

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT de GENIE MECANIQUE

N° :.....



DOMAINE : TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : PRODUCTIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Arslane Mustapha

Intitulé

Conception et Réalisation d'un Montage
d'usinage à la base du Principe de Six-Points

Soutenu devant le jury composé de:

Zaoui Moussa	Enseignant	Université de M'sila	Président
Slamani Mohamed	Enseignant	Université de M'sila	Encadreur
Amroune Salah	Enseignant	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère, à la mémoire de mon père et ma petite famille

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie le Dieu (Allah), notre créateur de m'avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier aussi, tous ceux qui par leurs conseils, encouragements, critiques ou discussions ont contribué à mon travail de mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de mémoire M. Mohamed SLAMANI, Maître de conférences à l'université de M'sila, pour sa disponibilité, ses nombreux encouragements, sa patience et toute la confiance qu'il m'a accordé durant le mémoire. Ces compétences et ces conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Il m'a apporté son soutien pour encadrer ce mémoire en me conseillant efficacement tout en me laissant travailler librement.

Je remercie vivement M. Mohamed ALI CHIKOUCHE, Le Président Directeur Général de MEI /spa (la société de Maintenance des Equipements Industriels), Filiale du Groupe Sonelgaz, ainsi que M. Djamel Eddine RIZOUG ZEGLACHE, Le Directeur des Ateliers au niveau de la même société, sans oublier M. Hachemi FERHAT, chef de projet PDR, pour leurs soutiens et accords à exploiter les équipements nécessaires dans l'intérêt de ce mémoire.

J'adresse des chaleureux remerciements à tous le personnel du staff pédagogique du département de génie mécanique, sans oublier le groupe des docteurs et enseignants qui a été consacré pour l'encadrement des étudiants, leurs soutiens ainsi que la bonne ambiance qu'ils ont entretenue dans les salles et les laboratoires et aussi pour la richesse des échanges scientifiques que j'ai pu avoir avec eux.

Enfin un grand merci à ma très chère mère, mon épouse pour ses précieux soutiens morales et ses encouragements, mes enfants YASSER, SOHEIB, ZAKARIA, ABDERRAHIM et IDRIS, mes sœurs, mes frères et enfin à tous mes amis.

Je vais conclure en ayant une pensée pour tous mes proches et ma famille qui m'ont toujours aidé et encouragé tout au long de ce travail. Je leur dédie à tous ce travail.

Sommaire

Sommaire	<i>i</i>
Abréviations	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	x
Introduction générale	1
 Chapitre I: Théorie Et Revue De Littérature	
I.1 Turbine à gaz :	4
I.1.1. Historique :	4
I.1.2. Définition :	4
I.1.3. Principe de fonctionnement :	4
I.1.4. Catégories des turbines à gaz :	6
I.1.4.1 : Turbine à gaz Type Frame Heavy Duty :	6
I.1.4.2 Turbines à gaz "dérivées de l'aviation" ou "aérodérivées" (Aircraft-Derivative Gas Turbines) :	6
I.1.4.3 Turbines à gaz industrielles :	6
I.1.4.4 Petites turbines à gaz:	9
I.1.4.5 Micro turbines à gaz :	9
I.1.5. Principales utilisations des turbines à gaz :	10
I.1.5.1 Production d'électricité	10
I.1.5.2 Production combinée chaleur-force	10
I.1.5.3 Pompage et compression	11
I.2. Conception et fabrication des ailettes :	11
I.2.1 Introduction:	11
I.2.2 Passage des gaz entre les ailettes fixes (vanes) et les ailettes mobiles (blades) :	11
I.2.3 : Matériaux utilisés et techniques de refroidissement :	13
I.2.3.1: Introduction:	13

I.2.3.2: Matériaux utilisés pour les ailettes turbines: _____	13
I.2.3.3 : Techniques de refroidissement : _____	15
I.2.3.3.1 Refroidissement par convection (convection cooling): _____	15
I.2.3.3.2 Refroidissement par impact (Impingement cooling) : _____	16
I.2.3.3.3 Refroidissement par film d'air: _____	16
I.2.3.3.4 Refroidissement par transpiration : _____	17
I.2.4: Processus de conception: _____	17
I.2.5 : Différents procédés de fabrication des ailettes : _____	18
I.3. Montages d'usinage : _____	18
I.3.1 : Définition et fonction d'un montage d'usinage : _____	18
I.3.1.1 : Définition d'un montage d'usinage : _____	18
I.3.1.2 : Fonctions d'un montage d'usinage : _____	18
I.3.2 : Les montages modulaires : _____	20
I.3.3 : Processus de conception du montage d'usinage : _____	21
I.3.4 : Démarche de conception du montage d'usinage : _____	21
 Chapitre II: Méthodologie	
II.1: Introduction: _____	23
II.2 : Position du problème : _____	23
II.3 : Objectifs : _____	24
II.4: Hypothèses: _____	26
II.5 : Méthodologie : _____	27
II.5.1 : Volet théorique et conception : _____	29
II.5.2 : Volet fabrication : _____	31
 Chapitre III: Conception Du Montage D'usinage	
III.1 : Introduction : _____	39
III.2 : Contraintes influençant la conception du montage d'usinage : _____	39
III.2.1: Contraintes physiques: _____	39
III.2.1.1 : La cinématique de la machine et l'accessibilité: _____	39
III.2.1.2 : La taille et la géométrie de la pièce et les autres éléments constituant le montage : _____	41
III.2.1.3 : La position de la pièce dans l'air de travail et son orientation : _____	43

III.2.2 : Contraintes d'assemblage :	45
III.2.3 : Contraintes de Fabrication :	46
III.2.4: Contraintes Esthétiques:	47
III.3: Localisation de la pièce :	49
III.3.1 : Principe de Six Points :	49
III.3.2 : Critères de choix des Six Points :	49
III.4 : Séquence des étapes de modélisation du montage de six points :	51
Chapitre IV: Réalisation Du Montage D'usinage	
IV.1 : Introduction:	56
IV.2 : Processus de fabrication :	56
IV.2.1 : La plaque de base :	56
IV.2.2 : Les éléments de liaison :	57
IV.2.3 : Éléments de positionnement :	58
IV.3 : Choix des outils et paramètres de coupe :	59
IV.3.1 : Choix des outils de coupe :	60
IV.3.2 : Paramètres de coupe :	60
IV.4 : Stratégies d'usinage :	68
Chapitre V: Étude de la validité Du montage d'usinage proposé	
V.1 : Introduction :	73
V.2 : Evaluation de la précision et de la répétabilité :	73
V.2.1 : Evaluation de la précision :	73
V.2.2 : Evaluation de la répétabilité :	76
V.3 : Analyse des résultats :	77
V.3.1 : Cas du plan incliné :	77
V.3.2 : Cas des 16 points aléatoires sur la pale d'ailette :	79
V.4 : Conclusion :	82
Conclusion Générale	83

<i>Annexe :</i>	84
<i>Références bibliographiques</i>	90
<i>Résumé :</i>	92
ملخ ص:	92

Abréviations

MMT : machine à mesure tridimensionnelle

EDM : usinage par électroérosion

ECM : usinage électrochimique

ECD : perçage électrochimique

CUV : centre d'usinage vertical

MU : montage d'usinage

TG : turbine à gaz

DMG: Deckel Maho Geildmeaster

MO: machine outil

MIP: mise en position

MAP: maintien en position

3D : trois dimensions

LP : basse pression

HP: haute pression

GE: general electric

IN: inconel

CAO : conception assistée par ordinateur

FAO / CAM : fabrication assistée par ordinateur

CFAO: conception et fabrication assistée par ordinateur

HMI: human interface machine

S: écart standard

I: distance entre la position atteinte et le barycentre des positions atteintes.

n : nombre de répétition.

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Turbine à gaz simple - notions de base. [3]	4
Figure I.2. Profil de température de la turbine. [2].....	5
Figure I.3: Turbine à gaz avec chambre de combustion annulaire (GE) [2].....	7
Figure I.4: Turbine à gaz avec chambre de combustion de type silo (Siemens) [1].....	7
Figure I.5: Coupe longitudinale d'une turbine à gaz aérodérivative [1].....	8
Figure I.6 : Turbine à gaz industrielle (medium size). [1].....	8
Figure I.7 : Coupe d'une petite turbine à gaz à flux radial montrant le rotor turbine. [1].....	9
Figure I.8: Schéma d'une micro turbine (Capstone Corporation). [1].....	10
Figure I.9 : Enchainement des étages d'aubes fixes et mobiles. [4].....	12
Figure I.10 : Ecoulement des gaz à travers les étages. [4].....	12
Figure I.11 : Schématisation du refroidissement par convection à l'intérieur d'une ailette [7]	15
Figure I.12 : Refroidissement par impact (Impingement cooling). [7].....	16
Figure I.13 : Refroidissement par application d'un film d'air sur la surface d'ailette. [7]	16
Figure I.14 : Processus de conception aérodynamique. [10].....	17
Figure I.15 : Les différents types de posage. [12].....	19
Figure I.16 : Les différents modes de bridage. [11].....	19
Figure I.17 : Exemple d'un montage modulaire. [11].....	20

CHAPITRE II

Figure II.1 : Disposition des éléments de positionnement et de bridage d'un montage sur une ailette turbine [13].....	24
Figure II.2.a : Schématisation des six points de référence au niveau de la pale (airfoil)	25
Figure II.2.b : Schématisation du nouveau référentiel après transfert.....	26
Figure II.3 : les différents acteurs qui agissent dans l'industrialisation d'un produit mécanique [1].....	28
Figure II.4: Images de quelques accessoires standards (AutoBlok).....	30
Figure II.5 : Centre d'usinage vertical (DMG).....	31
Figure II.6: Interface "ShopMill" sur CUV.....	32

Figure II.7: Pupitre HMI du CUV.....	32
Figure II.8 : Machine EDM- ONA AF35.....	33
Figure II.9 : Pupitre HMI de ONA AF35.....	34
Figure II.10 : Machine MMT (CMM) de la marque "HEXAGON".....	36
Figure II.11 : Palpeur 3D de la marque "Mitutoyo".....	36
Figure II.12 : Un cas d'une pièce qui n'a pas un contact avec les éléments de positionnement [15]..	37
Figure II.13 : Conséquences des vibrations sur une surface usinée [16].....	37
Figure II.14 : Représentation des éléments interchangeable sur notre montage d'usinage	37

CHAPITRE III

Figure III.1.a : Centre d'usinage vertical 5 axes se trouvant à MEI/Spa, modélisé et intégré dans la bibliothèque du logiciel de CFAO appelé TOPSOLID.....	40
Figure III.1.b : Espace de travail du centre d'usinage vertical.....	40
Figure III.2 : Quelques caractéristiques de la pièce à usiner au moyen de notre montage.....	41
Figure III.3 : Représentation des éléments de positionnement (d'appui) sur la plaque support.....	42
Figure III.4.a : Représentation de tous les composants du Montage d'usinage.....	42
Figure III.4.b : Représentation de l'ensemble pièce / montage d'usinage.....	43
Figure III.5 : Position et orientation de la pièce sur la table de la machine.....	44
Figure III.6 : Position horizontale de la pièce sur la table rotative.....	44
Figure III.7: Représentation de la plaque support en mode transparent avec les éléments de positionnement et leurs éléments de liaison.....	45
Figure III.8 : Exemple d'une pièce réalisée sur les deux machines CUV et EDM.....	46
Figure III.9 : Représentation graphique de l'usinage en finition sous forme de balayage 3 axes de la zone en contact avec la pièce.....	47
Figure III.10 : Accessoires standards de la marque AUTOBLOK sur la plaque support usinée.....	48
Figure III.11 : Eléments de positionnement et ces supports sur la plaque support usinée.....	48
Figure III.12 : Les mouvements possibles d'une pièce dans le système coordonné de Machine [17].....	49
Figure III.13 : Représentation des Six-points sur la pale d'ailette [18].....	50
Figure III.14 : Représentation des trois plans orthogonaux qui positionnent la pièce dans la turbine.....	50

Figure III.15 : Représentation des six points et les normales sur l'aillette.....	51
Figure III.16 : Représentation des appuis de référence sur l'aillette.....	51
Figure III.17 : Représentation des éléments fixes et mobiles pour les accessoires de soutien et de serrage.....	52
Figure III.18 : Position des composants du montage par rapport à la plaque de base, et cette dernière par rapport à la table de la MO.	53

CHAPITRE IV

Figure VI.1 : Vue générale du montage d'usinage avec le support extension intermédiaire.....	55
Figure IV.2 : Modèle CAD de la plaque de base indiquant les formes usinées pour chaque étape.....	56
Figure IV.3 : Modèle CAD d'un élément de liaison indiquant les formes usinées pour chaque étape.....	57
Figure IV.4.a : Modèle CAD illustre la découpe des appuis de référence pendant la première étape.....	58
Figure IV.4.b : Modèles CAD illustrent les surfaces de contact usinées des appuis de référence avec la pièce.....	59
Figure IV.6: Type de parcours.....	68
Figure IV.7: Type de remontée.....	69
Figure IV.8: Entre passes.....	70
Figure IV.9 : Type d'approche.....	70
Figure IV.10: Sens d'usinage.....	71

CHAPITRE V

Figure V.1 : Précision de positionnement et répétabilité [19].....	73
Figure V.2 : Ensemble ailette et MU sur la table de la MMT.....	75
Figure V.3 : Représentation des 20 points à mesurer sur l'aillette.....	75
Figure V.4 :	77
Figure V.5 :	77
Figure V.6 :	78
Figure V.7 :	78
Figure V.8 :	79

Figure V.9 :.....79

Figure V.10 :.....80

Figure V.11 :.....80

Figure V.12 :.....81

Figure V.13 :.....81

Figure V.14 :.....81

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Alliages pour les hautes températures (GE power Systems). [1].....	14
--	----

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristiques du CUV.....	33
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Liste des composants avec les matériaux correspondants.....	59
Tableau IV.2 : Représente les paramètres de coupe correspondants aux formes à usiner avec les outils adéquats.....	61

Introduction générale

Vue la demande croissante à l'énergie électrique d'une année à une autre, par la population algérienne et les infrastructures industrielles et économiques, et vue aussi les millions de devise dépensés chaque année pour l'achat des turbines à gaz et ces pièces de rechange, notamment les pièces nobles qui font partie de la section chaude de la TG, à savoir les ailettes mobiles et les ailettes fixes. L'état algérien et en but de satisfaire ces besoins, avait décidé de pénétrer ce domaine d'énergie et devenu un, parmi les constructeurs mondiales qui se comptent sur les doigts de la main, à travers le groupe SONELGAZ et ces filiales qui sont capables à prendre en charge le déficit.

MEI / Spa, société du groupe SONELGAZ, était la première qu'a pris l'initiative par ces propres moyens personnels et financiers. Cette filiale avait investi dans un nouveau projet qui se compose de deux parties, le Nouvel Atelier de fabrication de PDR installé en (2010), c'est un atelier équipé par des machines à CN de haute performance. La fonderie est le premier projet au niveau du continent africain qui sera opérationnel vers la fin de l'année (2017), et qui est capable de satisfaire largement le marché algérien, par un produit semi fini des ailettes mobiles et fixes.

En tant qu'ingénieur d'études techniques au début de ce projet, et récemment en tant qu'ingénieur de réalisation. Je mis cette étude de mémoire, qui est le résultat de cinq années de travail, de persévérance, d'essais, de modélisation, de manipulation et de concrétisation des résultats satisfaisants. Et avec l'accompagnement, le soutien et l'encadrement d'un professeur compétent, souple et conseiller, nous sommes arrivés à faire ce travail de mémoire sous le thème : Conception et Réalisation d'un Montage d'usinage à la base du principe de Six-points (d'une pièce à géométrie complexe) : application sur une ailette mobile d'une TG de puissance 135 MW.

Un montage d'usinage (fixture) est un équipement de production qui localise, fixe et maintient la pièce à usiner durant les opérations de l'usinage dans le but d'avoir un bon produit. Un montage doit fixer une succession de pièces d'une même géométrie dans des positions identiques, le montage d'usinage se varie relativement d'un outil simple à un équipement cher et complexe. Il est conçu de telle façon à maintenir la pièce à usiner pour diverses opérations dans diverses machines outils standards.

L'objectif de ce mémoire est d'apporter une contribution dans le domaine de la conception et la réalisation des montages d'usinage destinés pour la MIP et le MAP des pièces à géométries complexes, tout en basant sur l'expérience de quelques années de travail dans le domaine, et mettant en compte toutes les difficultés que notre montage peut affronter dès la phase de conception jusqu'à la phase de validation.

Pour répondre à tous ces soucis, nous structurons ce travail en cinq (05) chapitres successifs dans un ordre logique :

- Le premier est une théorie et revue de littérature, qui se compose de trois axes : l'un présente de façon générale les Turbines à gaz : Historique, définition, principe de fonctionnement, ces catégories et utilisations, l'autre s'intéresse à la conception et fabrication des ailettes et le dernier s'occupe de montage d'usinage, ça définition, ces fonctions, processus et démarches de conception.
- Dans le deuxième chapitre, nous exposons la Méthodologie adoptée en but d'achever ce travail, tout d'abords nous décrivons la position du problème puis les objectifs de ce travail, ensuite nous présentons les hypothèses et les différents volets de la méthodologie.
- Dans le troisième chapitre, nous donnons les différentes contraintes influençant la conception du MU, puis le concept du principe de Six-Points, et enfin une séquence des étapes de conception du montage d'usinage.
- Le quatrième chapitre, présente le processus de fabrication des différents composants du MU, le choix des outils et les paramètres de coupe et par la suite, les stratégies d'usinage qu'ont été mises en œuvre lors de la réalisation.
- Le dernier chapitre est consacré pour l'évaluation de la précision et la répétabilité du montage proposé, par l'analyse des résultats des tests que notre montage avait subi.

Après l'analyse des cinq chapitres, nous finissons notre étude par une conclusion générale explicite, du Processus de conception et de réalisation d'un Montage d'usinage pour des pièces à géométrie complexe.

Chapitre I

Théorie Et Revue De Littérature

I.1 : Turbine à gaz :**I.1.1 : Historique :**

Les premières turbines à gaz ont été fabriquées au début du XX^e siècle, en France par une société anonyme des Turbomoteurs à Paris, et en Suisse par la Société Brown Boveri à Neuchatel. Le travail net produit par ces machines est égal à la différence entre le travail utile fourni par la turbine et le travail nécessaire pour comprimer l'air, dans les premières réalisations, il était très faible, et ce n'est qu'à partir des années 30 que les applications industrielles ont vraiment commencé à se développer, grâce à l'amélioration des performances des compresseurs et des turbines, essentiellement due aux progrès réalisés dans la compréhension des écoulements gazeux, qui se poursuivent encore aujourd'hui grâce à la modélisation 3D.

Depuis une quinzaine d'années, les turbines à gaz connaissent un très fort développement dans de nombreuses applications : transport aérien, production d'électricité, cogénération, entraînement de machines (compresseurs et pompes), propulsion maritime, où elles font une percée croissante, comme arguments en leur faveur, mentionnons leur faible encombrement, leur excellent rapport puissance / poids, leur bon rendement, et leurs faibles émissions de polluants.

I.1.2 : Définition :

Une turbine à gaz est un moteur thermique à combustion interne produisant de l'énergie mécanique à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure.

I.1.3 : Principe de fonctionnement :

Un compresseur constitué d'un ensemble de roues munies d'ailettes comprime l'air extérieur ambiant à une pression comprise entre 10 et 30 bars environ, du gaz est injecté dans la chambre de combustion ou il se mélange à l'air comprimée et s'enflamme, les gaz chauds se détendent en traversant la turbine transformant l'énergie thermique en énergie mécanique (figure I.1.1).

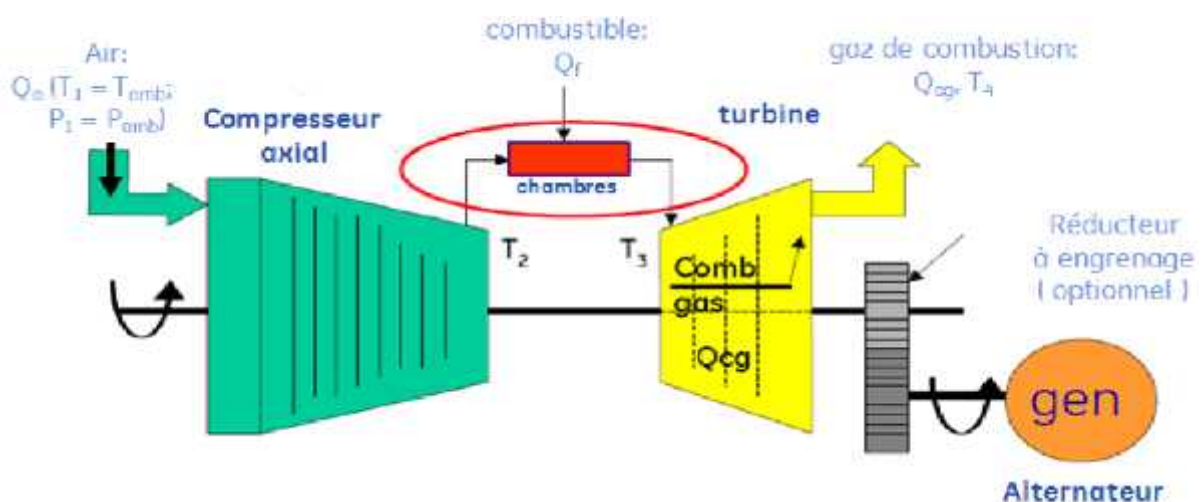


Figure I.1 : Turbine à gaz simple - notions de base. [3]

Pour atteindre des taux de compression r de 20 ou 30, **le compresseur** est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé, les rotors axiaux sont constitués d'un empilage de disques, soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie, les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C.

La **chambre de combustion** est construite en alliage réfractaire, dans les turbines à gaz, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la turbine de détente, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température.

Les pièces les plus exposées sont les ailettes (mobiles ou fixes) se trouvant dans les étages de haute pression ou les températures des gaz dépassent les limites des spécifications du matériau, notamment les aubages du rotor, qui sont très difficiles à refroidir. La figure I.1.3 représente l'effet des trous de refroidissement au niveau de la pale (airfoil), les ailettes sans trous de refroidissement sont disposées où la température des gaz est inférieure à la limite critique du matériau, et de plus, ces aubes sont très sensibles à l'abrasion, il est important donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages. Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et parfois renforcés par des barrières thermiques en céramique ou autres.

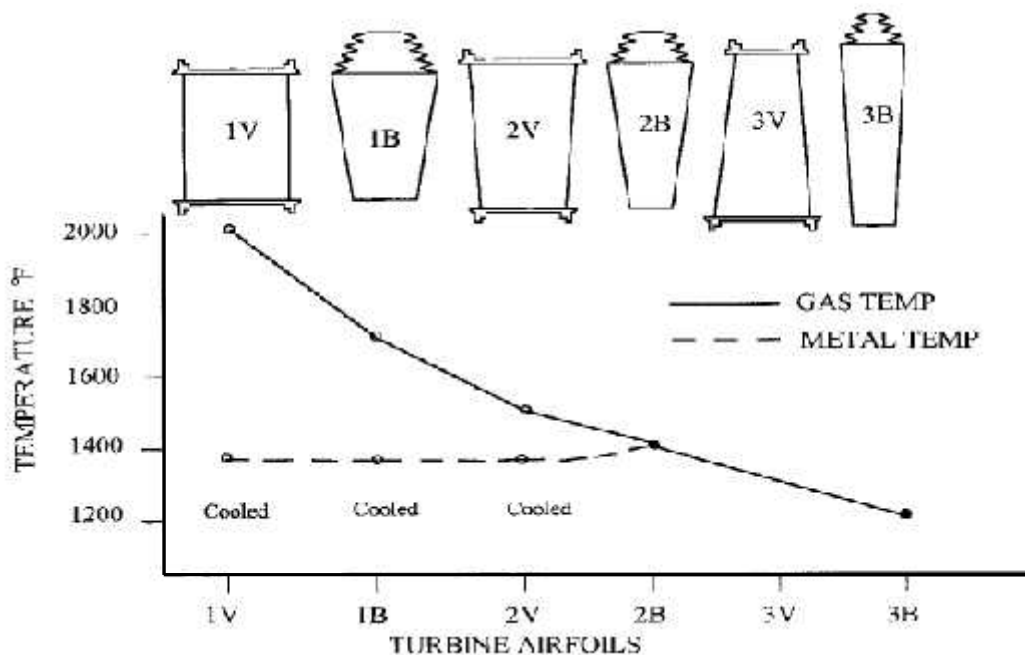


Figure I.2 : Profil de température de la turbine. [2].

I.1.4 : Catégories des turbines à gaz :

La turbine à gaz est classée en cinq grands groupes, où on distingue :

I.1.4.1 : Turbine à gaz Type Frame Heavy Duty :

Ce type constitue la gamme la plus large dans les unités de production de l'énergie ou elle se varie entre 3 MW à 480 MW pour les turbines d'une configuration à cycle simple, les intervalles de service sont environ 100,000 heures (12.5 ans), ces turbines sont conçues pour fonctionner en continu pendant des périodes allant jusqu'à 8000 heures (1 année) avec seulement une petite inspection annuelle.

La température dans la chambre de combustion, et plus particulièrement au niveau des premiers étages des ailettes (mobiles ou fixes) a été augmentée au-delà de 2500°F (1371°C) dans certains types de turbines à gaz et par conséquent l'augmentation de la puissance fournie, et aussi de 50% du rendement. Cette température pourra atteindre 3000°F (1649°C), ce qui va rendre les turbines à gaz plus puissantes et plus efficaces, pour cela un système de refroidissement spécifique par la vapeur suivant un cycle fermé a été prévu dans les designs récents dans le but de maintenir la température des matériaux des aubes inférieure à 1300°F (704°C) et de prévenir les problèmes de corrosion. Comme exemples, la figure I.1.3 et la figure I.1.4 représentent deux configurations différentes pour ce type de turbines, la première appartient à GE où la chambre de combustion a une forme annulaire, et la deuxième appartient à Siemens où la chambre de combustion a une forme de silo [1].

I.1.4.2 : Turbines à gaz "dérivées de l'aviation" ou "aérodérivées" (Aircraft-Derivative Gas Turbines) :

Ces turbines sont beaucoup plus légères et performantes (η entre 35 et 42 %), mais aussi plus chères, la puissance générée par ces machines aérodérivées est généralement comprise entre quelques centaines de kW et quelques dizaines de MW (de 2.5 MW à 50 MW), correspondant à celles des moteurs aéronautiques (Figure I.1.5), leur efficacité se varie entre 35 % et 45% [1].

I.1.4.3 : Turbines à gaz industrielles :

Ce type de turbines peut générer une puissance de sortie de 2.5 MW à 15 MW, elles sont utilisées largement dans les domaines pétrochimiques pour l'entraînement des compresseurs (Figure I.1.6), l'efficacité de ce type est inférieure à 30% [1].

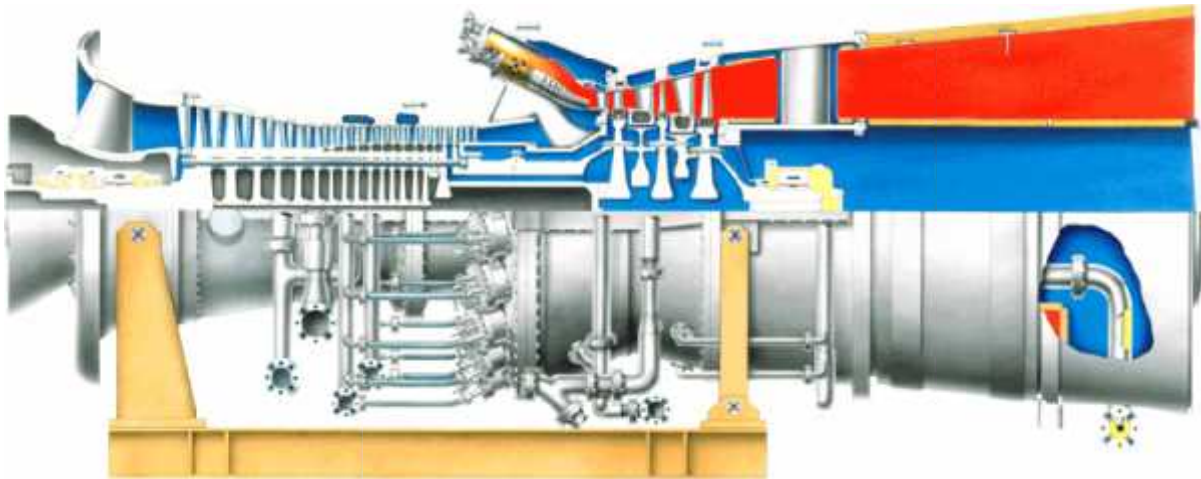


Figure I.3: Turbine à gaz avec chambre de combustion annulaire (GE) [2].

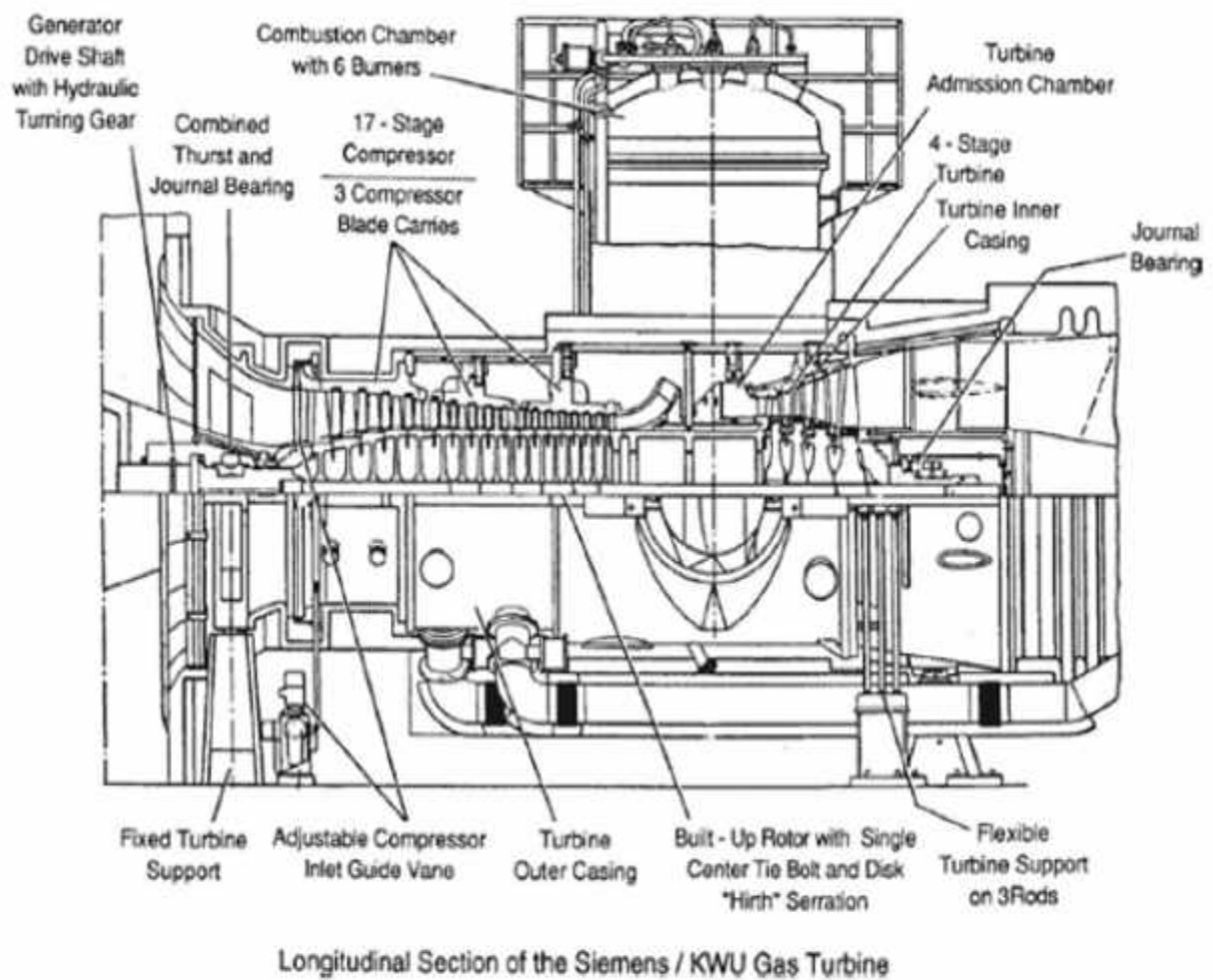


Figure I.4: Turbine à gaz avec chambre de combustion de type silo (Siemens) [1].

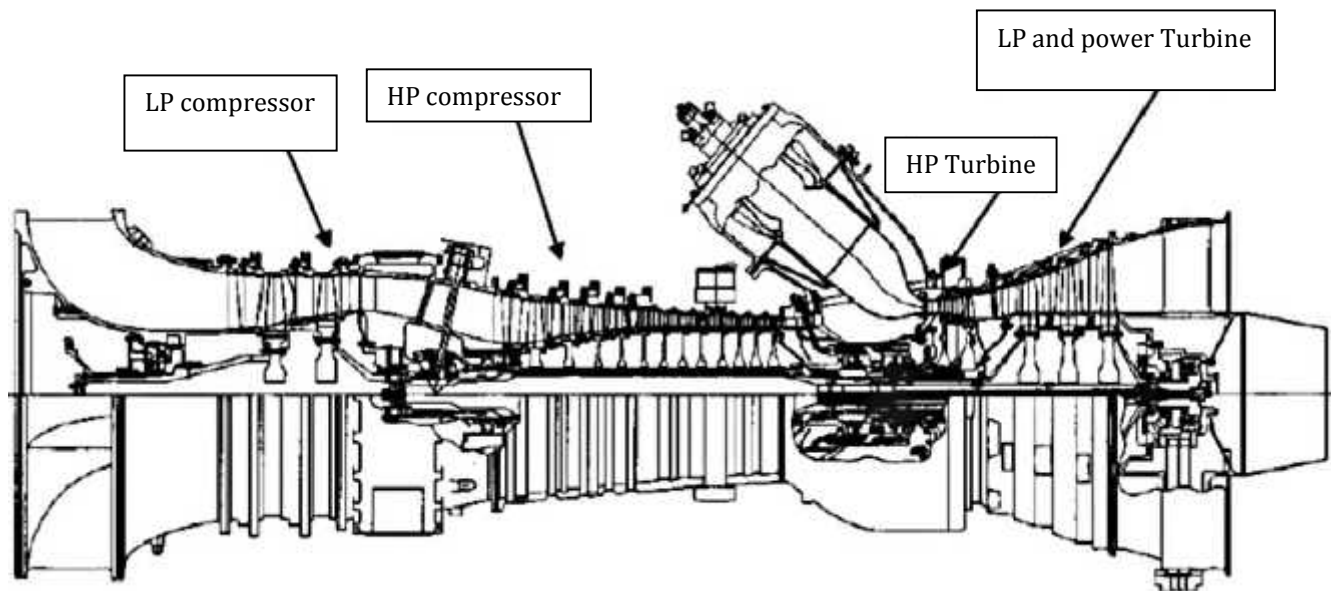


Figure I.5: Coupe longitudinale d'une turbine à gaz aérodérivée [1].

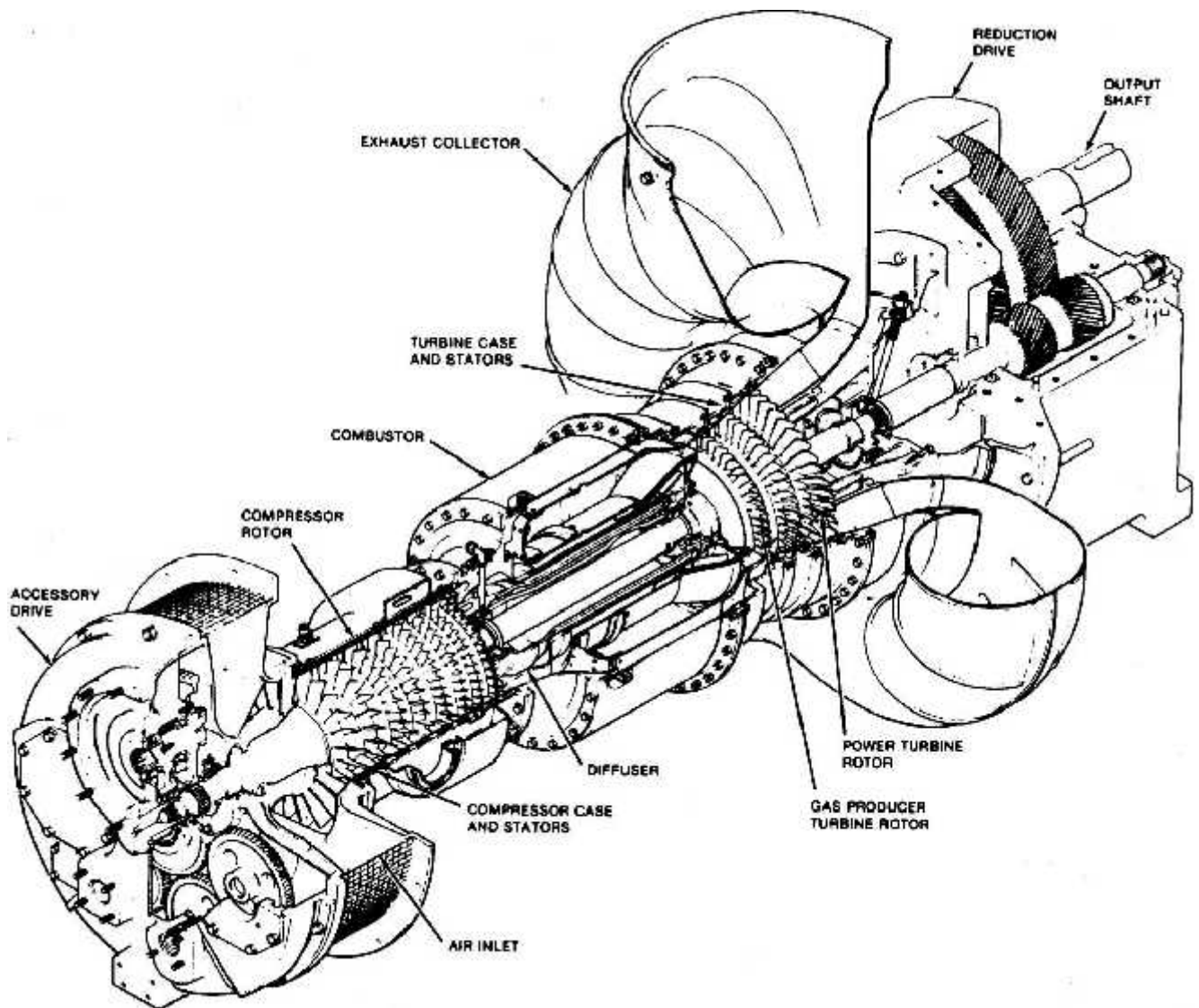


Figure I.6 : Turbine à gaz industrielle (medium size). [1]

I.1.4.4 : Petites turbines à gaz:

Ces turbines à gaz sont dans la plage d'environ 0.5 MW–2.5 MW. Elles ont souvent un compresseur centrifuge et une chambre de combustion d'admission radiale (Figure I.1.7). L'efficacité d'une configuration d'une turbine à cycle simple varie d'environ 15–25% [1].

I.1.4.5 : Micro turbines à gaz :

Ce type de turbine est dans la plage d'environ 20 kW–350 kW, sa croissance a été spectaculaire à partir de la fin des années 1990 (Figure I.1.8), car il y'a une recrudescence dans le marché de la distribution de l'énergie [1].

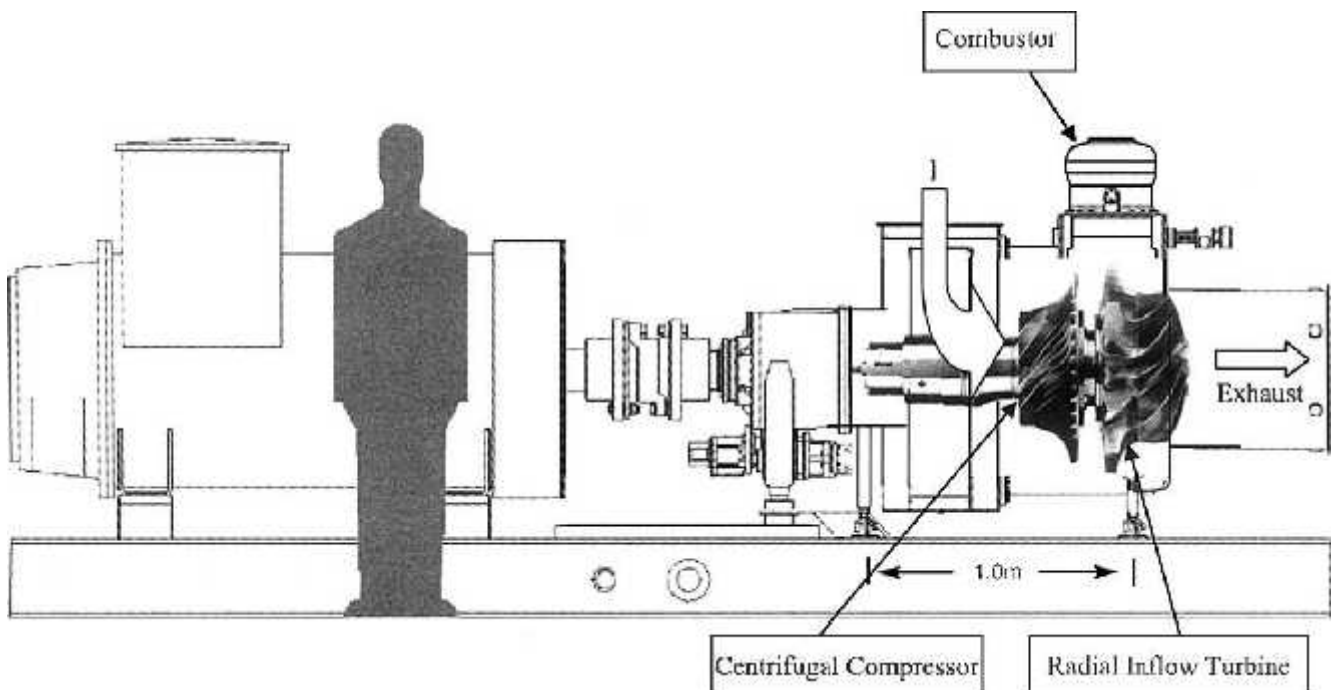


Figure I.7 : Coupe d'une petite turbine à gaz à flux radial montrant le rotor turbine. [1]

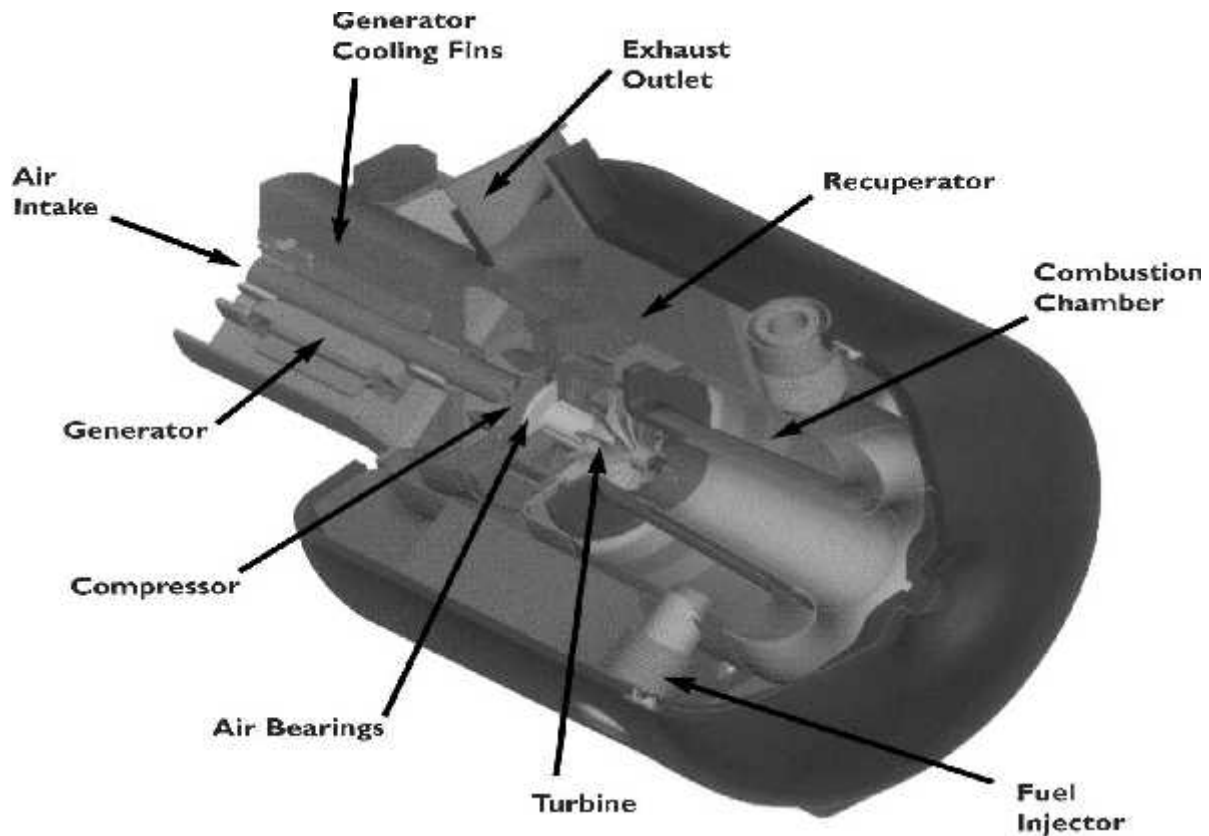


Figure I.8: Schéma d'une micro turbine (Capstone Corporation). [1]

I.1.5 : Principales utilisations des turbines à gaz :

Il y'a un nombre important de paramètres spécifiques qui peuvent définir chaque cas d'application d'une turbine à gaz tel que : type de combustible, durée de fonctionnement par an, températures extérieures extrêmes, montage, nuisances, etc. Il en résulte qu'une installation de turbine à gaz doit être personnalisée afin de répondre aux conditions d'exploitation envisagées. Dans ce qui suit on va citer quelques domaines principaux d'utilisation des turbines à gaz [12].

I.1.5.1 : Production d'électricité

Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre qui tourne à petite vitesse entraîne un alternateur. Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur.

I.1.5.2 : Production combinée chaleur-force

Ce type d'application est le plus courant car il permet :

- sur le plan national, d'économiser l'énergie fossile, gazeuse ou liquide.
- sur le plan industriel, d'économiser sur les dépenses énergies.

I.1.5.3 : Pompage et compression

Dans tous les types d'application étudiés, il est tout à fait possible de remplacer l'alternateur entraîné par une pompe, par un compresseur ou une soufflante. Le choix entre une turbine à un ou à deux arbres dépend du type de machine accouplé à la turbine et du mode d'exploitation envisagé.

I.2 : Conception et fabrication des ailettes :**I.2.1 : Introduction:**

Les ailettes turbines soient fixes ou mobiles sont l'un des composants le plus important dans les turbines à gaz, une ailette peut être définie comme étant le moyen de transfert d'énergie des gaz vers le rotor turbine. L'ailette est soumise à des différentes contraintes thermiques, à une corrosion par érosion, et à une foule d'autres paramètres hostiles entravant son bon fonctionnement. Pour survivre dans cet environnement difficile, les ailettes turbines sont souvent constituées d'un matériau exotique tel que les superalliages, et de nombreuses méthodes de refroidissements différentes comme les canaux d'air internes, et les revêtements de barrière thermique.

I.2.2 : Passage des gaz entre les ailettes fixes (vanes) et les ailettes mobiles (blades) :

Comme illustré dans la figure I.2.1, chaque étage de la turbine se compose d'une rangée d'aubes (ou ailettes) fixes sous forme d'anneau, suivi d'une rangée d'aubes tournantes (ailettes mobiles), avec un ordre inverse dans le cas du compresseur. Dans le compresseur l'énergie est ajoutée au gaz par les ailettes du rotor, puis convertie en pression statique par les aubes du stator (aubes fixes). Dans la turbine, les aubes fixes augmentent la vitesse des gaz, puis les aubes mobiles du rotor extraient l'énergie.

Les ailettes fixes et mobiles assurent un écoulement régulier de gaz. Lorsque le flux d'air pénètre dans la section turbine à partir de la section de combustion, il est accéléré à travers les aubes de stator de premier étage. Pour accélérer de plus le gaz, les aubes fixes tournent l'écoulement pour le diriger vers les aubes mobiles du rotor suivant un angle optimal. Lorsque la masse du gaz à grande vitesse passe à travers les ailettes turbine, l'énergie gazeuse est convertie en énergie mécanique, la Figure I.2.2 représente l'écoulement des gaz à travers un étage de la turbine.

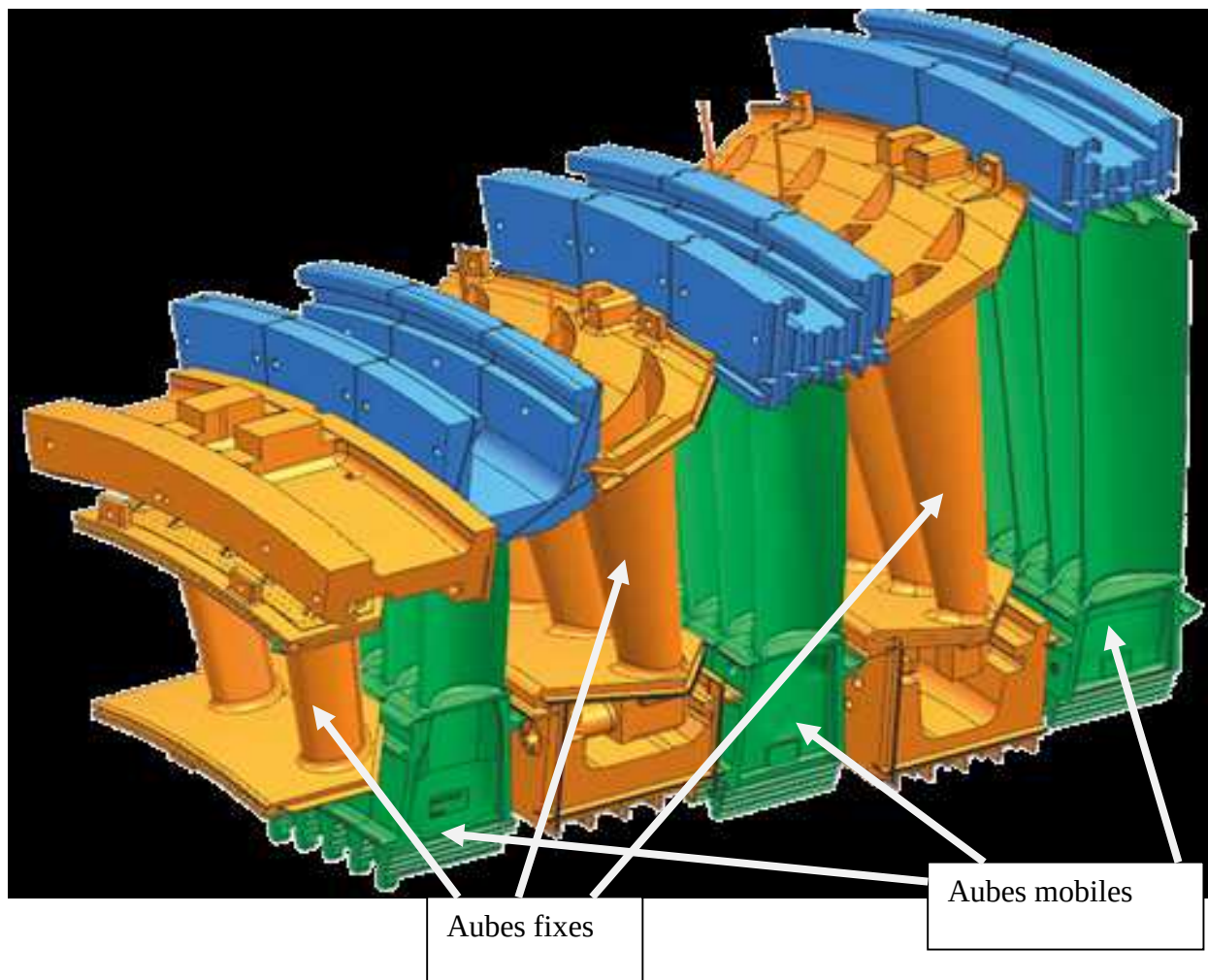


Figure I.9 : Enchainement des étages d'aubes fixes et mobiles. [4]

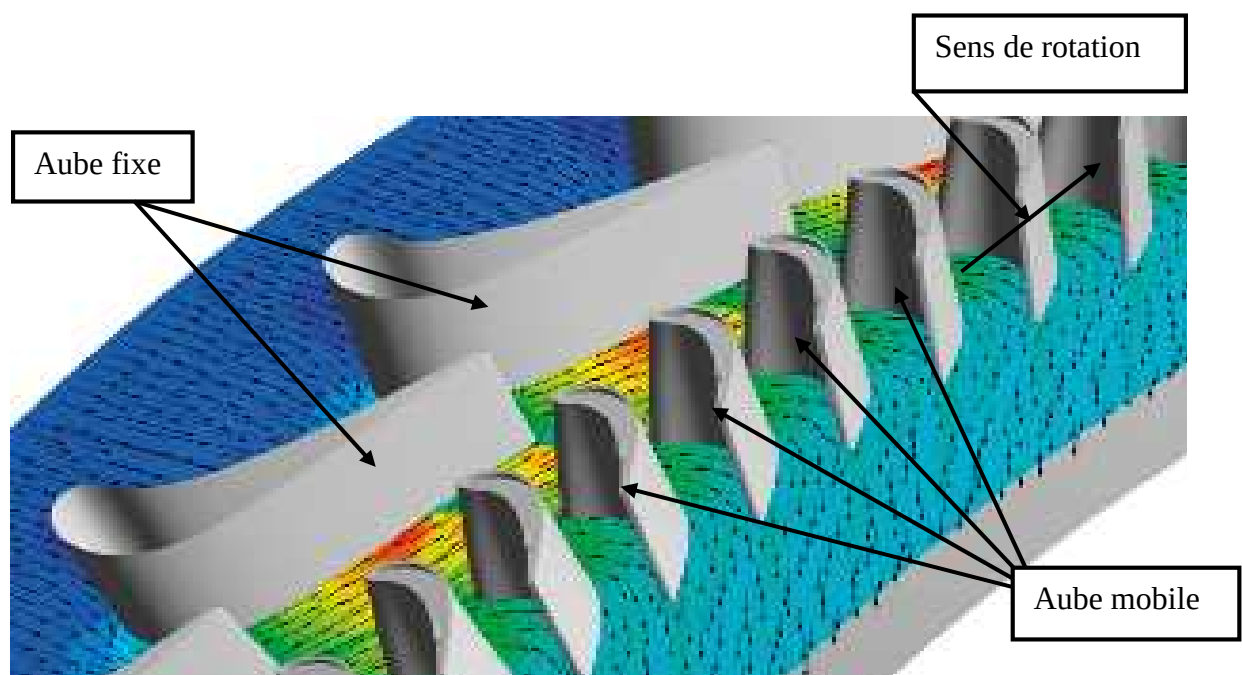


Figure I.10 : Ecoulement des gaz à travers les étages. [4]

I.2.3 : Matériaux utilisés et techniques de refroidissement :**I.2.3.1: Introduction:**

Dans les premières années de développement des turbines à gaz, les augmentations de la capacité de la température de l'alliage de l'ailette ont contribué à l'augmentation de la température de combustion, jusqu'à que le refroidissement par l'air a été introduit qui a découplé la température de combustion de la température de métal de l'ailette. Aussi, comme les températures de métal approchées de la plage de 1600°F (870°C), la résistance des ailettes à la corrosion est devenue plus limitée jusqu'à que la protection par revêtement (coating) a été introduite [1].

I.2.3.2: Matériaux utilisés pour les ailettes turbines:

La composition des nouveaux et conventionnels alliages dans toute la turbine sont représentés dans le tableau I.1 [1]. Ce tableau décrit les matériaux utilisés par GE dans la ligne de production des turbines, mais ces matériaux sont communs pour tous les constructeurs des TAG, même s'il peut y avoir quelques variations dans la composition des alliages.

Dans les années 1980, les alliages à base de Nickel IN 738 ont été largement utilisés, d'où ils étaient la norme de corrosion reconnue pour l'industrie. Des nouveaux alliages, tel que GTD-111 ont été développés et brevetés par GE au milieu des années 1970. [1].

Component	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta
Turbine Blades													
U500	18.5	BAL	18.5	-	-	4	3	3	-	-	0.07	0.006	-
RENE 77 (U700)	15	BAL	17	-	-	5.3	3.35	4.25	-	-	0.07	0.02	-
IN738	16	BAL	8.3	0.2	2.6	1.75	3.4	3.4	0.9	-	0.10	0.001	1.75
GTD111	14	BAL	9.5	-	3.8	1.5	4.9	3.0	-	-	0.10	0.01	2.8
Turbine Nozzles													
X40	25	10	BAL	1	8	-	-	-	-	-	0.50	0.01	-
X45	25	10	BAL	1	8	-	-	-	-	-	0.25	0.01	-
FSX414	28	10	BAL	1	7	-	-	-	-	-	0.25	0.01	-
N155	21	20	20	BAL	2.5	3	-	-	-	-	0.20	-	-
GTD-222	22.5	BAL	19	-	2.0	2.3	1.2	0.8	-	0.10	0.008	1.00	-
Combustors													
SS309	23	13	-	BAL	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-
HAST X	22	BAL	1.5	1.9	0.7	9	-	-	-	-	0.07	0.005	-
N-263	20	BAL	20	0.4	-	6	2.1	0.4	-	-	0.06	-	-
HA-188	22	22	BAL	1.5	14.0	-	-	-	-	-	0.05	0.01	-
Turbine Wheels													
Alloy 718	19	BAL	-	18.5	-	3.0	0.9	0.5	5.1	-	0.03	-	-
Alloy 706	16	BAL	-	37.0	-	-	1.8	-	2.9	-	0.03	-	-
Cr-Mo-V	1	0.5	-	BAL	-	1.25	-	-	-	0.25	0.30	-	-
A286	15	25	-	BAL	-	1.2	2	0.3	-	0.25	0.08	0.006	-
M152	12	2.5	-	BAL	-	1.7	-	-	-	0.3	0.12	-	-
Compressor Blades													
AISI 403	12	-	-	BAL	-	-	-	-	-	-	0.11	-	-
AISI 403 + Cb	12	-	-	BAL	-	-	-	-	0.2	-	0.15	-	-
GTD-450	15.5	6.3	-	BAL	-	0.8	-	-	-	-	0.03	-	-

Tableau I.1 : Alliages pour les hautes températures (GE power Systems). [1]

I.2.3.3 : Techniques de refroidissement :

Depuis les années 1950, l'évolution des procédés d'obtention de la coulée des ailettes brutes, de forgeage vers la coulée conventionnelle ensuite vers la solidification directionnelle et enfin le monocristal avait cédé une augmentation de 250°C concernant la température admissible critique de l'alliage. D'une autre part, le développement du refroidissement à l'air a presque doublé cette valeur en termes de température des gaz d'entrée de la turbine. L'utilisation du refroidissement à la vapeur pour accroître davantage l'efficacité des turbines à cycles combinés dans les chambres de combustion a été introduite vers le milieu et la fin des années 1990. Ce type de refroidissement des ailettes fixes et mobiles (blades and nozzles) a été introduit à des fins commerciales en l'an 2002. [6].

Les quatre techniques suivantes sont utilisées pour le refroidissement à l'air des ailettes turbines, ces techniques sont : la convection, refroidissement par impact (impingement), refroidissement par film et par transpiration. [7].

I.2.3.3.1 Refroidissement par convection (convection cooling):

Le refroidissement par convection implique que l'air soit dirigé vers l'écoulement à l'intérieur des ailettes fixes et mobiles, en éliminant la chaleur du matériau. L'écoulement est habituellement radial, faisant des passages multiples à travers les ailettes. La Figure I.2.3 schématise ce type de refroidissement à travers l'ailette.

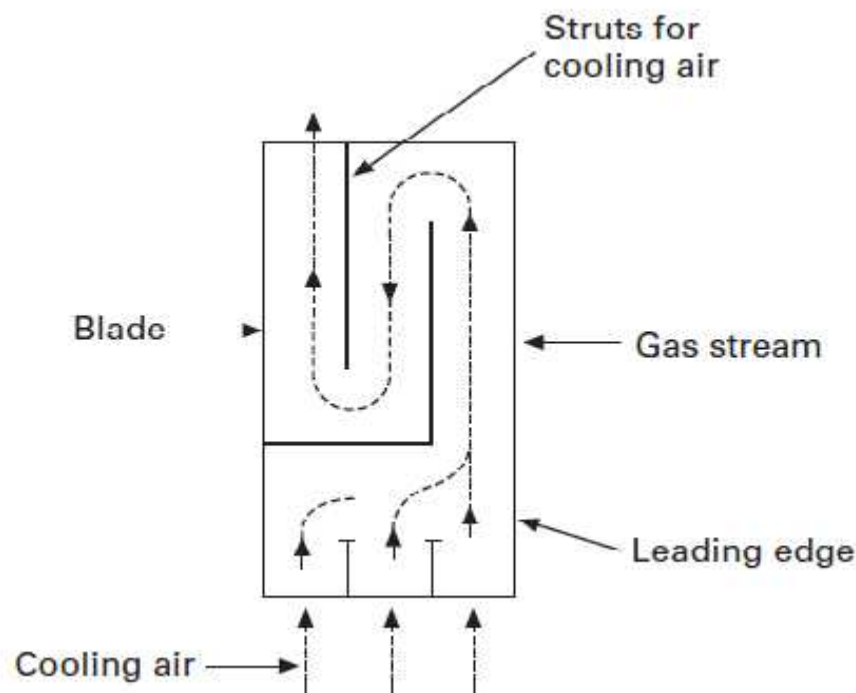


Figure I.11 : Schématisation du refroidissement par convection à l'intérieur d'une ailette. [7].

I.2.3.3.2 Refroidissement par impact (Impingement cooling) :

Ce type de refroidissement est similaire au refroidissement par convection mais avec une intensité plus élevée. L'air turbulent est forcé de frapper les surfaces internes de l'ailette, notamment au niveau du bord d'attaque, où la température maximale de l'ailette se produit habituellement (point de stagnation). Un exemple de refroidissement par impact du bord d'attaque d'une ailette est représenté dans la figure I.2.4.

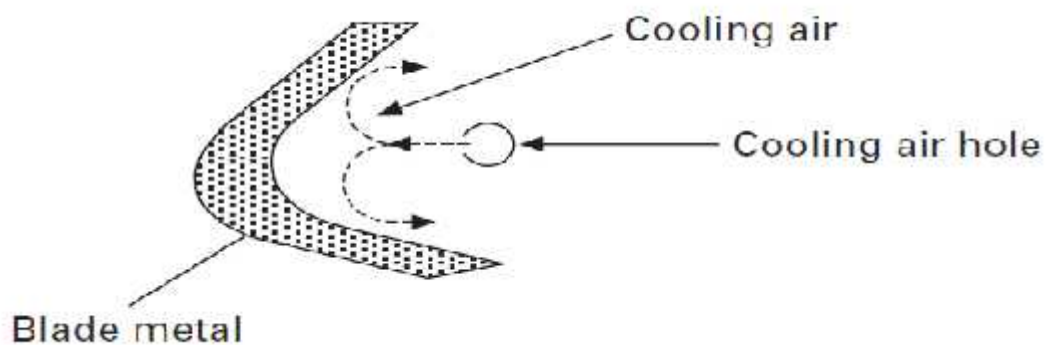


Figure I.12 : Refroidissement par impact (Impingement cooling). [7].

I.2.3.3.3 Refroidissement par film d'air:

Ce type de refroidissement est réalisé en permettant à l'air de s'écouler sur l'ailette, formant ainsi une couche isolante pour protéger le matériau de l'ailette des gaz chauds. La figure I.2.5 montre l'écoulement de l'air sous forme de film à travers des fentes sur la surface de l'ailette.

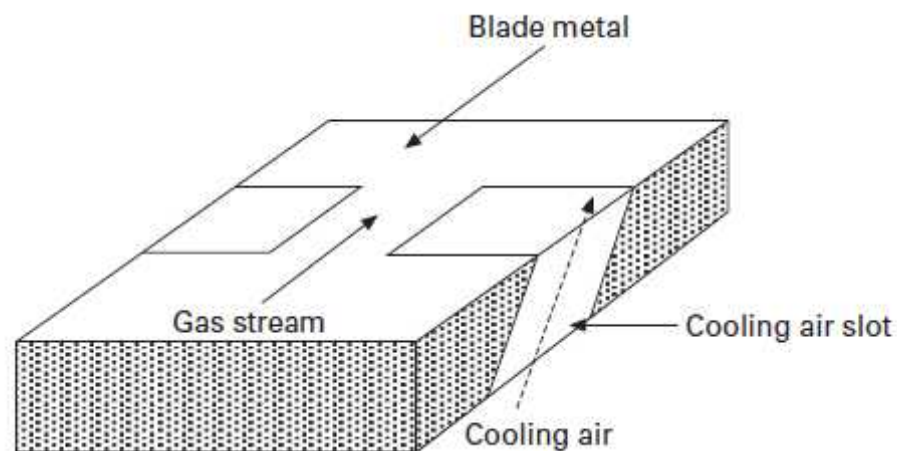


Figure I.13 : Refroidissement par application d'un film d'air sur la surface d'ailette. [7].

I.2.3.3.4 Refroidissement par transpiration :

Ce type de refroidissement est similaire au précédent, néanmoins l'air s'écoule à travers des sections poreuses de la paroi de la pale d'ailette. L'air peut couvrir toute la pale et est donc très efficace pour des applications à très haute température, mais ce type de refroidissement, a un effet négatif sur l'efficacité de la turbine.

I.2.4: Processus de conception:

Le nombre des étages de la turbine peut avoir un grand effet sur la conception des ailettes pour chaque étage, la partie haute pression est exposée à l'air le plus chaud et à la pression la plus haute, et la partie basse pression est soumise à un air plus froid et à une pression plus basse. Cette différence de conditions conduit la conception des ailettes de turbine à haute et basse pression à être sensiblement différente dans les choix de matière et les techniques de refroidissement même si les principes aérodynamiques et thermodynamiques sont les mêmes. Le processus de conception d'une turbine à gaz est un processus itératif entre différentes phases de complexité où le résultat d'une phase est l'entrée à la suivante. [8]. La figure I.2.6 montre le processus de conception de base d'une perspective aérodynamique.

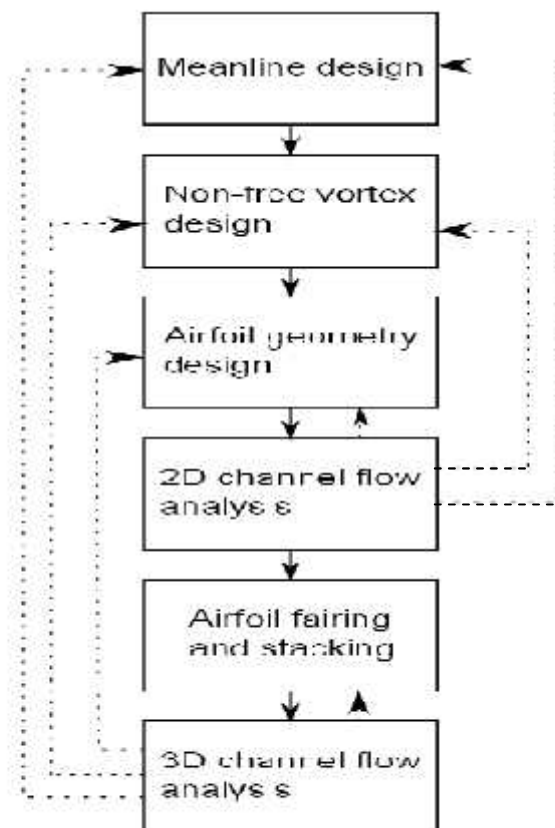


Figure I.14 : Processus de conception aérodynamique. [10]

I.2.5 : Différents procédés de fabrication des ailettes :

Les quatre différentes techniques de fabrication des ailettes sont :

- Forgeage.
- Fonderie.
- Fabrication
- Métallurgie des poudres.

L'usinage est une phase indispensable durant la fabrication des ailettes, il permet de donner la forme et les dimensions finales de l'ailette. Durant l'usinage, l'ailette doit être positionnée précisément dans l'espace de travail de la machine-outil. Puisque les ailettes ont des formes complexes et non standards, on aura besoin donc d'un montage d'usinage spécial.

I.3 : Montages d'usinage :**I.3.1 : Définition et fonction d'un montage d'usinage :****I.3.1.1 : Définition d'un montage d'usinage :**

Un montage d'usinage est un dispositif qui permet la fixation d'une pièce solidement à la bonne position dans l'espace de travail de la machine outil, afin d'obtenir une pièce usinée de bonne qualité. Un montage d'usinage doit respecter les contraintes suivantes:

- Garantir un libre accès des outils de coupe aux surfaces à usiner,
- Garantir la qualité de la pièce à usiner,
- Garantir la stabilité de la pièce sous les sollicitations dues aux efforts de coupe,
- Garantir un montage et un démontage aisé de la pièce,
- Permettre l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe,
- Garantir la sécurité de l'opérateur pour la mise en œuvre du montage.

I.3.1.2 : Fonctions d'un montage d'usinage :

Chaque montage d'usinage doit satisfaire les fonctions suivantes :

- **Positionner la pièce** : Afin de respecter l'isostatisme et assurer le maximum de précision et de stabilité, la pièce doit être positionnée précisément dans l'espace de travail de la machine-outil. Pour cela, le posage est une combinaison d'appui prépondérant, secondaire et tertiaire qui peut être de type (a) 3-2-1 (plan, linéaire, butée), (b) de type 3-2-1 (plan, centreur, localisation (locating)) ou de type (c) 4-1-1 (pivot, butée, butée) (Figure : 1.3.1). [11].

- **Maintenir la pièce :** Durant l'usinage, la pièce doit être maintenue en position sur ses appuis pour éliminer tout risque de mouvement dû aux sollicitations mécaniques extérieures comme les efforts de coupe, le poids de la pièce et les forces d'inertie. Ce maintien est assuré par un bridage qui peut être de mode bride lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui plan prépondérant, de mode étau lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui linéaire d'orientation et de mode mandrin lorsque la géométrie d'appui participe aussi au bridage (Figure 1.3.2).
- **Soutenir la pièce.** Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter des soutiens pour éviter les déformations et/ou les vibrations indésirables de la pièce durant son usinage. Le soutien est assuré par des éléments réglables afin de ne pas perturber la qualité de la mise en position de la pièce dans l'espace de travail de la machine outil.

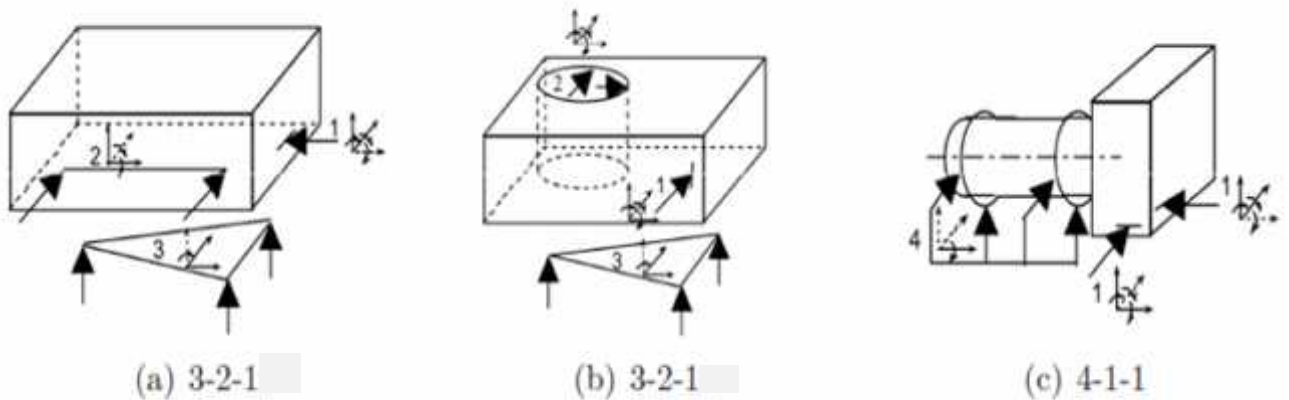


Figure I.15 : Les différents types de posage. [12]

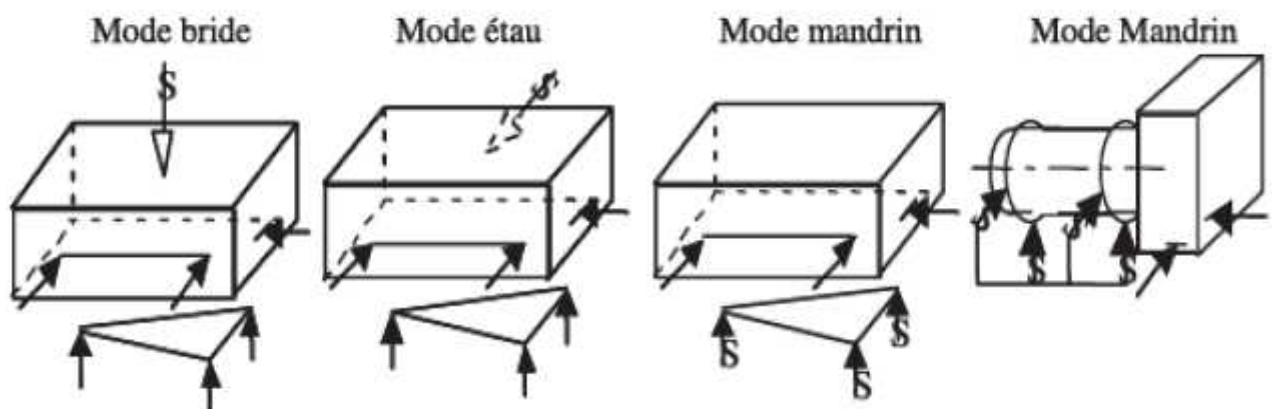


Figure I.16 : Les différents modes de bridage. [11].

Le premier objectif du montage d'usinage est de situer précisément la pièce dans l'espace de travail de la machine outil par rapport à un référentiel afin d'assurer l'usinage au bon endroit sur la pièce. Cette mise en position ne doit pas être perturbée par les efforts de coupe, de bridage et d'inertie. De plus, les outils de coupe ne doivent pas entrer en collision avec les éléments du montage d'usinage tout au long de leurs trajectoires.

I.3.2 : Les montages modulaires :

Les montages modulaires sont réalisés à partir d'éléments modulaires standards assemblés pour obtenir un porte-pièce désiré. Ils peuvent être aussi conçus et réalisés rapidement (Figure I.3.3) [11].

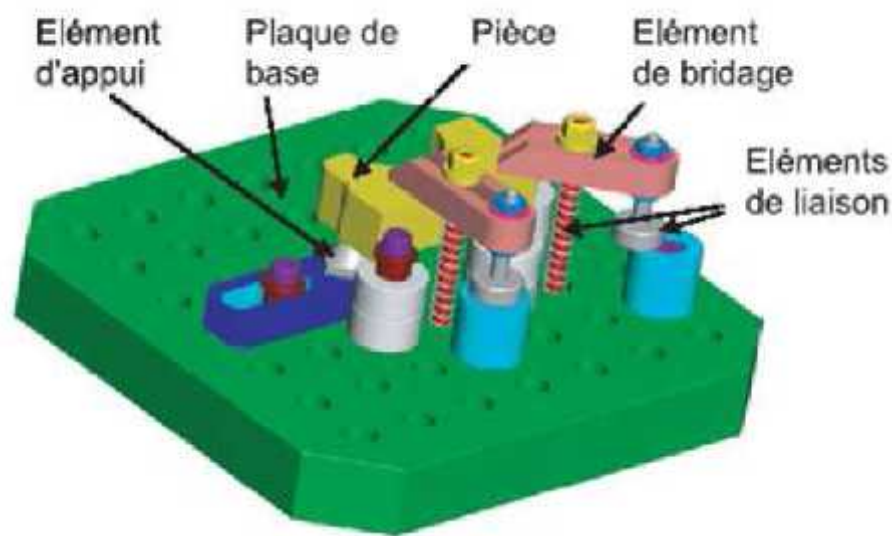


Figure I.17 : Exemple d'un montage modulaire. [11]

Les montages d'usinage modulaires pour le fraisage offrent les avantages suivants :

- Gain de temps incontestable sur l'étude et la réalisation d'un montage, mais aussi sur le temps global de mise en œuvre (délai total de fabrication du montage).
- Flexibilité : modifications faciles et rapides en fonction de l'évolution des pièces.
- Parfaitement adapte aux études réalisées par C.A.O.
- Capacité de bridage étendue.
- Précision liée a la rigidité du système : grande résistance aux efforts de coupe et de bridage.
- Conforme aux adaptations pour palettisation ou cellules flexibles.
- Capacité de brider des pièces en fonction du type de machine : sur centre d'usinage à broche horizontale ou verticale, sur fraiseuses, sur machines à mesurer 3D.
- Grande performance par ses possibilités de prise de pièces.
- C'est un outillage très performant pour la sous-traitance qui permet de réduire les délais de fabrication.

I.3.3 : Processus de conception du montage d'usinage :

Le processus de conception du montage d'usinage comprend quatre parties qui sont :

1. Description du problème de conception du montage d'usinage : Un problème de conception dans le cas général peut toujours être défini comme un problème d'optimisation qui englobe trois éléments : les variables de conception, les contraintes de conception et les objectifs de conception. Pour la conception du montage d'usinage la recherche de la solution optimale globale est difficile à obtenir mais l'optimisation des différents paramètres comme les forces de serrage optimales, le placement des points d'appui optimal reste possible. D'une façon générale on cherche une solution pertinente.
2. Analyse pour la conception du montage d'usinage : Chaque montage d'usinage devrait subir à des différentes analyses, cinématiques, de forces et de déformations, pour vérifier si sa configuration répond aux contraintes de conception du montage d'usinage.
3. Optimisation dans la conception du montage d'usinage : Optimiser une conception d'un montage d'usinage c'est la détermination des forces de bridage minimales en statique et en dynamique, la minimisation des déformations et des défauts de mise en position.
4. Vérification de la conception du montage d'usinage : L'objectif de la vérification est de définir, mesurer et optimiser la qualité du montage d'usinage, c.-à-d. la détection de n'importe quelle interférence qui peut se produire pendant la conception entre les différents éléments du montage d'usinage, ainsi que la mise en position, les tolérances, la stabilité de la pièce, l'accessibilité et les forces de bridage minimales.

I.3.4 : Démarche de conception du montage d'usinage :

Les quatre étapes suivantes sont les plus couramment utilisées dans la conception des montages d'usinage :

1. Sélection des éléments technologiques en contact avec la pièce : dans cette étape le choix se fait sur les éléments d'appui, les éléments de bridage et la plaque de base qui est le support d'assemblage de tous les éléments précédents.
2. Placement des éléments technologiques en contact avec la pièce : cette étape est consacrée pour le placement des éléments technologiques tout en respectant le processus de conception.
3. Eléments de liaison : dans cette étape on fait le choix des éléments de liaison pour les éléments d'appui et les éléments de bridage.
4. Assemblage : positionnement et orientation de tous les éléments technologiques et les éléments de soutien sur la plaque de base, puis la vérification de la solution finale.

Chapitre II

Méthodologie

II.1: Introduction:

La qualité d'une pièce est influencée par la capacité d'un montage d'usinage à tenir et à positionner correctement la pièce en tenant compte des différentes conditions fonctionnelles lors de la fabrication. La conception de montage d'usinage est importante pour tenir la pièce correctement et optimiser les erreurs (mise en position, efforts...etc.), que la pièce peut affronter, lors de l'usinage ou assemblage pour assurer la qualité du produit.

II.2 : Position du problème :

Les ailettes turbine ont une géométrie complexe qui se réfère à la géométrie de forme libre qui est à son tour représentée normalement sous formes de Bezier, B-splines et NURBS (Non-uniform rational B-splines) etc. La conception des montages d'usinage pour les pièces à géométrie complexe doit tenir compte de nombreux facteurs tels que les éléments de positionnement (locators), éléments de bridage (clamps), géométrie des éléments, propriétés des matériaux, orientation et position des surfaces à usiner etc. Très peu de montages d'usinage pour des pièces complexes peuvent fonctionner dès la première mise en œuvre sans modifications [13].

Une rangée dans un étage de turbine contienne quelque fois une centaine d'ailettes, qui fonctionnent dans un milieu sévère (haute température, haute pression, sollicitations des forces centrifuges...etc.). Ces ailettes doivent être bien réparties géométriquement tout autour de l'axe du rotor de la turbine, ce qui assure un flux d'air homogène à travers chaque étages d'ailettes, et par conséquent, sa influe positivement sur la stabilité de toute la machine. Suite à ce qui précède, un processus de production rigoureux de ces pièces nobles doit être mis en œuvre depuis l'état brut (Casting), passant par la phase de fabrication (Usinage), jusqu'à l'étape de revêtement de protection (Coating).

La fabrication des ailettes par toutes sortes d'usinage, soit : rectification, fraisage, EDM, ECM, même par Laser, nécessite un référentiel bien déterminé et presque unique pour tous type d'usinage. Ce référentiel est défini par le bureau d'études afin d'assurer la mise en position de l'ailette dans l'espace 3D au niveau de la roue (étage). Le montage d'usinage objet de cette étude est conçu à la base de ce référentiel qui est fourni avec le modèle 3D du casting (ailette brute) par le fondeur sous format IGES ou STEP.

La mise en position conventionnelle 3-2-1, qui est la stratégie souvent utilisée pour la conception des montages d'usinage destinés aux pièces de formes régulières, devienne inutile devant les pièces à géométrie complexe ou libre (free-form geometry), ou le système de serrage (positions et forces) est basé entièrement sur l'expérience de concepteur et la méthode (trial-and-error). Avec le

développement de la technologie avancée de la simulation numérique, l'analyse par éléments finis (FEA) joue un rôle très important dans le développement des montages d'usinage [13].

Cette étude de conception est applicable sur des montages d'usinage destinés à la MIP et le MEP des ailettes mobiles partie chaude de turbine à gaz, Type GE MS 9001E, qui sont des pièces à géométries complexes. La figure II.1 représente un exemple d'ailette turbine, où les opérations d'usinage ont été conduites sur le côté pied d'ailette (root) et le chapeau (tip). Les éléments de positionnement et les éléments de bridage sont placés sur la pale d'ailette (aerofoil) au niveau des sections C1 et C2.

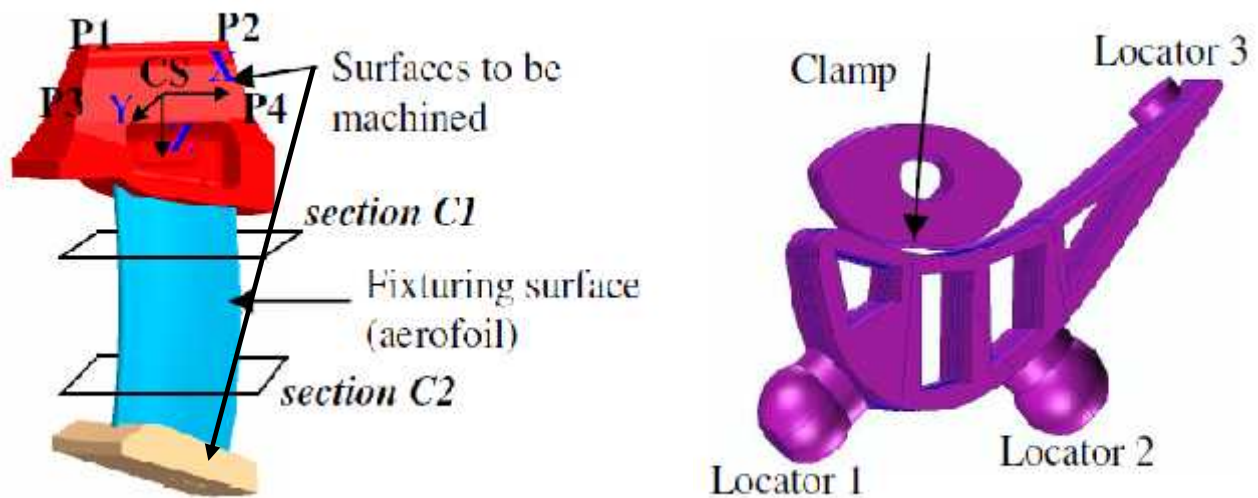


Figure II.1 : Disposition des éléments de positionnement et de bridage d'un montage sur une ailette turbine [13].

II.3 : Objectifs :

Ce mémoire a pour objectif de proposer une approche pour la conception et la réalisation d'un nouveau montage d'usinage pour la fabrication des ailettes turbines. La tâche principale de ce montage est de tenir et positionner correctement l'ailette durant l'usinage. Ce montage d'usinage doit contenir six (06) éléments de positionnement indépendants, qui vont éliminer les six (06) degrés de libertés que l'ailette possède dans l'espace au niveau de la pale (airfoil). Cette développement est basé sur la création d'un nouveau référentiel sur la partie pied d'ailette par le transfert et l'élimination de cinq (05) éléments de positionnement équivalents aux cinq degrés de libertés (03 translations et 02 rotations), les nouveaux éléments de positionnement sont de contacts coniques, l'un doit être fixe et l'autre mobile. Ce nouveau référentiel devra être unique pour d'autres montages d'usinage afin d'assurer les contraintes géométriques de positions entre les différentes formes usinées (voir les figures : II.2.a et b).

D'autres objectifs de cette étude sont orientés suivant trois axes :

- Axe économique : réduire la facture des dépenses fournie par la société de maintenance des équipements industriels MEI/SPA Filiale Sonelgaz, pour l'achat des équipements spécifiques, les outils de coupe, etc. Cette étude contribue aussi à la minimisation de la facture de confection des montages d'usinage chez des sous-traitants étrangers.
- Axe technique : avoir le savoir faire basé sur une combinaison université-entreprise, à travers le transfert technologique, la consolidation des connaissances scientifiques et la contribution à la progression technologique.
- Axe scientifique : cette étude contribue à l'enrichissement de la bibliothèque nationale et sa base de données relative au domaine de l'énergie en général et la fabrication des ailettes en cas particulier.

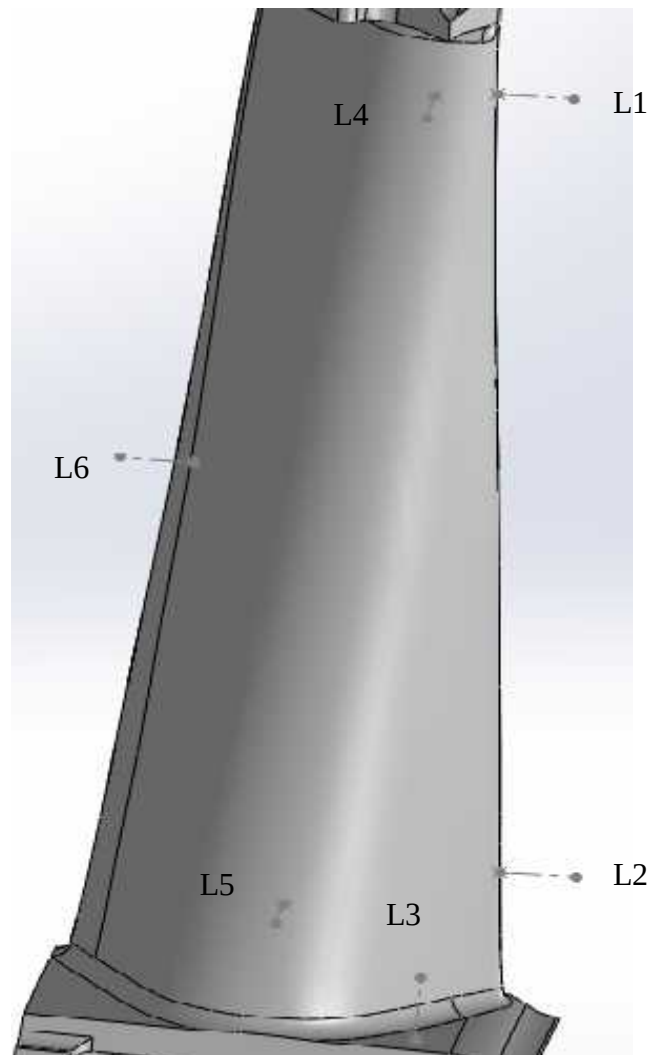


Figure II.2.a : Schématisation des six points de référence au niveau de la pale (airfoil)

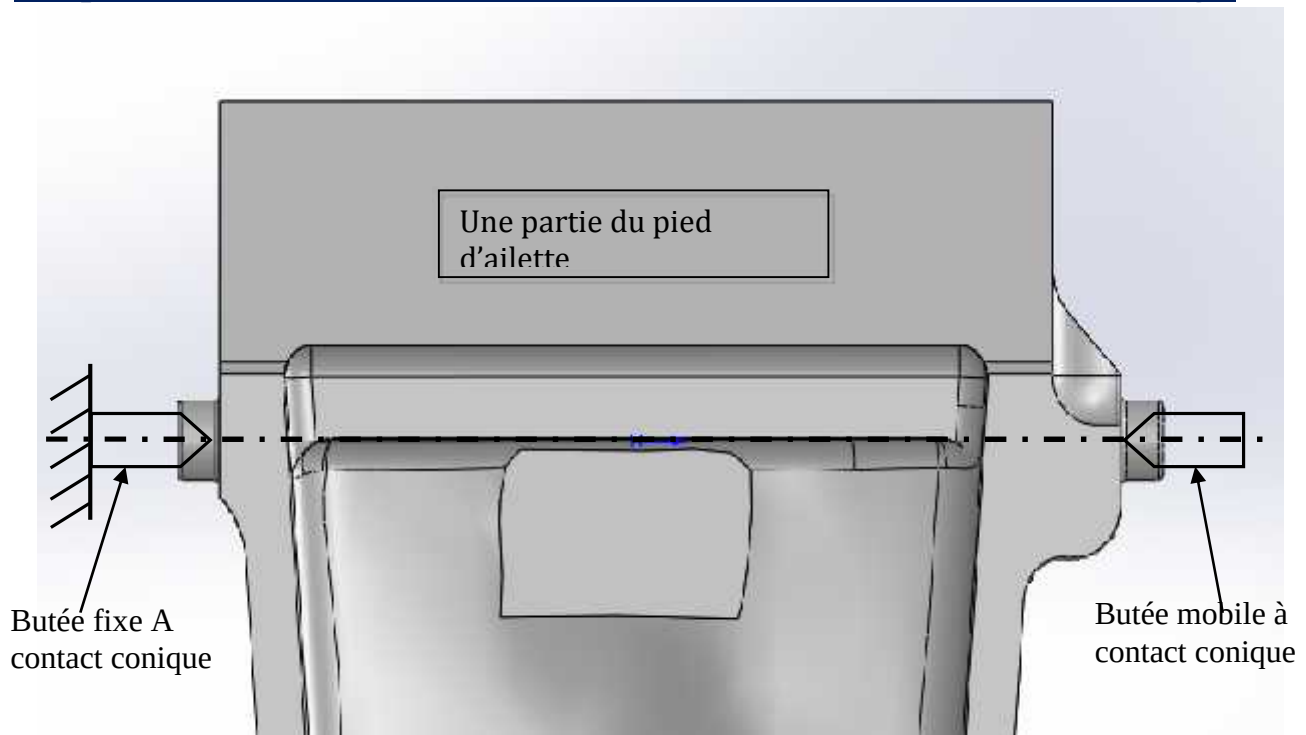


Figure II.2.b : Schématisation du nouveau référentiel après transfert

II.4: Hypothèses:

Avant d'aborder à la méthodologie de conception de montage d'usinage, il est nécessaire de préciser quelques hypothèses qui ont été formulées pour la cohérence de l'ensemble.

- Les ailettes brutes sont construites en utilisant un procédé appelé coulée d'investissement, qui est une méthode de coulée de haute rugosité de surface, de haute précision, qui utilise le sable et le silicate de tétra éthyle comme liant. Cette méthode est capable de produire de petites pièces avec une géométrie extrêmement complexe avec très peu besoin de finition [14]. Les sections dans la pale d'ailette où les éléments de positionnement sont situés, sont élaborées d'une attention spécifique, et l'erreur au niveau de ces sections doit être à l'ordre de $\pm 0.05\text{mm}$.
- Les machines outils où le montage objet d'étude a été réalisé sont d'une marque répandue appelée DMG, ce sont des centres d'usinage verticaux à 5 axes, de haute performance, stables, robustes, et de précision élevée. A cet effet on suppose que l'usinage durant la confection de ce montage, ou bien durant la réalisation des opérations d'usinage sur les ailettes au moyen de ce montage a été déroulé dans de bonnes conditions de stabilité et précision.
- La broche porte outil de ces centres d'usinage est entraînée suivant les 3 trois directions (X, Y, Z), par des axes à billes en céramique à compensation automatique qui sont motorisés au

moyen des moteurs pas à pas de très haute qualité. Cette broche peut porter un palpeur 3D analogique de précision (0.01 mm). Dans ce cas, on suppose que ce centre d'usinage de précision pourra remplacer la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) pour tous éventuels contrôles et mesures.

- Le référentiel de conception du montage d'usinage est le même que celui fourni par le fondeur avec le modèle 3D de format STEP et IGES qui représente l'intersection des trois plans orthogonaux (voir chapitre III).
- On maintien le référentiel d'usinage de telle sorte qu'il coïncide avec le référentiel de conception, afin d'éviter toutes erreurs issues de transfert des cotes.
- Tous les éléments de positionnement sont des appuis à contacts ponctuels situés au niveau de la pale (airfoil) de l'ailette, ces appuis sont considérés comme des pièces rigides, ainsi que les sauterelles et les brides de serrage (bridage), et les éléments de soutien.

II.5 : Méthodologie :

L'industrialisation d'un produit mécanique fait intervenir plusieurs acteurs (figure II.3) et services au sein d'une entreprise de production mécanique intervenant d'une manière ou d'une autre sur le produit. Le service marketing étudie les marchés, le service commercial reçoit les commandes et définit les besoins. Le cahier des charges, qui définit les fonctions que doit assurer le produit est transmis au bureau d'études (BE) chargé de concevoir le produit physique. Les systèmes de CAO, le calcul de structures et la simulation sont les outils employés pour définir les formes et les éléments du produit répondant aux fonctionnalités voulues. Le bureau des méthodes (BM) travaille en même temps que le bureau d'études. Il prévoit le fonctionnement technique de la production et prépare les documents nécessaires à son bon déroulement. La gestion de production (GP) organise les moyens à mettre en œuvre pour assurer pleinement la production. L'atelier réalise alors le produit en suivant les indications techniques fournies par le bureau des méthodes et les indications d'organisation provenant de la gestion de la production. Fini et assemblé, le produit ensuite peut être livré par le service expédition. [1].

A cet effet et afin de concrétiser les objectifs de cette étude en but de voir un produit réel, fiable, et pour une durée de vie suffisante. La méthodologie adoptée pour ce modeste travail a été basée sur trois volets principaux :

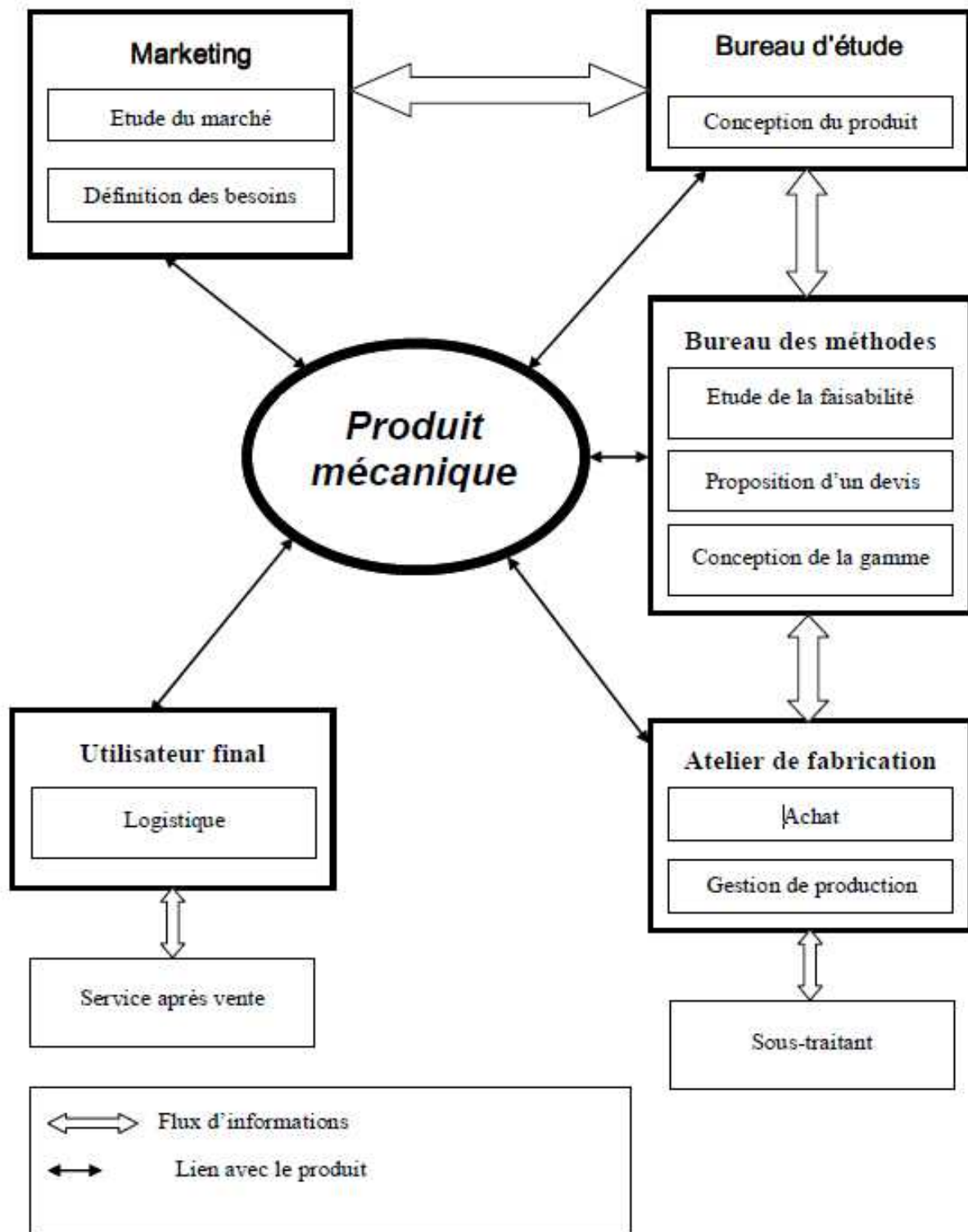


Figure II.3 : les différents acteurs qui agissent dans l'industrialisation d'un produit mécanique. [1]

II.5.1 : Volet théorique et conception :

Dans ce volet, le concepteur doit tenir en compte les points suivants :

- Il faut que le modèle 3D en format STEP ou IGES de la pièce brute (casting) dont le montage d'usinage doit la positionner et maintenir, soit le même que la pièce réelle brute fournie par la fonderie, pour cela un contrôle géométrique et dimensionnel unitaire (aillette par ailette) doit être effectué par le service contrôle & qualité au moyen de la MMT (CMM) en utilisant le modèle 3D, sur les pièces réelles provenant de la fonderie accompagnées d'un dossier technique incluant ce modèle 3D. Pour achever cette étape de contrôle, un montage similaire à ce montage objet d'étude a été conçu mais relativement différent en ce qui concerne les matériaux utilisés, le système de bridage, etc.
- Avoir les coordonnées cartésiennes des points de contacts entre les éléments de positionnements et la partie portant les sections de références qui est dans ce cas la pale d'aillette, le plan 2D inclus dans le dossier technique est le seul moyen qui permet d'avoir ces coordonnées cartésiennes.
- Pour les éléments de fixation (clamping), et en but d'optimiser le temps de conception, la précision, ainsi que l'aspect esthétique, le concepteur a le choix d'utiliser une large gamme d'accessoires standards fournis en formats 3D par plusieurs constructeurs (voir la figure II.4).
- Le concepteur doit choisir des logiciels de conception (CFAO) qui sont capable de faire :
 - ✓ La modélisation 3D et la mise en plan 2D.
 - ✓ La simulation des contraintes et déformations.
 - ✓ La détection des collisions et interférences.
 - ✓ L'assemblage des différentes pièces suivant des contraintes géométriques.
 - ✓ La fabrication assistée par ordinateur (FAO) ou bien le CAM.
 - ✓ Post-processing (génération du programme d'usinage ISO).

Suite à ce qui mentionnés ci-dessus, le concepteur et en se basant sur ces connaissances techniques et expérimentales, sera apte à concevoir un montage d'usinage qui répond aux exigences technologiques et fonctionnelles, telles que :

1. Un bon positionnement de la pièce, de telle façon qu'il doit être répétable pour la totalité des pièces.
2. Un bon maintien (une bonne stabilité) de la pièce durant l'usinage.
3. Facilite le montage et le démontage de la pièce dans un délai optimum, avec une accessibilité évidente des jeux de cales, en but de vérifier un éventuel jeu entre la pièce et les éléments de positionnement.
4. Accès libre des outils de coupe aux zones à usiner.

5. Assurer la sécurité de l'opérateur.
6. Possibilité de s'adapter aux autres fonctions, telles que le mesurage, des opérations d'EDM par enfonçage...etc.

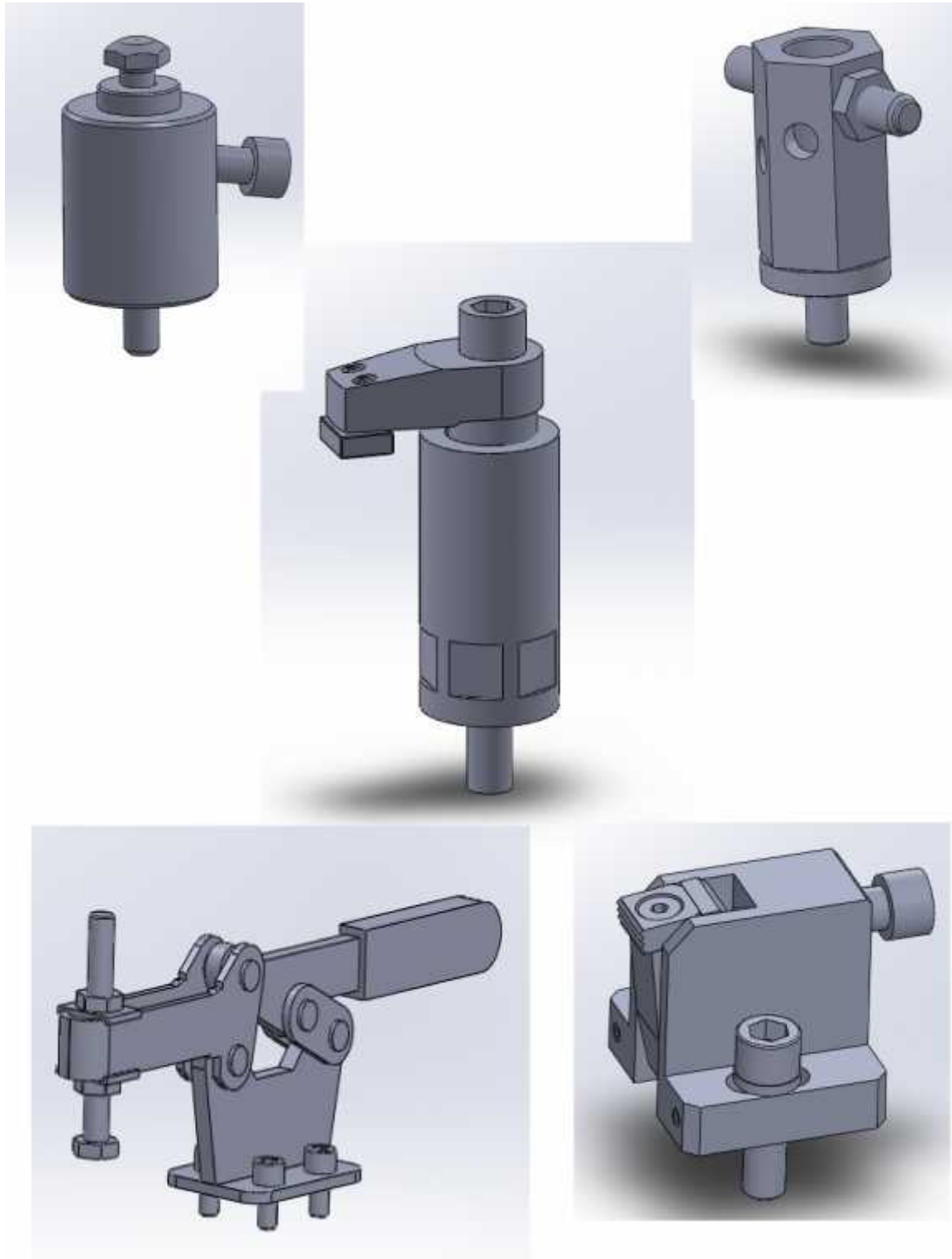


Figure II.4 : Images de quelques accessoires standards (AutoBlok)

II.5.2 : Volet fabrication :

L'industrialisation d'un produit mécanique est une étape fondamentale dans le processus de développement. Cette étape intervient après la phase de conception du produit et elle a pour but d'étudier la faisabilité de la fabrication du produit, compte tenu des données commerciales et des objectifs de la politique industrielle de l'entreprise. L'étude de développement et d'industrialisation doit être menée conjointement et en constante collaboration entre le bureau d'étude, le bureau des méthodes et la production.

Ce volet de production ou de fabrication, se résume souvent dans les équipements et matériels utilisés. Parmi ceux utilisés durant la réalisation de ce montage, on peut citer :

- Machines : parmi les machines qu'ont été utilisées on trouve :
 1. Centre d'usinage vertical à 5 axes de marque DMG (figure II.5), avec les caractéristiques illustrées dans le (tableau II.1). ce CUV a pour objectif de faire toutes les tâches de fraisage (ébauche et finition) sur les différents composants réalisable du MU, ainsi que la réalisation des trous de centre (nouveau référentiel) au niveau des pieds de 204 ailettes. Ce CUV peut être programmé suivant deux modes, le premier mode de programmation appelé "ShopMill" (figure II.6) ce fait directement sur la machine à travers un pupitre HMI (figure II.7), ce type de programmation est destiné uniquement pour les usinages de moins de 2 axes $\frac{1}{2}$. Le deuxième mode de programmation ce fait au moyen d'un logiciel de FAO appelé "TopCam".



Figure II.5: Centre d'usinage vertical (DMG).

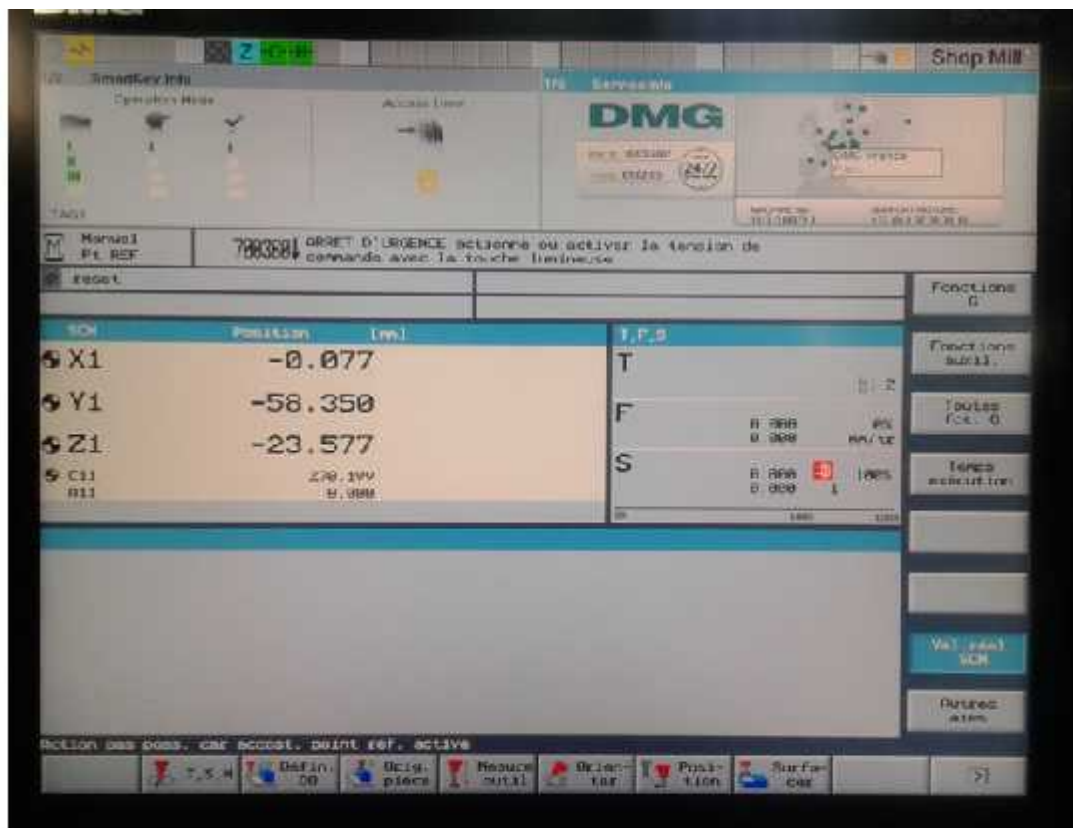


Figure II.6: Interface ShopMill sur CUV



Figure II.7: Pupitre HMI du CUV

Puissance du moteur broche	25 KW
Vitesse max de rotation broche	18000 tr/min
Vitesse max linéaire suivant x, y et z	10000 mm/min
Dimensions de la table machine (X x Y) mm	2000 x 750 mm
Course axes linéaires (X, Y, Z) mm	1800, 700, 700 mm
Angle d'orientation de la broche (axe B)	$\pm 105^\circ$.
Angle d'orientation de l'axe C	360°
Commande	Siemens / sinumerik 840d
Défaut de localisation des axes linéaires	0.007 mm

Tableau II.1 : Caractéristiques du CUV.

2. Robofil ou Wire-EDM de la marque ONA AF35 (figure II.8). Dans ce type de machines, l'usinage se fait par électroérosion à fil suivant jusqu'à quatre (4) axes simultanés. Deux modes de programmation sont aussi disponibles, le mode direct sur pupitre pour les contours qui vont être usiné suivant un axe ou deux (2) axes simultanés (figure II.9). Le deuxième mode se fait au moyen d'un logiciel de FAO appelé "Esprit", pour les usinages à quatre axes simultanés.



Figure II.8: Machine EDM ONA AF35

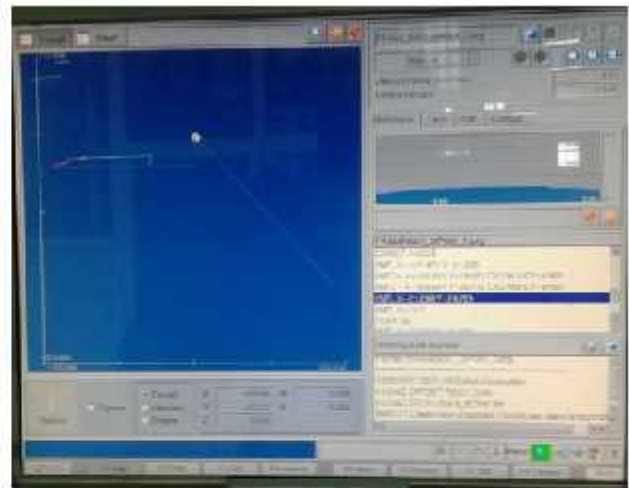


Figure II.9: pupitre HMI de ONA AF 35

- Outillages : on distingue deux types d'outillage utilisé dans ce travail :
 1. Outils de coupe : divers outils de coupe ont été utilisé pendant l'usinage des différents composants du MU selon des choix optimaux. Tous les outils de coupe utilisés dans ce travail seront illustrés avec détails dans le (chapitre IV).
 2. Accessoires et éléments de bridage et fixation standards : ce sont des composants standards de la marque "AutoBlok", destinés pour le maintien et le soutien de la pièce à usiner.
- Matières : ça concerne les matériaux constituant les différents composants du MU, un tableau (IV.2) récapitulatif dans le (chapitre IV), incluant les différents matériaux utilisés.

II.5.3 : Volet contrôle de qualité :

Le montage d'usinage doit répondre aux critères du système contrôle qualité suivants :

- La précision dimensionnelle et géométrique relative à la pièce que ce montage d'usinage devra la mettre en position. A cet effet notre montage d'usinage doit être soumis à des contrôles dimensionnels préalables et à des opérations d'usinage à titre d'essai sur des pièces prototypes (en cire par exemple), avant d'entamer l'usinage des pièces réelles. La MMT (CMM) de la marque «Hexagon» (figure II.10), que MEI/Spa dispose est l'instrument disponible le plus fiable pour effectuer cette tâche, ainsi que le centre d'usinage vertical à 5 axes muni d'un palpeur 3D analogique de la marque «Mitutoyo» (figure II.11), pour un éventuel de non disponibilité de la MMT.
- L'état de surface doit être rigoureux pour assurer un bon contact entre les éléments de positionnement et la pièce (figure II.12). La qualité de l'état de surface est proportionnelle à la stabilité du système d'usinage et la robustesse du montage d'usinage, par le choix optimal des paramètres et stratégies d'usinage, le choix approprié des matériaux de différents composants, et l'assurance d'un bon maintien des pièces pour éliminer tout risque de vibrations dû aux sollicitations mécaniques extérieures comme les efforts de coupe (figure II.13).
- Pour une durée de vie prolongée, les éléments de positionnement sont d'un matériau qu'a une dureté proche de celle de la pièce à usiner et plus dur que la plaque principale support et les autres composants du montage. Ces éléments sont conçus de telle façon qu'ils soient interchangeables pour une éventuelle déformation (figure II.14).
- L'analyse cinématique du système machine outil, montage d'usinage et pièce est nécessaire sur un logiciel de CAO qu'est «SolidWorks» dans notre cas, pour étudier l'accessibilité aux zones à usiner et les collisions des outils de coupe et les instruments de mesures (palpeur de la MMT) avec le système montage d'usinage / pièce.



Figure II.10: Machine MMT (CMM) de la marque "Hexagon"



Figure II.11: Palpeur 3D de la marque "Mitutoyo"

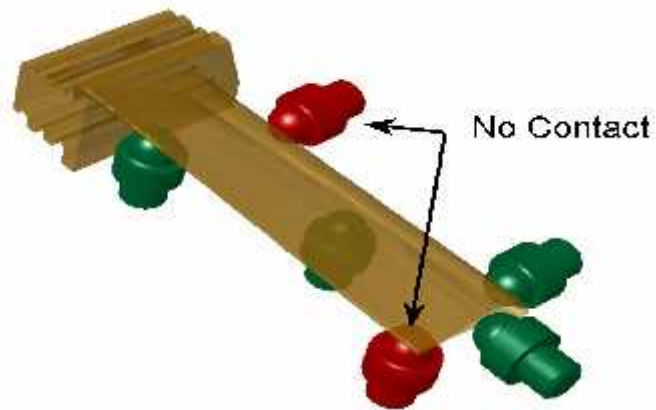


Figure II.12 : Un cas d'une pièce qui n'a pas un contact avec les éléments de positionnement [15].



Sans vibrations



Avec vibrations

Figure II.13: Conséquences des vibrations sur une surface usinée [16].

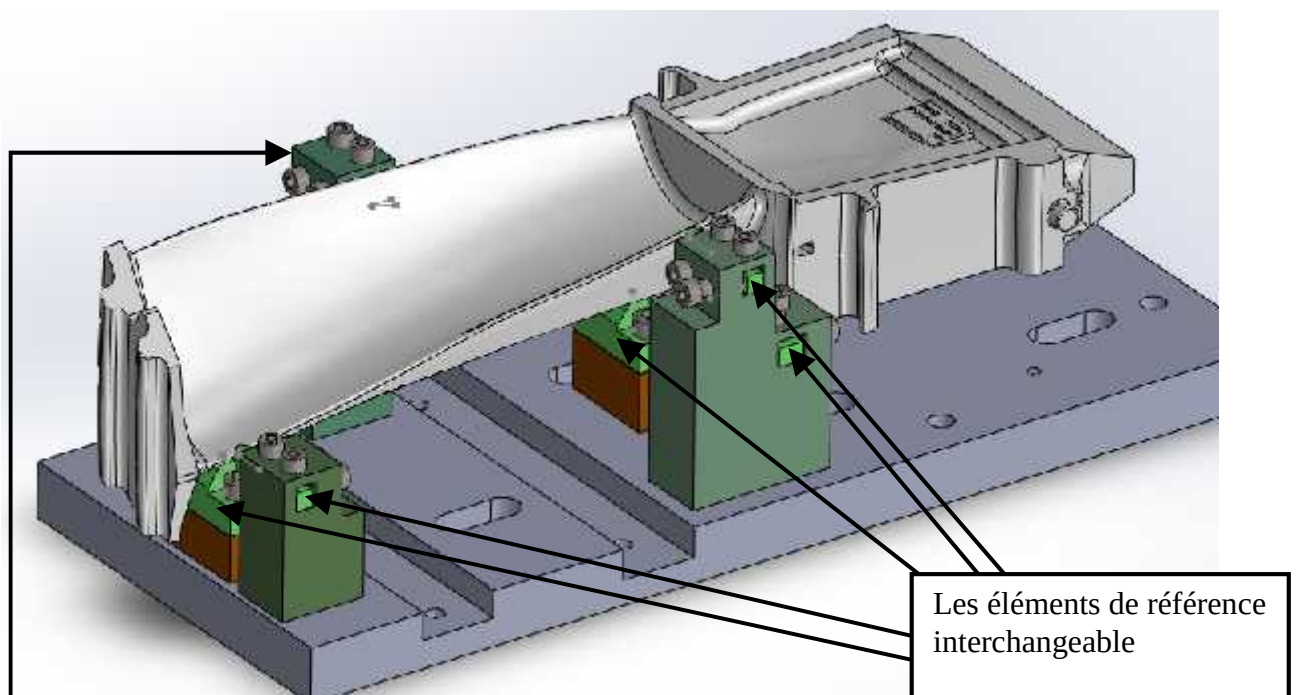


Figure II.14 : Représentation des éléments interchangeable sur notre MU.

Chapitre III

Conception Du Montage D'usinage

III.1 : Introduction :

Après avoir défini la méthodologie de conception du montage d'usinage et retenu une stratégie de résolution dans le deuxième chapitre, ce troisième chapitre sera consacré à la concrétisation de cette méthodologie de point de vue pratique. Dans la première partie de ce chapitre on va traiter les différentes contraintes influençant la conception de ce montage d'usinage, tandis que dans la deuxième partie on va parler sur l'isostatisme de l'ailette (principe, objectifs, et critères de choix). La dernière partie sera consacrée à voir la séquence des étapes de modélisation du montage de six points et l'ensemble constituant ce montage d'usinage pour être prêt à l'utilisation.

III.2 : Contraintes influençant la conception du montage d'usinage :

Dans le cas des montages d'usinage spéciaux pour des pièces à géométries complexes, la conception est en grande partie un processus basé sur l'expérience. La performance d'un montage d'usinage est très difficile à prédire, car elle est influencée par un grand nombre de facteurs directs et indirects, y compris la forme de la pièce, la taille, types de machines, les paramètres de coupe, les différents composants et accessoires utilisés dans le montage, et la stratégie d'inspection. Le concepteur doit être capable de trouver une combinaison tenant compte ces contraintes en se basant sur son expérience.

III.2.1: Contraintes physiques:

La cinématique de la machine, la taille et la géométrie de la pièce à usiner, la taille des éléments de positionnement, les éléments de bridage ainsi que les éléments de soutien, les types des outils à utiliser, les instruments de mesure et enfin les référentiels d'usinage et de conception, sont tous des contraintes que le concepteur devra les tenir en compte, afin de trouver une harmonie optimale, en but de faciliter le processus d'usinage.

III.2.1.1 : La cinématique de la machine et l'accessibilité:

La cinématique de la machine joue un rôle très important en ce qui concerne la détermination de nombres de posages, l'orientation de la pièce, et la position de la pièce par rapport à la table de la machine. Tant que la machine-outil utilisée est un centre d'usinage à 5 axes qui possède une table rectangulaire fixe, avec les dimensions (1800x700 mm), cette table fixe menée au milieu d'une table circulaire rotative selon l'axe (Z) de diamètre 700 mm, ainsi qu'une broche porte outil orientable selon l'axe (Y), jusqu'à 100° de chaque côté, cette broche a une course linéaire de 700 mm suivant les axes (Y et Z), et une course linéaire de 1800 mm suivant l'axe (X) (figure III.1.a et figure III.1.b).

Ces caractéristiques de la machine constituent un facteur positif vis-à-vis l'accessibilité des outils et les instruments de mesure aux zones d'usinage, le nombre de posages minimal, la position et l'orientation de la pièce.

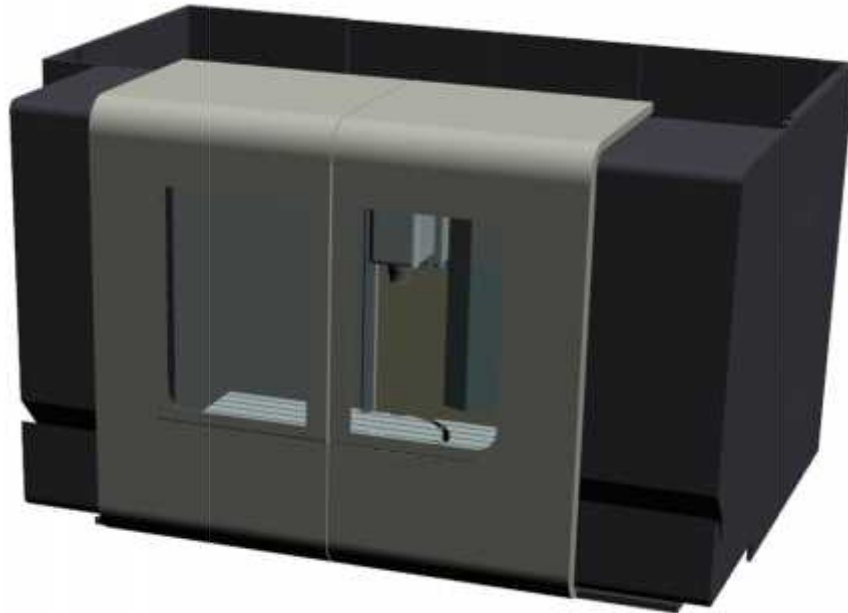


Figure III.1.a : Centre d'usinage vertical 5 axes se trouvant à MEI/Spa, modélisé et intégré dans la bibliothèque du logiciel de CFAO appelé TOPSOLID.

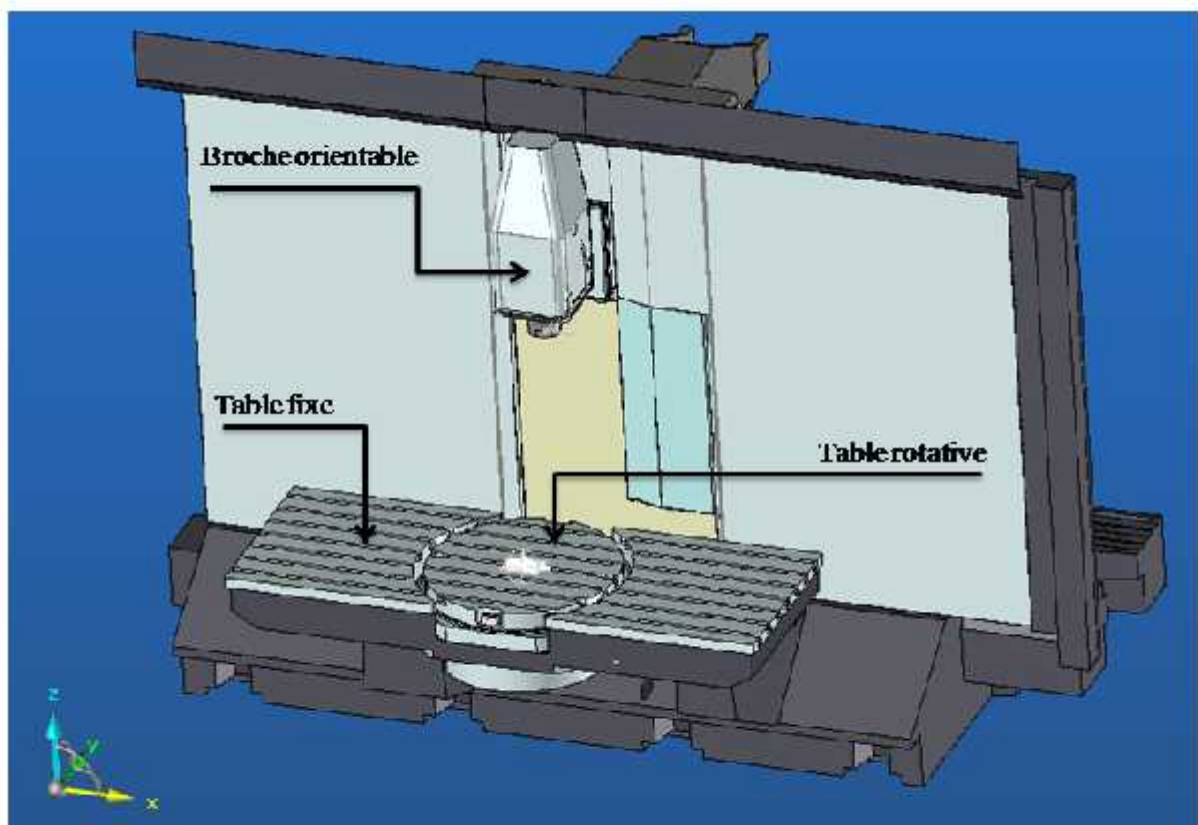


Figure III.1.b : Espace de travail du centre d'usinage vertical.

III.2.1.2 : La taille et la géométrie de la pièce et les autres éléments constituant le montage :

La pièce que notre montage devra la maintenir est une ailette turbine avec les caractéristiques suivantes voir (figure : III.2) :

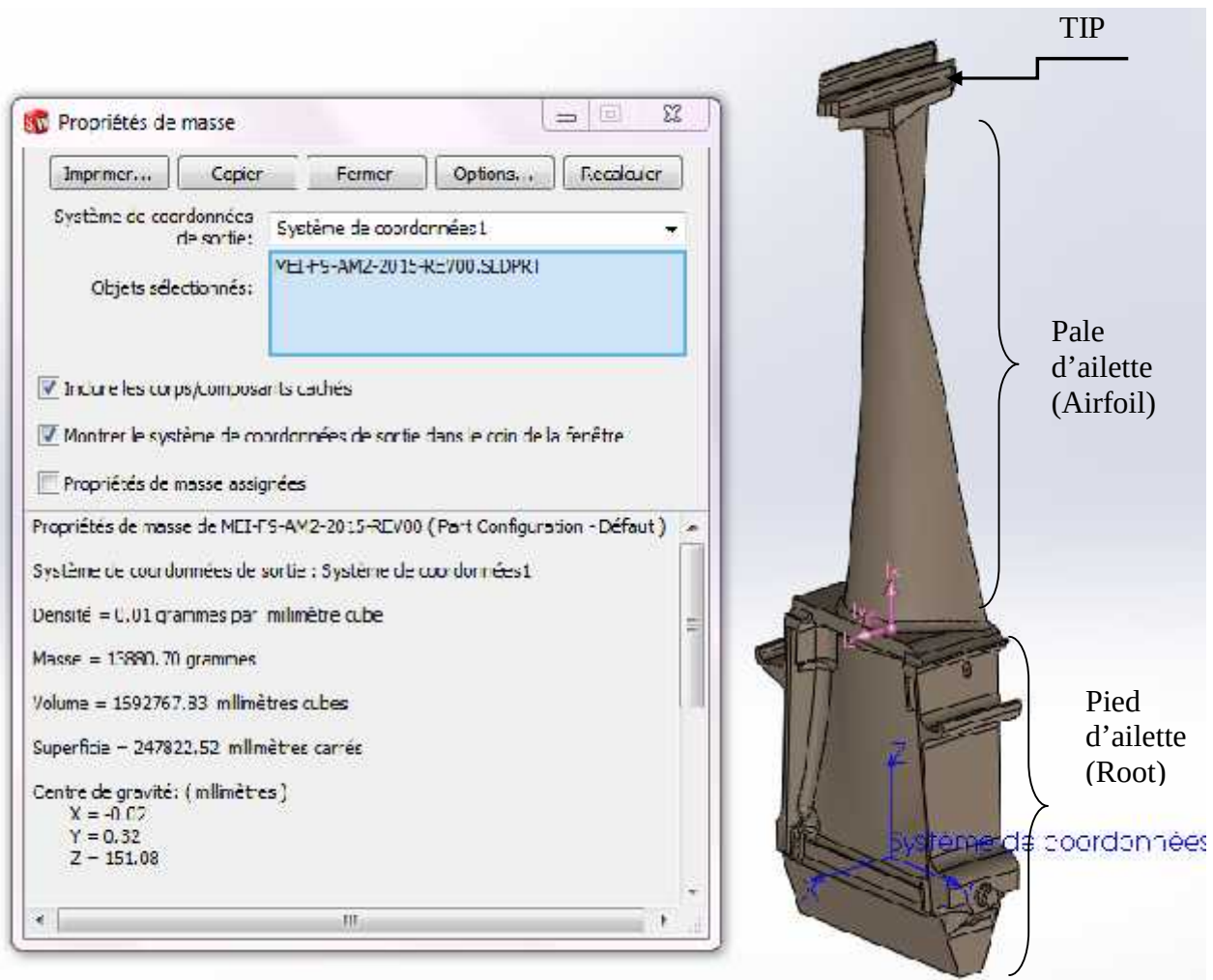


Figure III.2 : Quelques caractéristiques de la pièce à usiner au moyen de notre montage.

Cette ailette est une pièce à géométrie complexe, d'une longueur 580 mm, d'une largeur 190 mm, et d'une épaisseur 135 mm. Bien que la totalité des éléments de positionnement se trouvent au niveau de la pale d'ailette, ça signifie que le contact est impérativement ponctuel entre ces éléments et la pièce (figure III.3), ce qui nécessite d'autres éléments de soutien à introduire dans l'ensemble au niveau de la pale tant que le pied d'ailette, aussi bien que les éléments de bridage (figure III.4.a et figure III.4.b), en but d'offrir un bon maintien et une bonne stabilité au système d'usinage. La disposition de ces éléments de soutien et bridage a été conçue d'une manière, à mettre en évidence tous les contacts des éléments de positionnement avec la pièce, afin de permettre à l'opérateur de vérifier le jeu qui doit être ≤ 0.05 mm.

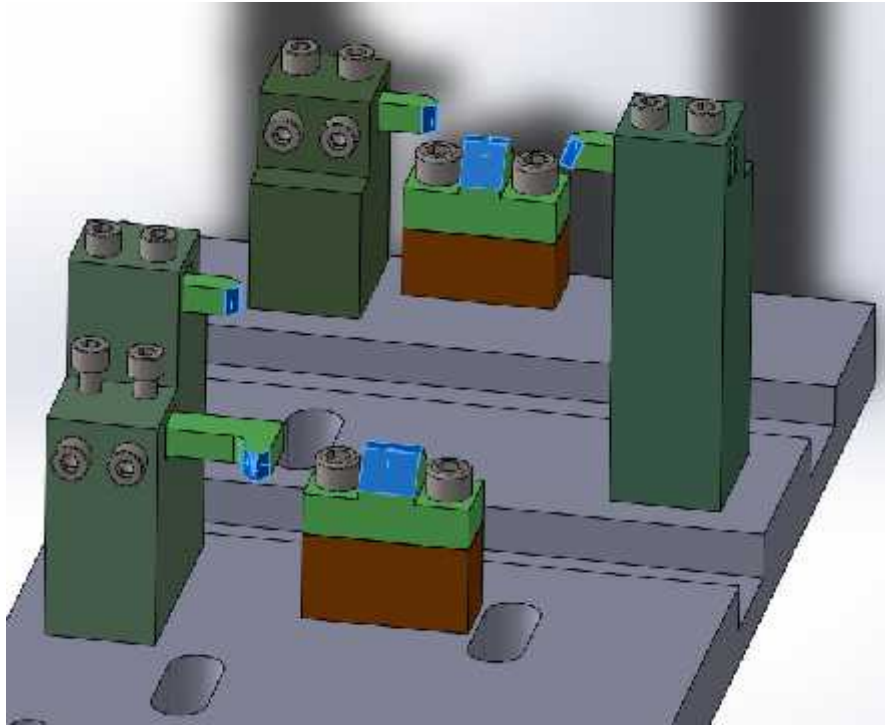


Figure III.3 : Représentation des éléments de positionnement (d'appui) sur la plaque support.

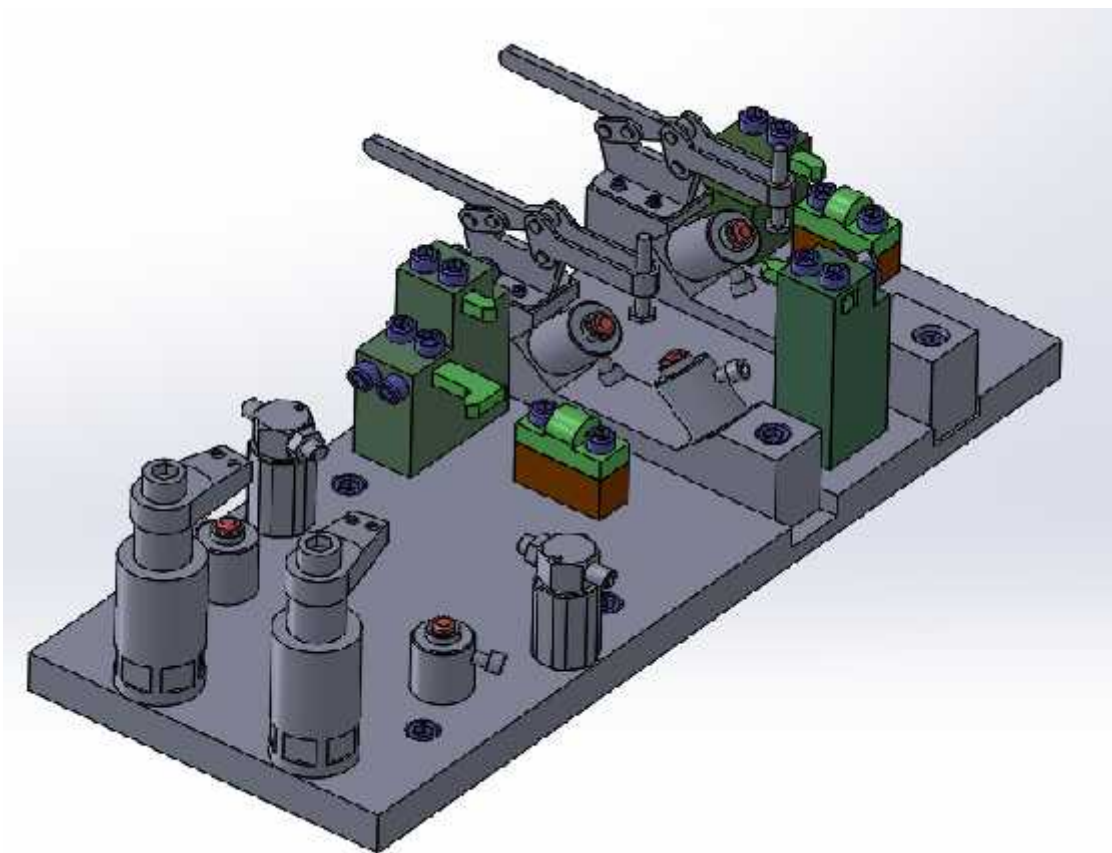


Figure III.4.a : Représentation de tous les composants du Montage d'usinage.

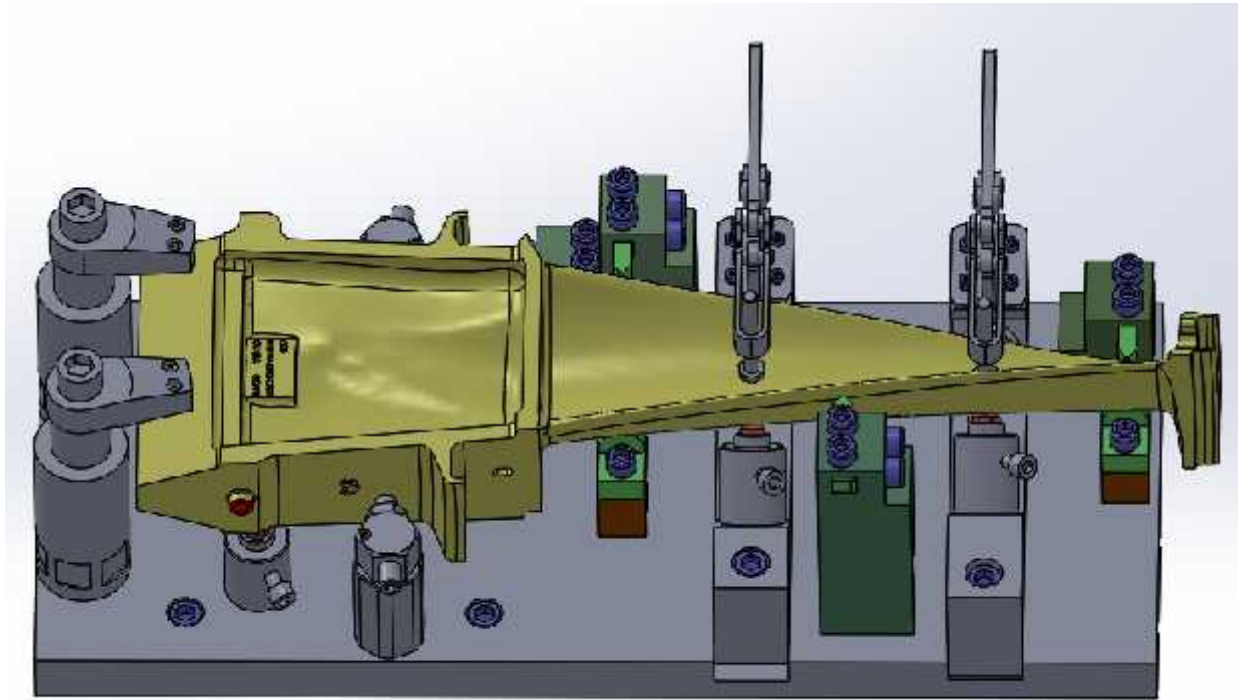


Figure III.4.b : Représentation de l'ensemble pièce / montage d'usinage.

III.2.1.3 : La position de la pièce dans l'espace de travail et son orientation :

Deux positions de la pièce dans l'espace de travail sont possibles. La première permet à la pièce d'être en position verticale de telle façon que le pied d'ailette qui contient la zone à usiner soit vers le haut dans le sens (Z+) voir (figure III.5), mais son orientation selon l'axe (Z) n'a aucune importance puisque elle est assurée par la table rotative. Néanmoins cette position n'est pas tellement optimale vue la complexité du montage d'usinage adéquat, et la distance considérable entre la zone d'usinage et la table de la machine, ce qui affecte la stabilité du système d'usinage et par conséquent la qualité de la pièce. La deuxième position qui représente notre choix dans cette étude est la position horizontale voir (figure III.6), cette position offre plus d'avantages que la première position en terme de simplicité de conception, autant que le système d'usinage devient plus stable.

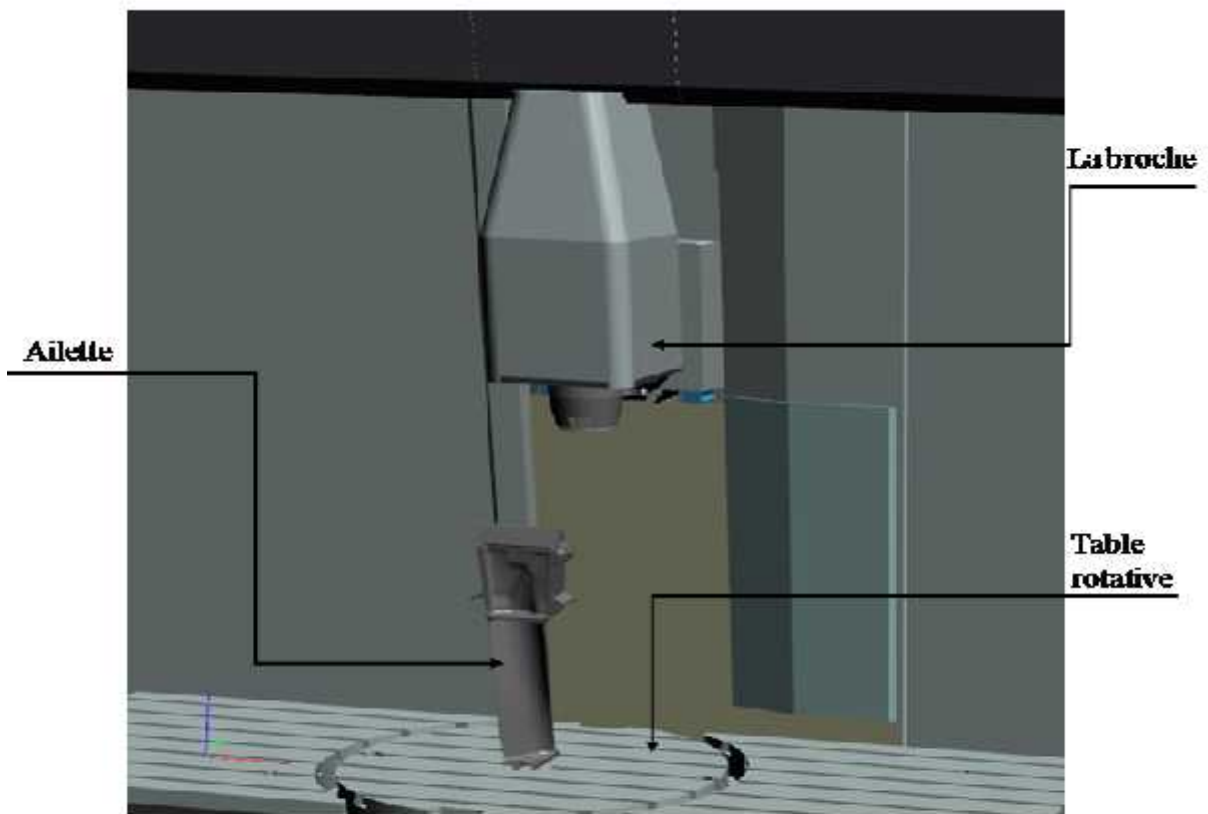


Figure III.5 : Position et orientation de la pièce sur la table de la machine.

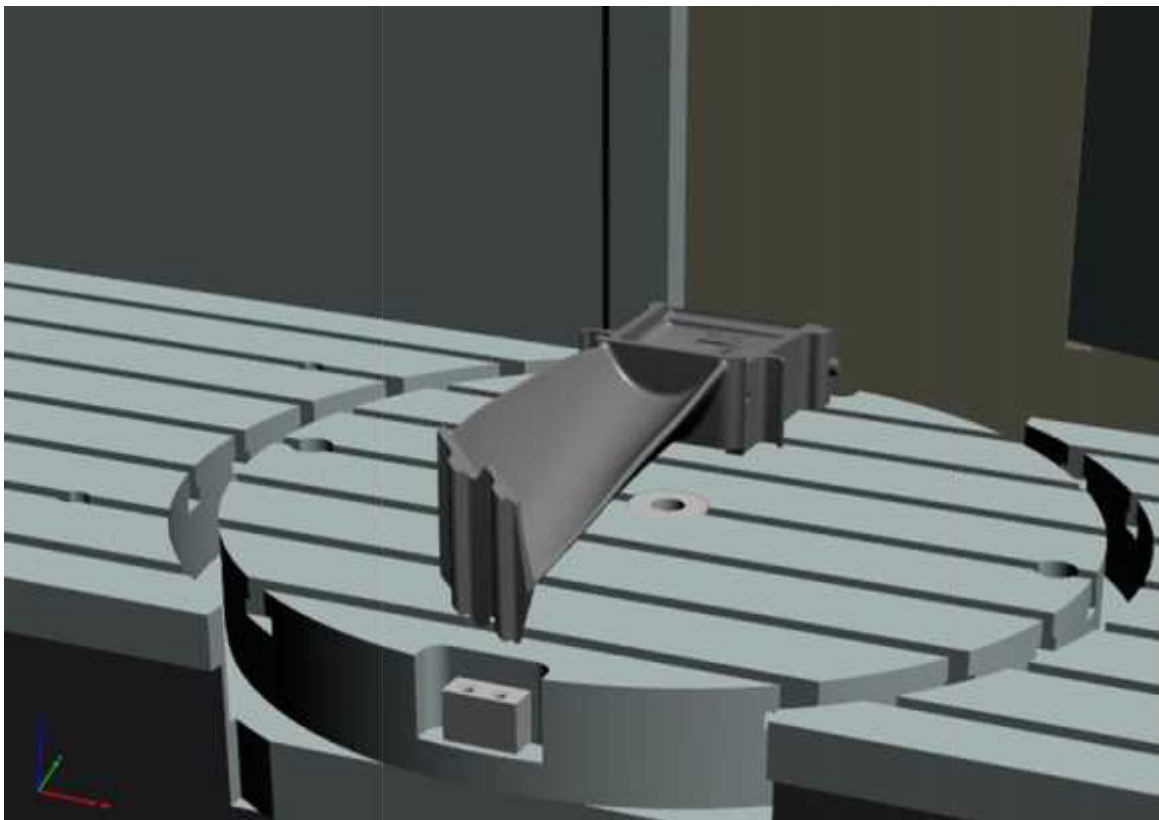


Figure III.6 : Position horizontale de la pièce sur la table rotative

III.2.2 : Contraintes d'assemblage :

L'assemblage des différents composants sur la plaque support principale est une étape très importante dans la conception des montages d'usinage. Tous ces composants y compris la plaque support ont été conçus dans le même assemblage avec SolidWorks (module assemblage) à partir du modèle 3D de l'ailette, tout en respectant toutes les contraintes géométriques et les analyses connues, en but d'assurer une cohérence optimale entre les différentes parties du montage, par la détection et l'élimination des éventuelles collisions, ainsi que d'assurer la mise en place des composants qui sont soumis à des efforts affectant leurs stabilités (figure III.7). Tous les composants du montage d'usinage sont assemblés au moyen des vis CHC M10 de différentes longueurs (figure III.4.b).

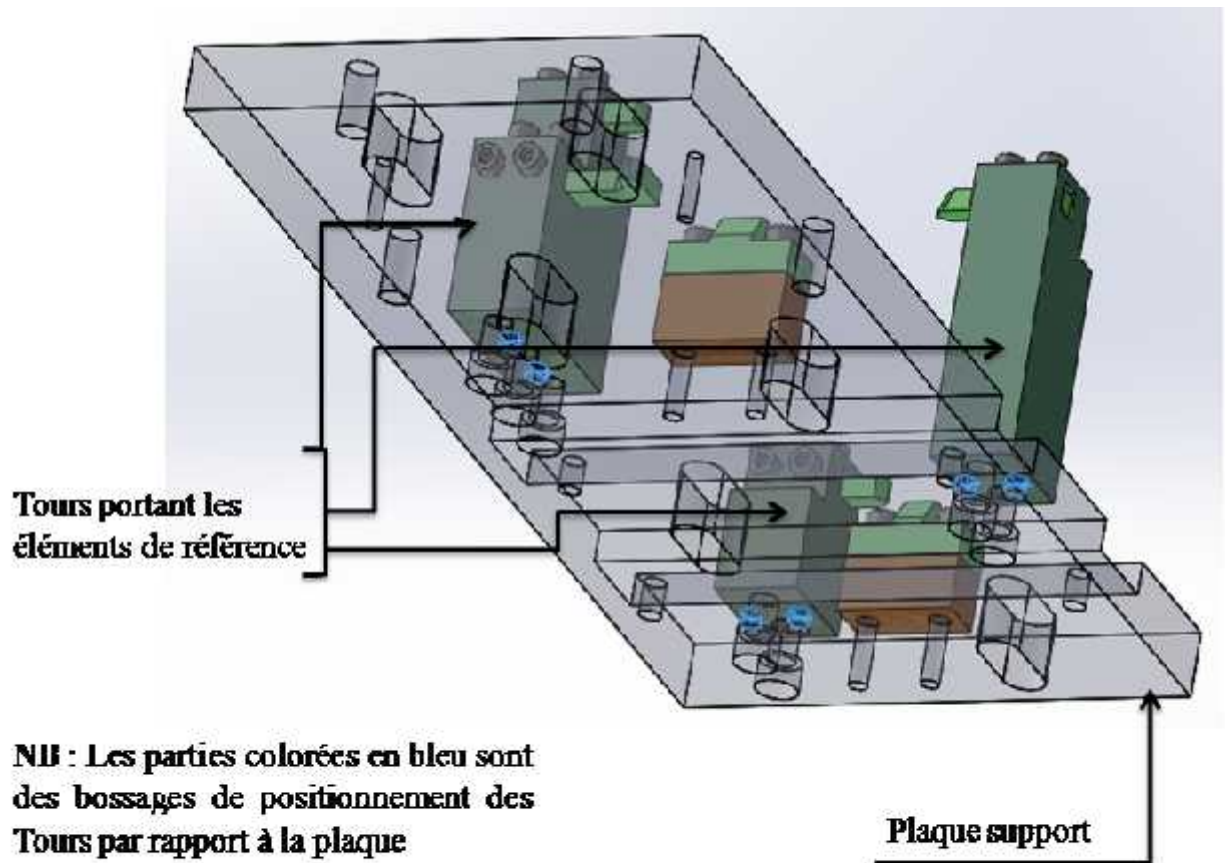


Figure III.7 : Représentation de la plaque support en mode transparent avec les éléments de positionnement et leurs éléments de liaison.

III.2.3 : Contraintes de Fabrication :

Le choix du procédé d'usinage dépend en premier lieu de la forme souhaitée, puis du plan de charge affecté à chaque poste de travail. Durant la réalisation de notre montage d'usinage, deux postes de travail ont été couplés pour la réalisation des différents composants, le centre d'usinage vertical à 5 axes, et la machine EDM à fil. Plusieurs composants du montage d'usinage ont été réalisés séparément à partir de l'état brut jusqu'à la phase finale soit sur le CU ou sur la machine EDM voir (figure III.8), mais les éléments de positionnement sont réalisés de la même façon, sauf la partie qu'est en contact avec la pièce où elle était reportée après l'étape d'assemblage finale (figure III.3).

La phase d'usinage en finition des éléments de positionnement a été réalisée impérativement sur le CU à 5 axes, en une seule phase, un seul posage, et avec le même référentiel que celui de la conception. Deux modes de programmation d'usinage ont été utilisés durant la réalisation des composants du montage d'usinage, le mode directe sur pupitre pour les usinages 2 axes 1/2 par le langage machine « Shop Mill pour le CU, le langage machine ONA AF35 pour la machine EDM », et le mode indirecte pour l'usinage 3 axes et plus en utilisait le logiciel FAO « TopCam / TopSolid » voir (figure III.9).

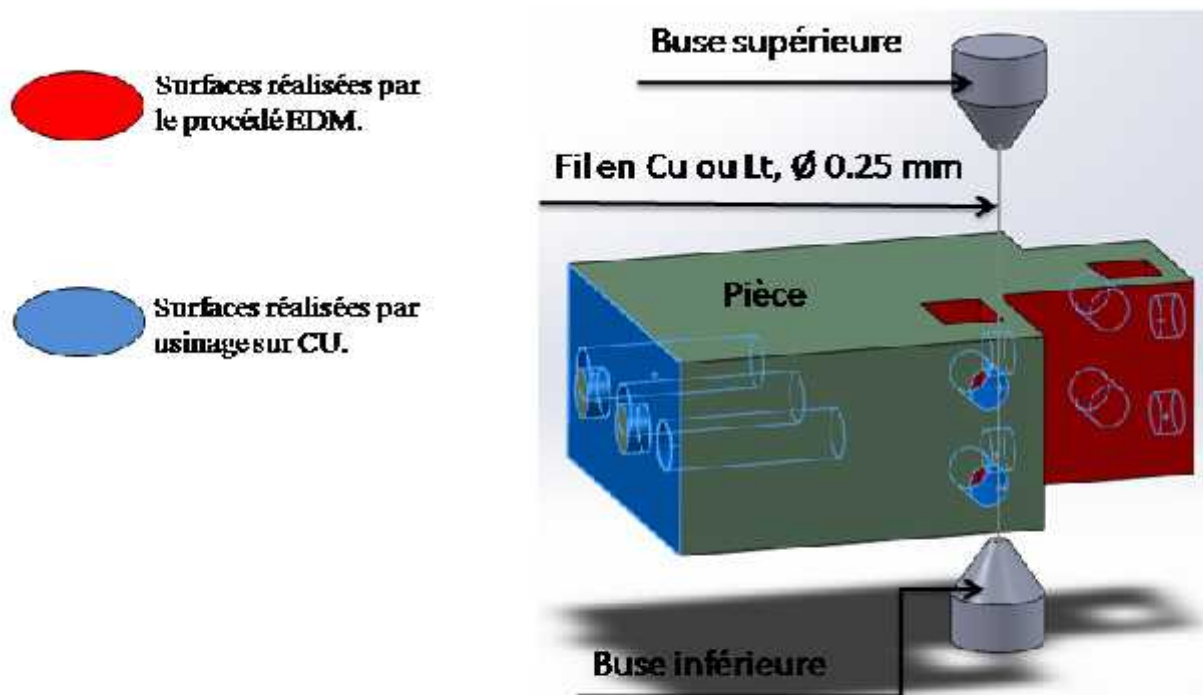


Figure III.8 : Exemple d'une pièce réalisée sur les deux machines, CUV et EDM.

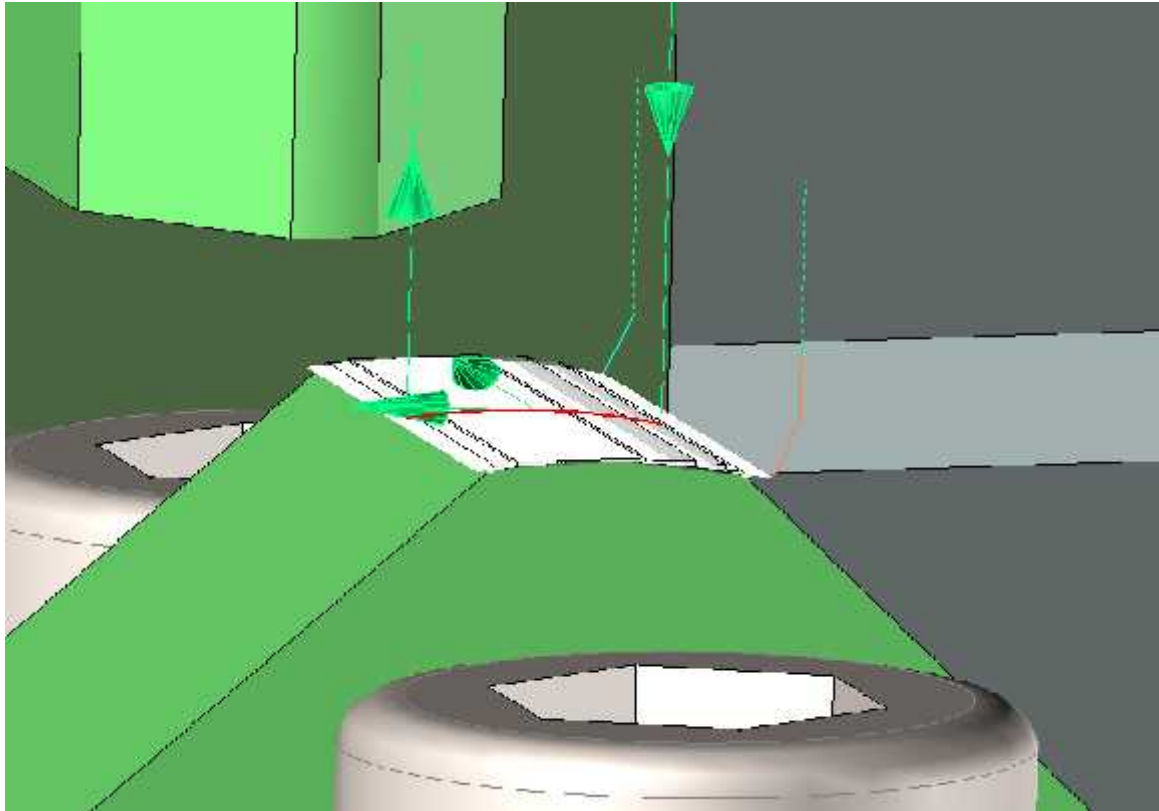


Figure III.9 : Représentation graphique de l'usinage en finition sous forme de balayage 3 axes de la zone en contact avec la pièce.

III.2.4: Contraintes Esthétiques:

En but de donner un aspect attirant pour notre montage d'usinage et être optimistes pour le choix entre la confection des éléments de soutien ainsi que les éléments de fixation, et l'utilisation des composants similaires standards de la marque « AutoBlok », on a opté pour le deuxième choix vue la crédibilité, la disponibilité et la faisabilité d'utilisation de ces accessoires standards (figure III.10).

Pour les autres composants qu'ont été usinés, on a appliqué une couche de peinture après sablage pour que l'aspect visuel soit semblable aux accessoires standards (figure III.11).

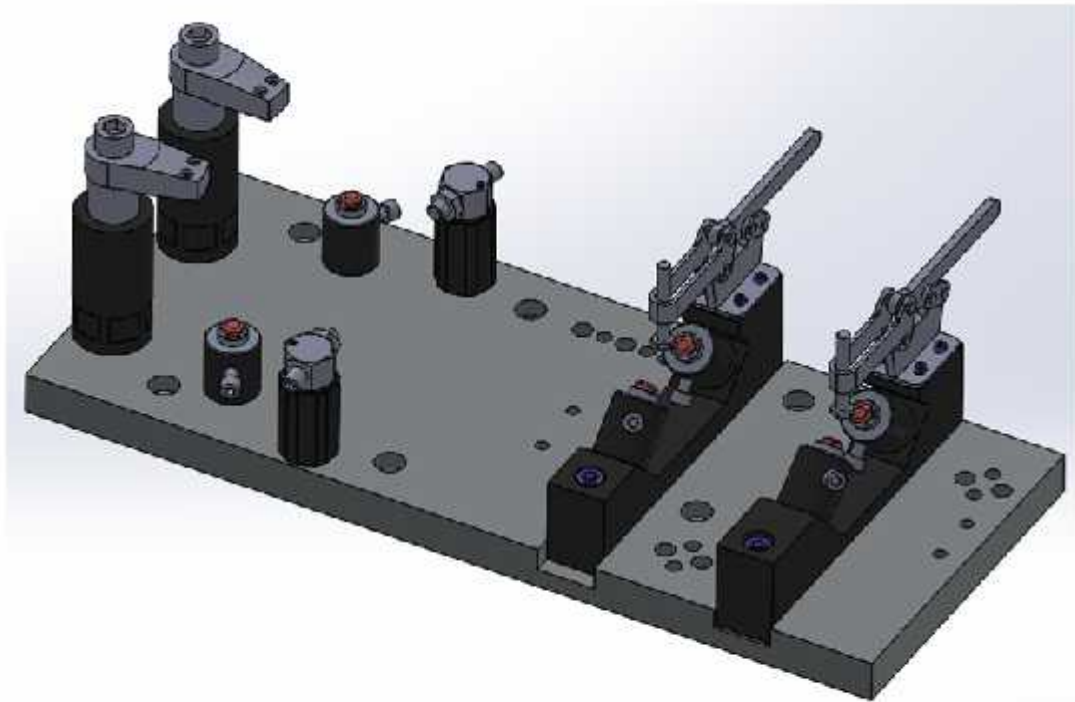


Figure III.10 : Accessoires standards de la marque AutoBlok sur la plaque support usinée

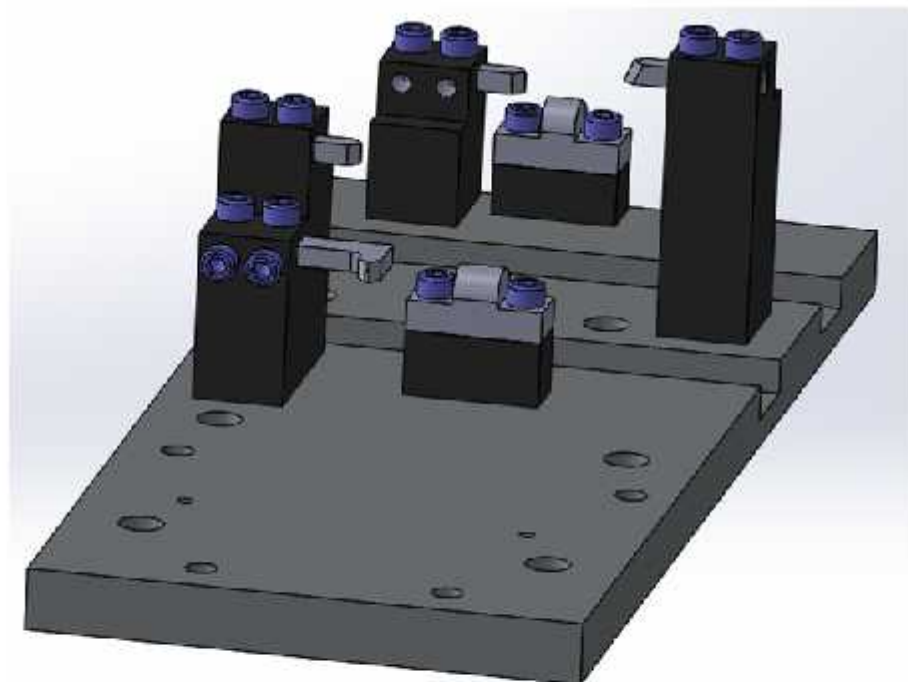


Figure III.11 : Eléments de positionnement et ces supports sur la plaque support usinée

III.3: Localisation de la pièce :

Une pièce a un total de 12 mouvements linéaires et rotatifs (incluant les directions positives et négatives pour chaque axe) le long des axes X, Y et Z (figure III.12), ces 12 mouvements sont également appelés 6 degrés de liberté. Le système de localisation du montage d'usinage devrait empêcher la pièce de se translater et de se tourner le long et autour de 3 axes X, Y et Z. Dans le cas d'une pièce à géométrie complexe, la méthode de six points peut être utilisée pour immobiliser la pièce à usiner [17].

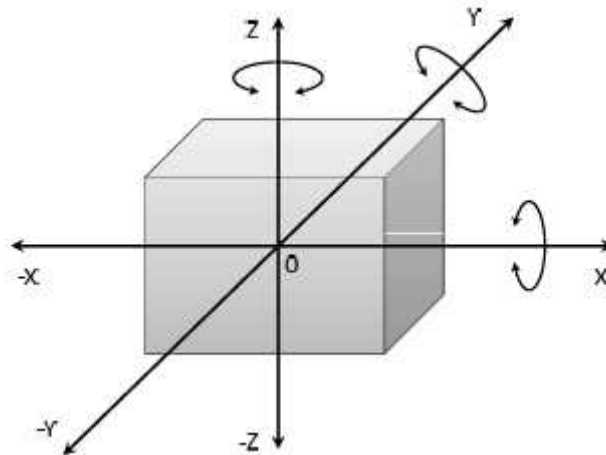


Figure III.12 : Les mouvements possibles d'une pièce dans le système coordonné de machine [17].

III.3.1 : Principe de Six Points :

Le six points est un principe d'isostatisme ou de mise en position qui assure la position de l'ailette (Blade) ou de la directrice (Vane) dans la turbine, par sa position relative aux autres composants, donc la précision et la répétitivité avec laquelle la pièce objet elle est positionnée, car cela garanti l'écoulement du flux d'air d'une façon régulière entre chaque deux ailettes successives à travers les différents étages de la Turbine, ce qui favorise la stabilité de la machine, et donc le rendement global de cette dernière. En effet, une des fonctions principales de l'usinage d'une pièce de fonderie (Ailette ou Vane brute) est donc de positionner correctement l'ailette dans la turbine [18].

III.3.2 : Critères de choix des Six Points :

Les critères de choix des six points sur la pale de l'ailette ont pour objectifs de mettre cette dernière dans sa position correcte au niveau de l'étage qui correspond, en tenant compte de toutes les contraintes géométriques de position par rapport aux autres composants de la turbine. Trois points (D2, D3 et D5) sur l'extrados de la pale pour positionner le plan C (figure III.13). Deux points (D1, D5) sur le bord d'attaque pour orienter le plan B (figure III.14). Un point de butée (D6) sur la partie chaude du talon pour définir le plan A et l'origine [18].

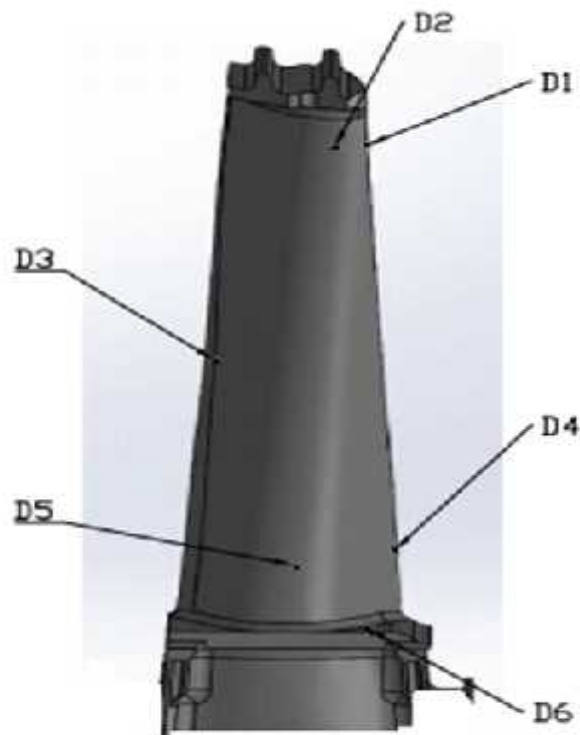


Figure III.13 : Représentation des Six Points sur la pale d'ailettes [18].

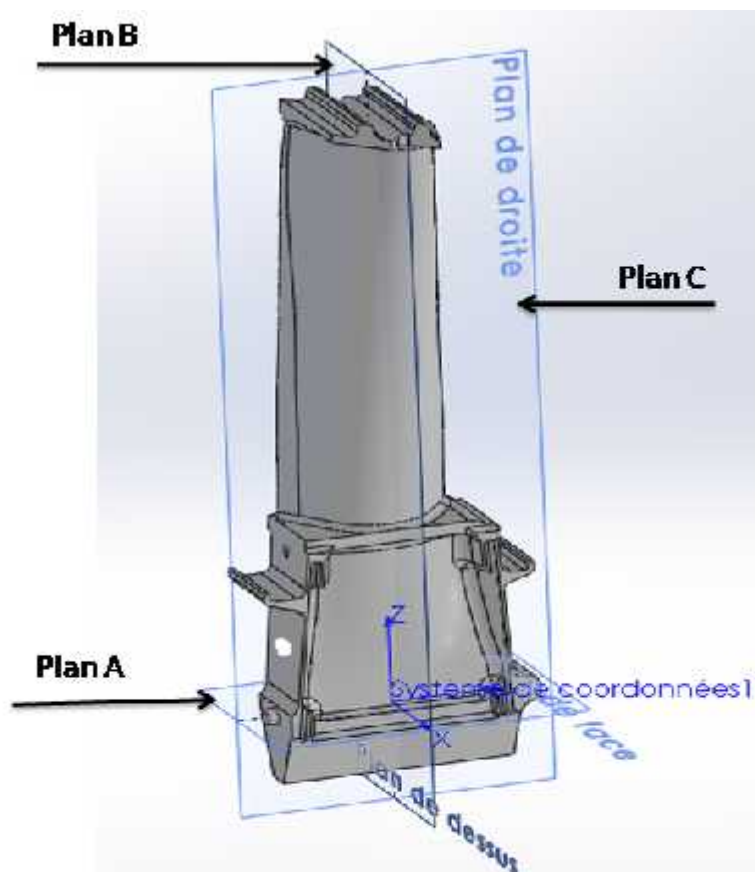


Figure III.14 : Représentation des trois plans orthogonaux qui positionnent la pièce dans la turbine

III.4 : Séquence des étapes de modélisation du montage de six points :

La conception du montage d'usinage a été déroulée suivant les étapes suivantes :

Etape 1 : Importer le modèle 3D de la pièce :

Création d'un fichier assemblage sur logiciel « SolidWorks », puis importation du modèle 3D de l'ailette. Au moyen de l'Esquisse 3D on a introduit les coordonnées (X, Y et Z) des six points de référence au niveau de la pale, ainsi que les lignes normales par rapport à la face de la pièce à partir de ces six points (figure III.15).

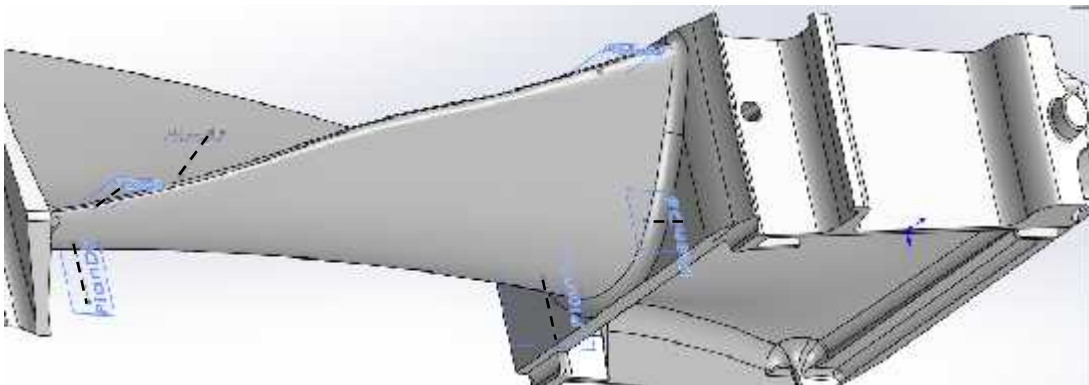


Figure III.15 : Représentation des six points et les normales sur l'ailette.

Etape 2 : Modélisation des appuis de référence :

Les éléments (appuis) de référence ont été modélisés à partir des six points et ces normales, de telle façon que le contact avec la surface doit être ponctuel vue la géométrie complexe de la pièce (figure III.16).

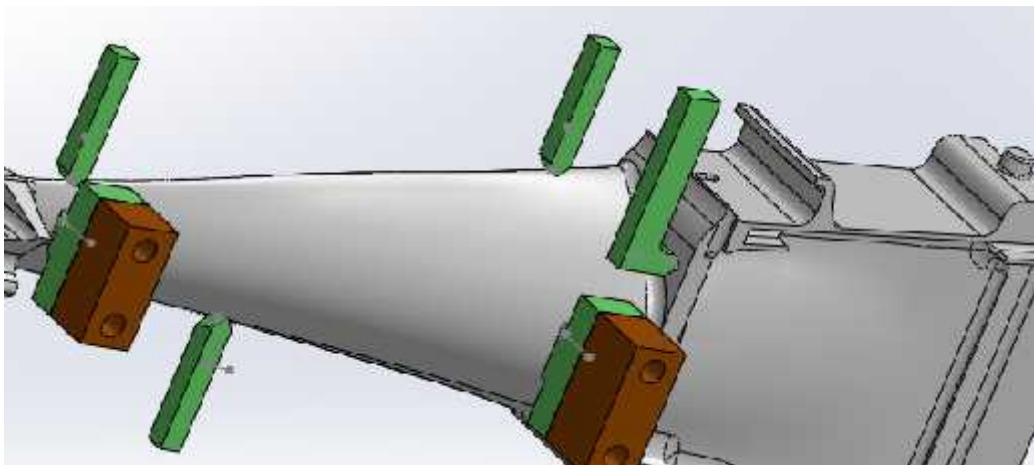


Figure III.16 : Représentation des appuis de référence sur l'ailette.

Etape 3 : Modélisation des éléments de soutien et les éléments de serrage :

Les éléments de soutien et les éléments de serrage ont été insérés dans l'assemblage de telle façon que les parties fixes de ces éléments ont des positions qui permettent (figure III.17) :

- L'accessibilité des outils de coupe et les instruments de mesure.
- L'ouverture et la fermeture libres dans la course admissible des parties mobiles telles que les pistons des appuis à ressort.
- Le serrage et le desserrage libres dans la course admissible des parties mobiles telles que les sauterelles et les pistons de serrage.

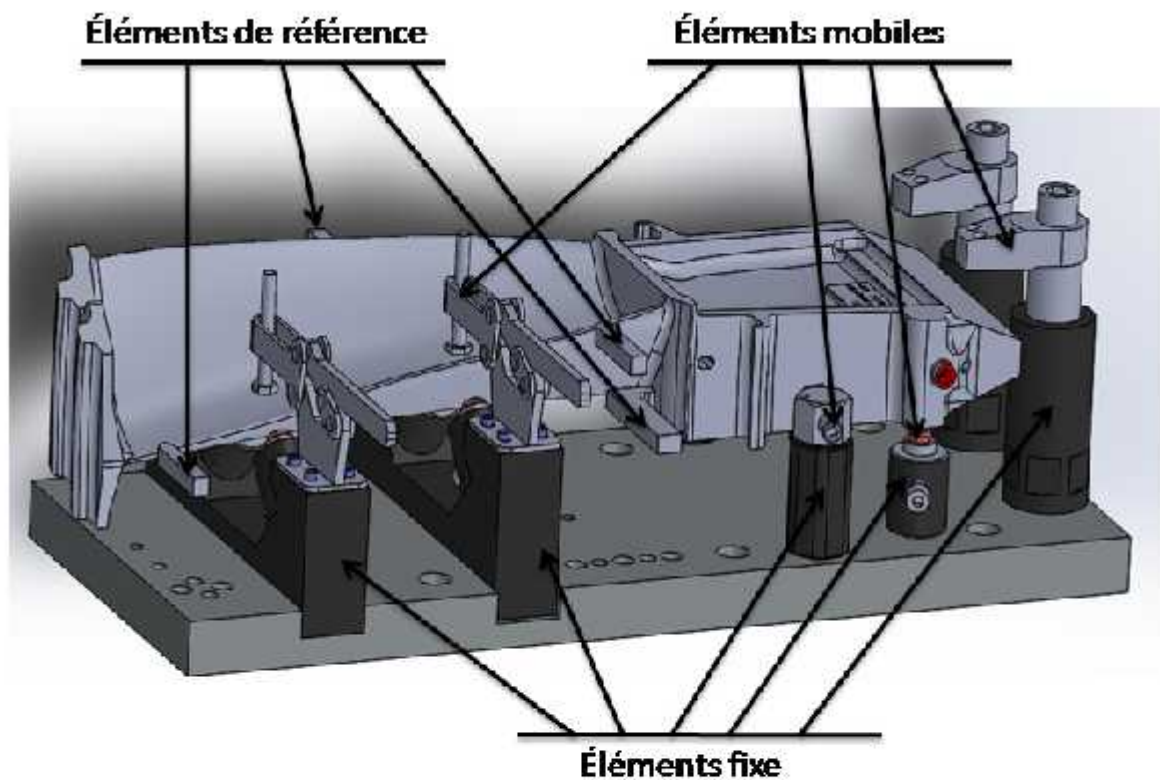


Figure III.17 : Représentation des éléments fixes et mobiles pour les accessoires de soutien et de serrage

Etape 4 : La plaque support :

La plaque de base a été modélisée juste après la mise en place des éléments dans l'étape 3. Dans cette étape, le concepteur doit prendre en compte les dimensions de la table de la machine outil, et que la plaque doit englober toutes les accessoires et les composants du montage d'usinage (figure : III.18).

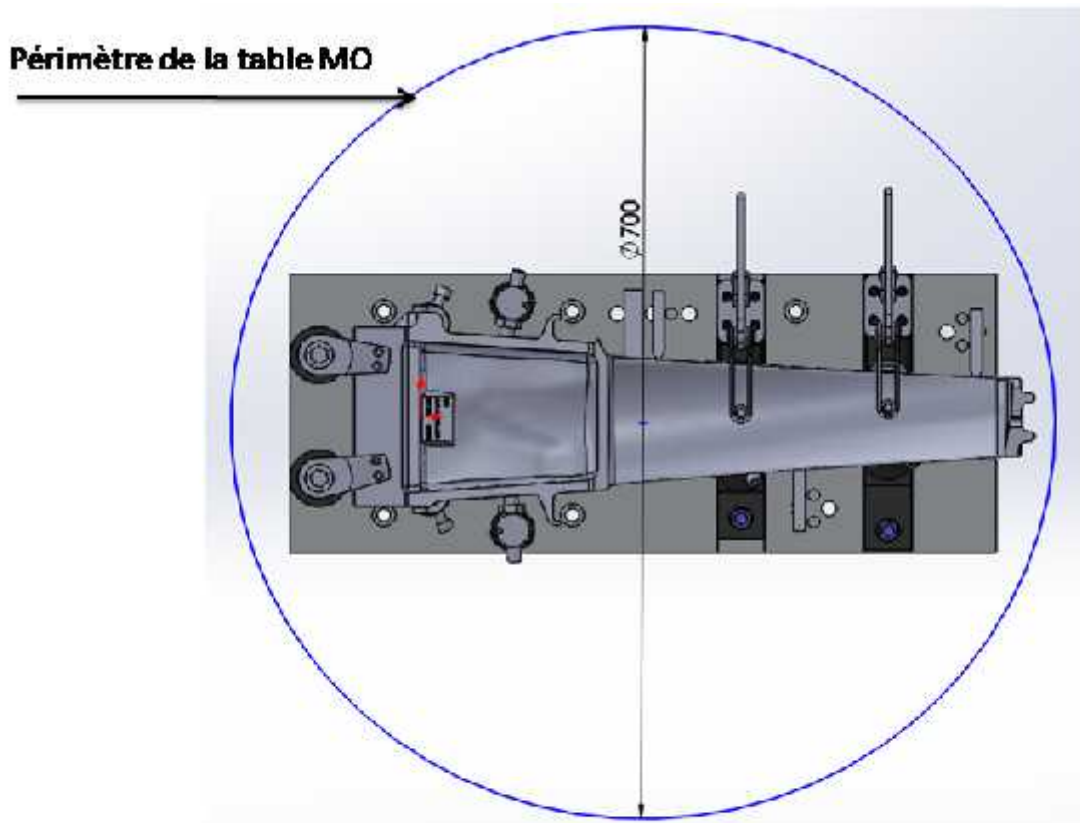


Figure III.18 : Position des composants du montage par rapport à la plaque de base, et cette dernière par rapport à la table de la MO.

Etape 5 : Modélisation des éléments de liaison des appuis de référence :

Dans cette étape, le concepteur doit tenir en compte l'accessibilité aux zone de contact appui / pièce en but de vérifier le jeu, ainsi que la mise en position et le système de maintien en position des appuis de référence sur les éléments de liaison (figure III.4.a).

Chapitre IV

Réalisation Du Montage D'usinage

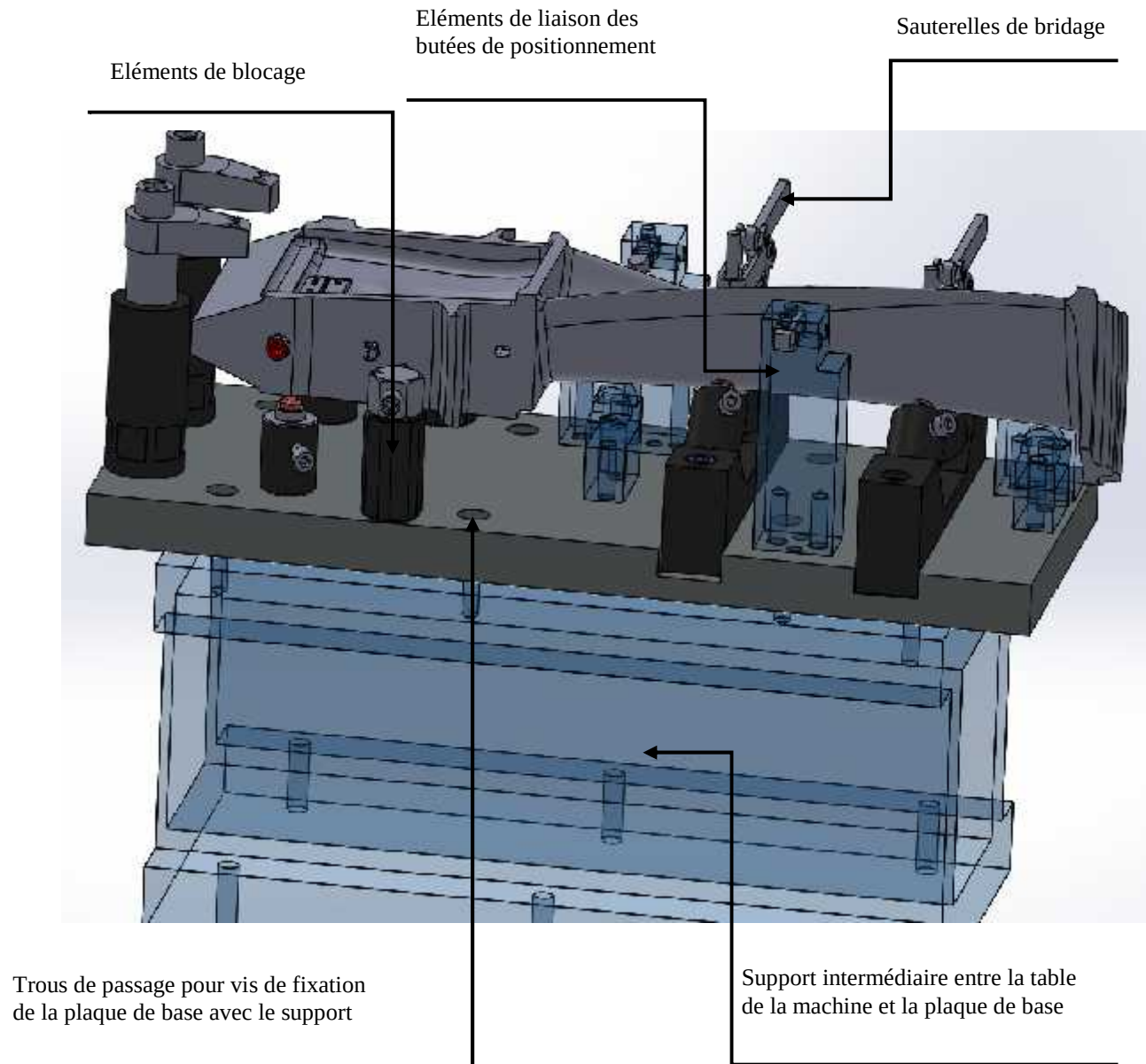


Figure IV.1 : Vue générale du montage d'usinage avec le support extension intermédiaire

IV.1 : Introduction:

Afin de valider la méthodologie et la démarche de conception du montage d'usinage proposées dans les chapitres 2 et 3, nous allons décrire à travers ce chapitre les différentes étapes de réalisation par les moyens disponible au niveau de MEI. Dans ce chapitre on va présenter le processus de fabrication de différents composants, les outils de coupe utilisés, les paramètres de coupe ainsi que le choix des stratégies d'usinage.

IV.2 : Processus de fabrication :

Les procédés de fabrication de chaque composant du montage d'usinage (figure IV.1) sont décrits ci-dessous. Globalement, les deux équipements de fabrication sont à savoir, le centre d'usinage vertical à 5 axes et la machine EDM à fil s'appelle aussi robofil, sans oublier la phase de débitage (préparation des pièces brutes).

IV.2.1 : La plaque de base :

La figure VI.2 ci-dessous illustre un modèle CAD de la plaque de base et indique les caractéristiques de formes de chaque étape de la procédure de fabrication. Il convient de noter que le centre d'usinage a une précision de 0.007 mm de localisation suivant et autour les trois axes (X, Y et Z).

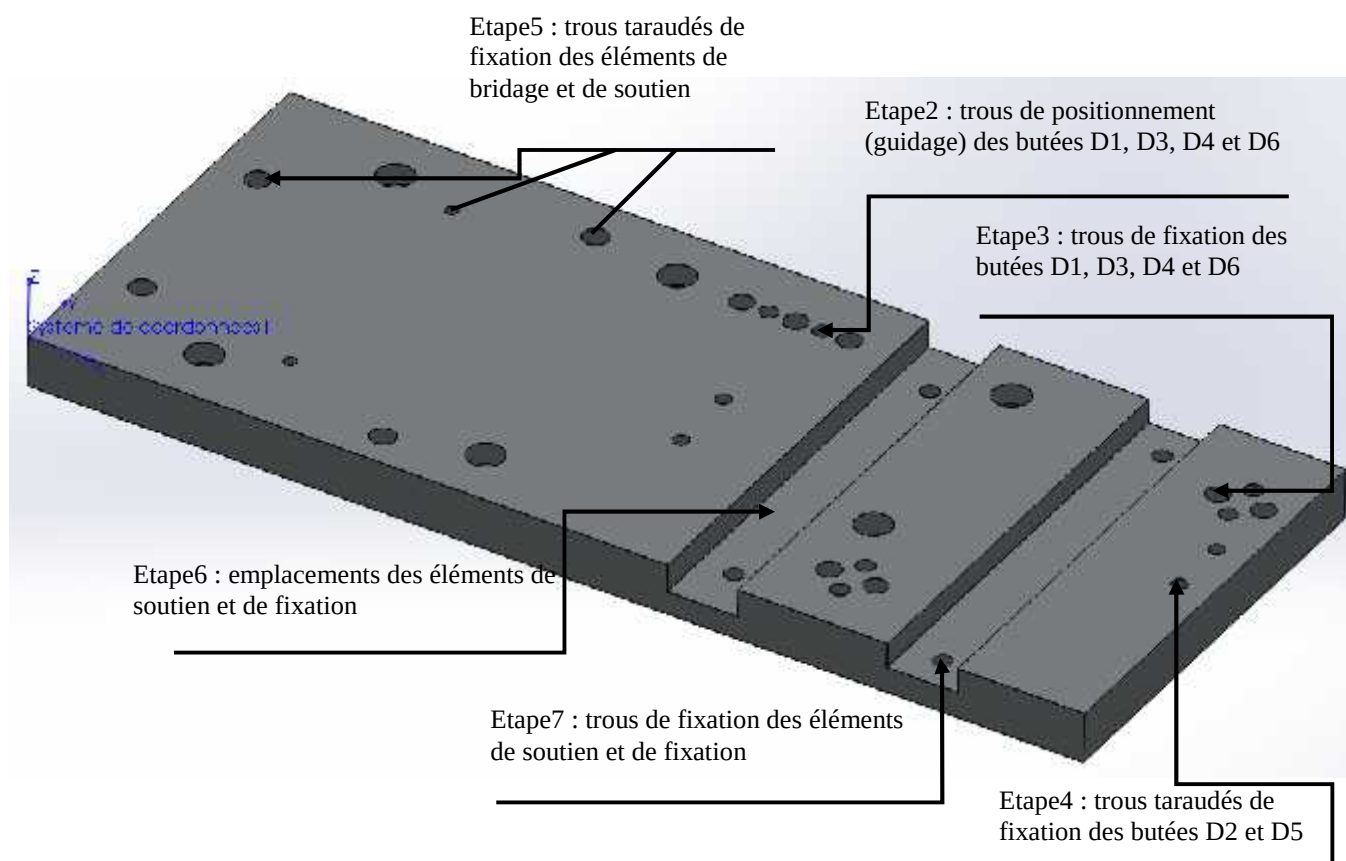


Figure IV.2 : Modèle CAD de la plaque de base indiquant les formes usinées pour chaque étape

La procédure de fabrication est comme suit :

- 1) Surfaçage des faces et contournage des bords de la plaque de base, puis détermination du référentiel programme à l'endroit comme il est indiqué sur la figure IV.2.
- 2) Réalisation des trous de positionnement (sous forme de poches circulaires) des éléments de liaison des butées D1, D3, D4 et D6, avec une fraise cylindrique deux tailles en carbure.
- 3) Perçage avec un foret en carbure des trous de passage pour la fixation des éléments de liaison des butées D1, D3, D4 et D6.
- 4) Réalisation des trous taraudés des butées D2 et D5, avec un foret en carbure suivit d'un taraud adéquat.
- 5) Réalisation des trous taraudés des éléments de bridage, de soutien et de blocage, avec des forets en carbure suivit des tarauds adéquats.
- 6) Réalisation des emplacements des éléments de soutien et de bridage, avec une fraise à surfacer-dresser et rainurer à pastilles.
- 7) Réalisation des trous taraudés des éléments de soutien et de bridage, avec un foret en carbure suivit d'un taraud adéquat.
- 8) Réalisation des trous de passage des vis de fixation de la plaque de base avec le support extension intermédiaire.

IV.2.2 : Les éléments de liaison :

La figure IV.3 ci-dessous illustre un modèle CAD d'un élément de liaison indiquant les caractéristiques de formes de chaque étape de la procédure de fabrication. Il est à noter aussi que la machine robofil a une précision de 0.008 mm de localisation suivant les axes X et Y.

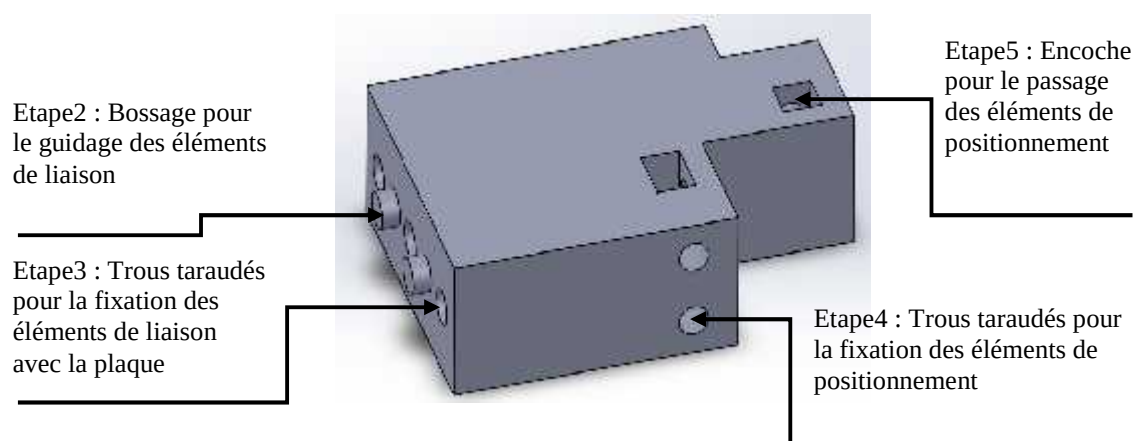


Figure IV.3 : Modèle CAD d'un élément de liaison indiquant les formes usinées pour chaque étape

La procédure de fabrication est comme suit :

- 1) Surfaçage des quatre faces sur CUV, avec une fraise à surfacer.
- 2) Réalisation des bossages de guidage, en ébauche avec une fraise à surfacer-dresser suivit d'une finition par une fraise cylindrique à deux tailles monobloc en carbure.
- 3) Perçage des trous taraudés de fixation des éléments de liaison avec la plaque de base, par un foret en carbure suivit d'un taraud adéquat.
- 4) Perçage des trous taraudés pour les vis de fixation des éléments de positionnement dans les éléments de liaison, par un foret en carbure suivit d'un taraud adéquat.
- 5) Réalisation des encoches qui logent les éléments de positionnement, par la machine robofil à partir des avant trous réalisés au niveau du CUV.

IV.2.3 : Éléments de positionnement :

Les éléments de positionnement sont appelés aussi les appuis de localisation ou de référence, ce sont de matériau différent que les autres composants. La figure VI.4 illustre les deux étapes de fabrication de ces éléments, la première est faite au niveau du robofil pour les mettre en état semi fini (figure VI.4.a) et la deuxième se fera au niveau du CUV pendant la phase de finition des six appuis après l'assemblage par vis avec les éléments de liaison (figure VI.4.b).

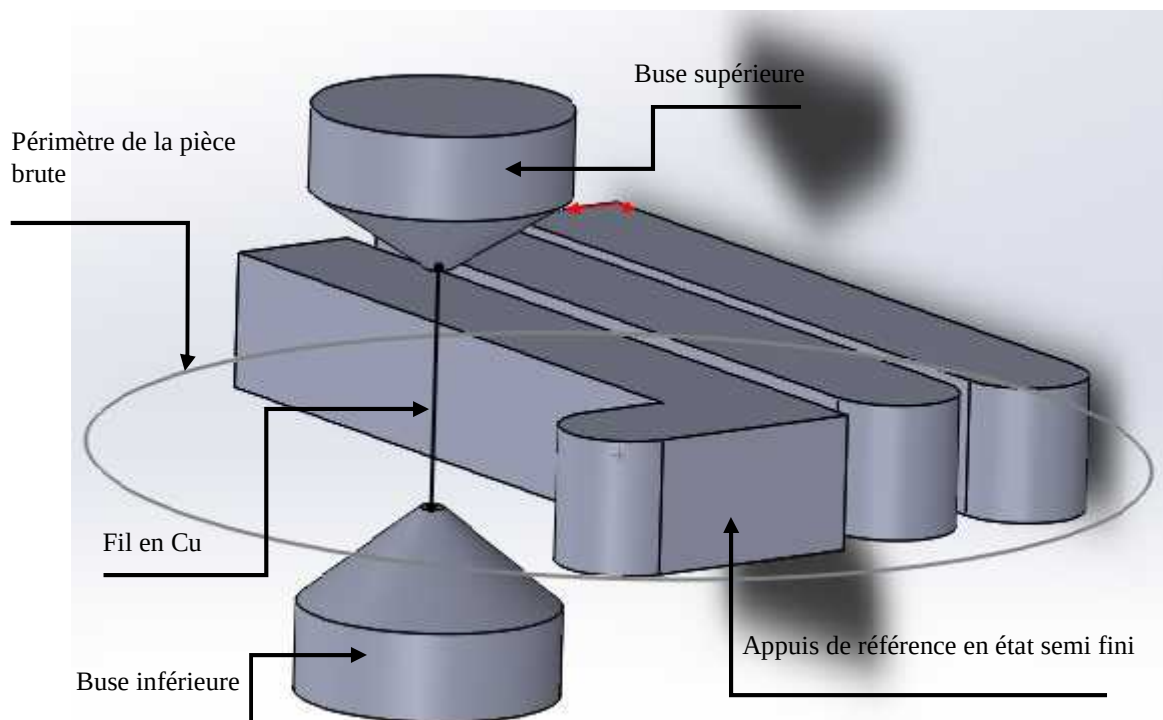


Figure IV.4.a : Modèle CAD illustre la découpe des appuis de référence pendant la première étape

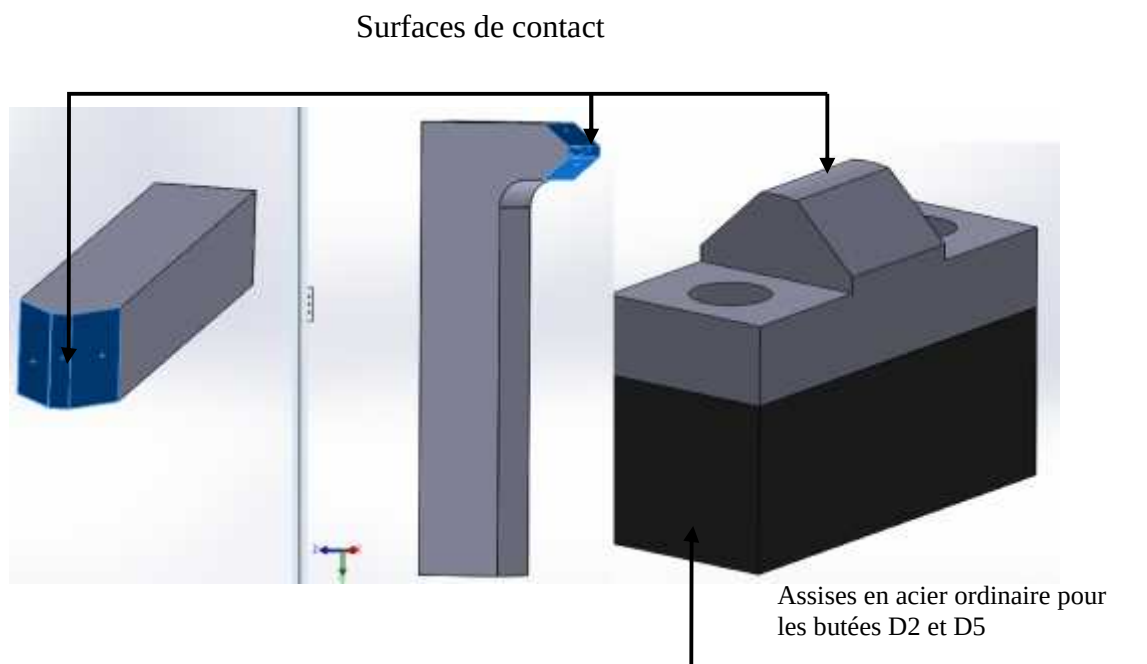


Figure IV.4.b : Modèles CAD illustrent les surfaces de contact usinées des appuis de référence avec la pièce

IV.3 : Choix des outils et paramètres de coupe :

Avant de passer aux choix des outils et des paramètres de coupe, il est nécessaire de savoir les types de matériaux constituant les différents composants du montage d'usinage ainsi que la pièce à usiner, sur lesquelles nos choix des outils et des paramètres de coupe vont se baser. Le tableau IV.1 représente le matériau de chaque groupe de composants. Les critères de sélection du matériau ont été conduits par les facteurs suivants :

- Les forces ou charges appliquées sur chaque composant.
- Disponibilité et cout du matériau.
- Usinabilité du matériau.
- Dilatation thermique.

Matériaux	composants
GTD111	Ailette mobile.
Acier ordinaire	Plaque de base et les éléments de liaison.
//	Les éléments de bridage et de blocage standards
Inconel 718	Les éléments de positionnement.

Tableau IV.1 : liste des composants avec les matériaux correspondants

IV.3.1 : Choix des outils de coupe :

Les outils de coupe utilisés pendant la confection des différents composants du montage d'usinage ont été choisis suivant les critères suivants :

- Le matériau du composant à usiner.
- La disponibilité au niveau du magasin d'outillage.
- L'opération à réaliser (ébauche ou finition).
- L'accessibilité aux surfaces à usiner (longueur et diamètre de l'outil).

Les différents outils de coupe sont représentés dans le tableau IV.2.

IV.3.2 : Paramètres de coupe :

Puisque les outils de coupe utilisés sont de la marque SECOTOOLS, alors les paramètres de coupe adoptés sont ceux préconisés par le constructeur lui-même, (figure IV.5). Les facteurs déterminants les paramètres de coupe sont :

- Le matériau de la pièce à usiner.
- L'opération à réaliser (ébauche ou finition).
- La profondeur de passe (radiale et axiale).
- L'état de surface de la pièce.
- L'usinage à sec ou avec arrosage.
- Le matériau de l'outil

Conditions de coupe

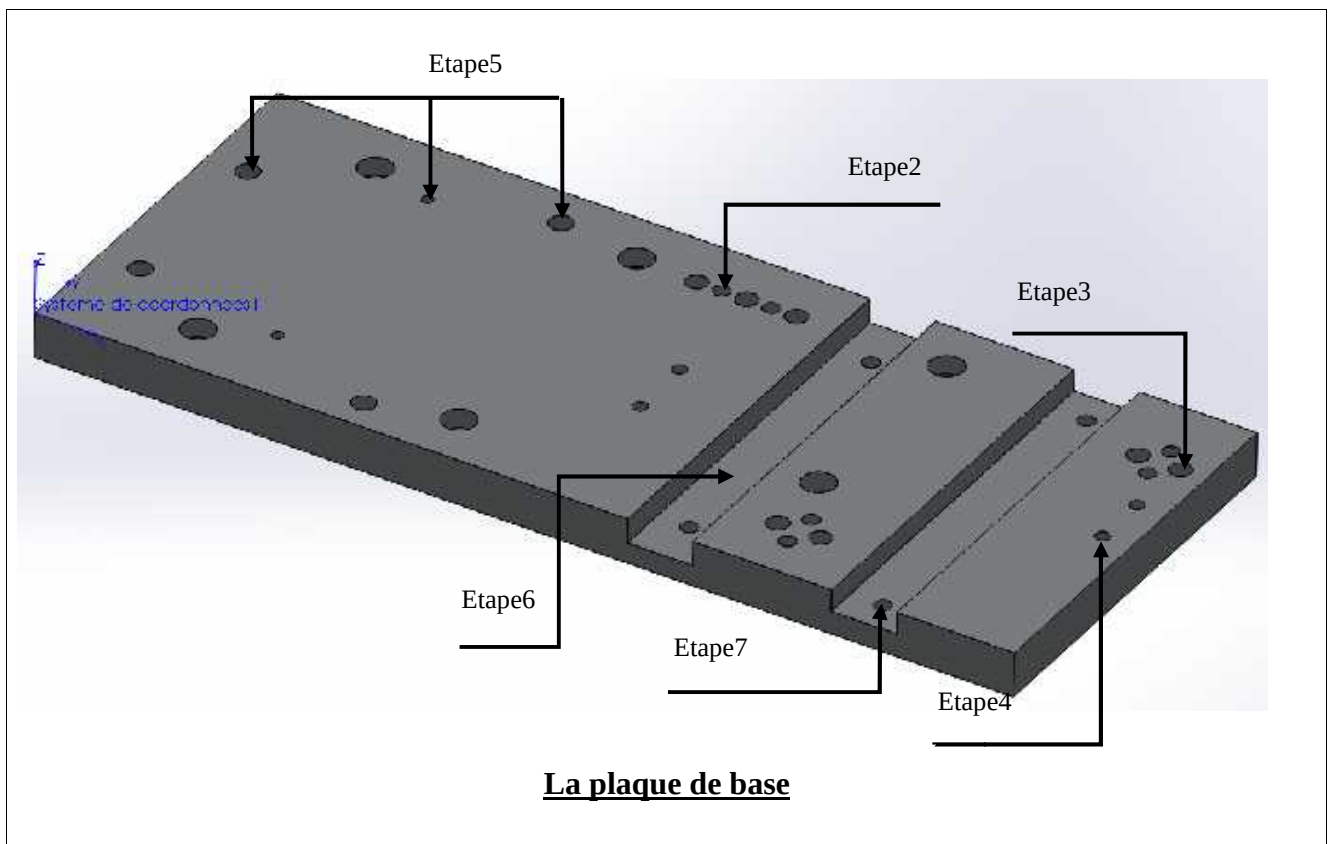


Rotation $n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad (\text{Tr/min})$	
Vitesse de coupe $v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad (\text{m/min})$	
Vitesse d'avance $v_f = n \cdot z_n \cdot f_z \quad (\text{mm/min})$ $v_f = n \cdot z_c \cdot f_z \quad (\text{mm/min})$	
Avance par tour $f = z_n \cdot f_z \quad (\text{mm/Tr})$ $f = z_c \cdot f_z \quad (\text{mm/Tr})$	
Débit copeaux $Q = \frac{a_g \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad (\text{cm}^3/\text{min})$	

a_g	= Profondeur de coupe radiale	mm
a_p	= Profondeur de coupe axiale	mm
D_c	= Dia. de fraise	mm
f	= Avance par tour	mm/Tr
f_z	= Avance par tour	mm/dent
z_c	= Nombre de dents effectif pour le calcul de la vitesse d'avance ou de l'avance	
n	= Tr/min (tr/min)	Tr/min
Q	= Débit copeaux	cm ³ /min
v_c	= Vitesse de coupe	m/min
v_f	= Avance	mm/min

Figure IV.5: Calculs des conditions de coupe en fraisage.

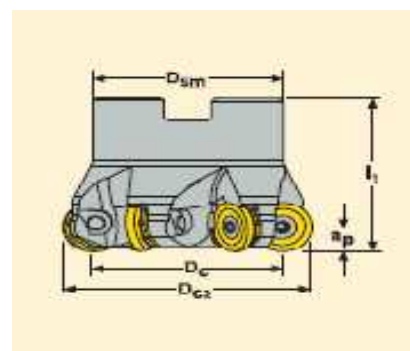
Le tableau IV.2 suivant représente les paramètres de coupe correspondants aux formes à usiner avec les outils adéquats



Etape 1 :

surfaçage des deux grandes faces de la plaque de base par une fraise à surfacer à pastilles rondes avec arrosage centrale, en ébauche et en finition, elle s'appelle aussi fraise à copier.

Diamètre de la fraise $\varnothing = 50$ mm.



Les paramètres de coupe pour ébauche :

$V_c = 260$ m/min, $f_z = 0.24$ mm/dent, $a_p = 2$ mm, $a_e/D_c = 80$ %.

Les paramètres de coupe pour finition :

$V_c = 320$ m/min, $f_z = 0.19$ mm/dent, $a_p = 0.2$ mm, $a_e/D_c = 60$ %.

Etape 4 :

Perçage des avant trous par un foret de diamètre $D_c = 8.5$ mm, suivit par un taraud M10.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

$V_c = 105$ m/min, $f = 0.22$ mm/tour,

Etape 5 :

- Perçage des avants trous par un foret de diamètre $D_c = 6.75$ mm, suivit par un taraud M8.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

$V_c = 105$ m/min, $f = 0.18$ mm/tour,

- Perçage des avants trous par un foret de diamètre $D_c = 14$ mm, suivit par un taraud M16.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

$V_c = 105$ m/min, $f = 0.32$ mm/tour,

Les paramètres de coupe pour le taraudage :

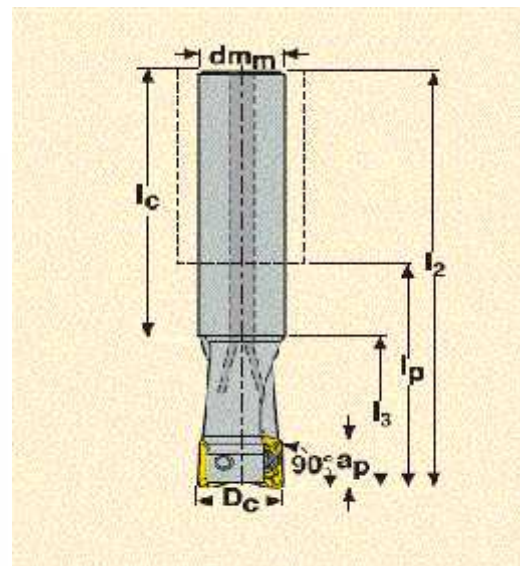
L'opération de taraudage se faite manuellement.

Etape 6 :

Réalisation des emplacements des éléments de soutien par une fraise à surfacer- dresser et rainurer à pastilles carrées de diamètre $D_c = 20$ mm,

Les paramètres de coupe sont :

$V_c = 250$ m/min, $f_z = 0.11$ mm/dent, $a_p = 4.5$ mm, $a_c/D_c = 100$ %.



Schématisation une fraise à surfacer- dresser et rainurer

Etape 7 :

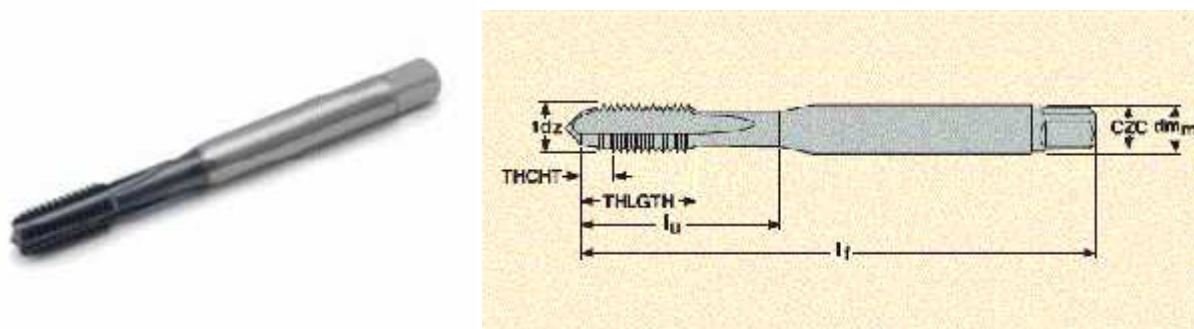
Perçage des avants trous par un foret de diamètre $D_c = 10.5$ mm, suivit par un taraud M12.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

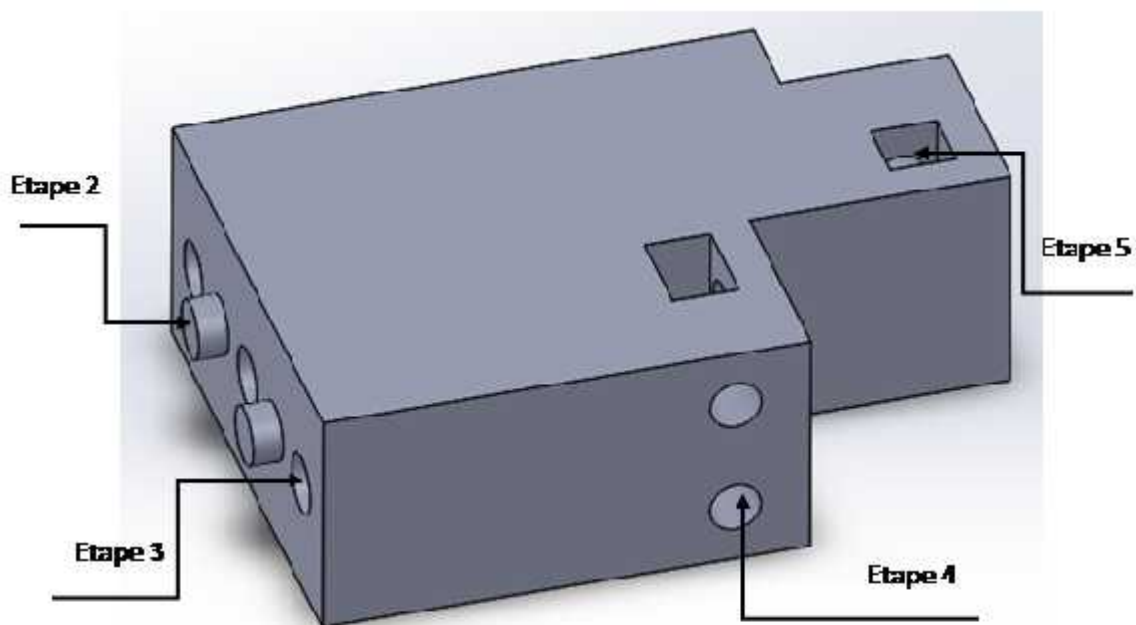
$V_c = 105$ m/min, $f = 0.26$ mm/tour,

Les paramètres de coupe pour le taraudage :

L'opération de taraudage se faite manuellement.



Schématisation d'un taraud



Un élément de liaison

Etape 1 :

Surfaçage par la fraise à copier $D_{c2} = 50$ mm, en but de donner la forme générale de la pièce, les paramètres de coupe sont les mêmes que ceux utilisés dans l'usinage de la plaque de base. La fraise à surfacer-dresser est une deuxième alternative qui peut être utilisé dans cette étape.

Etape 2 :

Réalisation des bossages en ébauche par une fraise à surfacer-dresser à pastilles de diamètre $D_c = 12$ mm, les paramètres de coupe utilisées sont les suivantes :

$V_c = 275$ m/min, $f_z = 0.070$ mm/dent, $a_p = 2.5$ mm, $a_e/D_c = 100$ %.

L'opération de finition se faite par une fraise deux tailles monobloc en carbure de diamètre $D_c = 12$ mm.

Les paramètres de coupe sont :

$V_c = 420$ m/min, $f_z = 0.13$ mm/dent, $a_p = 5$ mm, $a_e/D_c = 0.4$.

Etape 3 :

Perçage des avants trous par un foret de diamètre $D_c = 10.5$ mm, suivit par un taraud M12.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

$V_c = 105$ m/min, $f = 0.26$ mm/tour,

Les paramètres de coupe pour le taraudage :

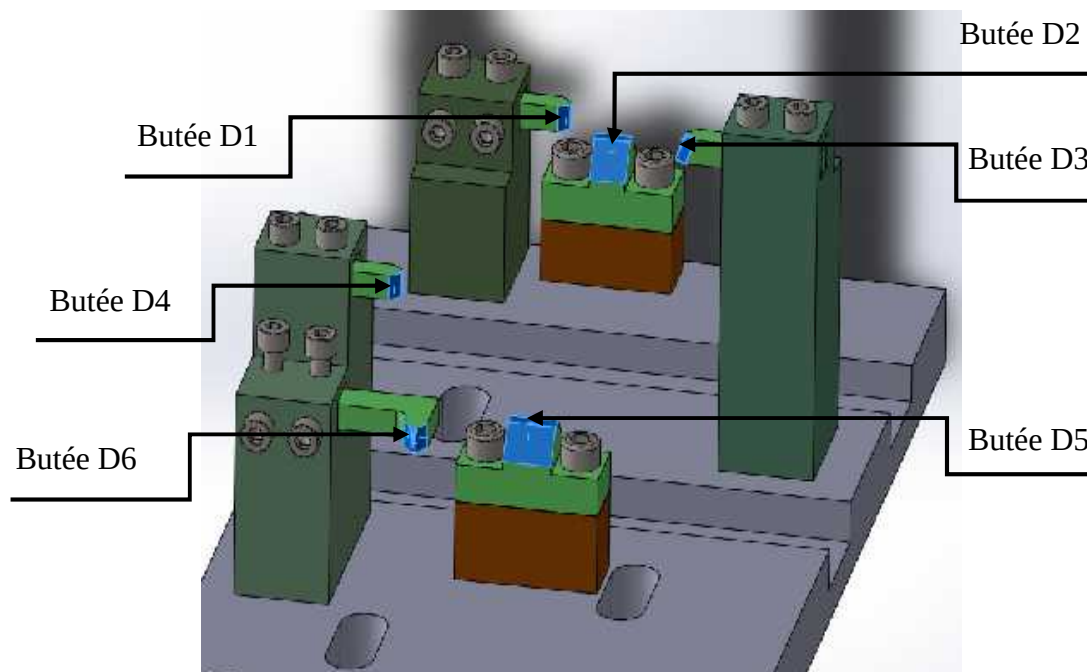
L'opération de taraudage se faite manuellement.

Etape 4 :

Perçage des avants trous par un foret de diamètre $D_c = 8$ mm.

Les paramètres de coupe pour le perçage :

$V_c = 105$ m/min, $f = 0.26$ mm/tour.



Éléments de positionnement

Etape 1 :

Les butées D1, D3, D4 et D6 ont été réalisées en utilisant le langage machine du CUV « Shop Mill », suivant un usinage 2 axes $\frac{1}{2}$, en ébauche et en finition par une fraise monobloc deux tailles en carbure de diamètre $D_c = 10$ mm, cette fraise monobloc a été montée dans un attachement de précision long en but d'éviter les collisions avec les éléments de liaison (tours).

Les paramètres de coupe pour l'ébauche sont :

$V_c = 32$ m/min, $f_z = 0.040$ mm/dent, $a_p/D_c = 0.85$, $a_e/D_c = 0.2$.

Les paramètres de coupe pour la finition sont :

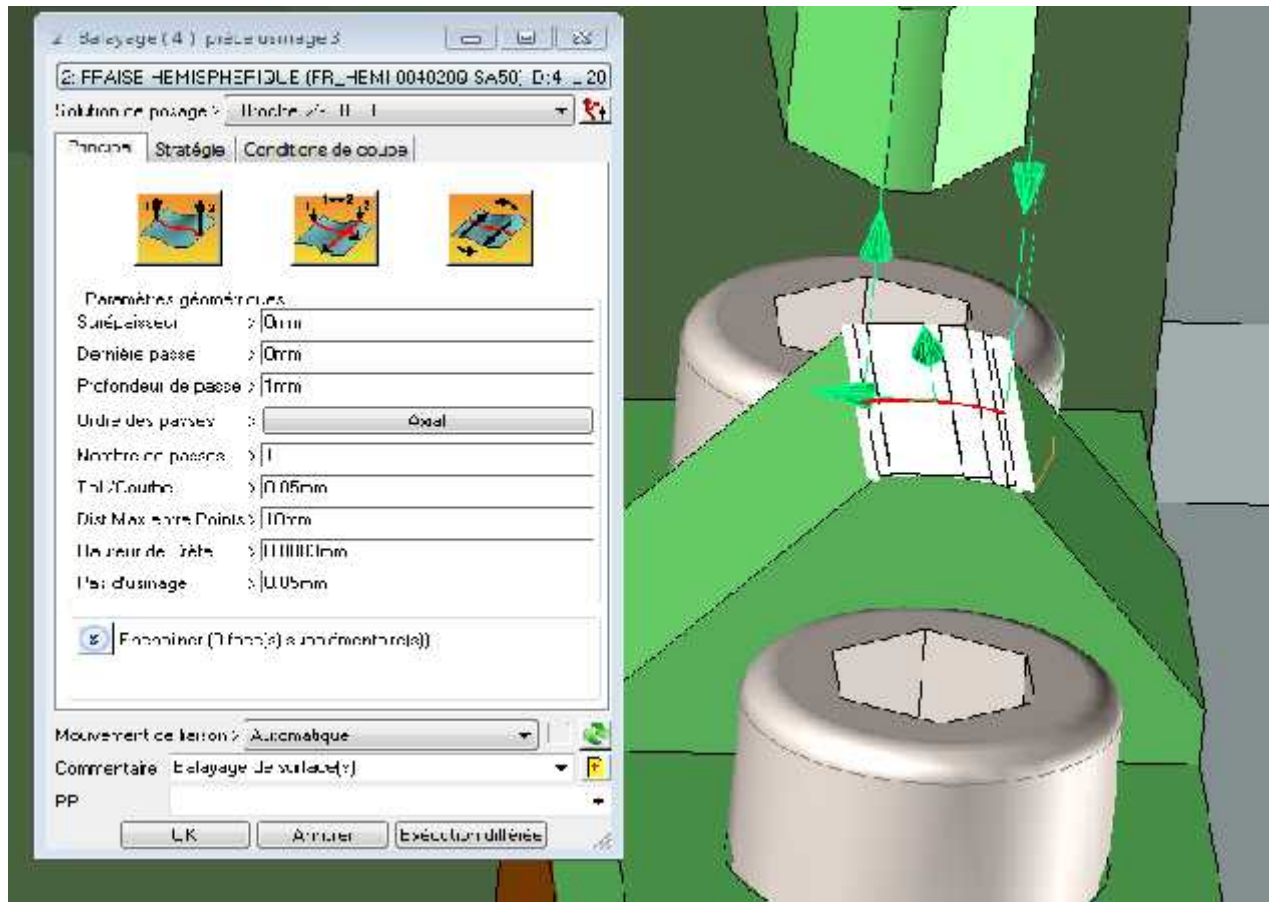
$V_c = 44$ m/min, $f_z = 0.11$ mm/dent, $a_p/D_c = 2$.

Etape 2 :

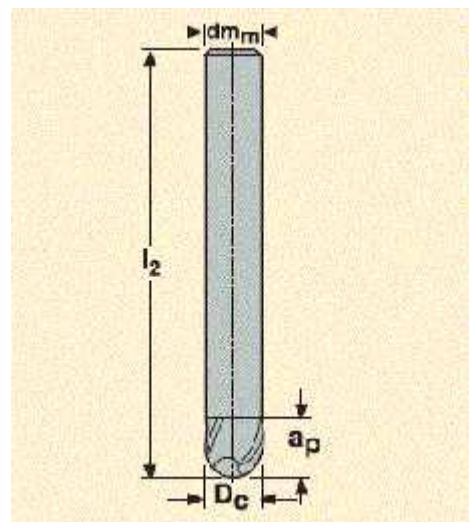
Les butées D2 et D5 ont été réalisées en utilisant le logiciel de FAO « TOPCAM », par un usinage 2 axes $\frac{1}{2}$, en ébauche par une fraise monobloc deux tailles en carbure de diamètre $D_c = 10$ mm (pour les paramètres de coupe, voir l'étape 1), et en finition par un balayage 3 axes, utilisant une fraise hémisphérique de diamètre $D_c = 4$ mm.

Les paramètres de coupe sont :

$V_c = 65$ m/min, $f_z = 0.07$ mm/dent, $a_p = 0.2$ mm, pas d'usinage = 0.05 mm, $h_c = 0.0003$ mm.



Les paramètres d'usinage d'un balayage 3 axes



Fraise hémisphérique

Fin du tableau IV.2

IV.4 : Stratégies d'usinage :

Le logiciel de FAO «TopCam » et le langage machine «Shop Mill », nous permettent de choisir les stratégies d'usinage adéquates, en but d'avoir un bon état de surface, un temps minimum d'exécution, une bonne stabilité du système d'usinage et d'éviter une éventuelle interférence entre l'outil et le reste du système d'usinage.

Parmi les stratégies d'usinage on trouve le type de parcours que l'outil doit le suivre pendant l'usinage. Dans notre cas, on a choisi le type «Zigzag» qui permet à l'outil un contact permanent pendant le balayage dès le début jusqu'à la fin de l'usinage (figure IV.6).

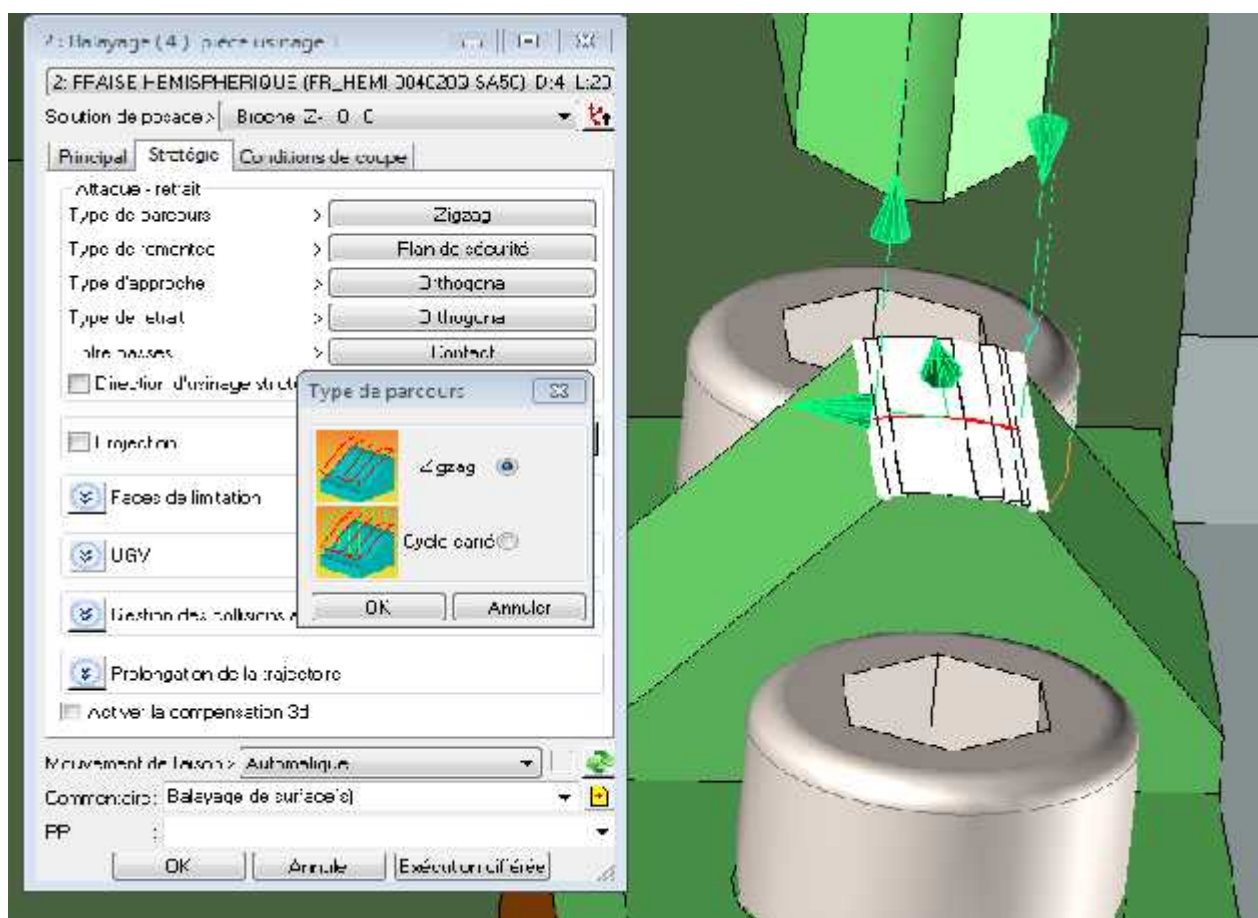


Figure IV.6 : Type de parcours

Le type de remontée est un paramètre indispensable à déterminer avec prudence afin d'éviter la probabilité de collision de l'outil avec la pièce en cour d'usinage pendant le déplacement à vide, dans notre cas on a opté pour le type de remontée : «plan de sécurité» qui est égale à 100 mm (figure IV.7).

L'entre passes sert à déterminer la manière de passer d'un parcours d'aller à d'autre de retour de l'outil pendant le balayage. Dans notre cas on a choisi le type « contact » (figure IV.8).

Le type d'approche et de retrait détermine le chemin à suivre par l'outil dès le plan de sécurité qu'on a déterminé auparavant, $PS = 100 \text{ mm}$, jusqu'à le point de contact avec la pièce et inversement. Dans notre cas et afin d'éviter les interférences avec d'autres composants voisins, on a choisi le type orthogonal (figure IV.9).

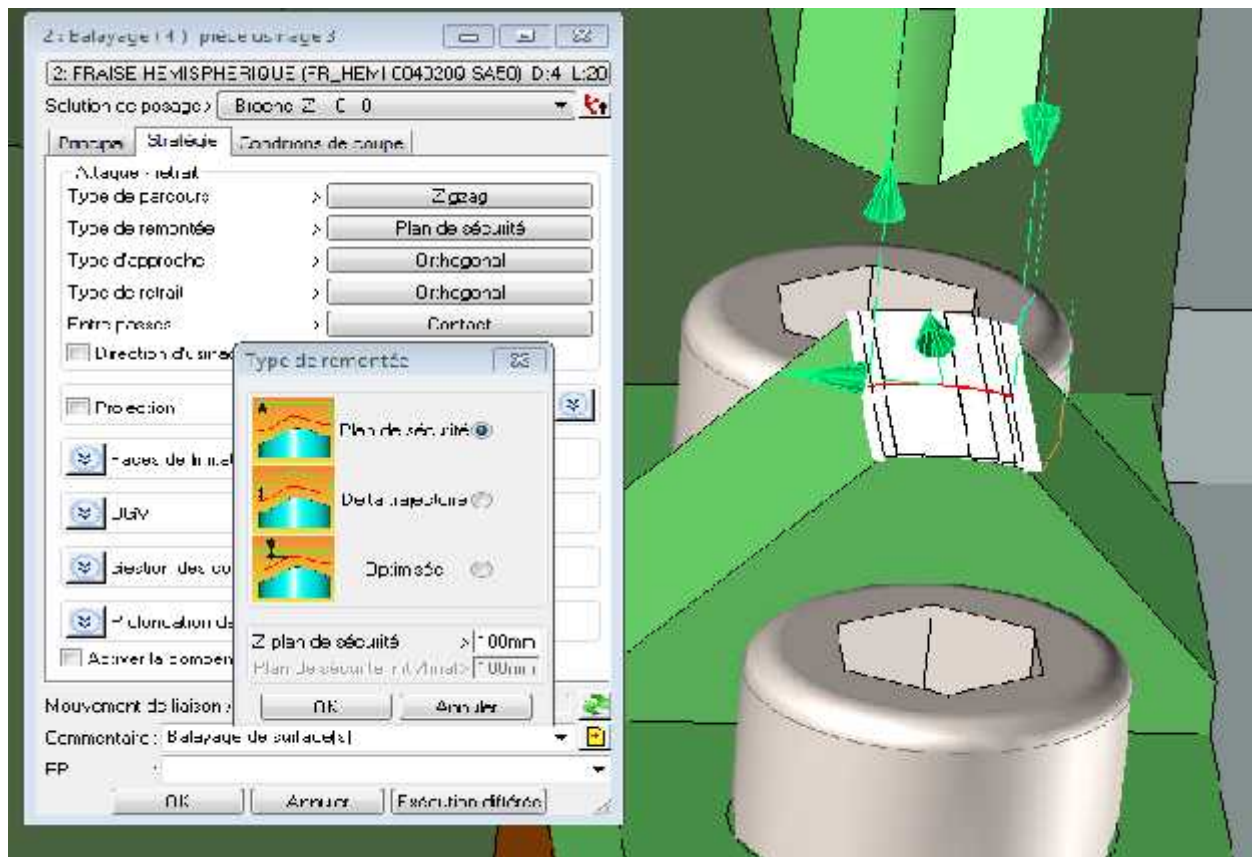


Figure IV.7 : Type de remontée.

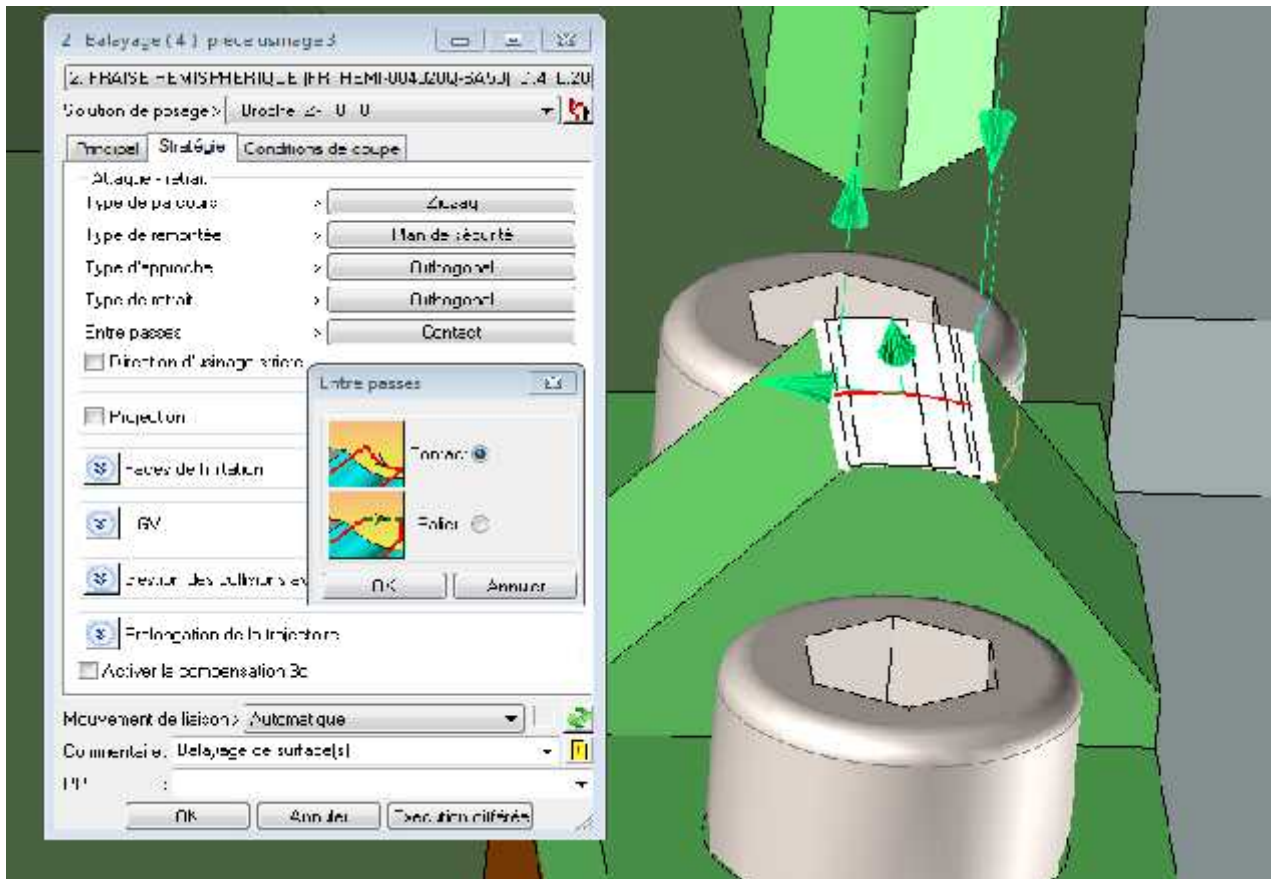


Figure IV.8: entre passes

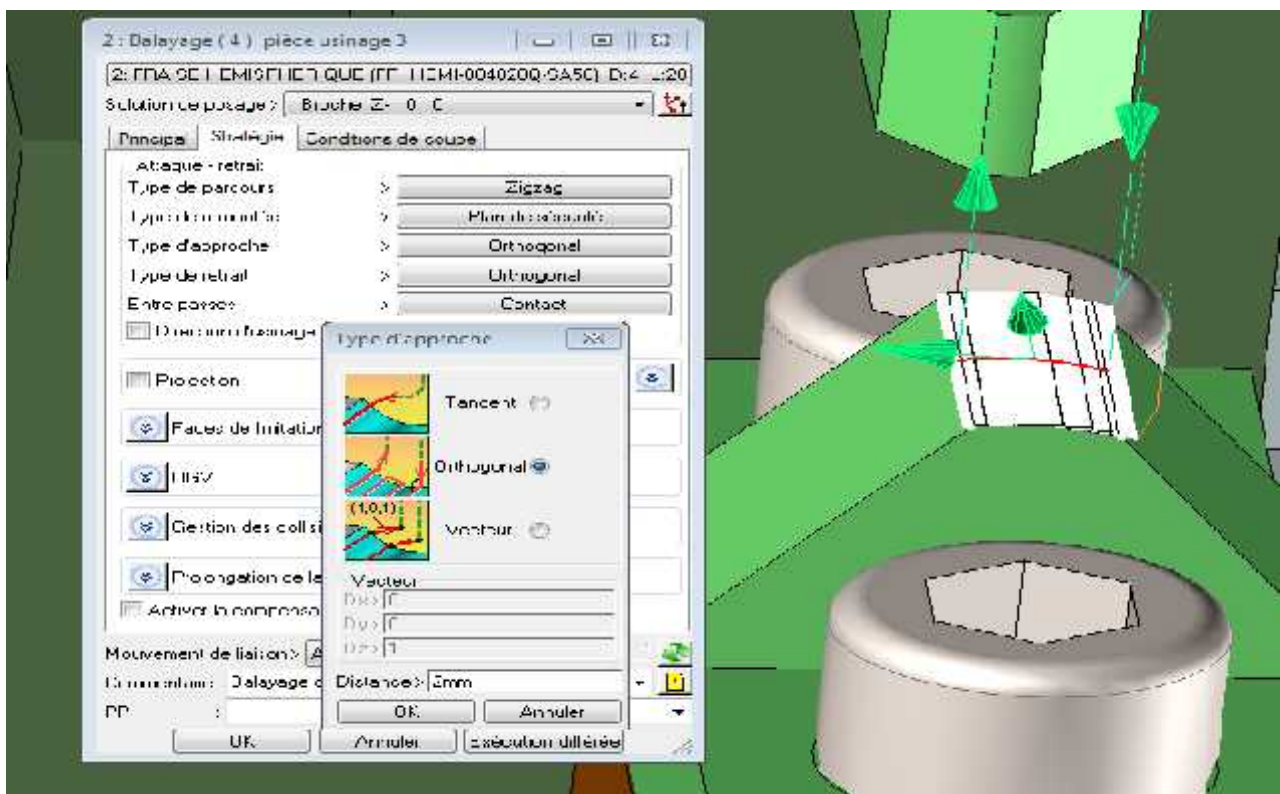


Figure IV.9: Type d'approche

Le sens d'usinage montre les directions des trajectoires que l'outil va les suivre dans le plan (X, Y), y compris le sens de balayage (axial ou transversal), le coté de début d'enlèvement de la matière (de l'avant vers l'arrière ou l'inverse), le coté de début de balayage (du droit vers la gauche ou l'inverse). Dans notre cas on a utilisé les deux variantes de sens de balayage en but de déterminer le niveau de précision et la qualité de l'état de surface. Le sens axial nous à donner la même précision mais un bon état de surface que le sens transversal (figure IV.10).

Sens transversal

Sens axial

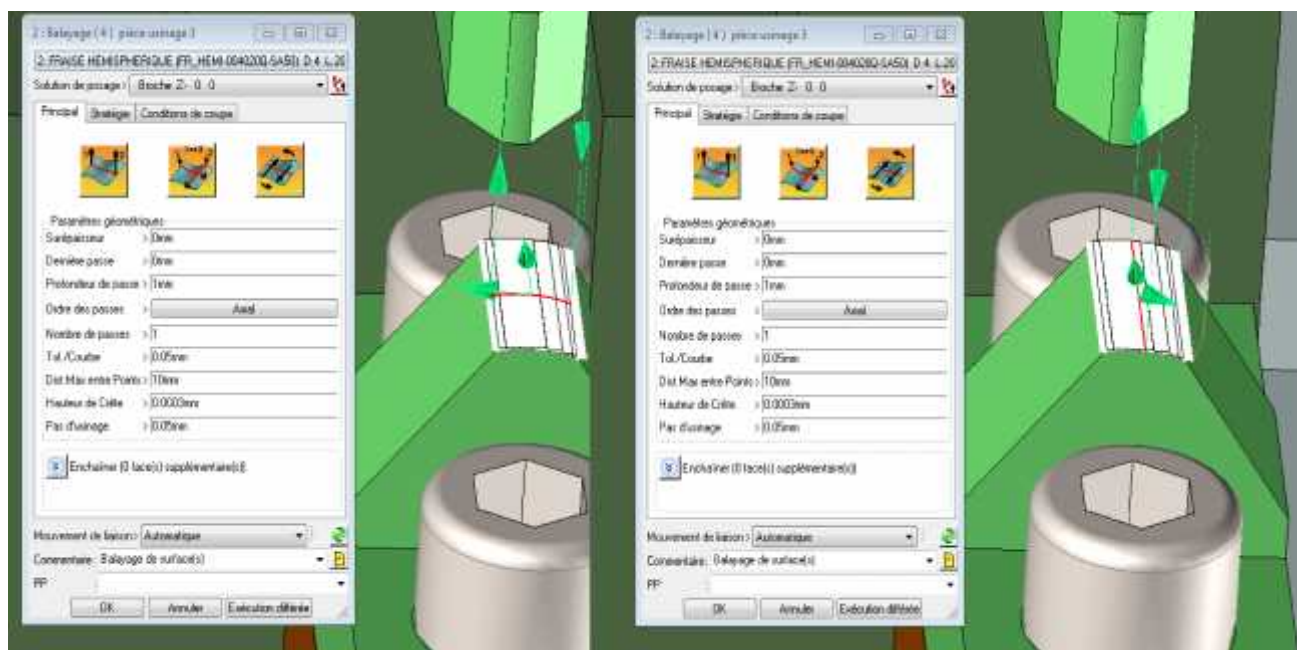


Figure IV.10: Sens d'usinage

Chapitre V

Étude de la validité

Du montage d'usinage proposé

V.1 : Introduction :

Ce dernier chapitre concerne le contrôle de la qualité du montage d'usinage développé. Ce contrôle a pour but de garantir la conformité de notre montage vis-à-vis des spécifications ainsi que son bon fonctionnement dans un environnement industriel. Pour cela, deux tests de validation ont été adoptés. Le premier test concerne l'évaluation de la stabilité statique de l'ailette sur le montage développé, par la sensation expérimentale des vibrations et bruits anormaux dans l'atelier d'usinage. Le deuxième test a pour objectif d'analyser la répétabilité et la reproductibilité du montage pour assurer la qualité des pièces usinées.

V.2 : Evaluation de la précision et de la répétabilité :

V.2.1 : Evaluation de la précision :

Ce type de tests concerne l'évaluation de la sensation de notre montage aux vibrations, bruits et autres nuisances dans l'environnement d'usinage. On peut également évaluer le manque de précision de notre instrument de mesure par ce type de test. Pour évaluer la précision, on calcule l'écart entre la position de commande (consigne) et la moyenne des positions atteintes lorsqu'elles s'approchent de la position de commande.

Donc la précision de positionnement est la différence entre la position de commande (consigne) et le barycentre des positions atteintes, voir la (figure V.1).

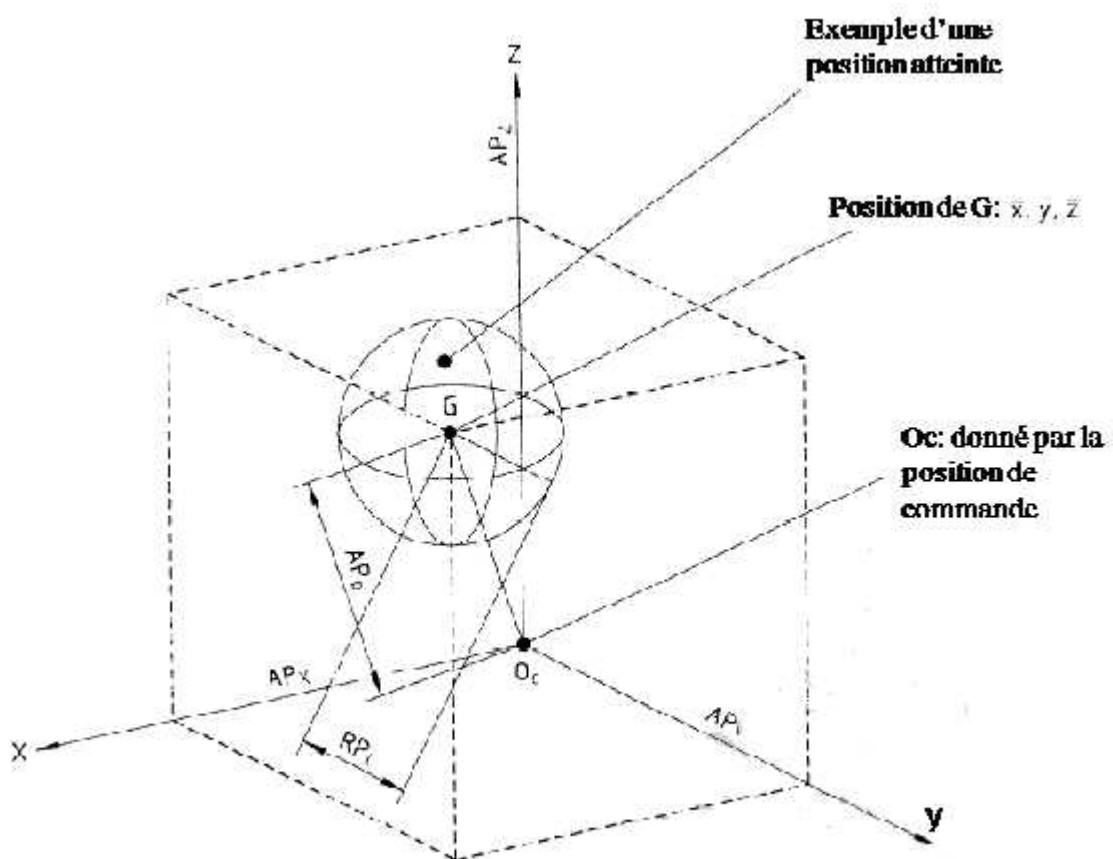


Figure V.1: Précision de positionnement et répétabilité [19]

D'après la norme ISO 9283 [19], la précision de positionnement se calcule comme suit :

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (V.1)$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad (V.2)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad (V.3)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (V.4)$$

Avec:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

$\bar{x}, \bar{y}$ et $\bar{z}$: Sont les coordonnées du barycentre d'un ensemble de points obtenu après la répétition de n fois de la même position.

x_c, y_c et z_c : Sont les coordonnées de la position de commande (consigne).

x_j, y_j et z_j : Sont les coordonnées de $j^{\text{ème}}$ positions atteintes.

Les données d'entrée dans ce cas d'évaluation sont :

- Le MU placé et aligné sur la table de la MMT (figure V.2).
- La température du milieu dans le stand MMT est environ 22°C.
- Création d'un référentiel de mesure coïncident avec celui du CAO.
- L'ailette insérée une seule fois dans le MU.
- Etablissement d'un programme de palpation de 20 points sur l'ailette (voir figure V.3). Les mesures prises lors du palpation manuel des 20 points sont considéré comme mesures de commande (consigne).
- Exécution du programme de mesurage en mode AUTO, trois (3) fois successives, $n=3$.
- Etablissement des tableaux sous format Excel pour chaque mesure, incluant les coordonnées (x, y et z) de chaque point, voir (annexe)
- Ce cas est appelé conventionnellement (**cas statique**).



Figure V.2 : Ensemble ailette et MU sur la table de la MMT.

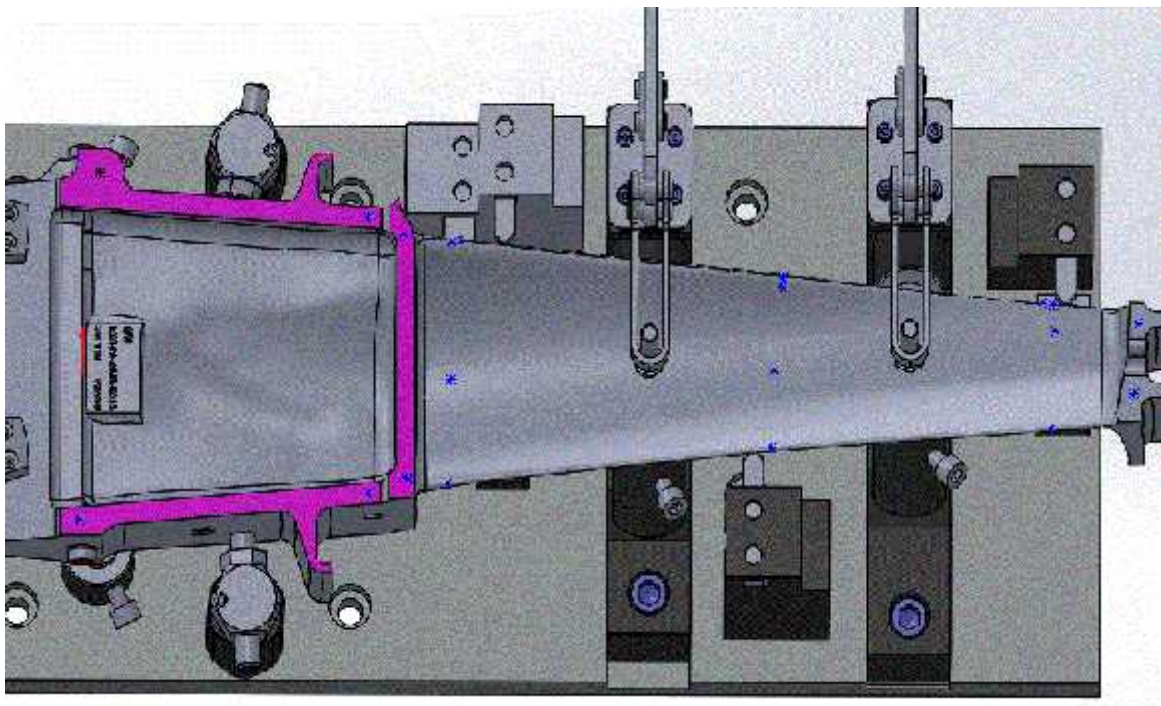


Figure V.3 : Représentation des 20 points à mesurer sur l'ailette.

Les résultats de ce **cas statique**, seront analysés dans la partie "analyse des résultats", au moyen du logiciel "MATLAB".

V.2.2 : Evaluation de la répétabilité :

Ce type d'évaluation concerne la répétabilité du MU, il exprime la proximité entre les positions atteintes, après n répétitions de la position de commande (consigne).

Pour une position donnée, la répétabilité de positionnement est exprimée par RP_i , laquelle est le rayon de la sphère dont le centre est le barycentre AP_p , voir (figure V.1), et qu'est calculée comme suit :

$$RP_i = \bar{I} + 3S_i \quad (V.5)$$

Avec:

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j$$

$$I_j = \sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2}$$

Avec:

$\bar{x}, \bar{y}$ et $\bar{z}$: Sont les coordonnées du barycentre d'un ensemble de points obtenu après la répétition de n fois de la même position.

X_j, Y_j et Z_j : Sont les coordonnées de $j^{\text{ème}}$ positions atteintes.

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - \bar{I})^2}{n-1}}$$

Les données d'entrée dans ce cas d'évaluation sont Les mêmes données d'entrée que dans le **cas statique** sauf que :

- L'ailette est insérée trois (3) fois successives dans le MU.
- Exécution du programme de palpation en mode AUTO après chaque insertion, $n=3$.
- Ce cas est appelé conventionnellement (**cas mise en place**).

Les résultats de ce **cas mise en place**, seront analysés dans la partie "analyse des résultats", au moyen du logiciel "MATLAB".

V.3 : Analyse des résultats :

V.3.1 : Cas du plan incliné :

La figure V.4 représente la disposition des quatre premiers points au niveau du pied d'ailette voir (figure V.3) qui présentent un plan incliné par rapport au plan référentiel de la MMT.

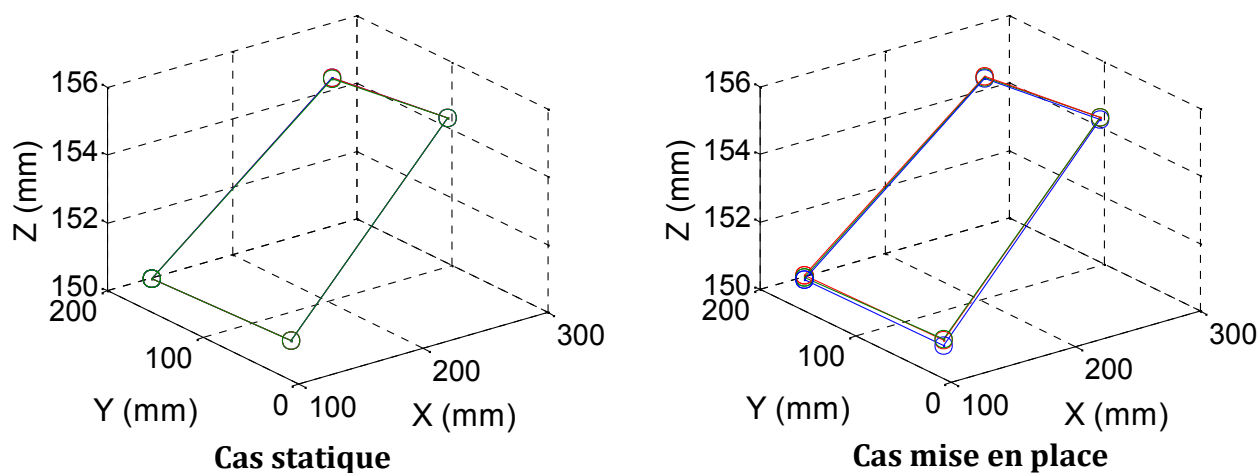


Figure V.4

La figure V.5 présente la précision absolue des trois mesures pour chaque point constituant le plan incliné du pied d'ailette. On voit clairement que la précision dans le cas statique est meilleure. Dans ce cas (**cas statique**) la précision absolue se varie entre 1.8 et 2.6 (μm), tandis que dans le **cas mise en place**, elle se varie entre 5 et 80 (μm).

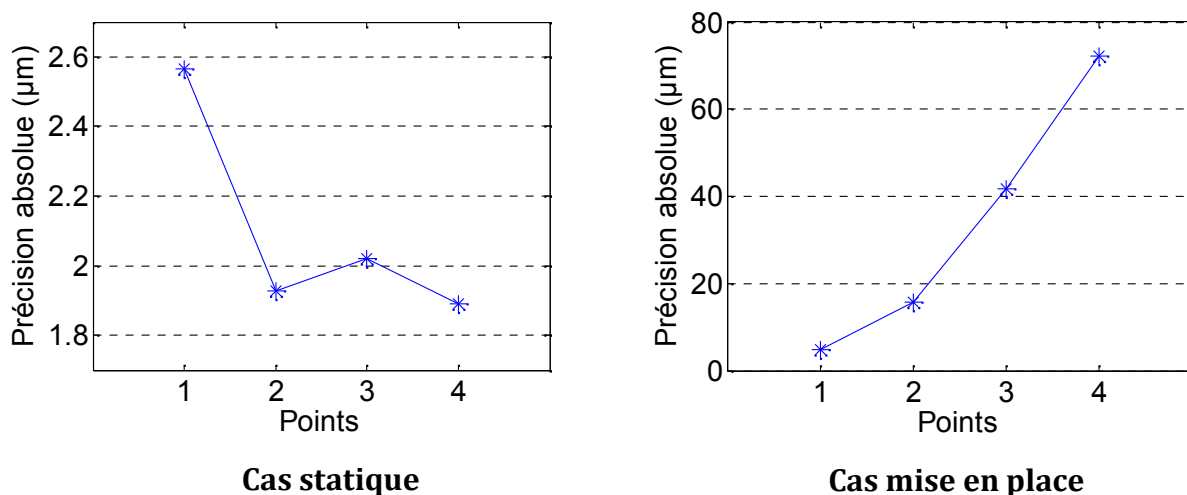


Figure V.5

La figure V.6 présente la précision au niveau des trois (3) axes (X, Y et Z). Pour les deux cas d'évaluation, la précision au niveau des deux axes (X et Y) se varie à proximité de la valeur de zéro, ce qui signifie la localisation du palpeur suivant ces deux axes, alors que pour l'axe (Z) est plus stable dans le **cas statique** (-2 μm environ) que dans le **cas mise en place** où elle se varie entre (20 et -80 μm).

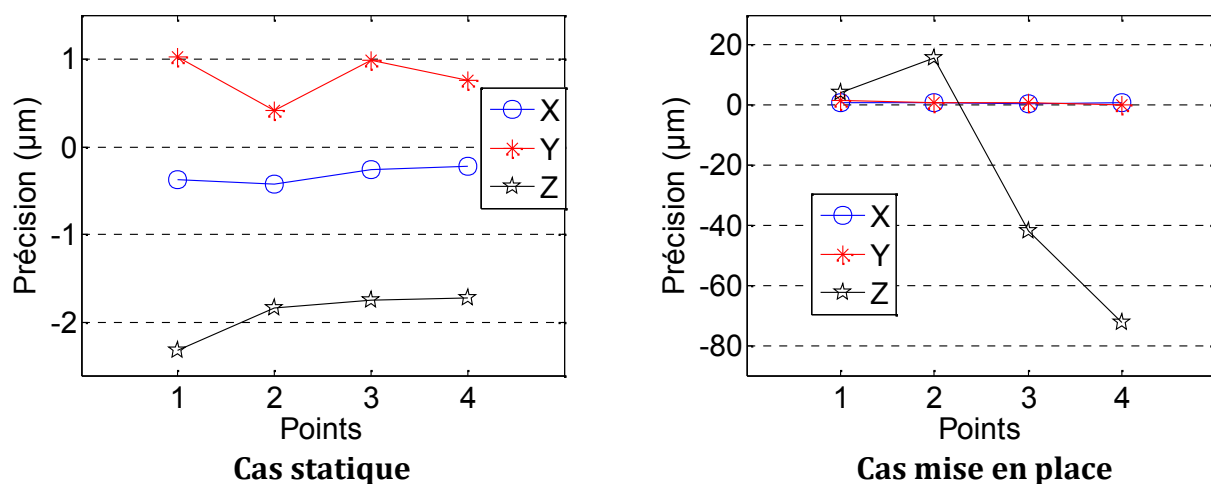


Figure V.6

Les figures V.7, V.8 et V.9 représentent la répétabilité des trois mesures des quatre points, indépendamment sur chaque axe linéaire. La variation remarquable se localise toujours suivant l'axe (Z).

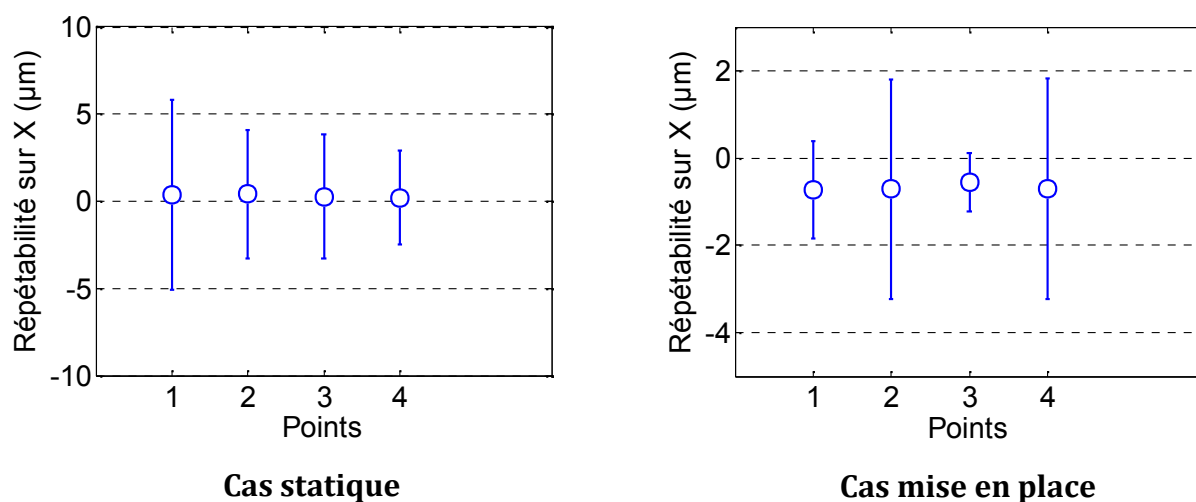
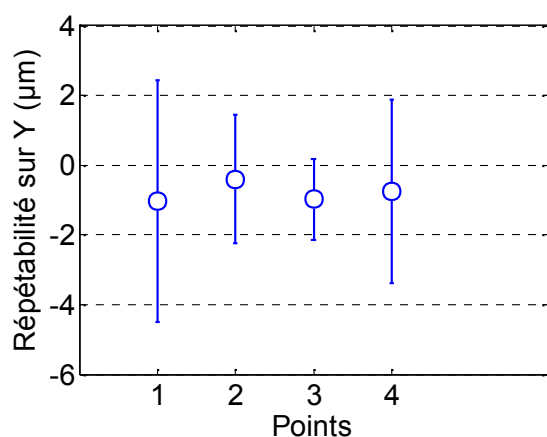
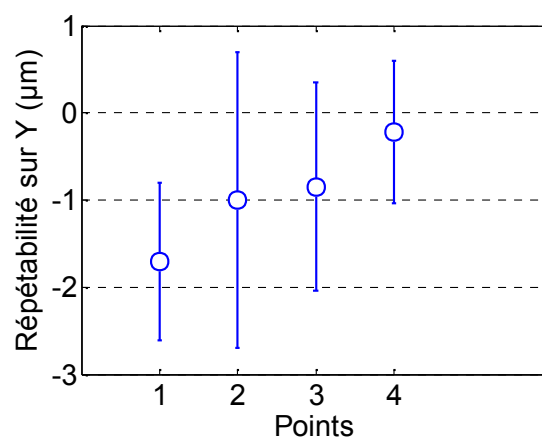


Figure V.7

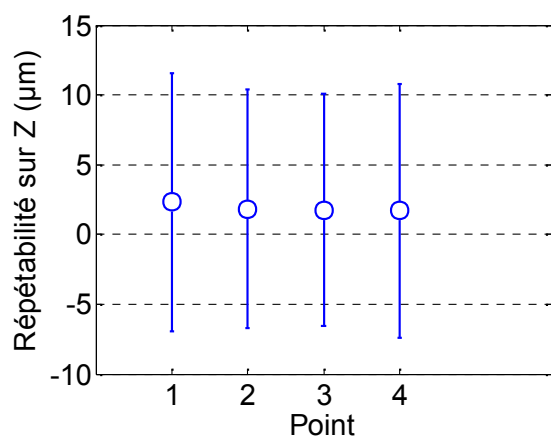


Cas statique

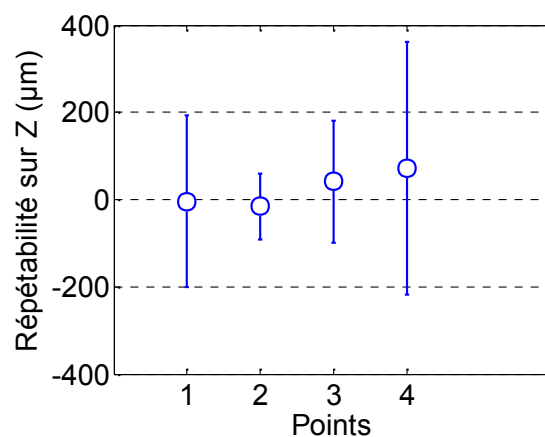


Cas mise en place

Figure V.8



Cas statique



Cas mise en place

Figure V.9

V.3.2 : Cas des 16 points aléatoires sur la pale d'ailette :

La figure V.10 présente la précision absolue des trois mesures pour chaque point, parmi les 16 points palpés sur la pale de l'ailette. Dans le **cas statique** la précision absolue se varie entre (1 et 20 μm), tandis que dans le **cas mise en place**, elle se varie entre (8 et 70 μm).

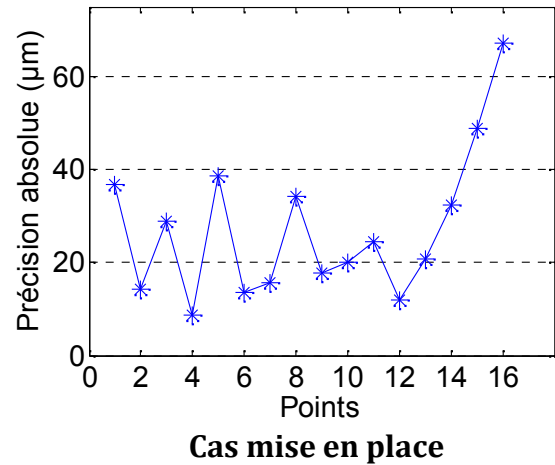
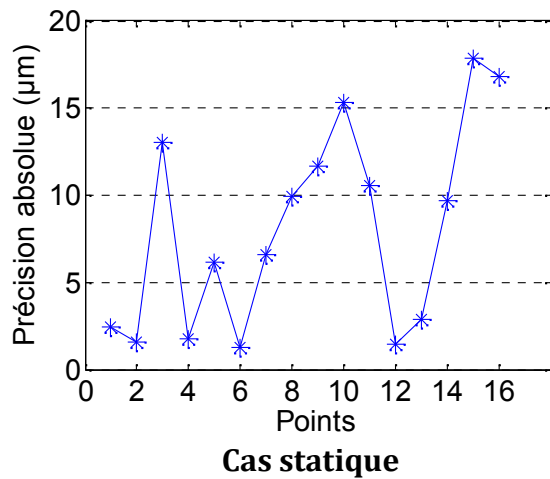


Figure V.10

La figure V.11 présente la précision au niveau des trois (3) axes (X, Y et Z). Pour les deux cas d'évaluation, la précision n'est pas tellement stable comme le cas du plan incliné, car la surface palpée est une surface à géométrie complexe. Néanmoins dans le **cas statique**, la précision se varie entre (-12 et 12 μm), alors que dans le **cas mise en place**, la précision se varie entre (-50 et 50 μm).

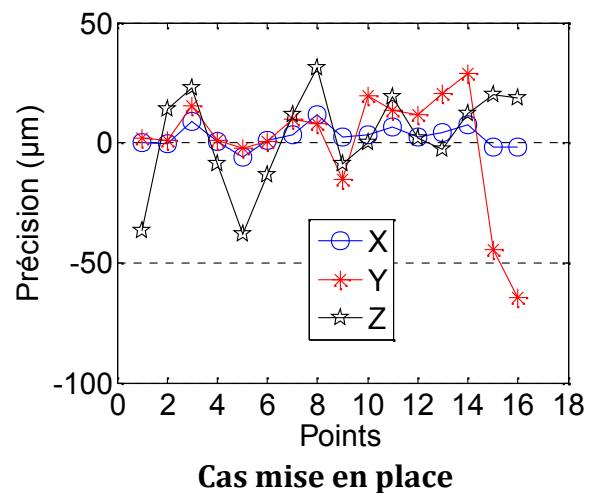
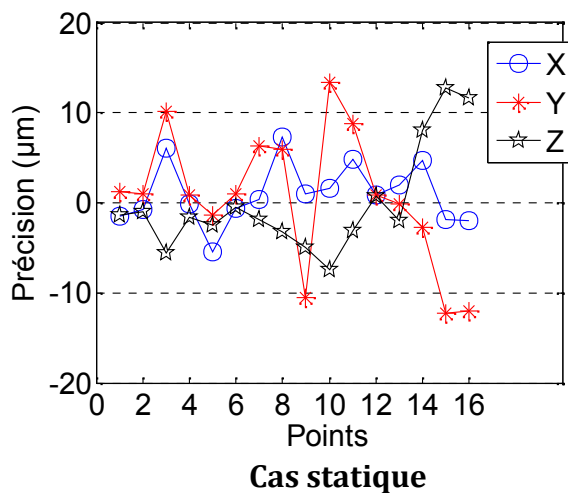
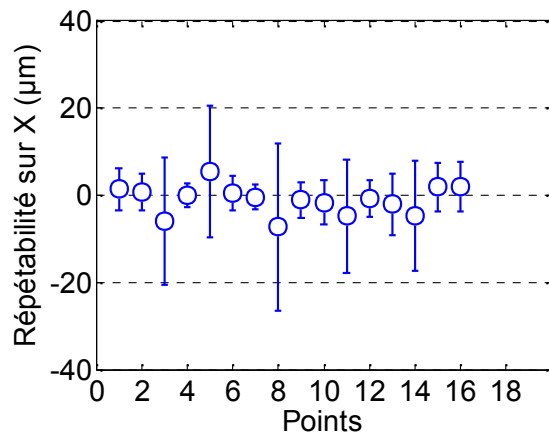
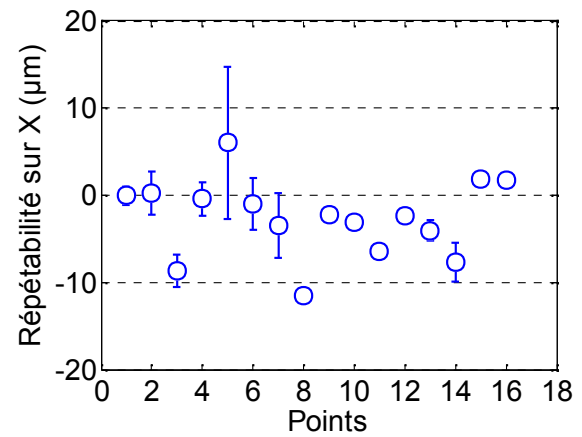


Figure V.11

Les figures V.12, V.13 et V.14 représentent la répétabilité des trois mesures des 16 points, indépendamment sur chaque axe linéaire. La variation remarquable se localise suivant l'axe (Z) (axe de palpée) pour les 12 premiers points, et suivant l'axe (Y) (axe de palpée) pour le 4 derniers points.

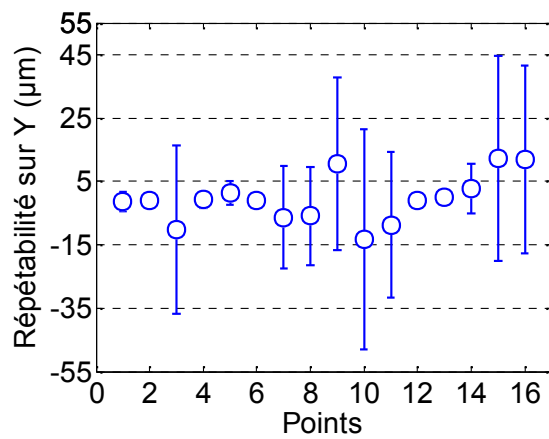


Cas statique

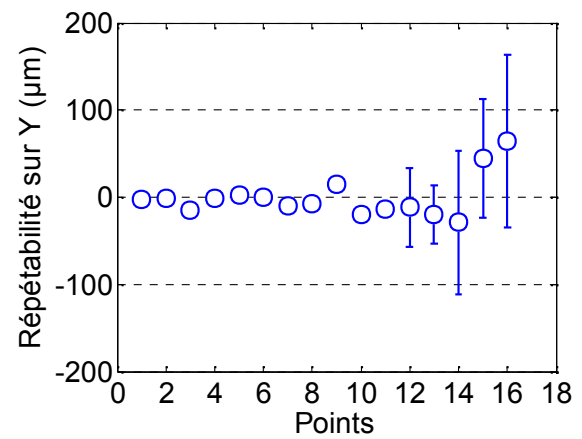


Cas mise en place

Figure V.12

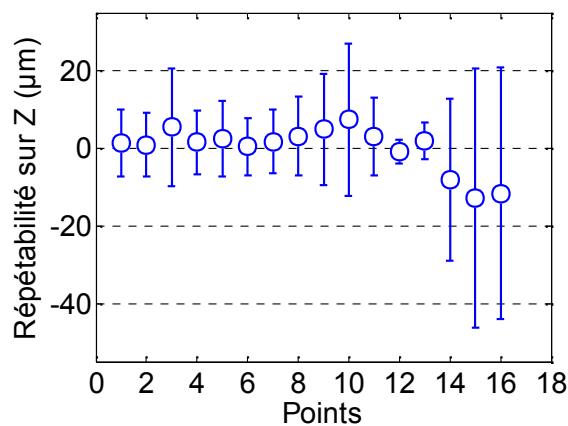


Cas statique

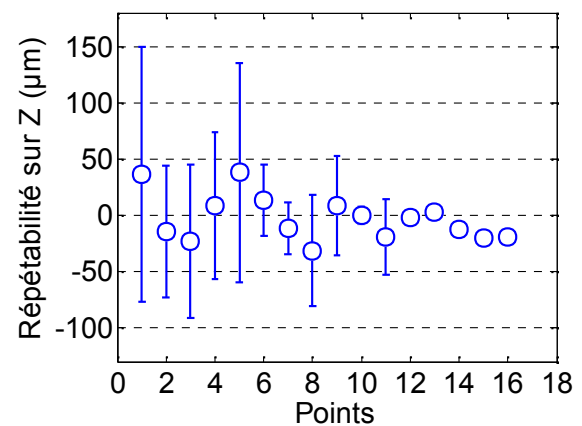


Cas mise en place

Figure V.13



Cas statique



Cas mise en place

Figure V.14

V.4 : Conclusion :

D'après les résultats des analyses des deux cas d'évaluation, le montage présente une bonne stabilité statique (vibrations et bruits minimales) cette stabilité est expliquée par la bonne précision de localisation suivant les trois axes (X, Y et Z). Pour le **cas mise en place**, qui présente la répétabilité de la MIP de l'ailette sur le MU (ou reproductibilité du montage), les résultats montrent une variation maximale de 150 μm au niveau de la pale d'ailette qu'est une surface à géométrie complexe où l'erreur admissible peut être à l'ordre de 100 à 200 μm . Cette variation est due à l'effort de serrage qui n'est pas constant pour chaque test.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons donné une synthèse de conception d'un montage d'usinage à la base de Six-Points d'isostatisme. Ce montage d'usinage est destiné pour la réalisation du nouveau référentiel qu'est dans ce cas les deux trous de centre au niveau du pied d'ailette mobile d'une TG.

Ce nouveau référentiel est considéré pour d'autres montages d'usinage un référentiel primordial, dans le but de faciliter et simplifier la prise de la pièce lors de l'usinage d'autres opérations telles que le pied de sapin, les trous de refroidissement, les parties d'étanchéité... etc.

La méthodologie proposée s'appuie essentiellement d'une grande partie sur l'expérience du concepteur qu'a fondé son travail sur trois volets principales : volet théorique, volet fabrication et volet contrôle qualité.

L'apport essentiel de cette étude, est l'implémentation du processus de conception en suivant les étapes de réalisation, et d'avoir des résultats satisfaisants par la création du nouveau référentiel sur 204 pièces (ailettes), qu'ont été fabriquées au moyen de ce montage. Ce nouveau référentiel sera utilisé dans un autre montage d'usinage destiné à la réalisation de six trous de refroidissement de diamètre $D = 2 \text{ mm}$ pour chaque, au niveau de la pale (géométrie complexe) d'ailette, par le procédé ECD.

Ce nouveau référentiel, peut être utilisé aussi dans un deuxième montage destiné pour la réalisation du pied de sapin, qu'est la partie intermédiaire permettant l'assemblage de l'ailette par le rotor turbine.

Comme conclusion, la conception et la réalisation de ce montage d'usinage, notamment pour les ailettes mobiles, partie chaude, pour plusieurs types de TG est considérée la première étape primordiale, qu'il faut mettre en œuvre.

Les tests de précision, de répétabilité et de reproductibilité montrent que notre montage présente une grande stabilité. De plus, les pièces usinées sur ce montage sont conformes aux spécifications des constructeurs, ce qui montre l'efficacité du montage d'usinage développé.

Annexe :

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.451410	178.442884	150.391366	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.381911	159.083431	155.249393	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.218949	36.947756	155.690408	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.420427	24.440353	150.640070	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.219939	41.718706	162.187727	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.305205	150.685325	161.876798	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.039950	148.988144	157.527246	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.008337	94.511479	126.792300	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.893836	41.550152	162.530975	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.088268	53.106044	179.766761	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.138399	105.897142	121.109327	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.190816	139.059849	128.062518	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.965398	60.143719	185.845632	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.032928	111.142811	108.659471	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.082015	131.005453	102.887953	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.094642	133.160455	100.605030	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.486394	141.328694	127.028743	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.036865	149.331678	155.299164	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.103777	113.068956	164.284913	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.024803	77.965019	178.957306	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau 1: 1ere mise en place de l'ailette

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.452038	178.443105	150.480816	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.383569	159.082389	155.273353	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.218517	36.948548	155.780268	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.420243	24.440826	150.818100	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.220565	41.717246	162.260907	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.305716	150.686984	161.893568	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.040838	148.986733	157.528616	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.008668	94.513269	126.829180	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.898096	41.551728	162.595355	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.086358	53.106016	179.779921	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.140270	105.897580	121.094527	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.190347	139.059259	128.029428	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.965128	60.143129	185.826352	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.032837	111.142541	108.655861	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.081725	131.005083	102.866223	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.094909	133.183705	100.604859	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.486134	141.320754	127.028573	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.037728	149.299257	155.299654	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.103509	113.113656	164.285252	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.024897	78.028599	178.957264	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau2: 2ème mise en place de l'ailette

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.452076	178.442506	150.519006	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.382960	159.083290	155.299343	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.218807	36.948217	155.756958	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.421784	24.440824	150.793990	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.219978	41.719207	162.240497	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.304075	150.686507	161.915648	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.039659	148.988465	157.567276	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.009576	94.512248	126.830370	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.899376	41.550946	162.571655	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.087638	53.105805	179.759141	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.140740	105.898099	121.097807	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.190526	139.059059	128.046608	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.965428	60.143318	185.816562	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.032858	111.142791	108.654261	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.081805	131.005083	102.872673	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.094835	133.188955	100.604779	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.486880	141.342813	127.029152	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.036261	149.353648	155.299313	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.103595	113.083896	164.285272	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.024643	77.981819	178.957195	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau 3: 3ème mise en place de l'ailette

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.451276	178.441395	150.458596	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.382600	159.082240	155.257673	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.218286	36.947948	155.783748	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.420442	24.440446	150.823010	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.220105	41.716797	162.266347	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.305545	150.685514	161.881118	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.031962	148.972323	157.517746	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.008435	94.511219	126.825500	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.903387	41.553132	162.604026	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.086738	53.105886	179.782141	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.136318	105.887624	121.088797	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.179048	139.051372	128.014608	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.963055	60.158611	185.837962	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.029825	111.122914	108.655962	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.075380	130.991490	102.855744	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.092458	133.166228	100.602959	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.482422	141.309648	127.031213	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.029218	149.299216	155.287354	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.105163	113.133444	164.264932	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.026349	78.055647	178.937644	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau 4: 1ere mesure levée

cas statique

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.448729	178.443478	150.453526	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.380281	159.083143	155.253413	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.216627	36.948710	155.779318	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.418853	24.440998	150.817790	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.216917	41.718801	162.261627	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.302946	150.686567	161.876978	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.039270	148.987754	157.507666	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.007376	94.511940	126.821280	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.894116	41.551282	162.597875	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.084329	53.106739	179.779031	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.136049	105.897034	121.084077	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.189119	139.060400	128.008068	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.963557	60.142471	185.828412	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.030999	111.143213	108.642971	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.081666	131.005103	102.849483	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.092520	133.167507	100.603429	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.483973	141.310626	127.028113	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.035922	149.293969	155.299294	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.101519	113.112998	164.283642	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.022587	78.036821	178.956064	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau 5: 2eme mesure levée

cas statique

Points	X	Y	Z	I	J	K
PNT2	118.452226	178.441584	150.459106	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT3	248.382149	159.081971	155.258833	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT4	248.218927	36.948277	155.784438	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT5	112.420394	24.442166	150.823070	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT6	267.218886	41.717608	162.266807	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT7	267.305106	150.686935	161.882248	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT8	286.041179	148.987422	157.512776	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT9	286.009197	94.512918	126.826520	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT10	285.895415	41.550831	162.602775	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT11	446.086459	53.106766	179.783881	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT12	446.137809	105.897002	121.088927	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT13	446.190868	139.060178	128.012798	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT14	572.965628	60.143258	185.833222	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT15	573.033198	111.142670	108.648171	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT16	573.083615	131.004360	102.854474	0.000000	-0.000000	1.000000
PNT17	573.094920	133.167715	100.604849	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT18	437.487033	141.310793	127.029413	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT19	294.036904	149.296267	155.299584	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT20	619.104033	113.117036	164.284802	0.000000	1.000000	-0.000000
PNT21	619.024671	78.040969	178.956724	0.000000	1.000000	-0.000000

tableau 6: 3eme mesure levée

cas statique

Références bibliographiques

- [1]: **Gas Turbine Engineering Handbook Third Edition** by Meherwan P. Boyce
Managing Partner, the Boyce Consultancy Fellow, American Society of Mechanical Engineers Fellow, Institute of Diesel and Gas Turbine Engineers, U.K.
- [2]: **Gas Turbine Handbook: Principles and Practices 3rd Edition**
By Tony Giampaolo, MSME, PE
- [3]: **Turbines à gaz stationnaires: Avancées technologiques**
Conférence à l'Université Pierre & Marie Curie, Paris 8 Octobre 2013
Michel Moliere: General Electric
- [4]: **New Parts Manufacturing Equivalent to GE MS9001E**, Sulzer Turbo Services Venlo B.V.
Spikweien 36 NL-5943 AD Lomm, the Netherlands.
- [5]: **Fundamentals of gas turbine engines.**
- [6]: **New technology used in gas turbine blade materials.**
Scientia ET Technica Año XIII, No 36, Septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira.
ISSN 0122-1701
- [7]: **Industrial gas turbines, Performance and operability**
A. M. Y. Razak
- [8]: **Review of Process and Material used for Design of Gas Turbine Blades**
Jaishri patel¹, Jaishri dubey² Rajni Dewangan³ Prakash kumar sen⁴ Shailendra kumar bohidar⁵
^{1,2,3}Student, Bachelor of Engg. (Mechanical Engg.), Kirodimal Institute of Technology, Raigarh, Chhattisgarh, India ^{4,5}Faculty, Department of Mechanical Engg, Kirodimal Institute of Technology, Raigarh, Chhattisgarh, India
- [9]: **DESIGNING OF AN AEROFOIL BLADES WITH 2-D GEOMETRY**
suvanjan bhattacharyya¹, manish joshi², aritra das³, soumavo dutta⁴, alexander swami⁵, md. kamal uddin⁶
- [10]: **Aerodynamic design of a gas turbine rotor blade for the KTH test turbine**
William Wiberg and Nicholas Anton
- [11]: **Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage, thèse de doctorat**
Par : Saïd ZIRMI le 14/10/2010.
- [12]: **Design and modelling of a fixturing system for an optimal balancing of a part family**
Sajid Ullah Butt
- [13]: **Deformation Analysis of Fixturing for Workpiece with Complex Geometry**
Y. Wang, X. Chen and N. Gindy

- [14]: **Thermo-mechanical modeling of a High Pressure Turbine Blade of an Airplane Gas Turbine Engine.** Pedro Marques Borges Brandão .Thesis to obtain the Master of Science Degree in Mechanical Engineering.
- [15]: **Sensor Based Fixture Design and Verification.** A Thesis Submitted to the faculty of WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE In partial fulfillment for the Degree of Master of Science in Manufacturing Engineering. By Radhakrishnan Purushothaman
- [16] : **Etude de l'influence de la direction d'usinage sur le comportement dynamique du processus de fraisage.** Mémoire présenté en vue de l'obtention Du diplôme de Magister GENIE MECANIQUE. Par : **Saci Rebai.** Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des sciences et de la technologie.
- [17]: **Turbine Blade Fixture for Inspection and Grinding,** Team 33: Blades & Lasers - Patrick Maloney, Nick Moroz, Craig Stanfill, Nick Zalenski ME450, Winter 2008 Section 7: Dr. Lalit Patil 15 April 2008
- [18]: **Advanced Tooling Solutions** - Document de formation, au niveau de MEI/spa.
- [19]: INTERNATIONAL STANDARD - ISO 9283 Robots manipulateurs industriels - Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes

Résumé :

La technologie des TG nécessite un travail rigoureux, en terme de conception tant que réalisation, vue les conditions de travail sévères, qu'au dessous, les différents composants de la TG doivent fonctionner selon une cohérence pré étudiée.

La précision dimensionnelle ainsi que géométrique, forme une exigence non discutable, qui nécessite des équipements spéciaux de haute performance, vis-à-vis les MO et ces outillages, autant que les montages d'usinage relatifs à chaque famille de pièces de la TG.

Dans ce travail de mémoire, nous avons présenté une contribution qui sera considéré comme un aide-mémoire pour les concepteurs et les industriels dans le domaine de l'usinage des pièces de formes complexes. Cette contribution vise essentiellement à donner des clés à la compréhension et à la maîtrise des différentes techniques liées à la fabrication des ailettes de la partie chaude des turbines à gaz. Pour cela, un montage d'usinage pour maintenir et fixer les ailettes durant l'usinage a été développé et fabriqué.

Pour valider la qualité du montage développé, une centaine de pièces (ailettes turbines) ont été usinées sur ce montage. Les résultats montrent que le montage fabriqué est très efficace, assure une bonne qualité des pièces usinées, présente une bonne rigidité, garantir une accessibilité élevée des outils de coupe aux différentes surfaces durant l'usinage et assure une bonne évacuation des copeaux.

Mots clés : montage d'usinage spécial, ailette turbine, turbine à gaz, conception des montages, stratégies d'usinage.

ملخص:

إن تكنولوجيا التربينات الغازية تتطلب عملا في غاية الصرامة، سواء من ناحية الدراسة والتصميم كما من ناحية الانجاز والتنفيذ، نظرا لظروف العمل القاسية، التي يجب أن يعمل تحتها مختلف مكونات التربينات الغازية في انسجام وتوافق مدروس مسبقا. إن الدقة البعدية وكذا الدقة الهندسية، تشكل مطلبا لا نقاش فيه، الذي يتطلب تجهيزات خاصة ذات أداء عالي، فيما يتعلق بآلات القطع والأدوات المتعلقة بها، وكذلك تركيبات التصنيع لكل صنف من القطع المنتمية إلى التربينات الغازية. من خلال هذا العمل، نعتقد بأننا قدمنا مساهمة على شكل خلاصة أو مذكرة، موجهة للمصممين والمصنعين، في ميدان إنتاج الأدوات المساعدة على تصنيع عنفات الجزء المرتفع الحرارة للتربينات الغازية. من أجل هذا، طورنا وصنعنا تركيب تصنيع موجه لتثبيت العنفات خلال عملية التصنيع. من أجل إثبات الجودة والنوعية للتركيب المطور، صنعنا مئات العنفات بواسطة هذا التركيب. وأظهرت النتائج بأن التركيب المصنع فعال، ويضمن نوعية حسنة للقطع المصنعة، وتماسك جيد، ويضمن مرور سلس لأدوات القطع لمختلف الأسطح خلال عملية التصنيع ويضمن انسيابية جيدة للرائش.

الكلمات المفتاحية: تركيب تصنيع خاص، عنفات التربينات، التربينات الغازية، تصميم تركيبات لتصنيع، استراتيجيات التصنيع.