REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du Génie Mécanique

PROJET **D**E **F**IN **D**'ETUDES **D**E **MASTER**

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Titre

Conception d'une broche pneumatique pour un routeur CNC

Proposé et encadré par : Dr Nasreddine AMOURA
Pr Abdellah ABDELLAH EL HADJ

Présenté par les étudiants : ALLALI Houssam
HAMMA Hommam

2020/2021

Dédicaces

Avec l'aide de DIEU Tout Puissant, nous avons pu réaliser ce modeste travail que je dédie à ceux qui sont dans mon cœur, qui ont veillés pour mon confort et sacrifiés beaucoup pour ma réussite : à mes Chers Parents, à mes frères, que Dieu les gardent.

De même qu'à celle qui a pris son temps pour encadrer ce travail, je veux dire : Dr Nasreddine AMOURA *; qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.*

Mes dédicaces vont tendrement à mes chers(es) amis(es), Ainsi qu'à tous mes camarades de la promotion 2018 /2019 et plus particulièrement mon binôme, Houssem Allali .

A tous ceux que j'aime …

Hamma Hommam

Je remercie le bon Dieu Tout Puissant d'avoir exaucé mon vœu de réaliser ce projet de fin d'études.

Je voudrais dédier le présent travail tout spécialement à mes chers parents qui m'ont élevés et soutenus tout au long de ma vie.

Je dédie également ce projet à mon frère et à toute ma famille.

Je tiens énormément à remercier mes chers amis (es) et camarades de cette promotion pour leurs encouragements et leurs aides.

Enfin, je voudrais dédier ce mémoire à toute personne ayant participée de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Houssem Allali

Remerciements

Nous remercions Allah, qui nous a guidés pour bien finir ce travail et nous adressons également nos vifs remerciements à nos parents qui ont fait beaucoup de sacrifices pour parfaire notre éducation, à nos frères et sœurs et à nos deux familles.

A tous les enseignants qui nous ont enseignés tout au long des nombreuses années de notre formation, de l'école primaire à la fin des études universitaires, et nous espérons mettre ce que nous avons appris au service de la communauté et de notre pays.

Nous remercions également tous nos amis et collègues qui ont partagé avec nous cette étape de notre vie.

A tous ceux qui nous ont aidés à atteindre notre objectif.

Résumés

ملخص

تتعامل أطروحة الماستر هذه مع تصميم المغزل لآلة تفريز صغيرة بثلاثة محاور. يتضمن الجزء الأول من هذه الرسالة البحث في مغازل التفريز ونظرة عامة على عدة مغازل من مختلف الصانعين. الجزء الثاني يتعامل مع حساب المعلمات الضرورية وتصميم المغزل والتحقق من المحاكاة اللاحقة. تتضمن هذه الرسالة أيضًا نموذجًا ثلاثي الأبعاد للمغزل ورسم التجميع ورسومات التصنيع.

الكلمات المفتاحية: الآلات الدقيقة، المغزل، التور بينات ومحامل المغزل، تصميم، محاكاة .

Abstract

This master's thesis deals with the design of a spindle for a small three axis-milling machine. The first part of this thesis includes a bibliographic research in milling spindles and an overview of several spindles from different manufacturers. The second part deals with the calculation of then necessary parameters, design of the spindle and subsequent simulation verification. This thesis also includes a 3D model of spindle, assembly drawing and manufacturing drawings.

Keywords: Micro-machining, air spindle, turbine, bearings, design, simulation

Résumé

Ce PFE de master porte sur la conception d'une broche pneumatique pour un routeur à trois axes. En premier, une synthèse bibliographique sur les broches de fraisage et une vue d'ensemble de plusieurs broches de différents fabricants et donnée. En second, est exposé la conception de la broche selon des paramètres fixés. Cette dernière est vérifiée par la simulation. Ce mémoire comprend également un modèle 3D de la broche, le dessin d'assemblage et les gammes d'usinage.

Mots clés : Micro-usinage, broche pneumatique, turbine, paliers, conception, simulation

Sommaire

Chapitre 1 Description générale de la machine à commande numérique....7
1.1 Introduction....8
1.2 Historique de la machine CNC....9
1.3 Les Différents Types De Machines CNC....10
1.4 Les fraiseuses CNC....10
1.5 Les tours à commande numérique....10
1.6 Les machines à électroérosion....10
1.7 Les découpeuses à jet d'eau....11
1.8 Eléments d'une machine-outil à commande numérique....11
1.8.1 Définition d'une MOCN....11
1.8.2 La structure d'une MOCN....12
Chapitre 2 Description générale de la machine pour usinage ultra-précision....16
2.1 Introduction....17
2.2 Structure mécanique....18
2.3 Système de broche et d'entraînement....18
2.4 Système de contrôle....19
2.5 Système de mesure de position et de rétroaction....19
2.6 Système de surveillance et d'inspection des conditions en cours....20
2.7 Micro et méso-machines....20
Chapitre 3 Les Paliers....22
3.1 Palier lisse....23
3.2 Palier lisse radial....23
3.3 Avantages et inconvénients des paliers lisses hydrodynamiques....25
3.3.1 Avantages....25
3.3.2 Désavantages....25
3.4 Avantages et inconvénients des paliers lisses hydrostatiques....25
3.4.1 Avantage....25
3.4.2 Inconvénient....25
3.5 Conditions de friction dans un palier lisse....26
3.5.1 Palier lisse axial (De poussée)....30
Chapitre 4 Broche aérostatique ultra-précise....51
4.1 Introduction....52
4.2 Les principes de base d'une broche de palier à air....55

4.3 Broches pneumatiques 56
4.4 Types de technologie de palier à air 57
4.4.1 Palier aérostatique 57
4.4.2 Palier aérodynamique 58
4.5 Classification du roulement aérostatique 58
4.6 Principe du roulement aérostatique 58
4.7 Avantages de l'axe de palier à air 59
4.8 Inconvénients des roulements à air 60
4.9 Applications des roulements à air 61
4.10 Calcul des paramètres de broche 61
4.10.1 Calcul des forces de coupe et des couples 62
4.10.2 Choix des paliers (à air ou à roulements) 64
4.10.3 Conclusion 68
4.11 Chois du type de turbine 68
4.12 Conclusion 74
5 Conclusion Générale 81
6 Références bibliographiques 83

1 Chapitre 1 Description générale de la machine à commande numérique

1.1 Introduction

La machine CNC (Computer Numerical Control) ou bien la machine à commande numérique est une machine contrôlée par ordinateur qui peut être utilisée pour fabriquer des pièces très précises. La machine enlève le matériau de la pièce avec un outil de coupe rotatif. Pour ce faire, la machine guide l'outil dans les trois directions du système de coordonnées cartésiennes, c'est-à-dire le long des axes X, Y et Z.

Les flèches dans la figure 1.1 ci-dessous illustrent les trois directions dans lesquelles la fraiseuse CNC peut se déplacer.

En Bleu la direction sur l'axe X. En Rouge la direction sur l'axe Y. En vert la direction sur l'axe Z.

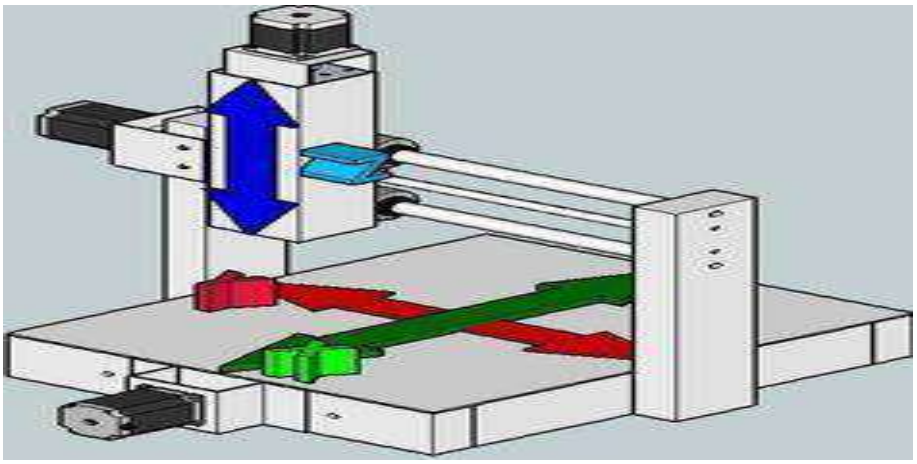


Figure 1.1 Sens des déplacements de la machine CNC

La fraiseuse CNC peut usiner de nombreux matériaux différents, tels que l'acier, l'aluminium, le laiton, le cuivre et le plastique. Un moulin n'est pas conçu pour couper du bois et ne devrait pas être utilisé pour cela.

Des exemples d'opérations pouvant être effectuées dans une fraiseuse à commande numérique consiste à découper une forme de profil, à graver du texte, à percer des trous et à créer des alvéoles de roulement.

1.2 Historique de la machine CNC

Les premières machines commerciales à commande numérique ont été construites dans les années 1950 et ont évolué à travers plusieurs étapes :

1950 - MIT développe une fraiseuse à commande numérique (CN).

1952 - Parsons dépose un brevet sur "Appareil de positionnement pour machine-outil à commande de moteur". La date était le 5 mai 1952.

1953 - À l'aide d'un système de lecture sur bande magnétique, un système de commande numérique nommé Numericord a été mis au point en avril 1953 par les efforts conjoints de G & L, du MIT et de General Electric Co. (Cutting tool engineering 2005).

1956- Année de programmation automatique de l'usinage à commande numérique.

1960- Premier contrôleur avec technologie à transistor introduit.

1960 - Le contrôle numérique direct (DNC) élimine les programmes de perforation de la bande de papier et permet aux programmeurs d'envoyer des fichiers directement de l'ordinateur au contrôleur de la machine-outil.

1968- Premier centre d'usinage commercialisé par Kearney et Trecker (constructeurs de machines-outils).

Machine à commande numérique des années1970développée.

Années 1980 - Application informatique à base graphique développée.

1997- Introduction de systèmes OMAC (Open Modular Architecture Control) basés sur une fenêtre PC pour remplacer les contrôleurs «firmware».

Plus récemment, les microprocesseurs ont rendu les commandes CNC encore moins chères, avec comme point culminant la disponibilité de la commande numérique pour le marché des loisirs personnels et de la commande numérique par ordinateur. Le projet de contrôleur de machine amélioré, ou EMC2, était un projet visant à mettre en œuvre un contrôleur Open Source à commande numérique lancé par le NIST, l'Institut national de la normalisation et de la technologie, à titre de démonstration. Quelque temps en 2000, le projet est passé dans le domaine public et Open Source, et EMC2 est apparu peu de temps plus tard en 2003.

Le fondateur d'Arts Finnerty, fondateur d'Art soft, a développé Mach3 comme un dérivé des premières versions d'EMC, qui fonctionnait sous Windows au lieu de Linux, le rendant ainsi encore plus accessible au marché des commandes numériques personnelles. La société Art, Art Soft, a été fondée en 2001.Les logiciels EMC2 et Mach3 sont tous deux vivants et en plein essor, de même que de nombreuses autres technologies CNC.

1.3 Les Différents Types De Machines CNC

Les premières machines à commande numérique datent des années 1940, lorsque les moteurs ont été utilisés pour la première fois pour contrôler le mouvement des outils préexistants. Au fur et à mesure que les technologies avançaient, les mécanismes ont été améliorés avec des ordinateurs analogiques, et finalement avec des ordinateurs numériques, ce qui a conduit à l'essor de l'usinage CNC.

La grande majorité des arsenaux CNC actuels sont entièrement électroniques. Parmi les procédés CNC les plus courants, citons le soudage par ultrasons, le poinçonnage et la découpe au laser. Les machines les plus fréquemment utilisées dans les systèmes CNC sont citées ci-dessous.

1.4 Les fraiseuses CNC

Les fraiseuses à commande numérique sont capables d'exécuter des programmes composés de messages à base de chiffres et de lettres, qui guident les pièces sur différentes distances. La programmation employée pour une machine de broyage peut être basée soit sur le code G, soit sur un langage unique développé par une équipe de fabrication. Les CNC classiques se composent d'un système à trois axes (X, Y et Z), bien que la plupart des modèles plus récents puissent accueillir trois axes supplémentaires.

1.5 Les tours à commande numérique

Avec les tours, les pièces sont coupées dans un sens circulaire grâce à des outils index ables. Avec la technologie CNC, les coupes utilisées par les tours sont réalisées avec précision et à grande vitesse. Les tours CNC sont utilisés pour produire des conceptions complexes qui ne seraient pas possibles sur les versions à commande manuelle. Dans l'ensemble, les fonctions de commande des fraiseuses et des tours à commande numérique sont similaires. Comme avec les fraiseuses CNC, les tours peuvent être dirigés par le code G ou par un code propriétaire unique. Cependant, la plupart des tours CNC se composent de deux axes – X et Z.

1.6 Les machines à électroérosion

L'usinage par électroérosion (EDM) est un procédé qui consiste à mouler des pièces à usiner en formes particulières à l'aide d'étincelles électriques. Avec l'électroérosion, des décharges de courant se produisent entre deux électrodes, ce qui enlève des sections d'une pièce à usiner.

Lorsque l'espace entre les électrodes devient plus petit, le champ électrique devient plus intense et donc plus fort que le diélectrique. Cela permet le passage d'un courant entre les deux électrodes. Par conséquent, des parties d'une pièce à usiner sont enlevées par chaque électrode.
Dans un processus connu sous le nom de rinçage, les débris de chaque pièce finie sont emportés par un diélectrique liquide, qui apparaît une fois que le courant entre les deux électrodes s'est arrêté et est destiné à éliminer toute autre charge électrique.

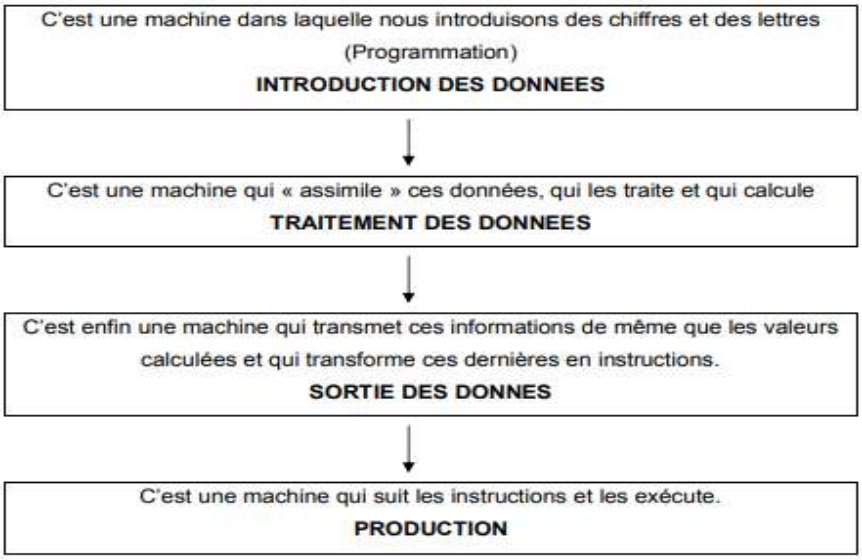
1.7 Les découpeuses à jet d'eau

Dans l'usinage CNC, les jets d'eau sont des outils qui coupent des matériaux durs, comme le granit et le métal, avec des applications à haute pression d'eau. Dans certains cas, l'eau est mélangée avec du sable ou une autre substance abrasive forte. Les pièces de machines d'usine sont souvent façonnées par ce procédé.
Les jets d'eau sont utilisés comme alternative plus froide pour les matériaux qui ne peuvent pas supporter les processus thermiques intensifs des autres machines CNC. Ainsi, les jets d'eau sont utilisés dans divers secteurs, comme l'aérospatiale et l'industrie minière, où le procédé est puissant, notamment pour la sculpture et la taille. Les découpeuses à jet d'eau sont également utilisées pour des applications qui nécessitent des coupes de matériaux très complexes, car l'absence de chaleur empêche toute modification des propriétés intrinsèques des matériaux pouvant résulter d'une découpe métal sur métal.

1.8 Eléments d'une machine-outil à commande numérique

1.8.1 Définition d'une MOCN

Une machine outils à commande numérique est une machine totalement ou partiellement automatique à laquelle les ordres sont communiqués grâce à des instructions codées portées sur un support matériel (ruban perforé, bonde ou disque magnétique,…)



1.8.2 La structure d'une MOCN

Comme pour tout système automatisé, nous pouvons décomposer la structure d'une MOCN en deux parties principales : la partie opérative et la partie commande.

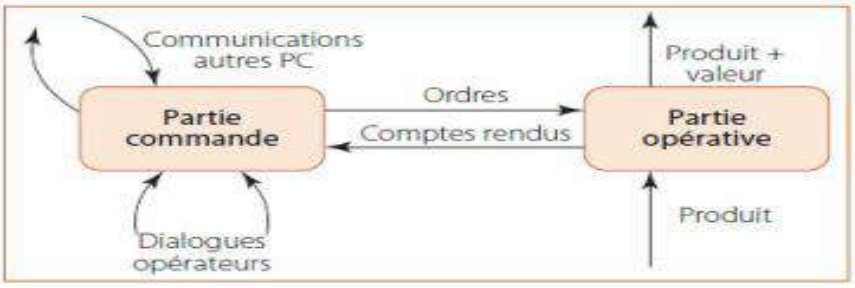


Figure 1.2 Structure d'une MOCN

1.8.2.1 La partie opérative

La partie opérative (notée PO) comprend principalement un ou plusieurs mobiles, appelés tables ou chariots, liés au bâti ou entre eux par des liaisons glissières ou pivots. La position des mobiles est détectée par un capteur de position, et leur vitesse est mesurée en permanence. On donne à ce sous-ensemble de partie opérative le nom d'axe numérique.

1.8.2.2 La partie commande

Les différentes opérations, constituant la tâche d'usinage, sont gérées par l'intermédiaire d'un DCN (Direct Numerical Control).

1.8.2.3 DCN (Direct Numerical Control)

Ces systèmes permettent le pilotage du plusieurs machines à partir d'un ordinateur

1.8.2.4 Principe de fonctionnement d'une MOCN

Une commande numérique (CN) est un automatisme programmable, assurant généralement la commande des vitesses et le contrôle en vitesse et position des organes mobiles d'une machine.
Elle comporte alors deux boucles d'asservissement et un bloc logique avec calculateur.
Le DCN (direct numerical control) : DCN est une machine informatique assurant principalement deux fonctions :

L'entrée des informations :

- Entrée du programme : manuelle au clavier ou par disquette, par liaison câblée avec ordinateur externe
- Analyse du programme : lecture, interprétation, contrôle syntaxe

Les fonctions de commande :

- Elaboration des valeurs de consigne (ordres) de 2 types : informations numériques (déplacement, vitesse d'avance..) et informations « tout ou rien » : automatismes divers (arrosage, rotation broche…)

A partir d'un programme préalablement établi, le DCN fournit des ordres (tension électrique, suite d'impulsions...) aux commandes des moteurs d'axes et de broche.

1.8.2.5 Particularité de fonctionnement d'une MOCN

Pour de fortes puissances et de faibles vitesses, le moteur à courant continu est remplacé par un moteur à courant alternatif à variation de fréquence du courant d'alimentation.
Pour l'UGV (Usinage à Grande Vitesse), recherche d'une réponse d'asservissement plus rapide et plus précise, le capteur de vitesse du type génératrice tachymétrie est remplacé par un capteur de vitesse du type codeur rotatif avec boucle de retour de vitesse numérique (suppression du Convertisseur Numérique Analogique)

1.8.2.6 Eléments de la commande principale

La partie commande permet de piloter la partie opérative. Elle est composée d'un calculateur (CNC) et d'éléments électroniques capables de piloter les moteurs : les cartes d'axes.

- **Les cartes d'axes**

Les cartes d'axes sont les éléments de bases d'un axe de déplacement. En fonction de l'ordre du calculateur, la carte autorise l'alimentation du moteur. L'alimentation va varier en fonction de la consigne (vitesse programmée, distance de déplacement) et de la position de l'axe.

- **Le DCN**

Le directeur de commande numérique (associé au pupitre) permet de piloter la machine-outil. Il décode le programme, calcule les déplacements à effectuer et délivre les ordres aux cartes d'axe. Certaines versions de DCN ont été développées de manières à ce que l'opérateur puisse facilement programmer. Avec le développement des logiciels de CFAO, ce type de programmation dit intuitif a perdu beaucoup de son intérêt.

1.8.2.7 Eléments de la partie opérative

La partie opérative comporte :

- Les axes de déplacements,
- Le système porte pièce.
- Le système porte outil.

1.8.2.8 Les axes de déplacements

Les machines-outils sont équipées au minimum de 3 axes de déplacements. Bien que le nombre d'axe ne soit pas en théorie limité, les constructeurs se limitent en général à un maximum de 5 axes.

Les 3 axes « basiques » sont les axes X, Y et Z. Ces 3 axes sont définis par la norme NF Z68-020.

Axe Z : Axe de la broche de la machine-outil. Le sens positif est donné par l'accroissement de la distance outil/pièce, la pièce étant fixe.

Axe- X : Axe du plus grand déplacement. Par défaut, le sens positif est donné vers la droite lorsque l'on fait face à la machine.

Axes-Y : Axe qui permet de former un trièdre X, Y et Z direct.

Les déplacements peuvent être assurés par trois sortes de moteurs :

- Moteur pas à pas
- Moteur à courant continu
- Moteur à courant alternatif

Le mesurage des déplacements peut être assuré par :

- Des capteurs absolus (disque codé)
- Des capteurs relatifs (disque binaire)

Pour éliminer le jeu de fonctionnement et diminuer le frottement on utilise un système vis écrou à bille.

1.8.2.9 La broche

La broche crée le mouvement de coupe nécessaire à l'usinage. Elle assure donc la mise en rotation de la pièce ou de l'outil. Ces deux cas posent des contraintes fonctionnelles différentes. Cinématiquement, la broche est en liaison pivot avec le bâti ou un chariot. Dynamiquement, elle doit être très rigide, et stable thermiquement de façon à garantir la position relative de l'outil par rapport à la pièce durant l'usinage.

1.8.2.10 Les porte-outils

Les porte-outils ont pour fonction d'assurer la liaison entre l'outil et la machine. Suivant le mode d'usinage, ils supportent des sollicitations dynamiques différentes. Le système de déplacement des portes outils et schématiser comme suit :

2 Chapitre 2 Description générale de la machine pour usinage ultra-précision

2.1 Introduction

Les machines-outils ultra précision jouent un rôle important dans la mise en œuvre de la micro / nano-découpe, alors qu'elles déterminent directement la précision d'usinage, la productivité, la productibilité et la répétabilité. Il y a eu de grandes demandes du marché pour des machines-outils ultra précis, qui sont capables d'usiner des composants et des produits de structure de plus en plus complexe (par exemple, des surfaces axialement asymétriques et des surfaces de forme libre) avec une plus grande précision et une finition de surface plus fine, et de faire face à toute nouveauté. Matériaux pour une production à haut débit et rentable. Ces exigences et exigences ont conduit au développement significatif d'une nouvelle génération de machines-outils.

La figure 2.1 illustre une micro-fraiseuse ultra-précise à cinq axes, développée à l'Université Brunel. Une machine-outil ultra précision typique comprend cinq sous-systèmes principaux, y compris une structure mécanique, un système de broche et d'entraînement, un système de contrôle, un système de mesure de position et de rétroaction, et un système de surveillance et d'inspection de l'état en cours de fabrication. Ces sous-systèmes déterminent de manière critique les performances de l'ensemble du système de machine-outil.



Figure 2.1 Figure schématique d'une micro-fraiseuse à cinq axes

2.2 Structure mécanique

La structure mécanique fournit un cadre et un support mécanique pour tous les composants de la machine. Il comprend des composants importants tels que la base de la machine, la colonne, la table de travail, la glissière, les boîtiers de broche et les chariots. Les principaux facteurs de conception et de sélection des machines sont les suivants :

1. Configuration structurelle
2. Rigidité et amortissement
3. Connectivité et interface structurelle
4. Dynamique de la structure et performances associées.

Une conception robuste de la structure mécanique devrait viser à atteindre une rigidité structurelle élevée de la boucle, de bonnes propriétés d'amortissement, une configuration structurelle symétrique et en boucle fermée, une minimisation de la déformation thermique, une stabilité à long terme et une isolation des effets environnementaux.
Le matériau est également un facteur clé dans la détermination des performances finales de la machine. Alors que la fonte et le granit ont été largement utilisés pour la fabrication de bases de machines et de glissières, le béton polymère est devenu populaire pour les machines-outils ultra précisions où un poids léger avec une capacité d'amortissement élevée et une rigidité est requis. Des matériaux structuraux à faible coefficient de dilatation thermique et stabilité dimensionnelle élevée ont également trouvé une application, notamment le super invar, le granit synthétique, la céramique.

2.3 Système de broche et d'entraînement

La broche est un élément clé d'une machine de précision et elle a un impact significatif sur les composants usinés en termes de précision de forme / dimensionnelle et de qualité de surface. Deux types de broches sont les plus couramment utilisés dans les machines-outils de précision, à savoir les broches de roulements aérostatiques et les broches de roulements hydrostatiques à huile. Ils sont capables d'une vitesse de rotation élevée avec une grande précision de mouvement. Les broches de roulements aérostatiques ont généralement une rigidité plus faible que les broches de roulements hydrostatiques à huile, mais elles ont une déformation thermique plus faible que ces dernières. Les broches de roulements aérostatiques sont largement utilisées dans les machines-outils de capacité de charge moyenne et petite, tandis que les broches de roulements hydrostatiques sont plus adaptées aux machines-outils grandes et fortement chargées.

Plus récemment, la technique des rainures a été utilisée dans la conception des roulements. Un roulement à air hybride rainuré combine les principes de conception aérostatique et aérodynamique pour optimiser les performances à ultra-haute vitesse.

Plusieurs mécanismes d'entraînement peuvent être utilisés pour les machines-outils ultra-précises, notamment les actionneurs piézoélectriques, les entraînements directs à moteur linéaire et les entraînements à friction. Les actionneurs piézoélectriques ont généralement une course courte avec une grande précision de mouvement et une large bande passante de réponse. Ils ont été utilisés dans le positionnement fin d'outils afin d'obtenir un contrôle de haute précision de l'outil de coupe (par exemple, un outil de coupe au diamant).

Les entraînements directs à moteur linéaire (CA ou CC) ont généralement une longue course et ils n'ont pas besoin de mécanismes de conversion tels que des vis mères, des crémaillères et des pignons. Ils offrent une meilleure rigidité, accélération, vitesse, fluidité de mouvement, répétabilité, précision, etc., bien que leurs applications dans l'industrie des machines-outils soient encore relativement nouvelles.

Les entraînements à friction ont également une longue course et se composent généralement d'une roue motrice, d'une barre plate ou ronde et d'un rouleau d'appui. Ils offrent une faible force de friction, un mouvement fluide et une bonne répétabilité et reproductibilité en raison de la déformation élastique induite par la pré-charge.

2.4 Système de contrôle

Suite à l'invention de la commande numérique par ordinateur (CNC) au début des années 1970, de nombreuses entreprises ont commencé à développer leurs systèmes de commande pour les machines-outils. Le système de contrôle comprend généralement des moteurs, des amplificateurs, des commutateurs et le contrôleur. Les contrôleurs CNC multiaxes à grande vitesse jouent un rôle essentiel dans le contrôle efficace et précis des servocommandes, la compensation des erreurs (erreurs thermiques et géométriques), le réglage optimisé des outils et la saisie directe de l'équation des formes. Les systèmes de contrôle avancés basés sur PC ont atteint des niveaux de résolution de contrôle nanométriques ou même sous-nanométriques à des fins d'ultra précision et de micro-fabrication, ces systèmes étant également couramment utilisés dans la majorité des machines d'ultra précision disponibles dans le commerce.

2.5 Système de mesure de position et de rétroaction

Les machines-outils ultra précision nécessitent nécessairement un système de mesure de position et de rétroaction ultra précision. Les codeurs laser (basés sur un interféromètre laser) sont

particulièrement adaptés car les interféromètres ont une résolution intrinsèquement élevée. Les interféromètres ont également la capacité d'éliminer les erreurs d'Abbe. Ils ont une résolution typique de 20 nm (numérique) et une résolution sous-nanométrique peut également être obtenue avec un système analogique via une interpolation externe. L'installation peut être simplifiée grâce au lancement laser à fibre optique et à l'optique interférométrique intégrée. Certaines échelles holographiques linéaires au laser ont une résolution meilleure que 10 nm.

Une autre technique alternative consiste à utiliser des encodeurs optiques à très haute résolution. Ils peuvent fournir une résolution proche de celle des codeurs laser, mais d'une manière plus réalisable et plus simple sur le plan industriel. Il y a une tendance à adopter davantage de codeurs optiques sur les machines de précision et d'ultra précision utilisées industriellement.

2.6 Système de surveillance et d'inspection des conditions en cours

Les machines-outils intelligentes et intelligentes sont un développement important pour les applications d'ultra précision.

Pour répondre à ces exigences, certains capteurs sont généralement nécessaires pour surveiller le fonctionnement de la machine-outil et pour combiner multifonctionnalité, fiabilité, sensibilité et compacité.

La surveillance de l'état d'usinage pendant l'usinage ultra-précis est généralement difficile en raison des très faibles émissions d'énergie et des forces de coupe associées par rapport aux processus d'usinage conventionnels.

Les effets thermiques sont connus pour être la plus grande source d'erreurs dimensionnelles.

Il est donc important de mettre en place une surveillance de température en ligne.

La surveillance de l'état peut également être appliquée à d'autres paramètres ou variables, par exemple la force de coupe, le broutage et les vibrations.

Il est souhaitable d'utiliser plusieurs capteurs pour réaliser la machine-outil intelligente et intelligente. De plus, l'usure des outils, la casse des outils et leur processus d'engagement nécessitent une grande attention en micro / nano-usinage en raison de la haute précision et des micro-outils fragiles impliqués.

2.7 Micro et méso-machines

Les machines ultra précision traditionnelles sont actuellement le principal moyen d'entreprendre la micro / nano-coupe en raison de leurs performances et de leur disponibilité. Cependant, ces machines sont généralement très chères, travaillent dans un environnement de contrôle de température serré, et sont peu efficaces en énergie et en ressources. Pour correspondre à la

micro-fabrication de miniatures et de microcomposants, le concept de micro-et méso-machines-outils a été proposé par certains chercheurs, comme le montre la figure.

Les micros et méso-machines et leur intégration pour le système de micro-fabrication / micro-usine conviennent à la fabrication de micro-produits à faible coût, nécessitant l'occupation de moins d'espace, et étant de faible consommation d'énergie et de plus grande mobilité, etc. Par rapport à une machine ultra précision conventionnelle, une micro ou méso machine a les cinq caractéristiques essentielles d'une déformation thermique réduite, d'une consommation de matière moindre, d'amplitudes de vibration plus petites, d'une empreinte plus petite et donc d'une plus petite occupation de l'espace et d'une consommation d'énergie moindre.

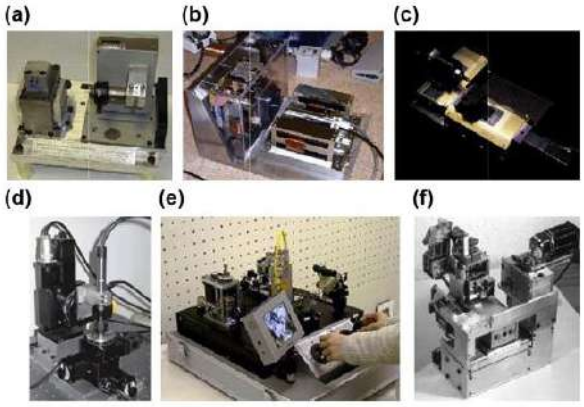


Figure 2.2 Micro et Méso machines typiques

a) micro-usine ; b) machine miniature de deuxième génération ;

c) machine miniature commerciale ; d) machine miniature ;

e) micro-usine ; f) micro-machine-outil.



Figure 2.3 Surface miroir obtenue sur la

machine de tournage au diamant à trois axes

3 Chapitre 3 Les Paliers

3.1 Palier lisse

Le palier lisse est un élément fréquemment utilisé dans la construction de pompes centrifuges qui permet à un composant mobile de glisser à l'intérieur d'un composant fixe. Une distinction est faite entre les paliers lisses radiaux pour les forces radiales (forces transversales) et les paliers lisses axiaux (ou de poussée) pour les forces axiales (forces longitudinales).

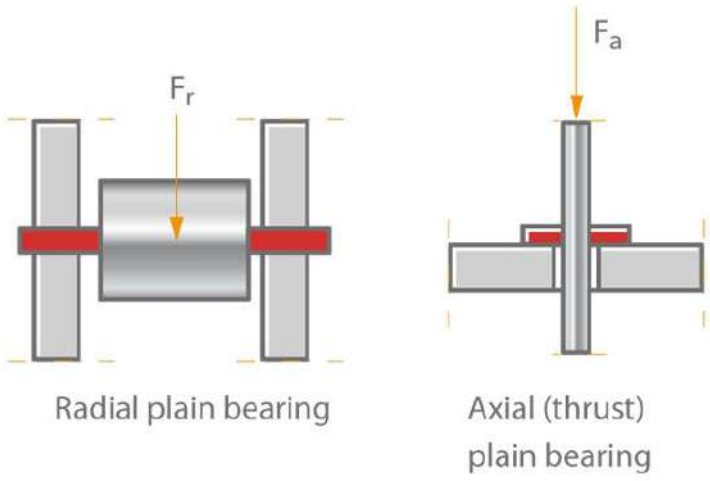


Figure 3.1 Palier lisse (schématique)

3.2 Palier lisse radial

Sur les paliers lisses radiaux, la partie mobile est l'axe ou le tourillon de l'essieu ou de l'arbre ; la partie fixe est la coque portante.

- **Coquilles de roulement et autres variantes**

Une coquille de roulement cylindrique (Figure 3.2)

a. Palier lisse.

b. Coque à deux faces, citronnelle.

c. Coque de roulement à deux faces, à décalage radial.

d. Coque de palier à trois faces.

e. Coque de roulement à trois faces et à plusieurs faces avec rainures ou poches de lubrification.

f. Roulement en caoutchouc.

g. Roulement à faces multiples avec patins radiaux inclinables.

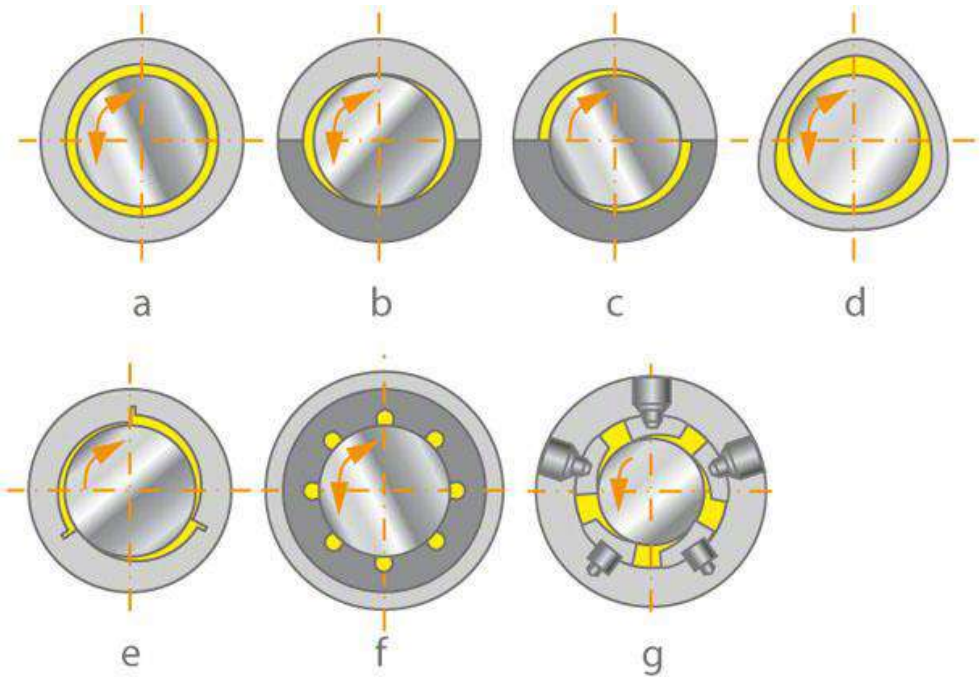


Figure 3.2 Palier lisse. Différents types de coquilles

Cette large gamme de conceptions de roulements est nécessaire pour répondre au comportement dynamique de fonctionnement caractéristique des rotors de pompe centrifuge. Les caractéristiques vibratoires des rotors équipés de paliers lisses dépendent en grande partie de la masse du rotor, de la répartition des masses, de la rigidité de l'arbre et des caractéristiques d'amortissement des paliers à une charge donnée.

La conception appropriée des roulements du rotor permet d'éliminer ou de réduire les deux types de vibrations latérales du rotor (forcées et auto-induites) à un niveau acceptable pour la machine. Les coefficients dynamiques de relèvement peuvent être optimisés. Le choix des roulements est un élément clé de cette optimisation, car chaque roulement offre des caractéristiques de performances différentes.

Un jeu de roulement est obtenu grâce au dimensionnement approprié et à l'ajustement mutuel des composants de roulement fixes et mobiles.

Celui-ci est rempli d'un lubrifiant liquide ou solide (type graisse) afin d'éviter les frottements de glissement. Lorsque le tourillon de palier atteint une vitesse circonférentielle suffisante, le jeu du palier permet au lubrifiant de former un coin porteur. Le coin de lubrification sépare les faces coulissantes les unes des autres, ce qui signifie que le roulement fonctionne en lubrification complète. Ce processus est typique des paliers lisses hydrodynamiques.

3.3 Avantages et inconvénients des paliers lisses hydrodynamiques

3.3.1 Avantages

- Fabrication simple ; le lubrifiant est introduit sans pression ou à très faible pression d'alimentation dans le roulement pendant le fonctionnement

- Très peu ou pas d'énergie est requise pour le système d'alimentation en huile

3.3.2 Désavantages

- Au démarrage et à l'arrêt, la lubrification complète du film fluide est impossible, ce qui entraîne une usure des surfaces de roulement (frottement mixte) voir Fig.4 Palier lisse

- Un autre type de palier est le palier lisse hydrostatique. Ici, le lubrifiant liquide est introduit dans les poches de palier individuelles sous haute pression.

- Pression statique élevée dans les poches du côté chargé de la surface de roulement (faible jeu pendant le fonctionnement, donc très faible diminution de la pression dans la couche de lubrifiant)

- Faible pression statique dans les poches du côté non chargé de la surface de roulement (grand jeu pendant le fonctionnement, donc chute de pression considérable dans la couche de lubrifiant)

3.4 Avantages et inconvénients des paliers lisses hydrostatiques

3.4.1 Avantage

- Lubrification complète du film fluide à tout moment, y compris au démarrage et à l'arrêt, donc pas de risque d'usure excessive

- Dimensions plus petites et pertes de charge réduites par rapport aux roulements hydrodynamiques de capacité de charge égale

3.4.2 Inconvénient

- Plus cher à ne fabriquer que les paliers lisses hydrodynamiques (plusieurs opérations de fabrication)

- Plus coûteux à utiliser car une surpression est requise pour le lubrifiant, ce qui entraîne une augmentation des investissements et des coûts énergétiques

Les types hydrodynamiques et hydrostatiques peuvent être combinés. Dans le cas de paliers lisses qui fonctionnent de manière hydrodynamique à l'état stationnaire, l'augmentation de la friction au démarrage et à l'arrêt, et l'usure qui y est associée, peuvent être réduites en fournissant

une lubrification hydrostatique auxiliaire à haute pression via des rainures longitudinales qui ne s'étendent pas au bord de la coquille de roulement.

L'alimentation auxiliaire en lubrifiant est coupée pendant le fonctionnement normal pour garantir que la pression hydrodynamique est maintenue dans l'espace de jeu de lubrification.

3.5 Conditions de friction dans un palier lisse

Voir Figure 3.3.

a. Frottement sec

Sans couche de lubrifiant de séparation entre les composants fixes et mobiles.

b. Frottement mixte

Une combinaison de friction sèche et fluide.

c. Frottement fluide

Avec une couche de lubrifiant de séparation (situation idéale)

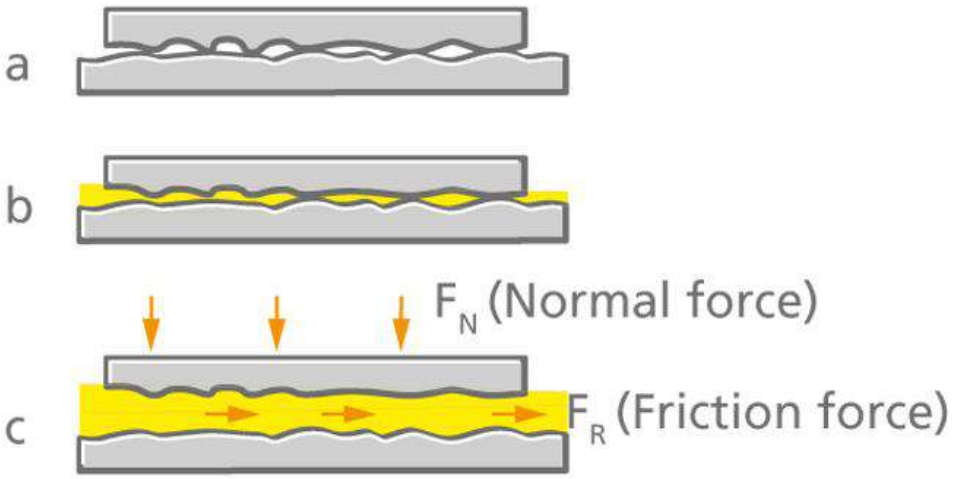


Figure 3.3 Diverses conditions de frottement dans un palier lisse

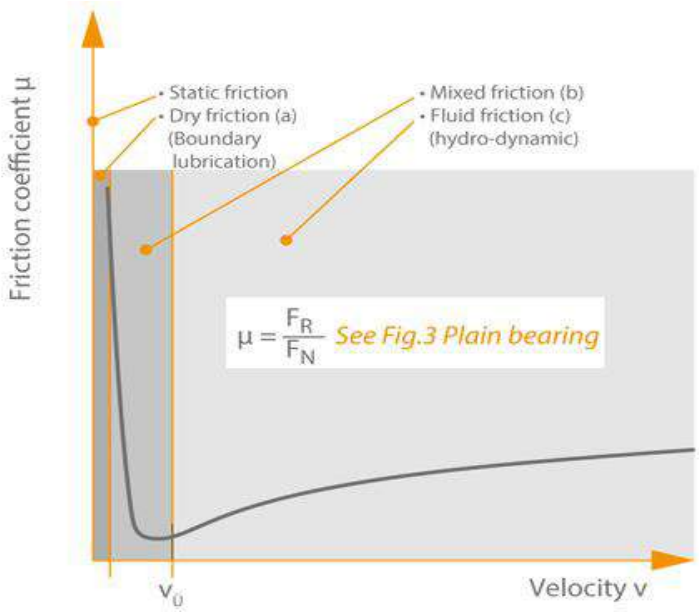


Figure 3.4 Coefficient de frottement en fonction de la vitesse pour un palier lisse (courbe STRIBECK). L'indice μ indique le point de transition.

Les trois types de friction peuvent se produire dans les paliers lisses hydrodynamiques au cours des trois phases de fonctionnement : démarrage, fonctionnement, ralentissement. Le démarrage est la phase de fonctionnement de l'arrêt à la pleine vitesse de fonctionnement. À mesure que la vitesse de glissement augmente, les paliers lisses hydrodynamiques subissent un frottement mixte, la quantité de frottement sec cédant progressivement la place au frottement fluide à mesure que la vitesse augmente. Enfin, le point de transition est atteint lorsque les surfaces se séparent les unes des autres et qu'une lubrification complète du film fluide avec un minimum de pertes par friction est établie.

Lorsque la vitesse de glissement augmente encore, l'épaisseur du film lubrifiant augmente également, mais les pertes par frottement augmentent à nouveau légèrement.

Ce comportement de friction a fait l'objet de recherches par Stribeck (Figure 3.5).

Lorsqu'une machine tombe en panne, les paliers lisses subissent le même processus que celui décrit ci-dessus pour le démarrage, mais dans l'ordre inverse (voir Processus de démarrage).

Un palier lisse doit généralement avoir son point de fonctionnement à l'état stable pendant la phase de lubrification du film fluide complet. Si un frottement mixte est présent pendant le fonctionnement continu, une usure excessive des faces d'appui peut être attendue. Un soin particulier doit être apporté à la sélection et à la mise en adéquation des deux matériaux dont les surfaces nécessitent une lubrification (usure, dissipation thermique).

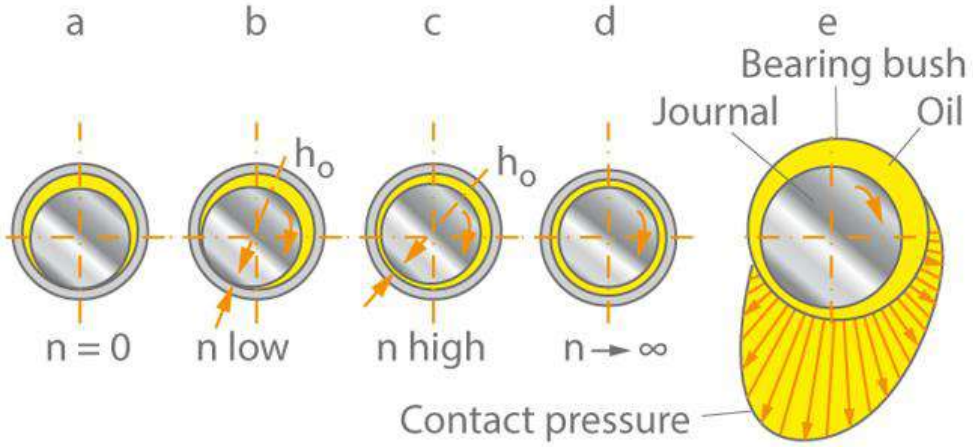


Figure 3.5 Position du tourillon dans un palier lisse à différentes vitesses n, épaisseur du film lubrifiant au point le plus étroit du jeu

De nombreuses pompes sont équipées de roulements de guidage d'arbre lubrifiés par le fluide traité. Dans ces cas, le choix des matériaux des roulements est particulièrement important car chaque fluide a ses propres caractéristiques de lubrifiant. Si de l'eau propre est utilisée comme lubrifiant, plusieurs matériaux de palier aux propriétés tribologiques appropriées sont disponibles. Il s'agit notamment des alliages métalliques, des élastomères, du caoutchouc dur, de l'électro-graphite avec ou sans liants de résine, du graphite dur avec ou sans liants de résine ou de l'imprégnation d'antimoine.

Si le fluide manipulé est utilisé comme lubrifiant et est sale ou contient des solides tels que du sable, les matériaux de palier doivent être fabriqués à partir de métaux durs ou de matériaux céramiques (par exemple, carbure de silicium). L'utilisation du même matériau pour les coussinets de palier et les manchons de protection d'arbre permet un entretien sans entretien palier.

Les roulements en céramique renforcée de fibres sont de plus en plus utilisés en raison de leur capacité à résister à la tension et aux fractures (Figure 3.6).

Le frottement est converti en chaleur qui est en partie dissipée dans l'air ambiant via le corps de palier ou l'arbre. Le palier lisse ne doit donc pas dépasser la valeur max. portant la température de fonctionnement. Si nécessaire, un système de refroidissement doit être prévu pour le roulement ou le lubrifiant (généralement le refroidissement par eau).



Figure 3.6 Palier en céramique (Matériau : manchon renforcé de fibre céramique, bague céramique "monolithique")

La conception de paliers lisses hydrodynamiques implique la solution d'un problème complexe qui prend en compte un certain nombre de facteurs tels que la géométrie et la taille du roulement, la charge du roulement, la viscosité du lubrifiant, la vitesse de glissement, la nature du flux dans le roulement (voir Fluide mécanique) et l'interaction entre ces facteurs.

L'objectif de la conception des paliers lisses est de garantir une lubrification complète du film fluide pendant le fonctionnement. Le processus de conception intègre des principes théoriques et des données expérimentales, en tenant compte de plusieurs coefficients caractéristiques interdépendants (Figure 3.7).

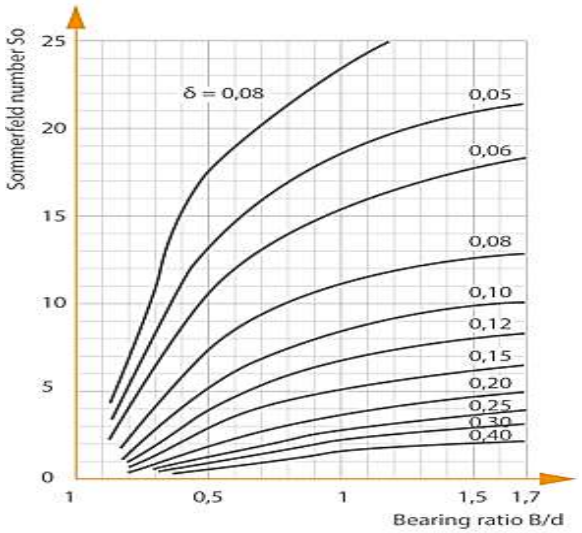


Figure 3.7 Epaisseur relative du film lubrifiant en fonction du nombre de Sommerfeld So et du rapport de palier B / d pour un palier lisse à flux laminaire radial.

Les paliers lisses dont le lubrifiant ne présente pas de caractéristiques d'écoulement purement laminaire (c'est-à-dire les paliers à très haute vitesse et simultanément à très faible viscosité du lubrifiant) ont tendance à avoir une capacité portante plus élevée, mais également des pertes par frottement plus élevées. Ici, la différence qualitative entre un flux laminaire et un flux turbulent joue un rôle décisif, aux côtés des coefficients caractéristiques des paliers lisses déjà mentionnés. La conception de paliers lisses avec un flux de lubrifiant turbulent est beaucoup plus compliquée que la conception de roulements avec un flux de lubrifiant laminaire.

3.5.1 Palier lisse axial (De poussée)

La partie mobile d'un palier lisse axial (de poussée) est le collier ou la plaque de poussée.

3.5.1.1 Pièce fixe et ses variantes

Voir figure 3.8.

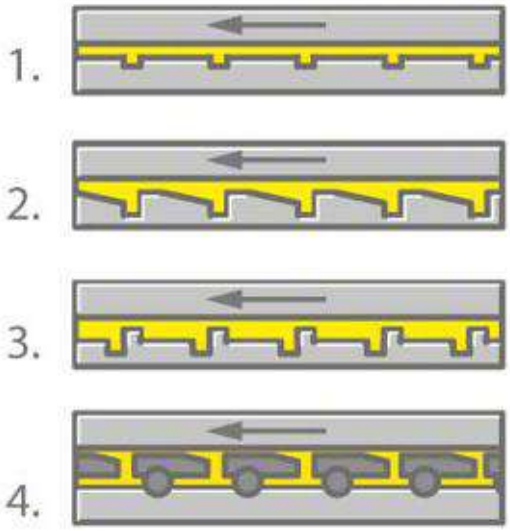


Figure 3.8 Variantes de la partie fixe d'un palier lisse de poussée

1. Bague de butée
2. Bague de butée avec faces de coin usinées
3. Bague de butée avec espace de barrage étagé
4. Coussinets inclinables à support excentrique ou coussinets inclinables souvent à support central (par exemple, lorsqu'une pompe à eau de refroidissement doit tourner en sens inverse (mode turbine) en raison d'un reflux de la tuyauterie)

Selon la conception, les paliers lisses sont subdivisés en paliers lisses hydrodynamiques, hydrostatiques et combinés hydrostatiques-hydrodynamiques pour des applications spéciales. Les deux types de conception de base doivent permettre un mouvement axial suffisant pour s'adapter à l'épaisseur du film de lubrifiant, qui varie en fonction de la charge, de la viscosité du lubrifiant et de la vitesse de glissement. Les mêmes arguments que pour les paliers lisses radiaux s'appliquent aux avantages et aux inconvénients des paliers lisses hydrodynamiques et hydrostatiques axiaux (poussée). La figure 3.9 illustre un palier lisse en carbone lubrifié dans une pompe de circulation.

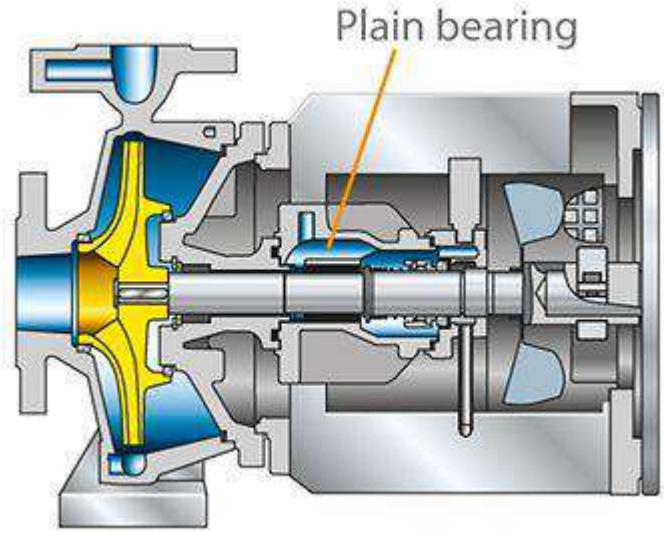


Figure 3.8 Pompe à corps en volute pour le pompage d'eau chaude / d'huiles thermiques, avec palier lisse côté pompe.

4 Chapitre 4 Broche aérostatique ultra-précise

4.1 Introduction

Un système de broche est l'un des composants clés les plus importants d'une structure globale de machine-outil. Un système de broche typique est fondamentalement construit par une broche, des roulements pour supporter la broche, un système d'entraînement pour entraîner la rotation de la broche, un système de refroidissement pour faire circuler les fluides, et un boîtier de broche pour supporter la broche et les roulements, etc. La vitesse de rotation, la puissance, le couple, la rigidité dynamique et les propriétés thermiques du système de broche déterminent la précision d'usinage et la productivité du processus d'usinage. Un système de broche aérostatique entraîné par turbine à air permet une rotation à grande vitesse et précise de la broche sans contact. La turbine à air possède des rainures en spirale 2D depuis le centre de rotation et fournit le couple de rotation sans ondulation en fournissant de l'air depuis le centre de la broche. Par conséquent, le système de broche aérostatique est l'un des systèmes de broche les plus efficaces pour l'usinage à l'échelle micro et nanométrique.

La figure 4.1 montre la configuration structurelle du système de broche. Sur cette figure, une broche principale est entraînée par une turbine à air, qui a un effet de refroidissement proportionnel à la vitesse de rotation de la broche. La rotation de la broche provoque une augmentation de la génération de chaleur au jeu des roulements, mais la génération de chaleur peut être annulée par l'effet du refroidissement de la turbine à air, qui est située près du roulement axial. La broche principale en céramique est supportée par des roulements aérostatiques dans les directions radiale et axiale. Les roulements aérostatiques sont faits de matériaux poreux.

La structure de fentes utilisée pour les roulements radiaux permet de supporter de manière isotrope le système de broche principal, comme illustré à la figure 4.2. Le mouvement d'erreur radial du système de broche peut être minimisé par le flux d'air laminaire provenant du restructure de fente des roulements radiaux.

La figure 4.3 montre un exemple de système de broche aérostatique entraîné par turbine à air. Comme on peut le voir, le système de broche a une structure simple et compacte. En conséquence, la chaleur générée au niveau des roulements peut être refroidie avec succès par l'expansion adiabatique dans la turbine à air. En fait, les résultats de l'évaluation des performances du système de broche confirment que la déformation thermique du système de broche est négligeable à une rotation à grande vitesse.

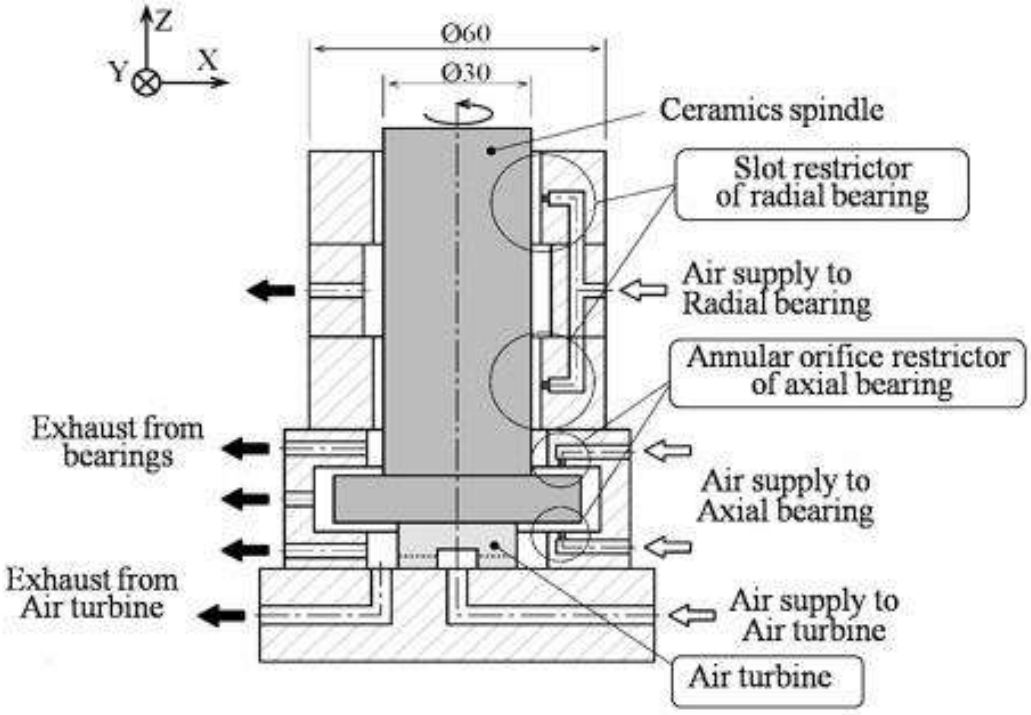


Figure 4.1 Configuration structurelle du système de broche

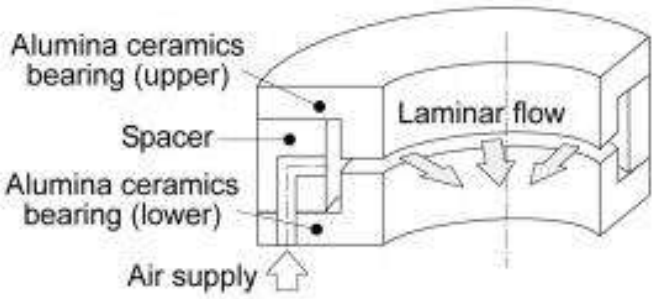


Figure 4.2 Rétracteur de fente du roulement radial

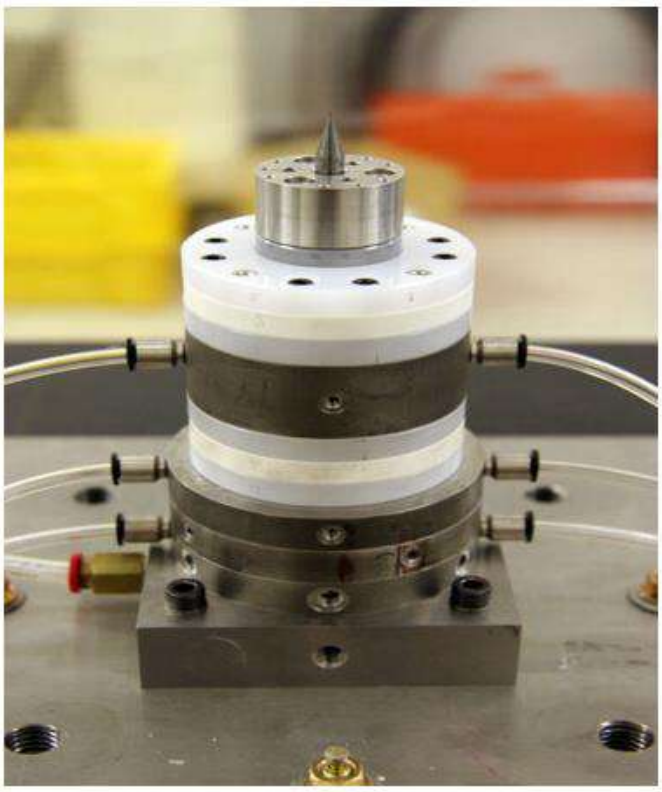


Figure 4.3 Exemple de système de broche aérostatique entraîné par turbine à air

Un roulement est un élément de machine qui supporte un autre élément de machine mobile. Il permet un mouvement relatif entre les surfaces de contact des éléments, tout en portant la charge. Une petite considération montrera qu'en raison du mouvement relatif entre les surfaces de contact, une certaine quantité d'énergie est gaspillée pour surmonter la résistance au frottement et si les surfaces de frottement sont en contact direct, il y aura une usure rapide. Afin de réduire la résistance au frottement et l'usure et, dans certains cas, d'évacuer la chaleur générée, une couche de fluide (connue sous le nom de lubrifiant) peut être fournie. Le lubrifiant utilisé pour séparer le tourillon et le roulement est généralement une huile minérale. Autrefois, les roulements antifriction étaient utilisés pour le développement de machines-outils de précision, en raison de problèmes tels que l'usure, la défaillance des roulements et d'autres facteurs, il y avait une recherche sérieuse dans le domaine de l'ingénierie de précision. Ensuite, le concept d'utilisation de paliers à air ou à gaz a été développé et a reçu une énorme

réponse de la part de toutes les organisations et centres de recherche. Plus tard, divers concepts ont été développés comme les paliers à air actifs et les paliers à air passifs, les paliers à air à pression externe et autres Les machines ultra-précises nécessitent des broches d'une précision nanométrique en rotation, une rigidité axiale et radiale modérée et une capacité de charge modérée. Les roulements aérostatiques ont été adaptés pour développer ce type de broches appelées broches aérostatiques ultra-précises. Étant donné que la plupart des machines ultra-précises nécessitent une broche de classe de précision avec une précision de fonctionnement, une rigidité et une bonne stabilité thermique supérieures, les roulements aérostatiques sont plus demandés. Le roulement aérostatique offre une grande précision de rotation, une stabilité thermique, une rigidité et des vitesses de fonctionnement élevées, par rapport à d'autres types de roulements.

Les machines ultra-précises nécessitent des broches d'une précision nanométrique en rotation, une rigidité axiale et radiale modérée et une capacité de charge modérée. Les roulements aérostatiques ont été adaptés pour développer ce type de broches appelées broches aérostatiques ultra-précises. Étant donné que la plupart des machines ultra-précises nécessitent une broche de classe de précision avec une précision de fonctionnement, une rigidité et une bonne stabilité thermique supérieures, les roulements aérostatiques sont plus demandés. Le roulement aérostatique offre une grande précision de rotation, une stabilité thermique, une rigidité et des vitesses de fonctionnement élevées, par rapport à d'autres types de roulements.

4.2 Les principes de base d'une broche de palier à air

Le principe de base du fonctionnement des paliers à air est établi depuis plus de cinquante ans. Un palier à air peut comprendre un manchon séparé d'un arbre lisse par un intervalle, généralement de 5 à 50 μm. L'air à haute pression est alimenté à travers de petits orifices dans le manchon à travers l'espace de roulement où il s'écoule le long de l'espace et hors des extrémités du roulement. La taille de l'orifice est adaptée à la taille du roulement de sorte que, à vide, la pression dans l'espace, juste en aval de l'orifice, est approximativement la moitié de la pression d'alimentation. Lorsqu'une charge radiale est appliquée, l'espace d'un côté de l'arbre se ferme, augmentant sa résistance et provoquant une augmentation de la pression. Sur le côté opposé de l'arbre, le plus grand espace a réduit la résistance au flux d'air et permet à la pression de chuter. La différence de pression à travers le roulement lui donne la capacité de supporter la charge appliquée sans encourir de contact métal-métal même en l'absence de rotation de l'arbre.

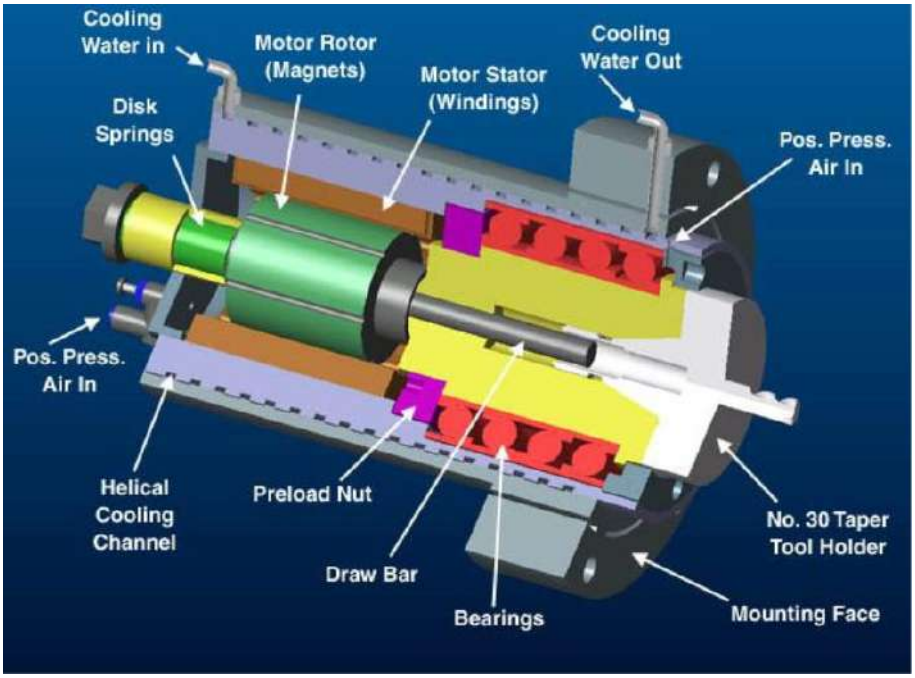


Figure 4.4 Coupe d'une broche de palier à air

4.3 Broches pneumatiques

Les broches pneumatiques utilisent deux ou plusieurs paliers lisses cylindriques pour supporter les charges radiales et une paire opposée de paliers de poussée annulaires plats pour supporter les charges axiales. Une conception pratique de la broche pneumatique a également un moteur d'entraînement intégré et des moyens de maintien au travail. Dans une broche typique, l'air comprimé pénètre par un orifice sur la face arrière et est alimenté par des perçages dans les réservoirs entourant chaque palier lisse et les réservoirs positionnés de chaque côté des paliers de poussée. À partir des réservoirs, l'air est acheminé par des rangées d'orifices dans les espaces de roulement (Figure 4.5).



Figure 4.5 Broches aérostatiques pour machines ultra-précises

4.4 Types de technologie de palier à air

Il existe deux types de paliers de précision :

4.4.1 Palier aérostatique

Les paliers aérostatiques (figure 4.6) nécessitent une source d'air sous pression externe. Cette pression d'air est introduite entre les surfaces d'appui par des trous de précision, des rainures, des marches ou des techniques de compensation poreuses.

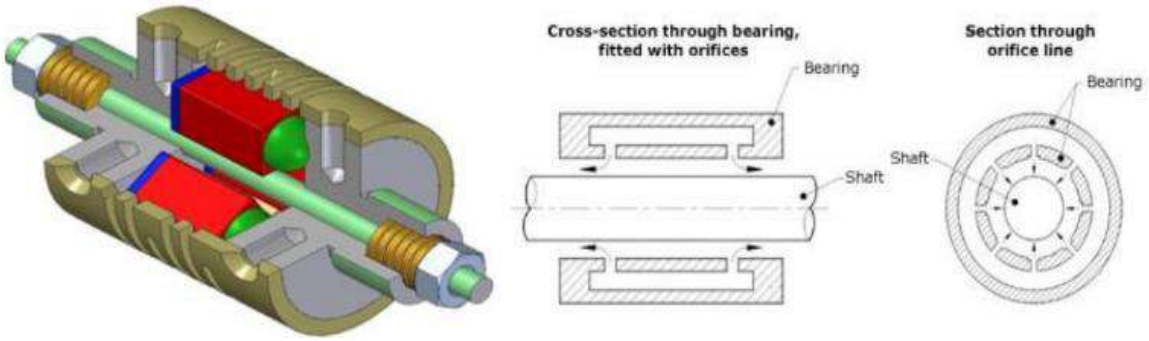


Figure 4.6 Palier aérostatique

Parce que les roulements aérostatiques ont une source d'air sous pression en raison de laquelle les roulements aérostatiques sont également connus sous le nom de roulements à air passifs. Une rigidité élevée peut être obtenue. Le roulement aérostatique est capable de supporter une charge plus élevée que le roulement aérodynamique, mais il nécessite une alimentation électrique continue pour fournir de l'air sous pression.

Les roulements, les bords intérieurs et extérieurs des butées sont évacués vers l'atmosphère. L'eau de refroidissement pénètre dans la broche par un orifice situé sur la face arrière. De là, il est généralement canalisé le long de la broche où il s'écoule à travers un réservoir entourant le roulement avant. L'eau de refroidissement est ensuite réinjectée le long de la broche où elle passe à travers un réservoir entourant le palier arrière avant de sortir par un orifice sur la face arrière de la broche.

Une source d'air sous pression, ils peuvent maintenir un entrefer en l'absence de mouvement relatif entre les surfaces d'appui. Les roulements à air offrent une solution pour de nombreuses applications de haute technologie nécessitant des performances et une précision élevées. Les roulements aérostatiques nécessitent un extérieur. Globalement, les roulements aérostatiques fonctionnent bien dans la plupart des aspects tels que la longue durée de vie, les opérations

sans bruit et sont exempts de contamination Étant donné que l'air a une viscosité très faible, les écarts entre les roulements doivent être petits, de l'ordre de 1 - 10 μm. Comme l'objet flotte sur une fine couche d'air, le frottement est extrêmement faible et même nul à l'arrêt.

4.4.2 Palier aérodynamique

Les roulements aérodynamiques dépendent du mouvement relatif entre les surfaces d'appui et généralement un certain type de rainures en spirale pour aspirer l'air entre les terrains d'appui. Cette action d'appui est très similaire à l'aquaplanage dans notre automobile sur une flaque d'eau à grande vitesse. À une vitesse inférieure, notre pneu couperait l'eau jusqu'à la route. De cette manière, les roulements aérodynamiques nécessitent un mouvement relatif entre les surfaces, lorsqu'il n'y a pas de mouvement ou lorsque le mouvement n'est pas assez rapide pour générer le film d'air, les surfaces de roulement entreront en contact. Les roulements aérodynamiques sont souvent appelés roulements à feuille ou roulements à action automatique. Des exemples de ce type de roulement comprennent la tête de lecture-écriture survolant un disque en rotation, des tourillons de vilebrequin, des tourillons d'arbre à cames et des paliers de poussée pour turbines de générateur électrique.

4.5 Classification du roulement aérostatique

Il existe cinq types de géométries de paliers aérostatiques : patin simple, tourillon à patins opposés, poussée rotative et tourillon conique ou paliers de butée. Il peut être à nouveau classé comme suit :

- Paliers de tourillon - essentiellement des surfaces cylindriques
- Paliers de butée - surfaces planes circulaires ou annulaires conçues pour la rotation
- Roulements de glissement — surfaces planes de toute forme limite conçues pour obtenir un mouvement de glissement
- Roulements sphériques

4.6 Principe du roulement aérostatique

La figure 4.7 montre que, comment le gaz à une pression d'alimentation, Ps est admis dans le jeu à travers un dispositif de restriction, ce qui réduit la pression d'alimentation. La chute de pression est due à l'accélération du gaz à mesure qu'il se dilate. L'air s'écoulera à travers le palier et retournera dans l'atmosphère où la pression se réduira encore à la pression atmosphérique, Pa. Un dégagement plus petit réduira la chute de pression qui donne une capacité de charge plus élevée. Il est souhaitable d'atteindre une condition optimale à laquelle

une rigidité maximale se produit lorsque le taux de changement de charge lorsqu'il est divisé par le taux de changement de jeu est un maximum.

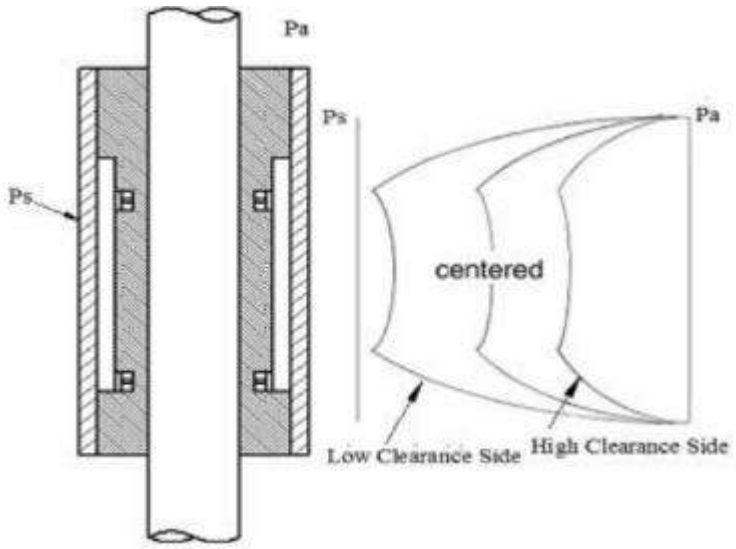


Figure 4.7 Principe du roulement aérostatique

4.7 Avantages de l'axe de palier à air

Par rapport à d'autres types de broches, les broches pneumatiques présentent un certain nombre d'avantages en termes de performances :

- **Précision de rotation élevée**

Les films d'air de roulement font la moyenne de toutes les caractéristiques de surface à un niveau bas permettant d'obtenir des mouvements d'erreur inférieurs à 0,05 μm.

- **Propreté**

Ne nécessitant aucun lubrifiant liquide, les broches à air conviennent à une utilisation dans des salles blanches.

- **Facilité d'entretien**

Les broches pneumatiques ne nécessitent aucun entretien. L'approvisionnement en air doit cependant être maintenu. Les roulements et les vibrations faibles, les broches pneumatiques utilisées dans les applications d'usinage peuvent produire.

- **Stabilité dimensionnelle élevée**

Le faible frottement des roulements et le refroidissement par eau permettent d'obtenir une croissance thermique négligeable.

- **Vitesses élevées**

Là encore, le faible frottement des roulements et l'utilisation du refroidissement par eau permettent aux roulements de fonctionner à des vitesses de surface extrêmement élevées.

- **Rigidité élevée**

Les petits dégagements inhérents aux roulements à air leur permettent d'être conçus avec une rigidité statique élevée. Les paliers à air permettent également d'utiliser de grands diamètres d'arbre, ce qui améliore la rigidité des ensembles de broches.

- **Amélioration de la finition de surface**

En raison de la précision intrinsèquement élevée de la rotation de l'air

- **Augmentation de la durée de vie des roulements**

L'absence de contact métal-métal garantit une durée de vie illimitée des roulements à condition que l'alimentation en air soit maintenue propre et exempte d'huile et d'eau.

- **Faible vibration**

Toutes les broches à air sont équilibrées à mieux que 0,001 g / cm.

4.8 Inconvénients des roulements à air

Les autres inconvénients sont énumérés ci-dessous :

- Les surfaces doivent avoir une finition extrêmement fine.
- Les caractéristiques de stabilité sont médiocres
- La vitesse doit être élevée.
- Le chargement doit être faible.
- La conception est plus empirique car les relations de flux sont presque impossibles à résoudre.
- L'alignement doit être extrêmement bon.
- Plus de puissance est requise pour mettre sous pression un fluide compressible.
- Les dimensions et les dégagements doivent être extrêmement précis.
- Un filtrage minutieux est nécessaire pour éviter la notation et la liaison ...

- Une conception soignée est requise pour éviter les vibrations dues à la compressibilité du fluide.
- Une très faible épaisseur de film est nécessaire pour confiner le flux de fluide à des valeurs raisonnables, nécessitant ainsi un usinage très précis en fabrication.

4.9 Applications des roulements à air

Les roulements à air sont utilisés dans une variété d'applications, notamment :
Machines de mesure de coordonnées, machines-outils de précision, traitement de plaquettes semi-conductrices, machines médicales, équipement de production de lentilles optiques, imprimantes numériques, jauges de précision lithographiques, machines de tournage au diamant, machines d'essai de matériaux, Tirage de cristal, tables rotatives, broches et test de friction. Les roulements offrent des avantages distincts pour différentes industries et marchés.

4.10 Calcul des paramètres de broche

Nous utilisons toujours le calcul des conditions de coupe et d'autres paramètres de broche de l'utilisation prévue de la fraiseuse. Dans ce cas, c'est la broche pour une petite fraiseuse à trois axes qui sera utilisée pour usiner à la fois de l'aluminium pur et des alliages plus tendres aluminium ou autres matériaux souples. Le fraisage doit également avoir lieu sur la fraiseuse contour. Toutes les opérations doivent être effectuées avec des outils d'un diamètre de 1 mm à 12mm. Comme il s'agit d'une broche pour une petite fraiseuse, les calculs et la conception prendront en compte pour garder la broche aussi petite que possible et en même temps pour permettre le changement d'outil automatique. Détermination de la vitesse de la broche
Le calcul est effectué pour la vitesse dite nominale, qui est déterminée par la vitesse de coupe et le plus grand diamètre d'outil utilisé.
La vitesse nominale est déterminée selon la formule :

$$Nn = \frac{1000.vc}{\pi.Dmax} = \frac{1000.250}{\pi.1} = 79617.83 \text{min}^{-1}$$

Il est également nécessaire de déterminer la vitesse de l'outil avec le plus petit diamètre, car elle diminue à mesure que le diamètre de l'outil augmente, la vitesse augmente et doit être prise en compte lors de la conception de la broche. On voit que la vitesse calculée pour le diamètre d'outil de 1 mm dépasse largement la vitesse recommandée, presque deux fois plus. Outil pour une vitesse aussi élevée, il n'est pas construit et nous allons donc l'utiliser comme vitesse maximale donnée par le fabricant.

$$N_{max} = 47800 \ \text{min}^{-1}$$

4.10.1 Calcul des forces de coupe et des couples

Lors de la conception de la broche, il est nécessaire de déterminer le couple maximal auquel les dimensions de la broche. Le couple maximal se produit à la vitesse minimale. Cependant, nous ne devons pas oublier qu'en raison des caractéristiques du moment Compresseur, il est également conseillé de déterminer le couple requis même à vitesse maximale.

Dans ce cas, les forces de coupe et les couples seront calculés pour les deux

Méthodes de surfaçage (fraisage latéral, rainurage) à la fois pour une vitesse minimale et pour une vitesse maximale. De plus, la force et le couple seront calculés pour le fraisage en plongée, qui fait partie des calculs ultérieurs.

L'amplitude du couple est donnée par:

$M_k = F_c.\frac{D}{2}(5,4)$

où:

Fc… force de coupe

D… diamètre de l'outil

Fraisage latéral

Lors du calcul de la force de coupe et du couple pour le fraisage latéral, ils sont pris en compte paramètres de tableau ci-dessous.

Nom de la quantité	Marque	Unité	Valeur
Vitesse max	N_n	[min-1]	47800
Diamètre maximum de l'outil	D_{max}	[mm]	1
Vitesse d'avance au min	V_{Fmax}	[mm/min]	800
Nombre de dents	z_n	[-]	2
Largeur de coupe au max	Aemax	[mm]	1
Largeur de coupe au min	Aemin	[mm]	0.2
Profondeur de coupe au max	Apmin	[mm]	1
Profondeur de coupe au min	Apmax	[mm]	1.5
Force de coupe spécifique	Kc1	[N/mm^2]	500

Augmentation de la force de coupe spécifique	Mc	[-]	0.25
Angle du front	γ0	[°]	0

Vitesse maximale et donc pour l'outil avec le plus petit diamètre.

Avance par dent :

$$Fz = \frac{Vfmax}{Zn.Nn} = \frac{800}{2 * 47000} = 0{,}0085\ mm$$

Épaisseur moyenne des copeaux :

$$Hm = Fz.\sqrt{\frac{Aemax}{Dmin}} = 0{,}0085.\sqrt{\frac{0.2}{1}} = 0.004\ mm$$

Force de coupe spécifique :

$$Kc = \frac{(1 - 0.01 * \gamma).K1c}{h_m^{mc}} = \frac{(1 - 0{,}01 * 0).500}{0.004^{0.25}} = 1988\ n/mm^2$$

Force de coupe**:**

$F_C = K_C.\ a_{pmax}\ .F_z = (1988)\ .\ (1{,}5).(0{,}0085)\ \ = 190.848$ N

Couple minimum pour le fraisage latéral :

$M_{kmax1} = F_c\ .\frac{DMin}{2} = 190.848.\frac{0.001}{2} = 0.095424$ Nm

Nom de la quantité	**Marque**	**Unité**	**Valeur**
Vitesse max	N_n	[min-1]	47800
Diamètre maximum de l'outil	D_{max}	[mm]	1
Vitesse d'avance au min	V_{Fmax}	[mm/min]	560
Nombre de dents	z_n	[-]	2
Largeur de coupe au max	Aemax	[mm]	1
Largeur de coupe au min	Aemin	[mm]	0.2

Profondeur de coupe au max	Apmin	[mm]	1
Profondeur de coupe au min	Apmax	[mm]	1.5
Force de coupe spécifique	Kc1	[N/mm^2]	500
Augmentation de la force de coupe spécifique	Mc	[-]	0.25
Angle du front	γ0	[°]	0

Avance par dent :

$$Fz = \frac{Vfmax}{Zn.Nn} = \frac{560}{2.47000} = 0.005 \text{ mm}$$

Épaisseur moyenne des copeaux :

$$Hm = Fz.\sqrt{\frac{Aemax}{Dmin}} = 0.035.\sqrt{\frac{1}{1}} = 0.005\ mm$$

Force de coupe spécifique :

$$Kc = \frac{(1 - 0.01 * \gamma).K1c}{h_m^{mc}} = \frac{(1 - 0{,}01 * 0).500}{0.005^{0.25}} = 1880.30\ n/mm^2$$

Force de coupe:

$F_C = K_C . a_{pmax} . F_z = (1880.30) . (1{,}5).(0{,}005)$ =13,95 N

Couple minimum pour le fraisage latéral:

$$M_{kmax1} = F_c . \frac{Dmin}{2} = 13{,}95 . \frac{0.001}{2} = 0.0069 \text{ Nm}$$

$P = 2\pi n_n . m_{kmax1} = 2.3{,}14 \frac{47800}{60} .0.095$ =0,4 kw

4.10.2 Choix des paliers (à **air ou à roulements)**

4.10.2.1 Roulements

Les roulements sont utilisés pour les roulements. Les roulements ont une rigidité élevée, capacité de jeu, faible coefficient de frottement, permettent une interchangeabilité facile et ne

nécessitent pas de course. Les inconvénients des roulements incluent leur sensibilité aux chocs et leur mauvais amortissement des vibrations.

Selon l'application, des roulements à billes à contact oblique sont placés dans les broches, rouleau ou cône. Les roulements à billes à contact oblique sont utilisés pour roulements plus petits, permettent des vitesses élevées et transmettent les forces axiales. Roulements à rouleaux servent à loger l'extrémité arrière de la broche, ne supportent pas de charges axiales, en radial direction ont une capacité de charge élevée et une rigidité élevée. Les roulements à rouleaux coniques ont une rigidité plus élevée et ils supportent des charges axiales plus importantes que les roulements à billes et sont utilisés pour des roulements plus grands.

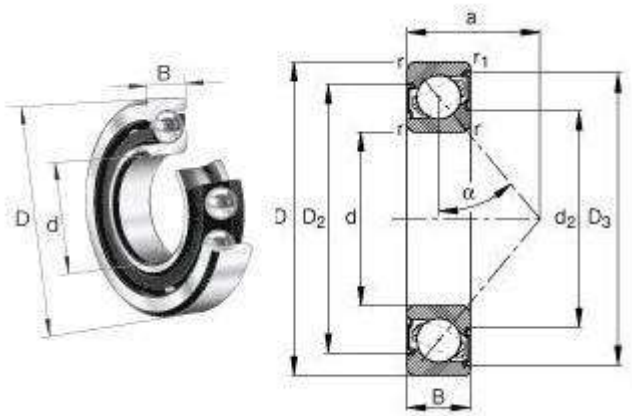


Figure 4.8 Roulement à billes

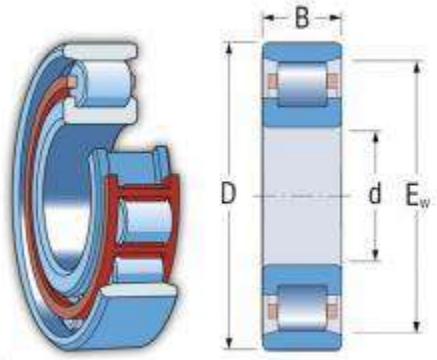


Figure 4.9 Roulement à rouleaux

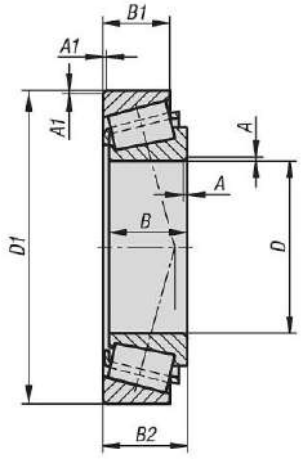


Figure 4.10 Roulement à rouleaux coniques

Le choix des roulements est influencé par des facteurs importants, qui sont la précision de production des roulements et facteur de vitesse. Ces deux données sont fournies par le

fabricant du roulement. Ils répondent le mieux à ces paramètres roulements à billes à contact oblique. Ils doivent être agis pour que le roulement fonctionne correctement pré charge, ce qui élimine les jeux axial et radial dans le roulement et augmente leur rigidité. Correctement

Le choix de la taille de la pré-charge affecte fondamentalement la fiabilité et le bon fonctionnement du roulement. Si la pré-charge sera trop faible, la capacité portante ne sera pas pleinement utilisée. Et vice versa si ça va pré charge trop élevée, il y aura une augmentation du frottement dans le roulement et donc une augmentation de la température dans le roulement, réduisant ainsi la durée de vie des roulements. La quantité correcte de pré charge est spécifiée par le fabricant du roulement et

Il existe plusieurs façons d'atteindre cette valeur.

Les ressorts ou entretoises sont le plus souvent utilisés anneaux. Lorsqu'un ressort est utilisé, une force constante est appliquée sur la bague extérieure du roulement.

L'avantage de cette méthode est l'immuabilité de la force de précontrainte même lors du changement de température des dimensions des pièces broche à condition que la possibilité de déplacement de la bague extérieure soit assurée.

Lors de l'utilisation d'entretoises anneaux, la pré-charge peut changer pendant le fonctionnement en raison de la dilatation thermique.

Un autre facteur important qui affecte le bon fonctionnement de la broche est la bonne sélection de la disposition des roulements. Les roulements doivent être disposés de manière à ce qu'ils tiennent fermement aux charges radiales et axiales. Lors de l'utilisation d'un roulement à billes à contact oblique, il est nécessaire l’utiliser avec un autre roulement ou par paires. Il existe plusieurs façons d'utiliser les pairs de roulements à billes à contact oblique, soit en "O" (dos à dos), disposition en "X" (face à face) ou disposition en "T" (en tandem). Lors de la disposition des roulements nous pouvons prétendre les roulements par paires en déplaçant une bague de roulement par rapport à l'autre lors du montage.

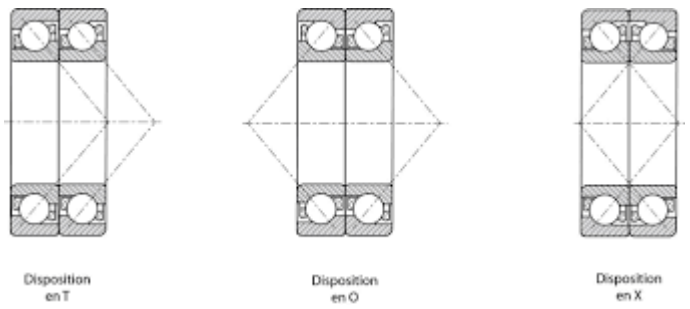


Figure 4.11 Moyens de disposer les roulements par paires

Pour garder la conception de fuseau simple et les coûts bas, le prototype a employé des roulements à billes de contact angulaires. Les forces de coupe radiale et axiale dans la micromachine sont généralement assez petites, c'est-à-dire inférieures à 1 N. La charge de gravité statique (dans la direction radiale d'un fuseau monté horizontalement) sur le prototype s'est également avérée négligeable. Les principales charges prévues sur le fuseau étaient dues au pré-chargement du roulement, en particulier à une vitesse plus élevée, et à la poussée du rotor de turbine, qui agissent tous deux dans la direction axiale. De telles forces axiales sont difficiles à prévoir avec précision a priori sans données empiriques établies. La structure globale de l'assemblage du rotor de fuseau est indiquée dans la figure 2 et se compose d'une paire de duplex dos à dos de roulements à billes de contact angulaires à l'avant/outil-extrémité et arrière/ turbine-end du fuseau respectivement.

La portée du roulement était de 40 mm. Le rotor de turbine a été surplombé pour permettre une conception compacte et la facilité d'assemblage. En outre, la turbine s'est épuisée à l'arrière du fuseau pour éviter un flux d'air important à travers les roulements à billes. Les roulements à billes de contact anguleux hybrides de pointe, avec des anneaux en acier Cronidur et des boules en céramique, permettent des vitesses angulaires allant jusqu'à 190 000 tr/min (DN 1140 000) et 280 000 tr/min (DN 1680 000) avec respectivement de la graisse et de l'huile-air lubrification. Ces valeurs sont pour les roulements simples, et la vitesse atteignable est réduite avec des ensembles duplex.

Les roulements à billes sélectionnés (SKF 706 CE) présentaient un alésage de 6 mm, un angle de contact de 15° et une rigidité axiale de l'ordre de 9–18 N/μm, selon le pré-chargement.

La rigidité radiale des roulements à billes n'a pas été fournie dans les feuilles de données, mais elle est généralement trois à quatre fois la rigidité axiale des roulements avec un angle de contact de 15°[18]. Les cotes de charge dynamique et statique des roulements sélectionnés étaient respectivement de 1,5 kN et de 0,5 kN. Un pré-chargement fixe a été choisi pour améliorer la rigidité du système.

Les roulements assortis aux deux extrémités ont été axialement pré-chargés par montage adjacent l'un à l'autre, la pré-charge prédéterminée par le fabricant. Une charge légère d'environ 10 N a été sélectionnée, car on s'attendait à ce que la pré-charge augmente considérablement à grande vitesse. La paire de roulements duplex à l'avant du fuseau axialement a été axialement située (fixe) pour permettre des charges de poussée dans les deux directions. La paire de roulement arrière flottait (non-localisation) pour compenser l'expansion thermique à grande vitesse. Des écrous de verrouillage ont été utilisés pour serrer à la fois la turbine et le roulement avant sur l'assemblage du rotor.

FICHE TECHNIQUE : ROULEMENT À BILLES 706-CE-HC-P4A-SKF



- Matière	Billes céramique
- Type de cage	Massive synthétique
- Roulement série	700
- Type d'étanchéité	Non étanche
- D - Diamètre extérieur (mm)	17
- C - Epaisseur (mm)	6
- d - Diamètre intérieur (mm)	6
- Marque	SKF
- Spécificités	Classe de précision P4 et ABEC9
- Type du roulement	A billes
- Angle de contact	15°

4.10.3 Conclusion

En somme, notre sélection de roulements était basée sur plusieurs facteurs et statistiques, et le résultat était un roulement. (SKF 706 CE) Prototype Roulements à billes à contact angulaire.

4.11 Chois du type de turbine

Les exigences de vitesse de rotation et de puissance de la turbine sont dictées par le processus de micro-usinage. La pression d'entrée est le seul paramètre réglable ouvert aux concepteurs de turbo-fuseau de micromachine. La limite de pression d'approvisionnement supérieure est déterminée par le système d'air comprimé de l'usine/usine d'atelier d'usine.

Les compresseurs d'air industriels typiques fonctionnent avec une pression de sortie de 6 à 8 bars, bien que de nombreuses installations de fabrication utilisent également des compresseurs distribués ou centralisés à basse pression, par exemple pour les applications de transport pneumatique. La limite inférieure pour la pression d'approvisionnement en turbine/fuseau est régie par des considérations de dimensionnement des tubes et des canaux d'écoulement. La sensibilité d'un régulateur de pression pneumatique typique est de 0,5 % de la pleine portée, par exemple 0,04 bar de résolution pour la plage de 8 barres. Toutefois, la résolution de contrôle efficace est limitée si l'utilisation de jauge standard (tube Bourdon) à environ 0,1 barre. La stratégie de conception prise dans ce projet consistait à utiliser une pression d'entrée aussi faible que possible tout en gardant la taille du fuseau d'une dimension similaire à celle des turbo-fuseaux commerciaux existants. Cette pression d'entrée a été déterminée à environ 1,7 barre au point de conception (100 W de puissance de sortie à 100.000 tr/min). Même avec la pression d'entrée relativement faible, le paramètre de vitesse spécifique est encore bien en

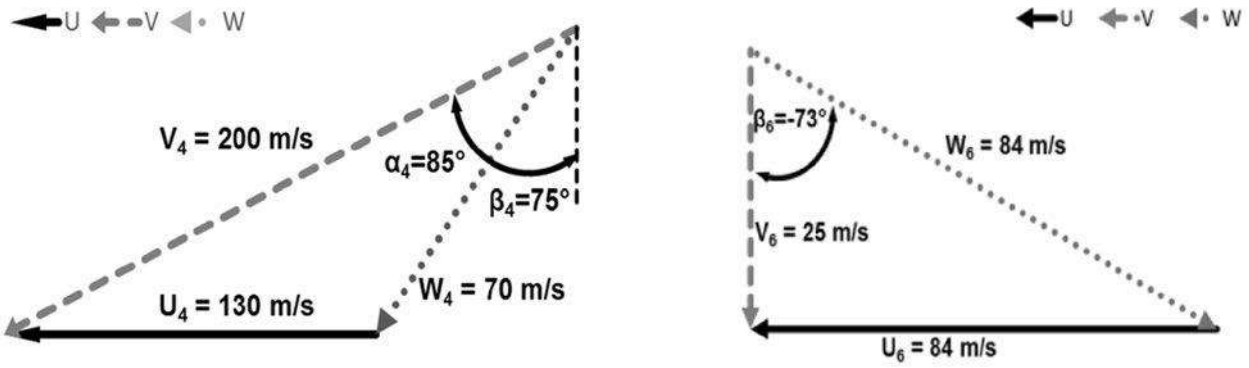
dessous d'optimal pour une turbine radiale-entrée/sortie axiale. C'est parce que la vitesse de rotation du fuseau, bien que considérée comme élevée du point de vue de l'usinage, est encore trop faible pour maximiser pleinement l'efficacité de la turbine sans augmenter de manière significative la taille de la turbine et du fuseau. Certaines variantes antérieures de conception de turbines pour un fuseau de micro-usinage, et leurs simulations numériques, ont été discutées dans. Il a été décidé d'augmenter le chargement de la scène (à partir de conceptions antérieures) afin de réduire davantage les forces de poussée potentielles de la turbine et la taille du diamètre du boîtier.

Tableau 4.1 Paramètres de conception de l'étape finale de la turbine pour le prototype

Étape	
Vitesse spécifique (rad)	0,2
Réaction d'étape	0.24
Coefficient de travail	1,5
Coefficient de débit	0,19
Rapport de pression	1,68
Flux de masse (g/s)	4
Interespace radial (mm)	1,5
Rapport d'aspect	0,21
Solidité	1,08
Nombre de lames	10
Solidité (mi-envergure)	3,13
Nombre de lames	13
Vitesse de rotation (tr/min)	79617.83

Le chargement a également entraîné une augmentation du rapport entre la portée de l'entrée et le diamètre, ce qui a réduit le dégagement relatif du boîtier à l'entrée du rotor. Cette approche de conception était un compromis entre la réduction des pertes de fuites de turbines et la sensibilité de l'efficacité de la turbine au dégagement, au détriment de l'augmentation des pertes de frottement du rotor. Les paramètres de conception géométrique et aérothermodynamique de la variante finale de turbine, et les triangles de vitesse, sont indiqués respectivement dans les tableaux 4.1 et figure 3. Il ressort clairement des triangles de vitesse du rotor de turbine indiqués dans la figure 3 que la vitesse d'écoulement est bien inférieure à la vitesse du son au point de conception. La conception à faible réaction a entraîné un angle

d'écoulement de sortie de la Buse Guide Vane (NGV) de 85°, qui est assez élevé par rapport aux turbines radiales conventionnelles. Pour simplifier la fabrication, un angle d'entrée de pale de rotor de 0°a été utilisé, c'est-à-dire une pale purement radialement en fibre optique sans balayage. Le rapport de vitesse de la pale qui en a résulté n'était que de 0,45 au point de conception, ce qui est bien inférieur au rapport optimal d'environ 0,7 pour les turbines radiales-entrées/axials . La figure 3 montre que la faible vitesse de la pale entraîne une incidence positive importante à l'entrée du rotor, ce qui entraînera probablement une séparation du débit sur les surfaces d'aspiration des pales. Des simulations de CFD avec ANSYS CFX ont été utilisées pour déterminer un certain nombre de variables de conception de pales de turbine, notamment : rapport de longueur de tangage à l'accord, déviation de la pale du rotor, épaisseur minimale de la girouette et forme de la feuille d'air, rapports elliptiques de bord de tête et de fuite, etc. En raison de la conception de la turbine à faible réaction et de son fonctionnement à des températures « froides » (c.-à-d. ambiantes), les charges mécaniques et thermiques prévues agissant sur le rotor de la turbine étaient relativement faibles. Cela a facilité le choix des métaux de faible densité, tels que l'aluminium et les alliages de magnésium, pour le rotor et a contribué à minimiser le moment global du rotor d'inertie. Le rotor de turbine a été conçu pour une vitesse de fonctionnement maximale de 170 000 tr/min. À cette vitesse, la déformation maximale des pales du rotor due à la force centrifuge, était prévue à moins de 10 μm à l'aide d'une simulation FEM (ANSYS Mécanique). Le stress maximal sur le rotor a été assuré être inférieur au stress de rendement du matériau avec un facteur de sécurité approprié. La fréquence naturelle prévue du premier mode du rotor de turbine individuel était de 51 kHz, ce qui était bien au-dessus de la vitesse de fonctionnement maximale du fuseau.

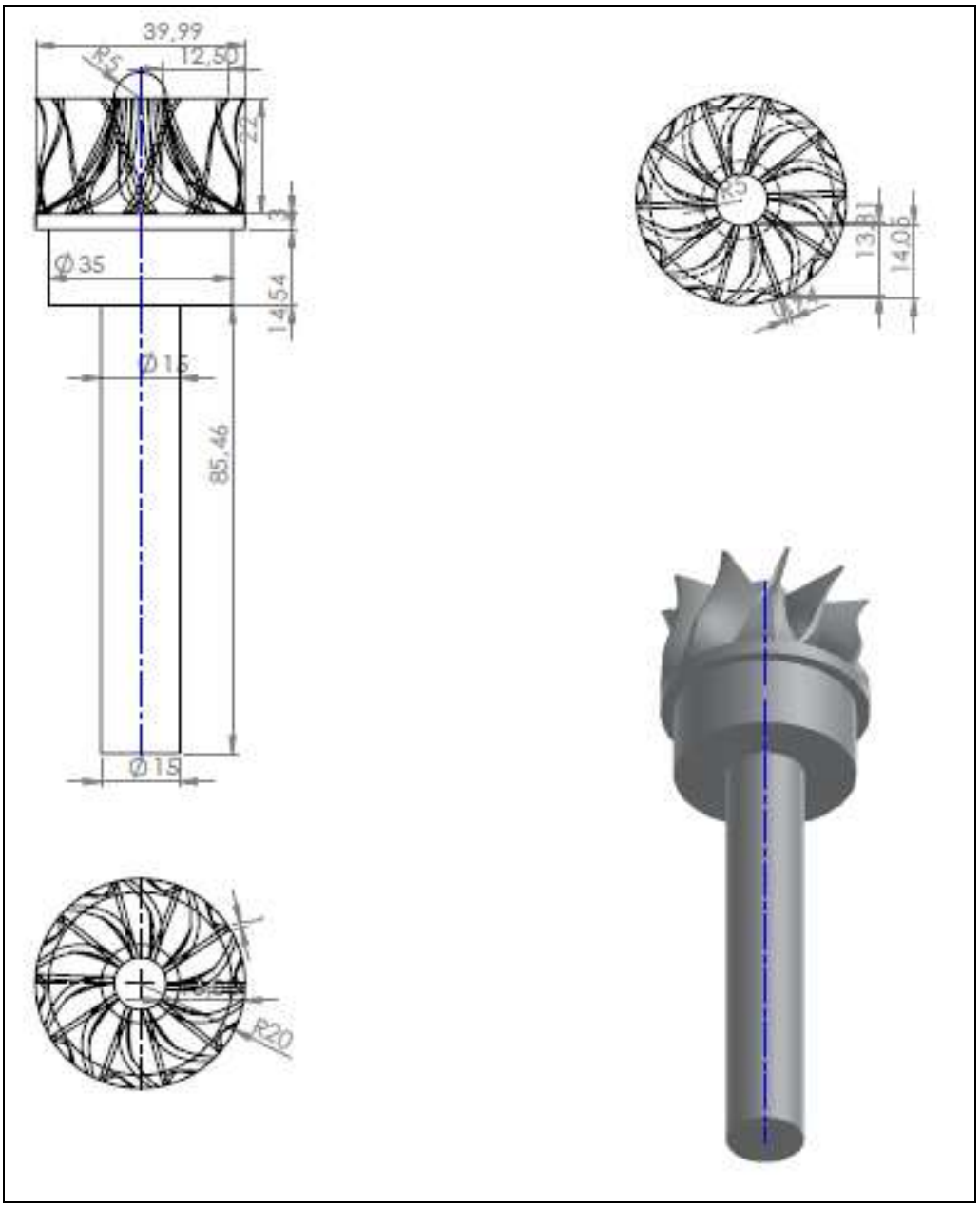


Figues. 4.12 Triangles des vitesses au point de conception, pour l'entrée (à gauche), et en fin de sortie (à droite)

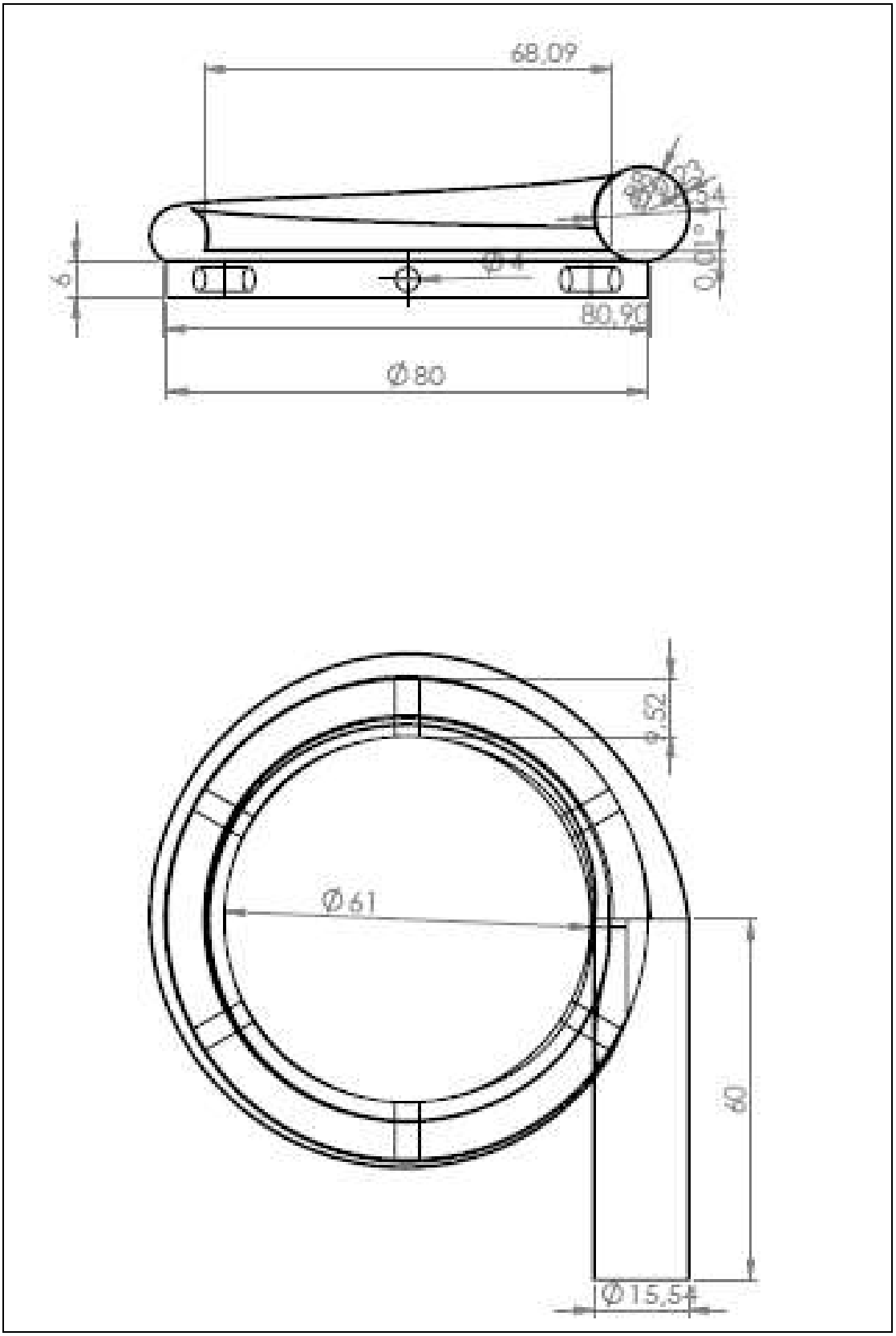
4.12 Conception de la broche sous SolidWorks®

Une turbine est un dispositif rotatif convertissant partiellement l'énergie interne d'un fluide, liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), en énergie mécanique au moyen d'aubes disposées sur un arbre tournant à grande vitesse.

L'énergie entrante du fluide est caractérisée notamment par sa vitesse, sa pression, son enthalpie. L'énergie mécanique sortante de la turbine entraîne un autre mécanisme rotatif comme un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur (exemple un générateur). L'ensemble est alors respectivement appelé turbo alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc.



Figues 4.13 Schéma avec image 3D montrant la conception de la turbine et l'arbre



Figues 4.14 Diagramme schématique montrant la conception et les dimensions volute



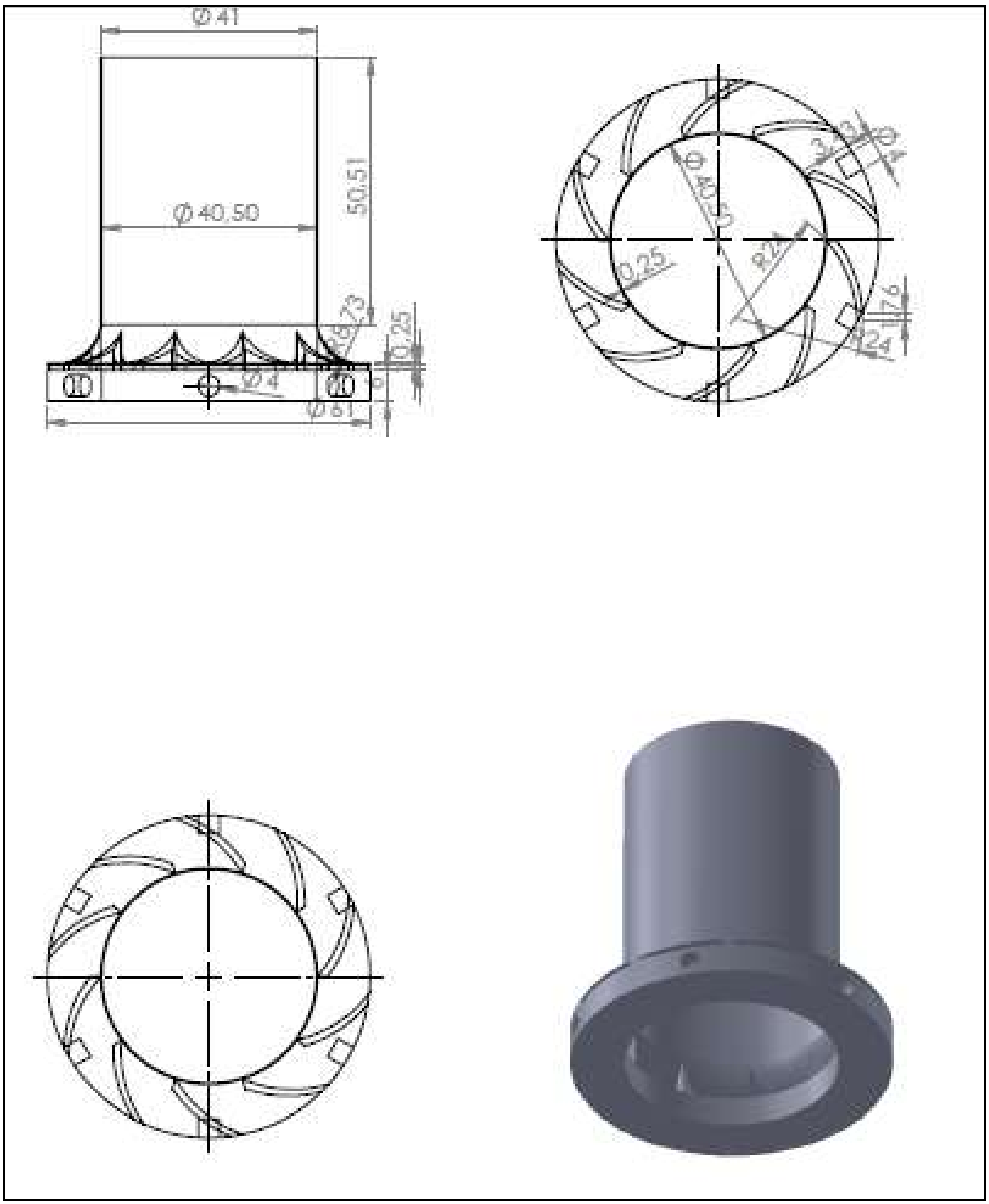
Figues 4.15 Hologramme montrant un dessin volute

Volute

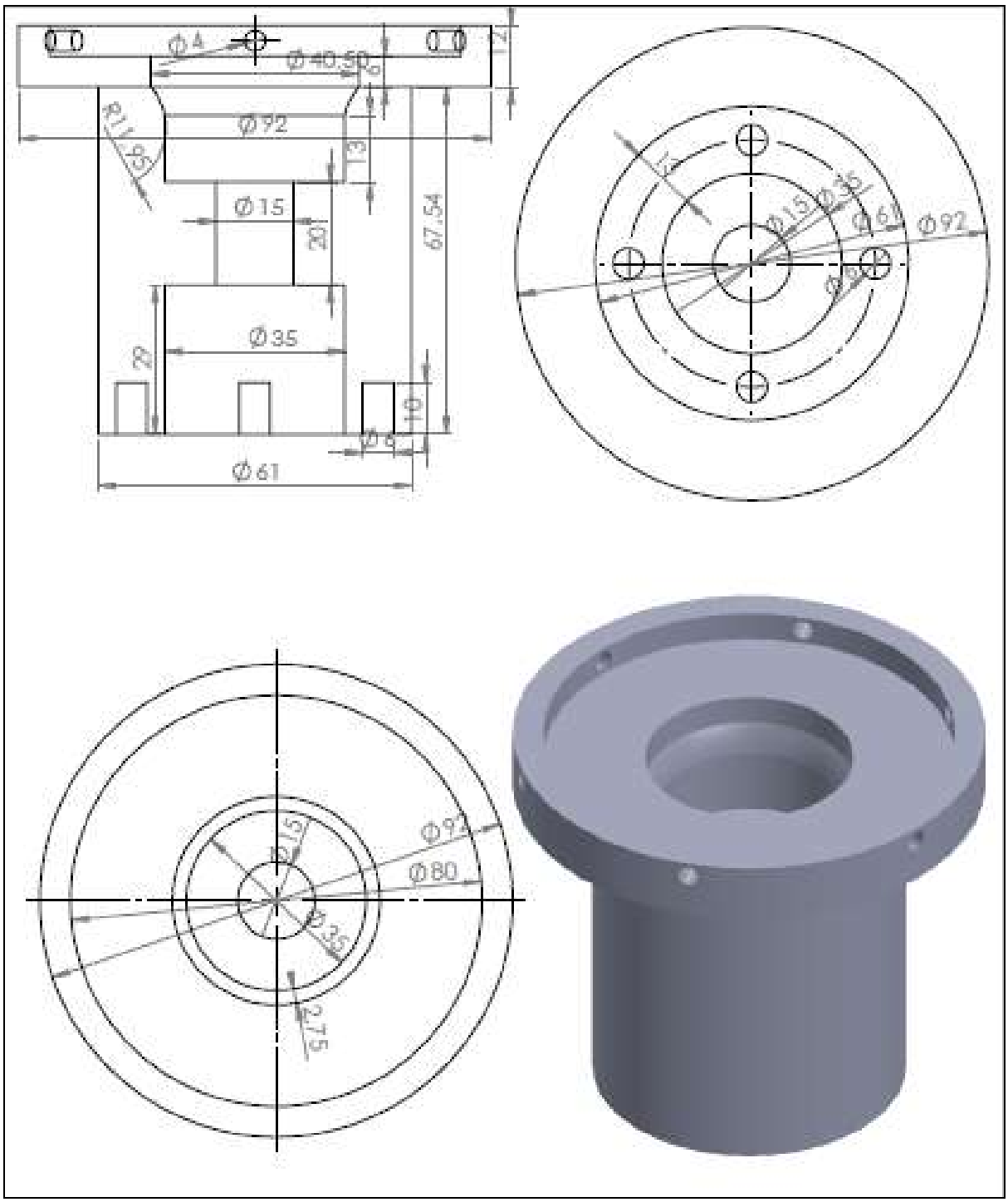
La fonction de la volute est de répartir le flux autour de la périphérie de la turbine pour fournir un débit massique uniforme et une pression statique uniforme à la sortie de la volute. À obtenir des conditions de sortie uniformes, le rapport de la surface d'écoulement à le rayon du centre de gravité (A / r) doit diminuer linéairement pour chaque section.

4.13 Conclusion

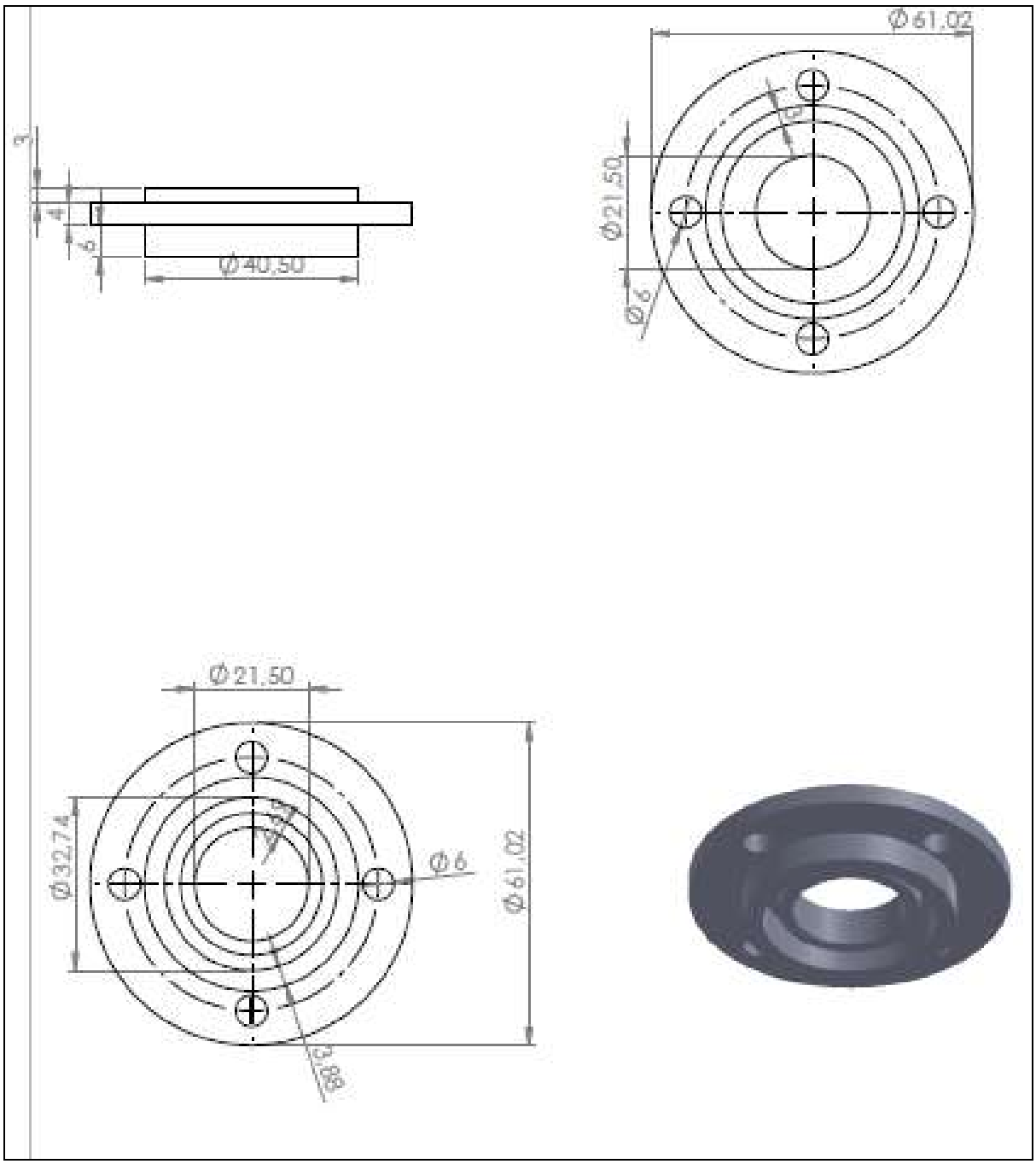
Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu de la broche aérostatique et énuméré ses avantages et ses inconvénients par rapport à une broche aérodynamique. Nous avons aussi donné une classification des roulements aérostatiques et leurs avantages dans le cas des broches ultra rapides. Un calcul préliminaire des paramètres de la turbine ont été effectué en se basant sur les données de la littérature pour ce type de broche. Ces calculs permettent de calculer les dimensions finales de la turbine et des paliers lors de la conception.



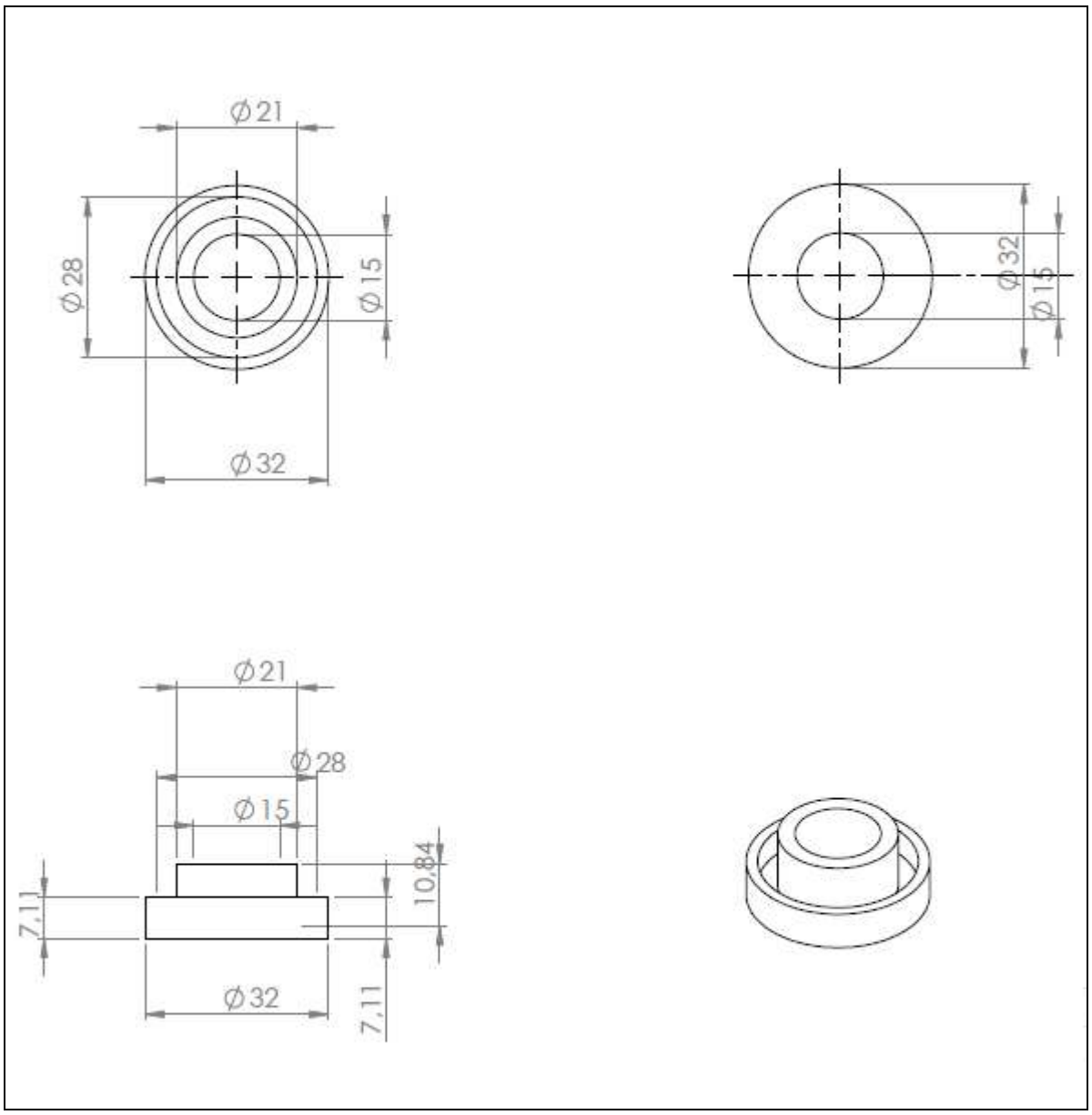
Figues 4.16 Schéma de principe avec une image 3D de l'entrée et de la sortie de l'air comprimé



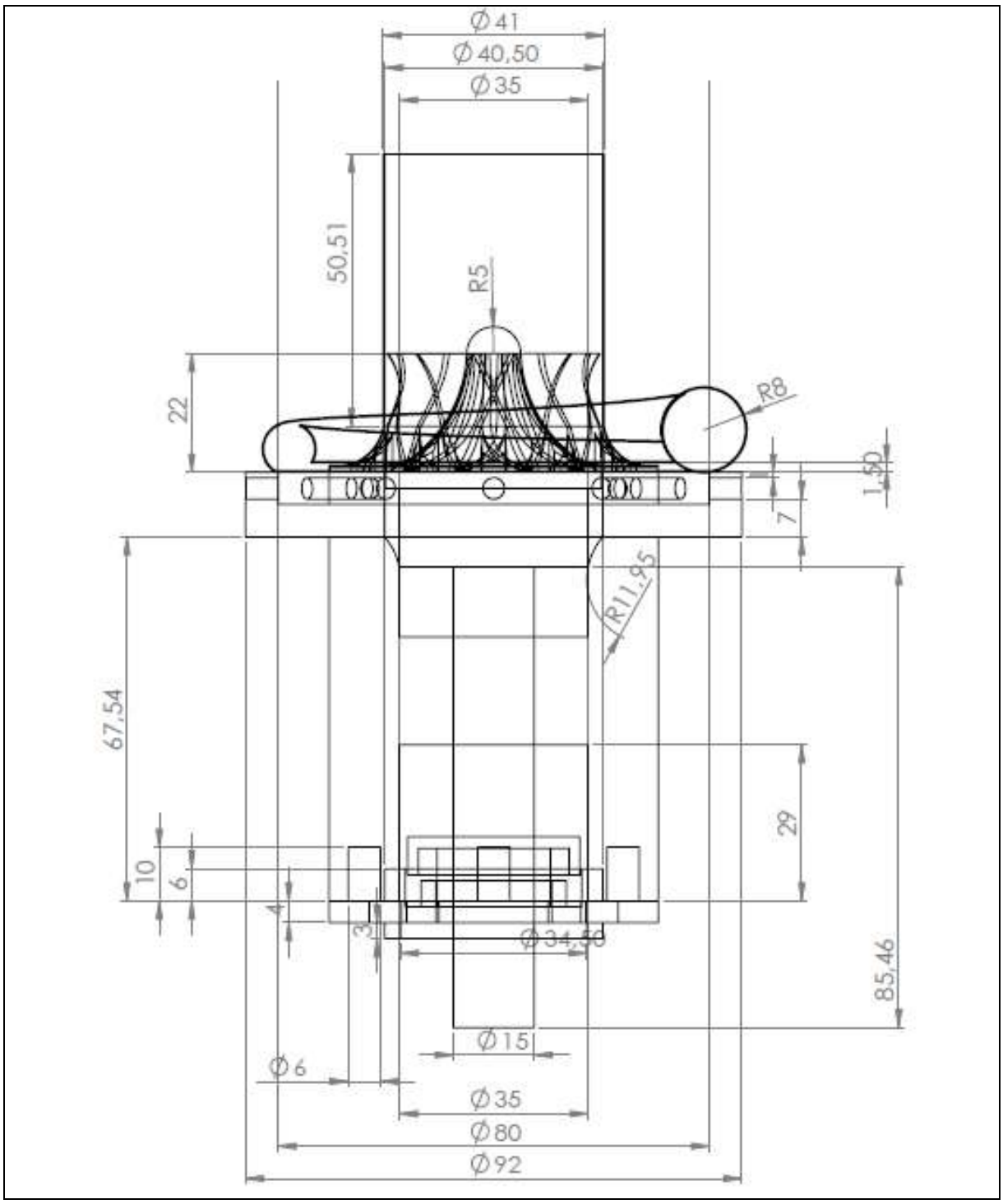
Figues 4.17 Schéma avec un hologramme du support



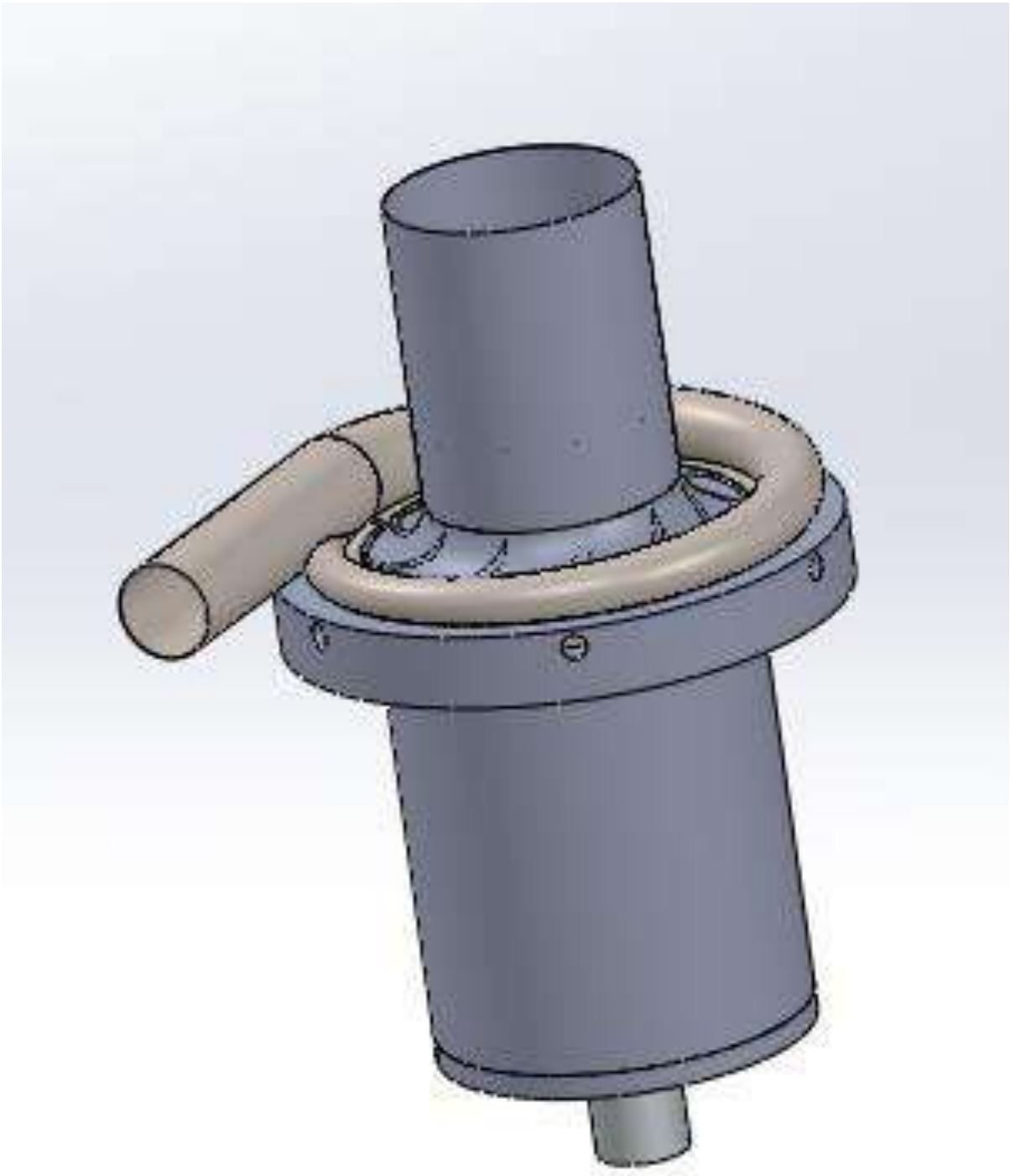
Figues 4.18 Dessin schématique avec un hologramme de la pièce d'appui



Figues 4.19 Dessin schématique avec un hologramme de la pièce d'appui



Figues 4.20 Schéma de principe montrant l'installation finale dl la broche



Figues 4.21 Hologramme montrant la composition finale de la broche

5 Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif tracé, au début de ce projet de fin d'études de Master, était de concevoir une broche pneumatique pour un routeur trois axes à commande numérique afin de réaliser des opérations de micro-usinage par fraisage. La démarche prévue consistait à faire :

- Les calculs préliminaires pour dimensionner la turbine, qui représente la pièce maitresse de l'ensemble, et à laquelle le rendement est fortement lié.
- Concevoir la turbine en utilisant le logiciel commercial Cf-Turbo®.
- Procéder à des simulations sous ANSYS® CFD pour évaluer les performances aérodynamiques et structurelles de l'étage de turbine.
- Etudier un certain nombre d'options pour réduire le poids et l'inertie du rotor en maintenant un rendement élevé de la broche.
- Evaluer les performances aérodynamiques à charge partielle de la turbine afin qu'elle puisse fonctionner sur une large plage de charges de couple et de vitesses.
- Enfin, réaliser la partie CAO sous SolidWorks avec les dessins de définition.

Malheureusement, la situation sanitaire vécue durant la période de stage, ne nous a pas permis de réaliser l'ambitieux plan de travail donné par nos encadreurs, et nous avons fait de notre mieux pour assimiler la partie bibliographique traitant des machines CNC, des broches aérostatiques pour micro-usinage de précision et des paliers à air. En plus nous avons effectué les calculs préliminaires pour la turbine. Les parties sensées être réalisées sous Cf-turbo et Ansys, n'ont malheureusement pas pu être accomplies à cause du confinement et de l'impossibilité de travailler avec notre encadreur en présentiel.

Enfin, nous espérons que ce travail servira de point de départ pour de futurs PFE, dans lesquels seront traitées toutes les étapes cités ci-dessus.

6 Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] ISO14955-1 Machine tools - Environmental evaluation of Machine Tools, Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools. 2012, International Organisation for Standardisation, Switzerland

[2] Schubert, A., et al. HPC for improved efficiency on standard machine tools by using new fluid-drive spindles. 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 2013. Berlin, Germany.

Beater, P., Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control. 2007, Berlin Springer

[3] McDonnell, G., D. Artt, and S. Spence, The design, development and testing of a hydraulic turbine dynamometer, 6th International Conference on Turbocharging and Air Management systems. 1998, IMechE: London,UK.

[4] Li, W., Zhou, Z. X., & Xiao, H. (2015). Design and evaluation of a high-speed and precision microspindle. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 78(5–8), 997–1004.

[5] Sung, H. (2007) High-speed fluid bearing micro-spindles for meso-scale machine tools (mMTs). PhD Dissertation, North-western University

[6] Jahanmir, S., Ren, Z., & Heshmat, H. (2010). Design and evaluation of an ultrahigh speed micro-machining spindle. Machining Science and Technology, 14(2), 224–243.

[7] Wardle, F. (2015). Ultra-Precision Bearings. Oxford: Woodhead Publishing.

Moustapha, H., Zelesky, M., & Baines, N. (2003). Axial and Radial Turbines. Wilder: Concepts ETI Inc.

[8] Harris, P., Linke, B., & Spence, S. (2016). A numerical investigation of a miniature pneumatic spindle turbine. Proceedings of the Bath/ASME symposium on fluid power and motion control.

[9] Harris, P. & all. (2019). Design and Development of a High Efficiency Air Turbine Spindle for Small-Part Machining. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. **7** , 915–928.

[10] Pai , B.U. (2013). Turbomachines. Wiley India.