils numériques dans une démarche de fabrication industrielle, et à anticiper l'ensemble des paramètres techniques nécessaires à l'obtention d'un dispositif fiable, reproductible et adapté à un contexte de production semi-industriel. Cette étape marque ainsi la maturité technologique de notre projet, le rendant éligible à la fabrication réelle et à son déploiement dans un environnement de production.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre formation en ingénierie mécanique, nous avons mené un projet de conception et de modélisation d'un dispositif de guidage pour travaux de filetage, destiné à améliorer l'efficacité, la précision et la sécurité des opérations de filetage et taraudage en environnement industriel. Ce projet, mené avec rigueur et ambition, a permis de confronter nos compétences théoriques à une problématique technique réelle, tout en développant une solution concrète, déposée sous forme de brevet.

L'étude a démontré qu'un guidage axial maîtrisé, associé à un ajustement fonctionnel précis (de type H7/g6), pouvait considérablement réduire les défauts de centrage et les ruptures prématurés des outils pendant les opérations de filetage. Grâce à une architecture mécanique simple mais réfléchie, notre dispositif assure une transmission fluide du mouvement, tout en intégrant des éléments de sécurité (comme la bille avec ressort à pression ajustable) capables d'absorber les efforts excessifs cette conception à été validé par des tests réels sur machine-outil.

Les simulations numériques, la préparation CN sur CAMWorks, ainsi que l'élaboration des dessins de définition finale ont permis de préparer le dispositif à l'industrialisation. Les éléments qui composent le dispositif ont été sujet à une étude approfondie et détaillée, à commencer par le choix du type de matériau (acier XC36, aciers traités), des modes d'obtention, des efforts en service, et des conditions d'usinage. Une attention particulière a été portée au contrôle dimensionnel par métrologie conventionnelle, et à l'analyse des jeux fonctionnels pour garantir le bon fonctionnement.

En termes de résultats, notre dispositif répond aux exigences de répétabilité, de fiabilité et de modularité, avec un système interchangeable (filière/taraud) permettant une adaptation rapide aux besoins de la production. Il constitue une alternative pertinente aux solutions complexes ou coûteuses, en s'inscrivant dans une logique de simplicité, de durabilité et de compatibilité industrielle.

En perspective à ce travail, il serait envisageable d'étudier les points suivants dans les recherches futures :

- Réalisation d'un prototype usiné et validation expérimentale du comportement mécanique en atelier ;
- Étude de la durabilité en conditions réelles (tests de fatigue, cycles thermiques, corrosion).
- Optimisation topologique du dispositif par simulation pour réduire le poids et les contraintes localisées ;
- Développement d'un modèle de simulation dynamique pour anticiper les efforts en fonctionnement réel ;
- Création d'un guide utilisateur industriel avec procédures d'assemblage, maintenance et réglage.

Cette conclusion reflète non seulement l'aboutissement d'un travail académique complet, mais aussi l'émergence d'une démarche de recherche appliquée, centrée sur l'innovation industrielle. Elle témoigne de notre capacité à concevoir des solutions concrètes, à analyser des contraintes réelles, et à faire le lien entre ingénierie, production et amélioration continue.

Références

[1] O. Torres, “Vingt-Cinq Ans De Recherche En Discipline Entre Courants Et Contre-Courants,” PME : De nouvelles approches, 1998.

[2] F. ’Merzouk, “Définition et typologie des PME. Cité dans le mémoire,” 2009.

[3] A. et ’Ayad, S. M. ’Chelil, “Les PME en Algérie : réalités et perspectives,” 2009.

[4] A. E. Amghar, “Gestion des PME-PMI : Organisation, management et stratégie. ,” Paris : Ellipses, , 2019.

[5] M. & T. O. ’Marchesnay, “Théorie de la PME et déséconomies d’échelle. PME, Dominos Flammarion,” 1999.

[6] B. Leila and B. Houari, “Caractéristiques et spécificités des Petites et Moyennes Entreprises en Algérie Characteristics and specificities of Algerian’s Small and Medium Enterprises Résumé,” 2020.

[7] E. G. Bourgeois, “Organisation et structure des entreprises industrielles. ,” Paris : Dunod, , 2017.

[8] I. 1101, I. 14638, I. 2768’ ’ISO 8015, “pour cotation et tolérances géométriques. AFNOR NF E 04-515 – Métrologie.”

[9] F. VILLARS, “Cotation fonctionnelle,” Conception et Production, 1999, doi: 10.51257/a-v1-bm7020.

[10] “Dunod,” “Mémento de spécification géométrique des produits – Normes ISO GPS,” 2020.

[11] ’ ’Saber A, “ L’analyse de fabrication le préparateur le bureau des méthodes ».”

[12] AFNOR NF E 04-515, “Métrologie – Instruments de mesure.”

[13] B. & P. L. I. Cagnac, “Introduction à la métrologie. Paris : Lavoisier, ,” 2016.

[**14]** B. J. Chaillou, “Initiation à la métrologie dimensionnelle. ,” Paris : Dunod, , 2020.

[15] P. S. Monnier, “Maîtrise des procédés industriels : métrologie, SPC, capabilité. ,” Paris : AFNOR, , 2019.

[16] A. ’Michle, Systémes Mécaniques Théorie Et Dimensionnement. 1992.

[17] A. Q. Dinh, A. Quan, and D. Étude, “Étude sur modèle physique des mécanismes de transfert de charge dans les sols renforcés par inclusions rigides. Application au dimensionnement,” application au dimensionnement, 2010.

[18] “GM 3 CDIM Poly FR.”

[19] C. BOUVET, “Mécanique de la rupture des composites : délaminage et fissuration,” Systèmes aéronautiques et spatiaux, 2019, doi: 10.51257/a-v1-trp4043.

[20] H. Jardin-Nicolas, “Filetage et taraudage”.

[21] C. ’Sandvik, “Threading methods.”

[22] A. Ghidini, Techniques de tournage et filetage. 2010.

[23] Walter Tools, “Thread milling overview.”

[24] G. ’Hoffmann, “Guide pratique du filetage à la fraise.”

[25] J. ’Duflou, “Procédés de fabrication sans enlèvement de copeaux”.

[26] S. C. ’Dunod, “Thread Rolling Guidelines.”

[27] S. , & S. S. ’Kalpakjian, “ Manufacturing Engineering and Technology .”

[28] “MIT OpenCourseWare,” “Mechanics of Machining and Threads.”

[29] ISO, “Filetages ISO - Profils et dimensions. Organisation internationale de normalisation.”

[30] J. ’Duflou, Profils normalisés de filetage. Dunod. 2013.

[31] C. ’André, Guide du dessinateur industriel. 2004.

[32] Académie de Lille., “Réalisation d’un objet mécanique en 3D avec SolidWorks,” 2022.

[33] Dassault Systèmes., “SolidWorks 2023 User Manual. Dassault Systèmes,” 2022.

[34] Dassault Systèmes., “SolidWorks Advanced Tools,” 2020.

[35] Jacques. Goguet, “CAO pour l’ingénieur. Éditions Lavoisier,” 2020.

[36] DMG MORI, “CLX 550_Tournage universel.”

[37] HCL, CAMWORKS 3 Axis essentials. 2020.

[38] Sinutrain,Tournage simplifié avec ShopTurn. 2010.