

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT
DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Etude de fabrication d'une aube d'une turbine à gaz

Devant le jury composé de :

Dr. GHEUA HOSSAM EDDINE
Dr. ZENINA MOHAMMED LAID
Dr.
Dr. M. KHECHANA

Président
Examineur
Examineur
Encadreur

Présenté par :

Houamdi Ali
Aribi Abdelhak
Belhadj Abdelouahab
Belaid Abderrahmane

2021-2022

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.

Grâce à cet humble travail, nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur **M. KHECHANA**, pour ses encouragements, ses précieux conseils et pour tout le réconfort qu'il nous a apporté au cours de notre étude et de la réalisation de ce projet.

Nos remerciements et notre estime a tous les enseignants du **département de génie mécanique**.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

DEDICACE

À nos chers parents,
Qui nous ont toujours soutenus dans nos études,
À nos frères et nos sœurs chacun avec son nom,
À tous nos amis chacun avec son nom,
À tous nos collègues chacun avec son nom,
À tous nos enseignants chacun avec son nom,
À chaque personne qui nous a aidés.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT

DEDECACE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

RESUME

INTRODUCTION GENERALE

I. Etude bibliographique sur les aubes des turbines à gaz

Introduction	2
I.1. Les composants	2
I.1.1. Le compresseur	2
a) Les compresseurs centrifuge	3
b) Les compresseurs axiaux	3
c) Les aubes du rotor et stator	3
I.1.2. La chambre de combustion	5
I.1.3. Turbine de détente	5
I.2. Les aubes	6
I.3. Le profile des aubes	6
I.3.1. Profile NACA	6
a) Série à quatre chiffres (Série 4)	7
b) Série à cinq chiffres (Série 5)	8
c) Profils de ligne de cambrure	8
I.3. Les matériaux de réalisation d'aube	8
I.4. LES SUPERALLIAGES	9
I.4.1. Les superalliages à base de nickel	10
I.4.2. Structure d'un superalliage	10
I.4.3. L'INCONEL 738	11
I.4.4. Les propriétés de l'inconel 738	11
I.5. Techniques de refroidissement	12
I.5.1. Convection interne forcée	12
I.5.2. Film-cooling	13
I.5.3. Impact de jets	14
I.6. Le système barrière thermique	14
I.6.1. Présentation du système barrière thermique	14
I.7. Modes de dégradation	15
I.7.1. Dégradations intrinsèques	15
I.7.2. Dégradations extrinsèques	16
Conclusion	18
II. Matériaux et méthodes de fabrication des aubes	19
II.1. Introduction	20
II.2. La fabrication des aubes de turbine	20
II.2.1. Usinage des aubes de turbine	20
a) Simulation du fraisage 3D des aubes	21
b) Exemple de simulation du fraisage à commande numérique 5 axes de l'aube d'une turbine	21
II.2.2. Coulée des aubes	22
a) Moulage des aubes	22
• Principe	22
• Principales caractéristiques	23
b) Coulée par pulvérisation	23
• Principe	23
c) Moulage sous vide	23
• Principe	23
• Principe caractéristiques	24
d) Moulage à la cire perdue	24
II.3. Evolution des matériaux des aubes	25

II.4. Les superalliages	25
II.4.1. Les superalliages à base de nickel	26
II.4.2. Structure d'un superalliage	26
II.5. L'INCONEL 738	27
II.5.1. Introduction	27
II.5.2. Les propriétés de l'inconel	27
II.5.3. Composition de l'inconel	28
II.6. Les matériaux composites	28
II.6.1. Définition	28
II.6.2. Classification des matériaux composites	29
II.6.3. Les renforts	29
a) Classification des renforts	30
II.6.4. Structure de renforcement	30
a) Les unidirectionnels (UD)	30
b) Les tissus	30
• Toile	31
• Serge	31
II.6.5. Les matrices	31
a) Les Matrices organiques	31
b) Les matrices métalliques	32
c) Matrices Céramiques	32
II.6.6. Ingénierie des matériaux composites	32
a) Monocouches	32
b) Stratifiés	33
II.6.7. Composites sandwiches	34
II.6.8. Etapes de la mise en œuvre des matériaux composites	34
II.7. L'ALUMINE	34
II.7.1. Composite à matrice céramique	35
II.7.2. Propriétés des composites à matrice céramique	35
a) Propriété mécanique	35
b) Propriétés thermiques et électriques	35
Conclusion	36
III Simulation de l'aube d'une turbine	37
III 1. Partie de conception	38
III 1.1. Introduction	38
III 1.2. Présentation de CATIA	38
III 1.3. Présentation de SOLIDWORKS	39
III 1.4. ETUDE L'USINAGE DE L'AUBE PAR SOLIDWORKS	39
a) Création de la pièce	39
III.2. Génération du programme en code iso CN	46
III.2.1. Pièce brute	46
III.2.2. Pièce de fabrication	47
a) Définir la phase d'usinage	47
b) Définir les opérations d'usinage	51
• Ebauche 1	51
• Contournage niveau Z	53
III.2.3. GENERATION DU PROGRAMME EN CODE ISO CN	56
III.3. Analyse de l'aube	58
III.3.1. Présentation ANSYS	58
III.3.2. Analyse modèle de l'aube	58
Conclusion	62
CONCLUSION GENERALE	
LES REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma d'une turbine à gaz.....	2
Figure I.2 : Un compresseur centrifuge[02]	3
Figure I.3 : Disque circulaire de rotor qui contient les aubes [02].....	3
Figure I.4 : Les aubes de rotor et les aubes de stator [02]	4
Figure I.5 : La fixation d'aube sur le carter de compresseur [02]	4
Figure I.6 : Chambre de combustion d'une turbine à gaz Rolls Royce [05]	5
Figure I.7 : Turbine à gaz [07].....	5
Figure I.8 : Une aube d'une turbine à gaz [09].....	6
Figure I.9 : Lignes du profil - 1 : Corde, 2: Cambrure, 3: Longueur, 4: Ligne médiane [10].....	7
Figure I.10 : Développement de matériaux d'aube [13]	9
Figure I.11 : Structure d'un superalliage [12]	10
Figure I.12 : Morphologie des précipités γ' (MET). [12].....	11
Figure I.13 : Morphologie de précipitation de la phase γ' . [12].....	11
Figure I.14 : Refroidissement par convection interne forcée [16].....	13
Figure I.15 : Refroidissement par film [17].....	13
Figure I.16 : Refroidissement par impact de jets [18]	14
Figure I.17 : Système barrière thermique [18]	15
Figure I.18 : Ecaillages de la couche de céramique des systèmes barrière thermique pour aube [18]	16
Figure I.19 : Disparition de la couche de céramique par érosion [18]	16
Figure I.20 : Mécanisme de dégradation d'un système barrière thermique par interaction.....	17
Figure II.1 : Simulation du processus de fraisage à commande numérique d'une aube [20]	20
Figure II.2 : Exemple de fraisage à commande numérique 5 axes de l'aube de la turbine [20]	21
Figure II.3 : Simulation du fraisage à commande numérique d'une aube par deux fraises simultanément [20] ...	22
Figure II.4 : Simulation de fraisage 5 axes avec fraises à bout sphérique [20].	22
Figure II.5 : Exemple de moulage. [21].....	22
Figure II.6 : Schéma du principe de coulée de la cire perdue [23].	24
Figure II.7 : Développement de matériel de code de 1940 à nos jours. [12]	25
Figure II.8 : Structure d'un superalliage. [12]	26
Figure II.9 : Morphologie des précipités γ' (MET). [12]	27
Figure II.10 : Matériau composite [26]	29
Figure II.11 : Classification des renforts. [26]	30
Figure II.12 : Nappe unidirectionnelle. [26]	30
Figure II.14 : Pliez les renforts unidirectionnels. [29]	33
Figure II.15 : Constitution d'un stratifié. [30]	33
Figure II.16 : Matériau sandwich avec noyaux solides. [30].....	33
Figure III.1 : Fraisage 4 axes d'une aube	37
Figure III.2 : Architecteur du logiciel CATIA v5	38
Figure III.3 : Insertion une courbe 1.....	39
Figure III.4 : Coordonnées de la courbe 1.....	40
Figure III.5 : La courbe	40
Figure III.6 : Conversion de courbe a front plan.....	41

Figure III.7 : Extrusion de courbe pour obtenu une forme 3d	41
Figure III.8 : Utilisation l'opérateur de flexion.....	41
Figure III.9 : L'aube après la flexion	42
Figure III.10 : Insertion de rectangle	42
Figure III.11 : Extrusion de rectangle pour obtenu un forme 3d	43
Figure III.12 : Insérassions un sketch en forme de tiroir	43
Figure.III.13 : Extrusion inverse pour obtenu la forme de pied	44
Figure.III.14 : paramètre de filet.....	44
Figure III.16 : Aube filet	44
Figure III.15 : Ajouter les trous de refroidissement horizontal et verticale.....	45
Figure III.19 : Fenêtre de la pièce brute.....	46
Figure III.17 : début de dessin du brut 1.....	46
Figure III.18 : Définition de la pièce brute	47
Figure III.23 la pièce brute en 3D.....	47
Figure III.19 : La partie brute qui recouvre la partie finale en 3D.	47
Figure III.20 : Ouverture de l'atelier de machines.	48
Figure III.21 paramètres de fraiseuse	49
Figure III.22 : fenêtre phase d'usinage	49
Figure III.23 : Trièdre d'usinage.....	49
Figure III.24 : Point de changement d'outil.....	50
Figure III.26 Définition de la géométrie à former.	51
Figure III.25 : Identification de la stratégie d'automatisation.	51
Figure III.27 : identifier l'outil à utiliser.	52
Figure III.28 Modifier les paramètres de coupe.	52
Figure III.29 : Trajet d'outil 1. 1	52
Figure III.30 : Simulation de l'usinage du projet 1.....	53
Figure III.31 : géométries à former et le niveau inférieur de l'aube.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure III.32 : stratégies d'automatisation 2.	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
Figure III.33 : Sélectionnez l'outil à utiliser	54
Figure III.34 : Définition de la stratégie de partie macros.....	54
Figure III.35 : Trajectoire d'outil 2.....	55
Figure III.36 : Simulation de contournage.....	55
Figure III.37 : Créer un code CN.	56
Figure III.38 : Aube conçue avec CATIA puis importé dans Design Modeler de ANSYS	59
Figure III.39 : Aube maillée	60
Figure III.40 : Chargement de l'aube 1	60
Figure III.41 : Distribution des contraintes	60
Figure III.42 : Distribution des déformations	61
Figure III.43 : Distribution des déplacements	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du moulage.....	23
Tableau II.2 : Propriétés du moulage par pulvérisation.....	23
Tableau II.3 : Propriétés de coulée sous vide.....	24
Tableau II.4 : Composition chimique de l'Inconel 738.....	28
Tableau III.1 : Les coordonnées de la courbe.....	39
Tableau III.2 : Propriétés de INCONEL 718.....	59

Résumé :

Les caractéristiques d'une turbine à gaz (vitesse, poussée, ...) sont fortement liées à la matière des aubes. Le succès de fabrication de l'aube réside dans le choix d'obtention du brut et les différents procédés appliqués. Dans une turbine à gaz, les conditions de fonctionnement des aubes sont particulièrement très dures : La température est très élevée, la force centrifuge provoquée par les vitesses de rotation élevées est très importante, elles sont exposées à des effets d'abrasion par les gaz chauds à grande vitesse, ainsi que à des phénomènes de vibration qui peuvent causer des dommages tels que : impact, fissure, usure, destruction du revêtement protecteur et dégradation de la microstructure.

Il est donc clair que les aubes se présentent comme les pièces les plus importantes dans une turbine à gaz. Elles sont caractérisées par une complexité géométrique délicate, ceci rend sa modélisation et sa fabrication difficiles, d'où le choix des procédés de fabrication convenables sont très importants.

Abstract :

The characteristics of a gas turbine (speed, thrust,) are strongly related to the material of the blades. The success of the manufacture of the blade lies in the choice of obtaining the crude and the different processes applied. In a gas turbine, the operating conditions of the blades are very hard: The temperature is very high, the centrifugal force caused by the high rotational speeds is very important, they are exposed to abrasion effects by hot gases at high speed, as well as to vibration phenomena that can cause damage such as: impact, cracking, wear, destruction of the protective coating and degradation of the microstructure.

It is therefore clear that blades present themselves as the most important parts in a gas turbine. they are characterized by a delicate geometric complexity, this makes its modeling and manufacture difficult hence the choice of suitable manufacturing processes are very important.

ملخص:

ترتبط خصائص التوربينات الغازية ارتباطاً وثيقاً بمادة الشفرات. يكمن نجاح تصنيع الشفرة في اختيار الحصول على المادة الخام و العمليات المختلفة المطبقة. في التوربينات الغازية، تكون ظروف تشغيل الشفرات صعبة للغاية: درجة الحرارة العالية، قوة الطرد المركزية الناجمة عن سرعة الدوران، فهي تتعرض لتأثير التآكل بواسطة الغازات الساخنة، وكذلك ظواهر الاهتزاز التي يمكن ان تسبب ضرراً مثل: التكسير، التآكل، تدمير الطلاء الواقي و تدهور البنية المجهرية.

لذلك من الواضح ان الشفرات تقدم نفسها على انها أهم الأجزاء في التوربينات الغازية. تتميز بتعقيد هندسي دقيق مما يجعل نمذجتها و تصنيعها امراً صعباً للغاية و بالتالي فان اختيار عمليات التصنيع مهم للغاية.

Les mots clés :

Turbine à gaz, les aubes, profile NACA, L'INCONEL 718, SOLIDWORKS, film-cooling.

INTRODUCTION GENERALE :

INTRODUCTION GENERALE :

Il y a plusieurs types de turbines, et pour chaque type, un large éventail de propriétés. Dans cette mémoire, nous étudierons l'aube d'une à turbine à gaz. Cette machine se compose de trois pièces principales : le compresseur, la chambre de combustion et la turbine de détente où les aubes sont existées et sont les pièces les plus importantes.

Les aubes contiennent une complexité difficile à modéliser et difficile à former par usinage, une déformation ou par un autre processus. Ils sont dans la partie la plus chaude et sont les pièces qui subissent les sollicitations les plus endommageant, en raison de nombreux facteurs tels que la température très élevée des gaz brûlés (souvent supérieure à la température de fusion des alliages), les forts gradients thermiques présents, notamment lors des phases de décollage et atterrissage, le fluage dû à la force centrifuge, la corrosion à chaud, les contraintes élevées induites par la géométrie complexe ainsi que la fatigue vibratoire.

L'un des objectifs actuels des concepteurs des turbines à gaz est comment faire réussir la conception une pièce dans le but d'assurer une meilleure performance avec des solutions de fabrication économique et simple avec une garantie de fiabilité et une longue durée de vie.

Ce travail se compose de trois chapitres :

- 1) Chapitre I :** Ce chapitre est consacré à étude bibliographique de turbine à gaz en général et les aubes en particulier (forme géométrique, les différents matériaux de fabrication, les méthodes de refroidissement...)
- 2) Chapitre II :** Ce chapitre expose une étude sur les matériaux et méthodes de fabrication des aubes.
- 3) Chapitre III :** Ce chapitre est réservé à la simulation d'une aube de turbine.

I. Etude bibliographique sur les aubes des turbines à gaz

I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Une turbine à gaz est une machine thermique qui convertit l'énergie Chimique d'un carburant en une énergie mécanique en se servant de l'air comme moyen de combustion . Le principe d'une turbine à gaz à combustion interne, est très ancienne. En 1731, l'Anglais John Barber partagea un brevet sur ce sujet. Cependant, il a fallu environ cent ans avant que les turbines à gaz ne commencent à se déployer. Son développement fut longtemps retardé par le succès de la turbine à vapeur. L'avantage pour la turbine à gaz conduisit à une lutte frénétique de dépôts de brevets entre 1880 et 1900 et à de nombreuses expériences entre 1900 et 1910.

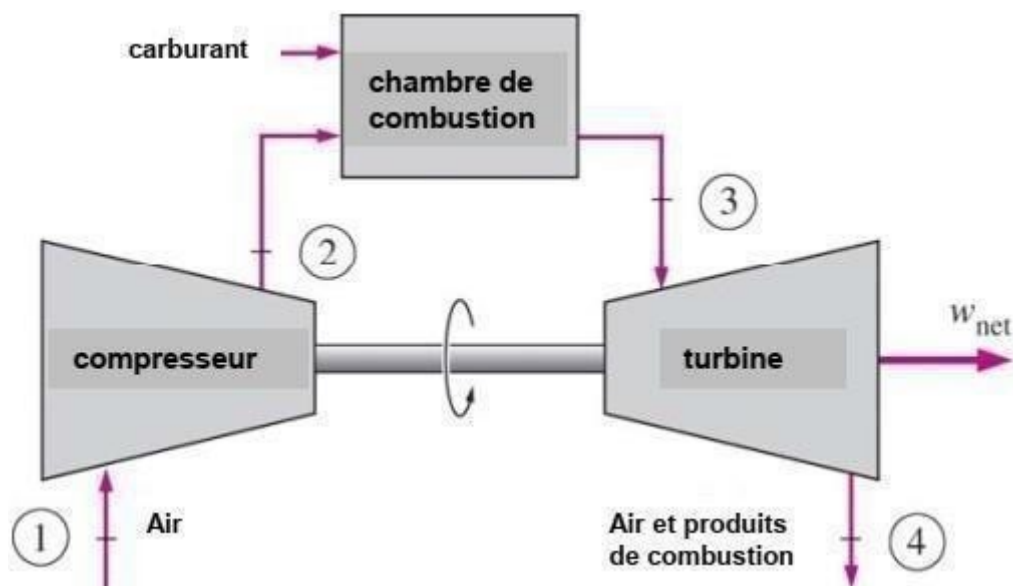


Figure I.1 : Schéma d'une turbine à gaz

I.1. Les composants :

Une turbine à gaz a trois parties principales sont :

I.1.1. Le compresseur :

Le compresseur est utilisé pour augmenter la pression d'air. Cette pression permet d'améliorer la combustion et l'extraction d'énergie car le mélange de carburant / air est de plus petite taille. D'un autre côté, l'augmentation du taux de pression augmente l'efficacité thermique. Il existe deux types de compresseurs :

a) Les compresseurs centrifuges :

Les compresseurs centrifuges sont généralement dédiés aux forces modérées et dans les situations dans lesquelles les principaux problèmes de couple secondaire apparaissent. Ils conviennent parfaitement aux applications industrielles. Un étage de compresseur centrifuge comprend une roue mobile, un diffuseur lisse, éventuellement un diffuseur à ailettes, un redresseur axial (configuration aéronautique) ou une volute (configuration industrielle).[01]

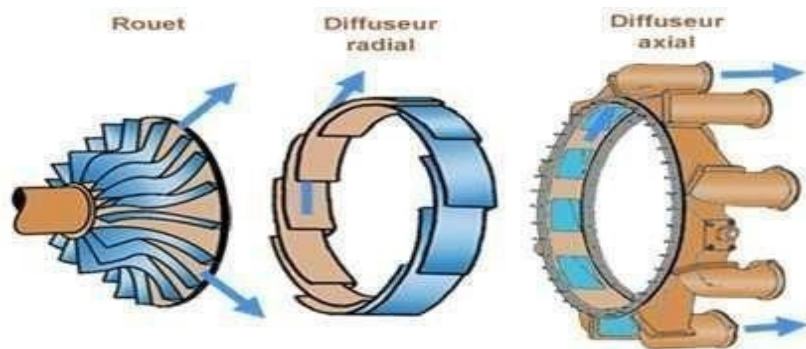


Figure I.2 : Un compresseur centrifuge[02]

b) Les compresseurs axiaux :

Les compresseurs axiaux sont généralement utilisés pour les machines à haute énergie, car la réduction du couple principal est inévitable, consistant en une série d'étapes. Il se compose d'une série d'étapes charnières disposées dans une série, chacune composée d'une roue et d'une partie fixe avec des lames essentielles.

L'aubage mobile rotor est constitué d'un disque circulaire sur lequel sont fixées des aubes (ailettes) et tourne devant l'aubage fixe redresseur. L'envergure des ailettes varie le long de l'écoulement pour compenser les variations de la masse volumique du fluide et pour conserver à la vitesse débitante axiale une valeur constante.[03]

c) Les aubes du rotor et stator :

Les aubages mobiles et fixes sont installées au bord d'attaque de façon à être dirigés au point de fonctionnement nominal de la machine, selon la vitesse de l'écoulement soit dans le

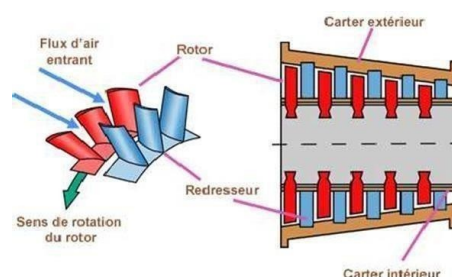


Figure I.3 : Disque circulaire de rotor qui contient les aubes [02]

Cadre de référence lié aux roues (cas des roues mobiles), soit dans un système d'axes fixe (cas des roues fixes).

Le calage des aubages au bord de fuite est déterminé au bord arrière pour donner au fluide l'écart souhaité qui vise à créer un moment cinétique (cas des roues mobiles) ou, au contraire, à annuler ce moment cinétique (cas des roues fixes).

L'ensemble des roues mobiles et des roues fixes contribue à l'accroissement de la pression. En effet, dans chaque roue mobile, le transfert d'énergie, depuis l'arbre vers le fluide, se trouve réalisé par accroissement simultané de l'énergie cinétique et de la pression. En complément, dans les roues fixes, l'excédent d'énergie cinétique est à son tour converti en un deuxième accroissement de la pression.[01][03]

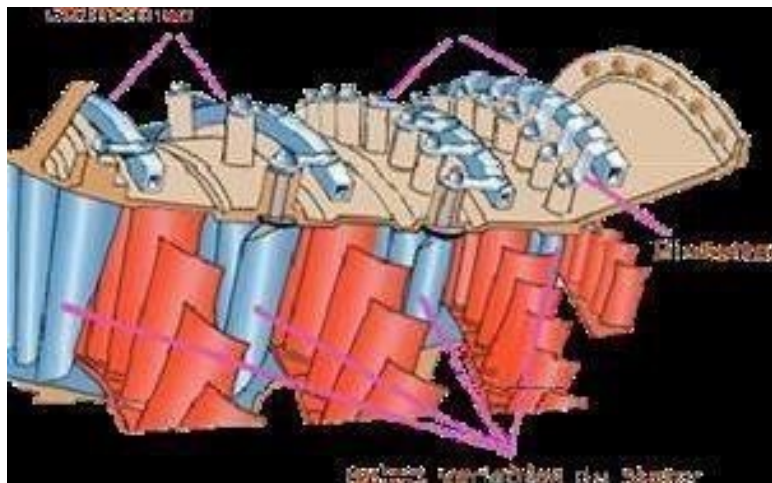


Figure I.4 : Les aubes de rotor et les aubes de stator [02]

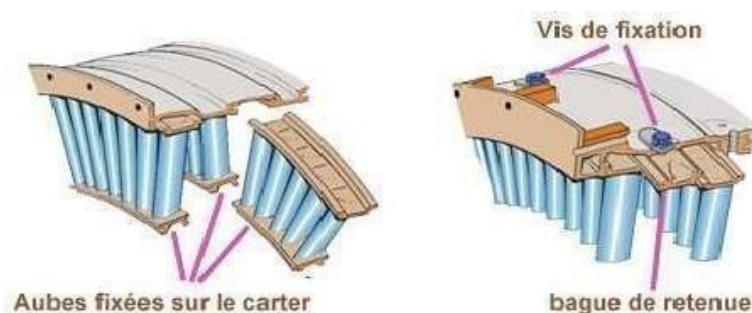
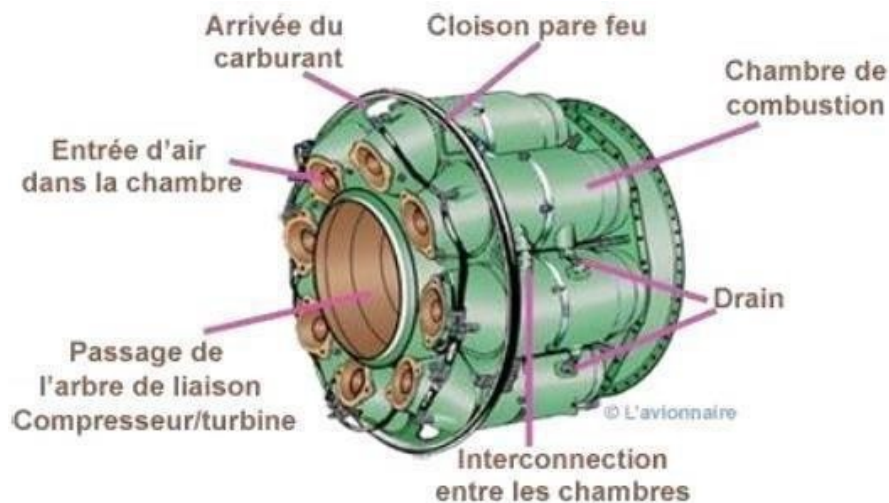


Figure I.5 : La fixation d'aube sur le carter de compresseur [02]

I.1.2. La chambre de combustion :

Le rôle de la chambre de combustion est de brûler le mélange de carburant et d'air et pour délivrer à la turbine les gaz chauds et brûler. Tenant compte du fait que la température des gaz ne dépasse pas la température maximale de la turbine, sinon ce dernier risque d'être endommagé [04]



Dessin réalisé d'après un dessin from the jet engine by Rolls-Royce

Figure I.6 : Chambre de combustion d'une turbine à gaz Rolls Royce [05]

I.1.3. Turbine de détente :

La partie de la turbine généralement se compose d'un certain nombre d'étages chacun d'eux est constitué d'un étage stator et d'un étage rotor (aubes). Dans l'étage stator (directrice), les gaz à des températures et des pressions élevées fournies par la pièce de transition, sont accélérés et acheminés vers un étage d'aubes du rotor montées sur un disque connecté à l'arbre de puissance.[06]

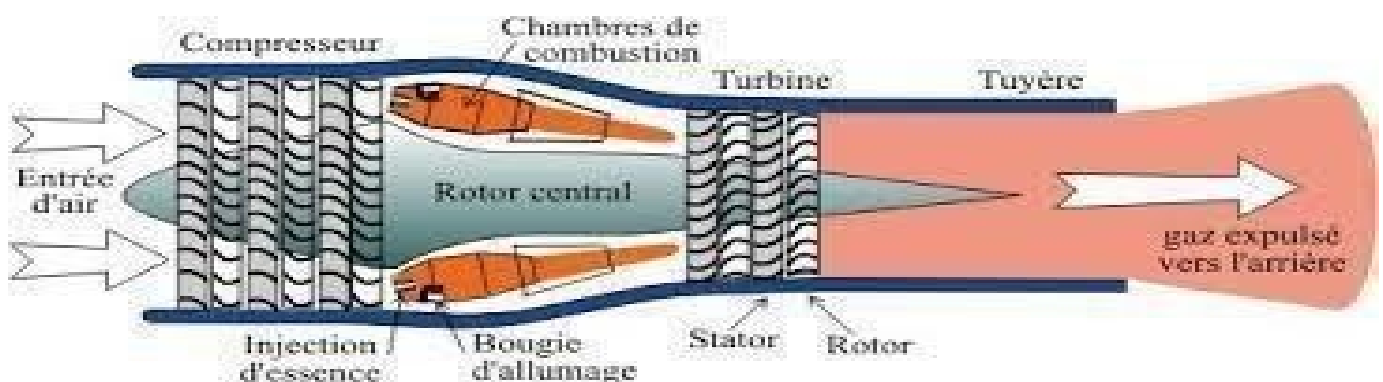


Figure I.7 : Turbine à gaz [07]

I.2. Les aubes :

L'aube est la partie d'une turbine en forme de cuillère ou de pale sur laquelle s'exerce l'action du fluide moteur. Il est le composant individuel qui constitue la partie de turbine d'une turbine à gaz. Les pales sont chargées d'extraire l'énergie du gaz à haute température et haute pression produit par la chambre de combustion. Les aubes de turbine sont souvent l'élément limitant des turbines à gaz, et son profil est optimisé pour respecter le domaine d'utilisation de l'étage du compresseur auquel elle appartient.[08]

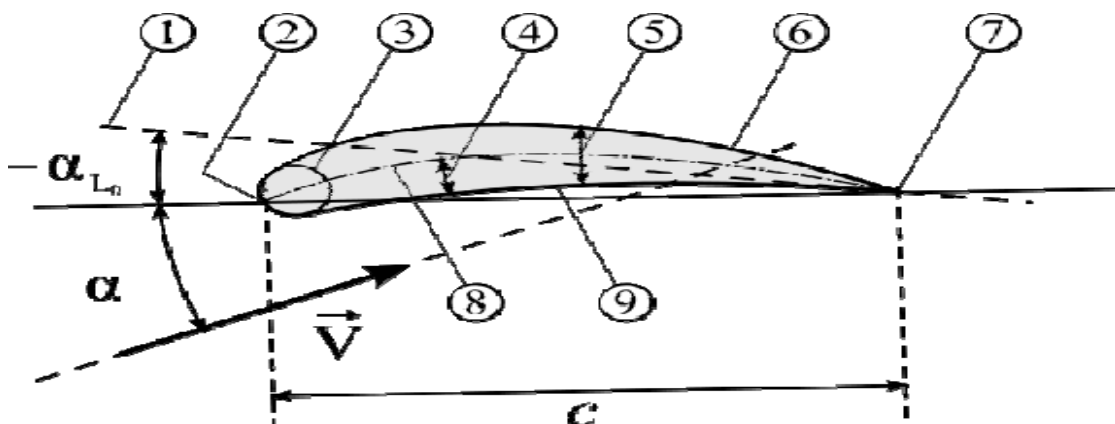


Figure I.8 : Une aube d'une turbine à gaz [09]

I.2. Le profil des aubes :

3.1 Profil NACA :

Les profils NACA sont des formes aérodynamiques pour les ailes d'avions développés Par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA). La forme des profils NACA est décrite à l'aide d'une série de chiffres qui suivent le mot « NACA ».



- ① Intrados.
- ① Ligne de portance nulle ;
- ② Bord d'attaque ;
- ③ Cylindre du bord d'attaque ;
- ④ Cambrure ;
- ⑤ Epaisseur maximale ;
- ⑥ Extrados ;
- ⑦ Bord de fuite ;
- ⑧ Ligne moyenne de cambrure ;

La géométrie du profil de l'aube dépend de sa fonction, et selon NACA nous pouvons distinguer les caractéristiques suivantes : [10]

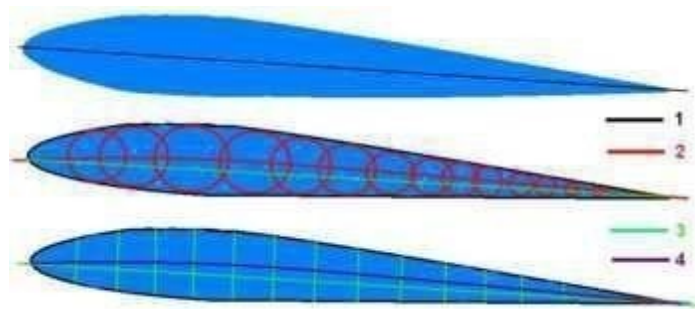


Figure I.9 : Lignes du profil - 1 : Corde, 2: Cambrure, 3: Longueur, 4: Ligne médiane [10]

a) Série à quatre chiffres (Série 4) :

Les sections d'aube NACA à 4 chiffres définissent par :

1. Premier chiffre décrivant cambrure maximale en pourcentage.
2. Deuxième chiffre décrivant la distance de cambrure maximale du bord d'attaque de la voilure en pourcents.
3. Les deux derniers chiffres décrivant épaisseur maximale de l'élément aérodynamique pourcent.

Par exemple dans le cas du profil NACA 2415 :

- ❖ Le 2 représente la cambrure relative maximale 2.
- ❖ Le 4 représente la position de la cambrure maximale.
- ❖ Le 15 représente l'épaisseur relative maximale.

Le profil aérodynamique NACA 0015 est symétrique, le 00 indiquant qu'il n'a pas de cambrure. Le 15 indique que l'aile a une épaisseur de 15% à corde rapport de longueur. [11]

b) Série à cinq chiffres (Série 5) :

La série NACA 5-chiffres permet de décrire des surfaces portantes plus complexes

1. Le premier chiffre, multiplié par 0,15, donne le coefficient de portance prévu (C_L).
2. Les deuxième et troisièmes chiffres, lorsque multipliés par 0,5, donnent P , l'emplacement de cambrure maximale comme une distance à partir du bord d'attaque (en pourcentage).
3. Les quatrième et cinquièmes chiffres donnent l'épaisseur maximale de l'élément aérodynamique (en pour cent) [12]

Par exemple, dans le cas du NACA 23015 :

- ❖ Le 2 représente le coefficient de portance caractéristique ($3/2 \cdot 0.2 = 0.3$).
- ❖ Le 30 représente la position de la cambrure maximale ($1/2 \cdot 30 = 15\%$ de la corde).
- ❖ Le 15 représente l'épaisseur relative maximale (15%).

c) Profils de ligne de cambrure :

Lignes de cambrure à 3 chiffres

- ❖ Les lignes à trois chiffres permettent d'obtenir une cambrure maximale très avancée.
- ❖ Le premier chiffre est égal à $2/3$ du coefficient de portance choisi (en 10ièmes).
- ❖ Le deuxième chiffre est le double de l'emplacement longitudinal de la cambrure maximale (en 10ièmes).
- ❖ Le troisième chiffre indique un bord non réfléchi (0) ou réfléchi (1) de fuite.

I.3. Les matériaux de réalisation d'aube :

Bien qu'il ait connu depuis longtemps que l'augmentation de la température d'entrée de turbine dans les résultats de moteurs aéronautiques dans les moteurs plus efficaces, les limites de fusion des métaux ont certainement restreint ces températures. Le besoin de meilleurs matériaux a stimulé de nombreuses recherches dans le domaine des alliages et des techniques de fabrication, et cette recherche a abouti à une longue liste de nouveaux matériaux et méthodes qui rendent possibles les turbines à gaz modernes [12]

I.4.1. Les superalliages à base de nickel :

Ils sont connus notamment sous les noms de marques : Inconel (Inco) et Hastelloy (Haynes international). Ils présentent d'ailleurs de très nombreuses nuances dont des alliages super réfractaires utilisés à hautes températures.

I.4.2. Structure d'un superalliage :

Les superalliages à base de nickel contiennent des précipités cohérents de la phase ordonné γ' dans la matrice CFC γ .

Un superalliage est un solide biphasique :

- ❖ Une **matrice** : système CF désordonné (appelé phase γ)
- ❖ Des **précipités** : formant un système CF ordonné NiAl_3 (phase γ')

Ces deux phases sont mixées sans qu'il y ait rupture de la structure :

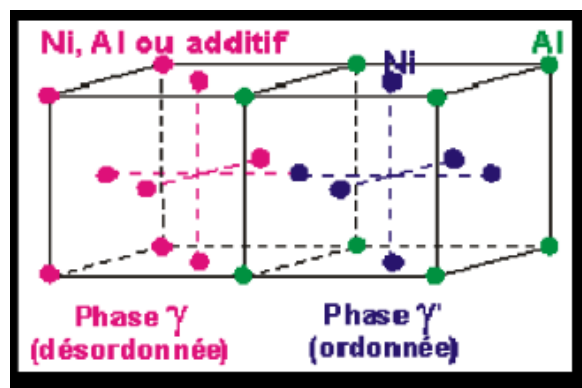


Figure I.11 : Structure d'un superalliage [12]

Le facteur de durcissement de ces alliages est surtout la phase intermétallique γ' , à structure cubique, cohérente avec la matrice nickel-chrome. Sa composition est $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$; elle peut contenir également, en solution, du chrome ou du cobalt ; d'autres phases intermétalliques peuvent précipiter dans les superalliages à base de nickel, telle que la phase orthorhombique Ni_3Nb .

Les dislocations produites par le fluage rencontrent, au cours de leur déplacement, ces particules γ' , qu'elles sont obligées de cisailer ou de contourner, nécessitant une contrainte mécanique supplémentaire.

Le mouvement des dislocations est contraint de suivre les couloirs très étroits qui séparent les précipités cubitiaux.

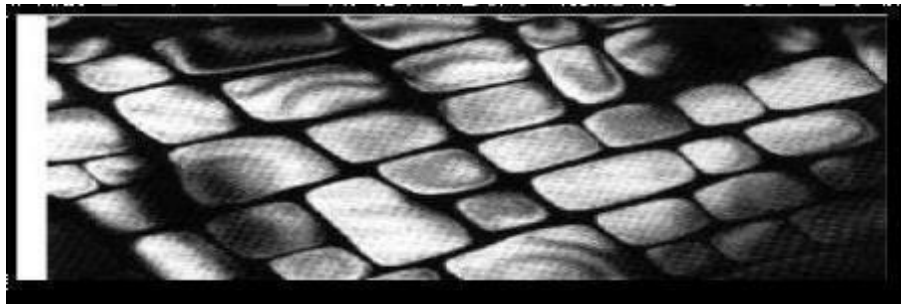


Figure I.12 : Morphologie des précipités γ' (MET). [12]

Dimensions des précipités de γ' (d'environ 64 angströms) dans la phase γ fait baisser énormément les performances à haute température d'environ 80 %. La dimension de ces précipités peut être contrôlée en faisant un recuit du superalliage.

I.4.3. L'INCONEL 738 :

L'inconel un alliage constitué de Nickel, de fer et de Chrome. Contrairement aux aciers inoxydables qui sont tous à base de fer et alliés avec du nickel et du chrome, certains Inconels sont à base de nickel et alliés avec du chrome et du fer, comme par exemple l'Inconel 738. Le terme « Inconel » est une marque déposée de métaux spéciaux. Corporation,

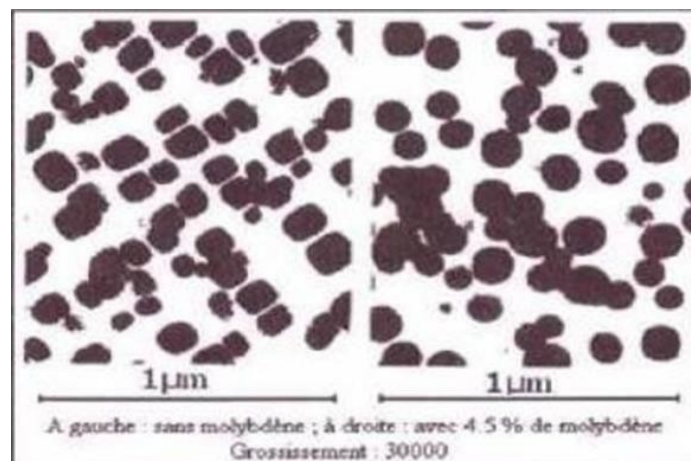


Figure I.13 : Morphologie de précipitation de la phase γ' . [12]

Désignant différents alliages de métaux. La marque est utilisée comme préfixe pour environ 25 alliages.

I.4.4. Les propriétés de l'inconel 738 :

Ses propriétés mécaniques et son apparence sont comparables à celles de l'acier inoxydable. Sa résistance mécanique à la traction varie de 690 à 1 275 MPa (100 000 à 185

000 psi) selon l'alliage. Ils ont les mêmes avantages que les aciers inoxydables par rapport aux aciers carbonés, mais en plus marqués. La résistance à la chaleur est beaucoup plus importante ($\pm 900^\circ$).

Évidemment, ils sont aussi beaucoup plus chers, la décision de les utiliser est calculée sur la durée de vie prévue et la rentabilité de l'application. Les inconels sont fréquemment utilisés dans l'aéronautique et plus particulièrement pour les pièces des parties chaudes des réacteurs. Ils sont aussi utilisés dans les centrales nucléaires.

L'inconel 738 est un superalliage à base de nickel de large utilisation pour les applications de haute température, spécialement pour la fabrication d'aubes de turbines à gaz récentes. Il présente une bonne résistance au fluage et à la corrosion sèche.

Deux versions de cet alliage sont produites :

- ❖ Inconel 738C (high carbon version)
- ❖ Inconel 738LC (L \ddot{u} w carbone version)

La différence entre les deux est le pourcentage de carbone, le premier avec 0.17 %C et le deuxième avec 0.11 %C le premier est largement utilisé.

I.5. Techniques de refroidissement :

A un rapport de pression constant, l'efficacité thermique du moteur augmente à mesure que la température d'entrée de la turbine (TET) augmente. Cependant, des températures élevées peuvent endommager la turbine, car les aubes sont soumises à des contraintes centrifuges importantes et les matériaux sont plus faibles à haute température. Ainsi, le refroidissement des aubes de turbine est essentiel. Les conceptions de turbines modernes actuelles fonctionnent avec des températures d'admission supérieures à 1900 kelvins, ce qui est obtenu en refroidissant activement les composants de la turbine. [15]

Il y a des techniques de refroidissement sont décrites dans les lignes suivantes :

I.5.1. Convection interne forcée :

Il fonctionne en faisant passer de l'air de refroidissement à travers des passages internes à la lame. La chaleur est transférée par conduction à travers la pale, puis par convection dans l'air circulant à l'intérieur de la pale. Une grande surface interne est souhaitable pour cette méthode, de sorte que les chemins de refroidissement ont tendance à être sinueux et remplis de petites ailettes. Les passages internes de la lame peuvent être de forme circulaire ou elliptique. Le refroidissement est obtenu en faisant passer l'air à travers

ces passages du moyeu vers la pointe de la pale. Cet air de refroidissement provient d'un compresseur d'air. Dans le cas d'une turbine à gaz, le fluide extérieur est relativement chaud qui passe par le passage de refroidissement et se mélange avec le flux principal en bout d'aube.

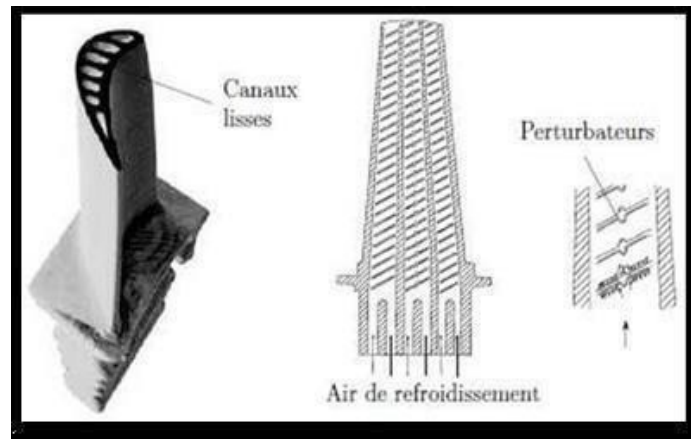


Figure I.14 : Refroidissement par convection interne forcée [16]

I.5.2. Film-cooling:

Le refroidissement par film (également appelé refroidissement par film *mince*), un type largement utilisé, permet une efficacité de refroidissement plus élevée que le refroidissement par convection et par impact. Cette technique consiste à pomper l'air de refroidissement hors de la pale à travers de multiples petits trous ou fentes dans la structure. Une fine couche (le film) d'air de refroidissement est alors créée sur la surface externe de la pale, réduisant le transfert de chaleur du flux principal, dont la température (1300–1800 kelvins) peut dépasser le point de fusion du matériau de la pale (1300–1400 kelvins). [17]



Figure I.15 : Refroidissement par film [17]

I.5.3. Impact de jets:

La technique de l'impact de jet consiste à chemiser l'aube et à percer plusieurs orifices dans cette chemise. La chemise est alimentée en air frais et des jets d'air se forment ainsi à la sortie des orifices et viennent refroidir la paroi interne des aubes de turbine. Les coefficients d'échange obtenus avec cette méthode sont très élevés ce qui la rend très efficace. C'est pour cela qu'elle est notamment utilisée sur le bord d'attaque des aubes, en impact dit concentrer,

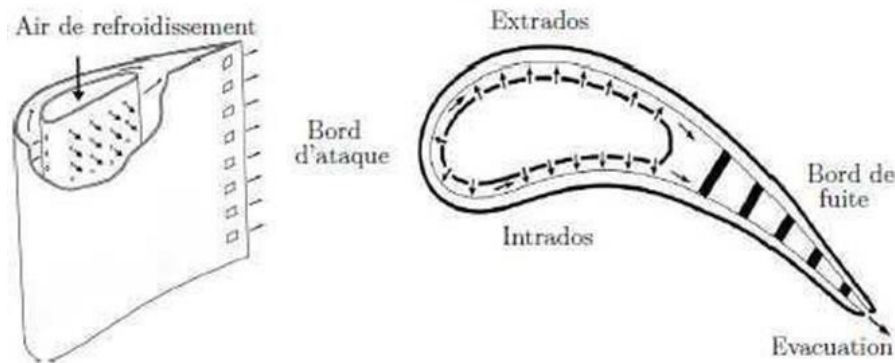


Figure I.16 : Refroidissement par impact de jets [18]

Car cette partie est particulièrement exposée au flux de chaleur extérieur. Un impact réparti (matrice de jets) est souvent introduit également sur la partie amont de l'intrados et de l'extrados de l'aube. L'objet du travail présenté dans ce mémoire porte sur cette technique de refroidissement particulière.

I.6. Le système barrière thermique :

L'utilisation de systèmes barrière thermique sur les aubes des turbines aéronautiques permet d'améliorer leurs performances, en leur faisant supporter une température plus élevée ou augmentant leur durée de vie. Soumis à un environnement très sévère, ces systèmes subissent non seulement des dégradations liées à leur oxydation à haute température (dégradations intrinsèques) mais aussi des dégradations dues à des impacts de particule et à des dépôts d'oxydes en leur surface (dégradations extrinsèques).

I.6.1. Présentation du système barrière thermique :

Les barrières thermiques sont des systèmes multicouches composés d'une couche de céramique isolante déposée à la surface du superalliage constitutif de l'aube de turbine sur une couche de liaison intermédiaire qui assure la protection du superalliage contre l'oxydation. Entre la couche de liaison et la couche de céramique, se développe, dès

l'élaboration du système, une couche d'alumine qui croît en service, par réaction entre l'oxygène qui diffuse à travers la couche de céramique et l'aluminium contenu dans la couche de liaison.

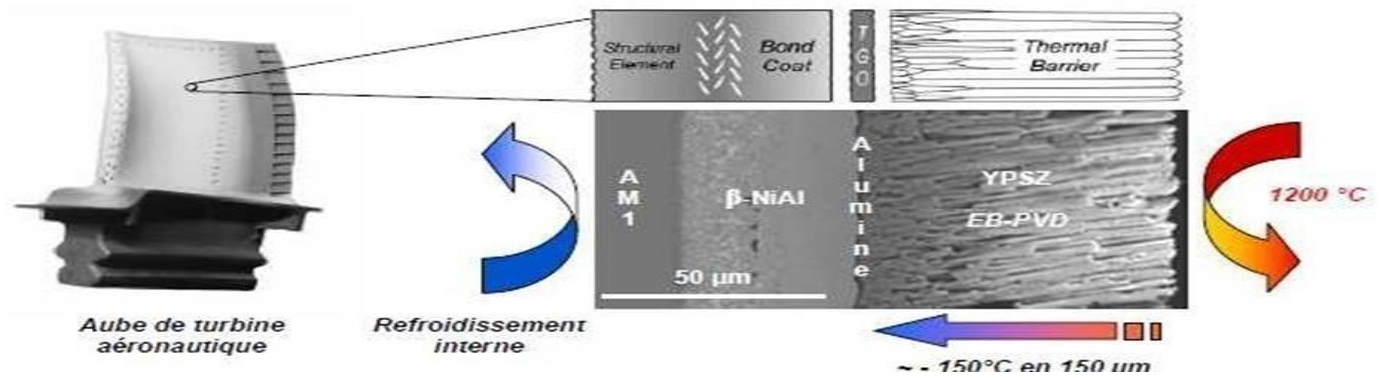


Figure I.17 : Système barrière thermique [18]

Si la température des gaz de combustion peut atteindre 1600°C , la température en surface de la couche de céramique atteint, elle, typiquement 1200°C . La couche de céramique permet un abaissement de la température d'environ $1\text{ K}/\mu\text{m}$, soit un abaissement global de 100 à 150°C en fonction de son épaisseur. En condition de service, la température de la couche de liaison est comprise entre 1000 et 1100°C .

I.7. Modes de dégradation :

La ruine des systèmes barrière thermique survient par écaillage de la couche de céramique. Le métal mis à nu est alors dangereusement exposé aux gaz chauds. Aux mécanismes accompagnant les phénomènes d'oxydation à haute température (dégradations intrinsèques) s'ajoutent des dégradations liées aux impacts de particules et aux dépôts d'oxydes en surface des pièces (dégradations extrinsèques).

I.7.1. Dégradations intrinsèques :

L'adhérence de la couche de céramique est affectée par les modifications microstructurales qui accompagnent l'oxydation de la couche de liaison en condition de service. L'écaillage de la protection thermique qui, *in fine*, conduit à la ruine du système,

résulte d'une fissuration qui s'amorce et se propage au niveau de la couche d'alumine interfaciale.



Figure I.18 : Ecaillages de la couche de céramique de systèmes barrière thermique pour aube [18]

I.7.2. Dégradations extrinsèques:

En fonctionnement, diverses particules peuvent entrer dans la turbine (sable, poussières, particules métalliques arrachées à certaines parties du moteur, *etc.*)

Outre des dommages locaux n'affectant généralement qu'une épaisseur limitée de la couche céramique, provoqués instantanément par l'impact de particules pouvant atteindre des dimensions millimétriques, des phénomènes d'érosion plus progressifs, liés à l'action de particules plus petites, peuvent conduire à la disparition totale de la couche de céramique sur des zones étendues, notamment sur le bord d'attaque des aubes.



Figure I.19 : Disparition de la couche de céramique par érosion [18]

Ce phénomène, en entraînant une augmentation importante de la rigidité de la couche de céramique infiltrée, peut conduire à des fissurations en condition de service qui mènent à la perte d'une partie de la protection thermique. Par ailleurs, une interaction chimique peut survenir entre les dépôts de CMAS et la zircone, susceptible de provoquer une dissolution de la couche de céramique.

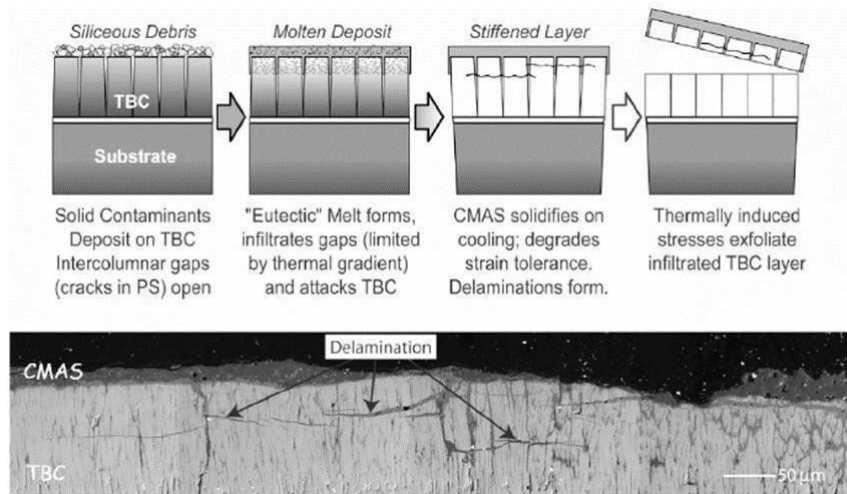


Figure I.20 : Mécanisme de dégradation d'un système barrière thermique par interaction

Conclusion :

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, la fabrication d'aubes de turbine nécessite une combinaison de sciences telles que la mécanique des fluides, la mécanique de propulsion, la dynamique des gaz, la thermodynamique, les sciences des matériaux et les procédés de fabrication.... Pour obtenir une aube bonne et précise.

Chapitre II: MATERIAUX ET METHODES DE FABRICATION DES AUBES

II.1. Introduction :

La fabrication des produits mécaniques est devenue de plus en plus importante. Que ce soit dans le secteur des transports, de l'énergie ou des télécommunications... Chaque jour, de nouvelles techniques apparaissent. Ces produits doivent répondre aux exigences des clients et avec un coût en moins .

Par conséquent, la conception et la fabrication de aubes jouent un rôle essentiel dans les performances finales d'une turbine. L'objectif est donc de déterminer, dès la phase de conception, la géométrie des aubes hautes performances et à prix raisonnable.

II.2. La fabrication des aubes de turbine :

La compétitivité de la fabrication d'aubes pour les turbines à gaz et à vapeur est un défi, parce que ces pièces comprennent la plupart des caractéristiques les plus difficiles :

- 1) La capacité de fabrication des matériaux dans lesquels les pièces sont fabriquées est variable.
- 2) De très grandes quantités de matériaux doivent être enlevées et de bonnes finitions de surface doivent être produites.
- 3) La forme des pièces est complexe (certains codes nécessitent une programmation CAM développé avec les meilleures méthodes).
- 4) Les aubes sont sujettes aux vibrations pendant l'usinage et pendant le fonctionnement (pièces longues et minces qui nécessitent des outils avec des pièces légères capables d'absorber les vibrations).
- 5) L'efficacité de la production est importante (production en grandes quantités).

II.2.1. Usinage des aubes de turbine :

Les aubes de turbine sont fraisées avec précision, sous forme de trajectoires très serrées.

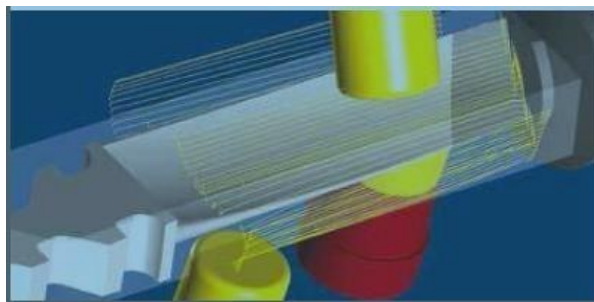


Figure II.1 : Simulation du processus de fraiseage à commande numérique d'une aube [20]

a) Simulation du fraisage 3D des aubes :

La simulation du fraisage 3D des aubes de la turbine est assurée par les logiciels de simulation du fraisage à commande numérique. Ces logiciels utilisent des stratégies d'usinages conformes aux situations rencontrées. Le choix des paramètres technologiques (vitesse de rotation de la broche de la machine, vitesse d'avance, les profondeurs de passes,...) sont laissés à l'utilisateur. Les chemins vides dans les parties inférieures.

b) Exemple de simulation du fraisage à commande numérique 5 axes de l'aube d'une turbine

Les fraiseuses à commande numérique 5 axes peuvent synchroniser tous ses axes pour garantir des trajectoires des outils (fraises). Ces trajectoires sont très serrées, ce qui permet de garantir des aubes très lisses (bon état de surface). Des cycles d'ébauche et de finition et d'autres qui sont préparés pour des surfaces de formes bien déterminées (rainures, surfaces complexes,..).

La synchronisation des mouvements des 4 ou 5 axes est un travail délicat mais nécessaire si on

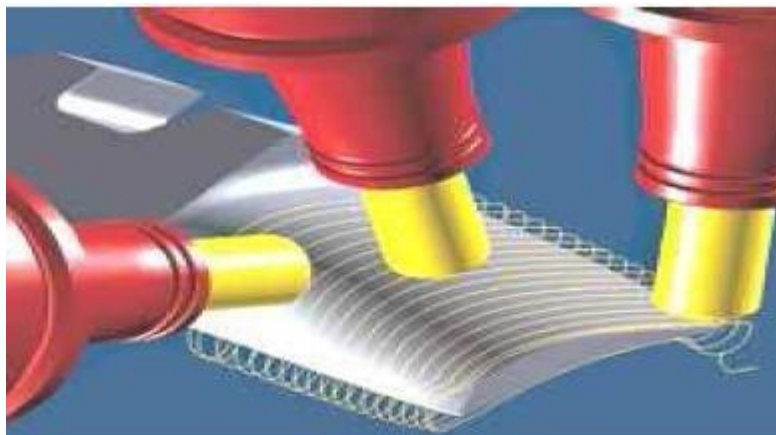


Figure II.2 : Exemple de fraisage à commande numérique 5 axes de l'aube de la turbine [20]

veut, par exemple, usiner les roues d'un turbocompresseur, dans les conditions où :

- L'espace entre les dents est très serrée, c'est-à-dire que l'espace entre les dents suffit à peine pour faire passer la fraise et il ne doit pas altérer leurs flancs.
- L'outil (fraise) doit passer entre deux aubes voisines sans altérer leurs surfaces malgré que la dent est très mince ;
- Ceci doit se faire à grande vitesse et ne doit pas endommager le flanc de la dent voisine.

L'ingénierie des aubes de turbine détermine l'efficacité des moteurs d'avion . La tendance actuelle est clairement orientée vers les profils mince des aubes . Mais tous ces choix n'étaient pas possibles sans la maîtrise de l'usinage des profils minces. Le choix du matériau pose.

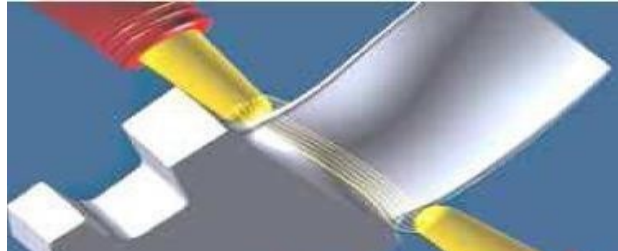


Figure II.3 : Simulation du fraisage à commande numérique d'une aube par deux fraises simultanément[20]

encore un autre problème, car un matériau hautement résistant à la haute température n'est pas facilement usinable . Par exemple, l'Inconel 718.

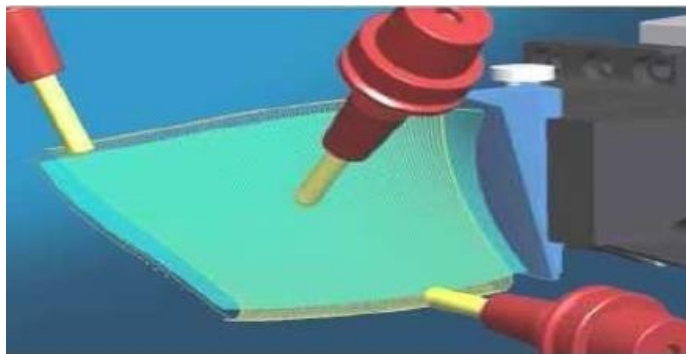


Figure II.4 : Simulation de fraisage 5 axes avec fraises à bout sphérique[20].

II.2.2. Coulée des aubes :

a) Moulage des aubes :

- **Principe :**

C'est un moyen très ancien de fabriquer les pièces par coulée de la matière à l'état liquide, Il peut être effectué manuellement ou à la machine, il permet de fabriquer des pièces de de différentes encombres. [21].

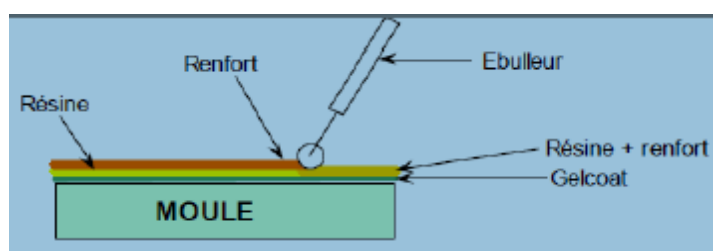


Figure II.5 : Exemple de moulage.[21]

- **Principales caractéristiques:**

Avantages	Inconvénients
1) Très larges possibilités de forme 2) Pas de limite dimensionnelle 3) Moules simples, peu coûteux, rapides à réaliser en interne	1) Une seule face lisse 2) Faible cadence de production par moule. 3) Espace de travail important

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du moulage.

b) Coulée par pulvérisation :

- **Principe :**

Une façon manuelle ou robotique de fabriquer des pièces de résines à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mis en œuvre à l'aide de la machine dite de « projection » qui consiste en :

- Dispositif de coupe .
- Un ou deux pistolets à la fois laissent tomber les gouttes de résine.

- **Principales caractéristiques :**

Avantages	Inconvénients
1) Très larges possibilités de forme et dimensions. 2) Productivité plus élevée qu'au contact. 3) Investissements très modérés.	1) Une seule face lisse. 2) Propriétés mécaniques moyenne. 3) Qualité tributaire de la main d'œuvre.

Tableau II.2 : Propriétés du moulage par pulvérisation.

c) Moulage sous vide:

- **Principe :**

Le moulage sous vide est fait entre les deux parties du moule . Selon la technologie de mise en œuvre des renforts (mat, tissu, ...) sont placés à l'intérieur du moule poussé sur le

renfort. La pression exercée sur le moule est utilisée lors du nettoyage de l'aspirateur pour une distribution de résine et imprégnation de renforcement. [22]

- **Principales caractéristiques:**

Avantages	Inconvénients
1) La qualité ne dépend pas de l'emploi. 2) Qualité constante.	1) possibilités de formes plus petites . 2) Mise au point parfois difficile.

Tableau II.3 : Propriétés de coulée sous vide

d) Moulage à la cire perdue :

Le moulage à la cire perdue ou avec des modèles non permanents proviennent de l'artisanat. La nécessité de reproduire des objets métalliques était nécessaire (répéter des sculptures dans Bronze, par exemple). L'industrie s'est rapidement intéressée à ce processus, ce qui lui a permis d'obtenir des formes très complexe, difficile à réaliser grâce à des procédés de fonderie sable, (moule permanent...). Ou des machines traditionnelles. En fait, le procédé de cire perdue consiste à mettre en œuvre Le moule en céramique (coquille) autour d'une pièce typique est généralement en cire. Cette croûte Vide la pièce modèle, pleine de métal liquide. Lorsque le métal est durci, le La coque est détruite pour obtenir la pièce métallique.

Ce processus permet donc de former les parties auxquelles le modèle parvient La fonderie permanente sera très complexe et donc coûteuse. processus précis, propriétés dimensionnelles des pièces, mais surtout La finition de surface est supérieure aux autres procédés de fonderie. [23]

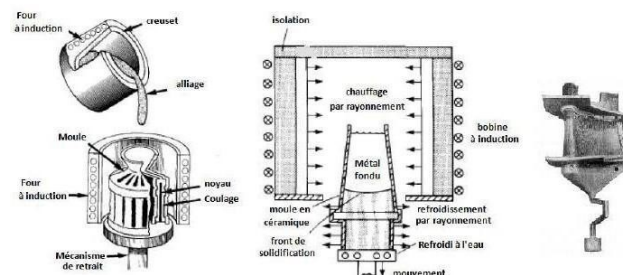


Figure II.6 : Schéma du principe de coulée de la cire perdue[23].

II.3. Evolution des matériaux des aubes

Les exigences sur les turbines à gaz évoluent et les aubes aussi, car elles présentent les pièces maîtresses dans l'ensemble. Les matériaux des aubes ont évolués d'une manière accrue . Depuis les années 40 du siècle passé jusqu'aujourd'hui, les différences sont parfaitement apparentes . L'efficacité des turbines est en liaison étroite avec le type de matériau de l'aube . [12]

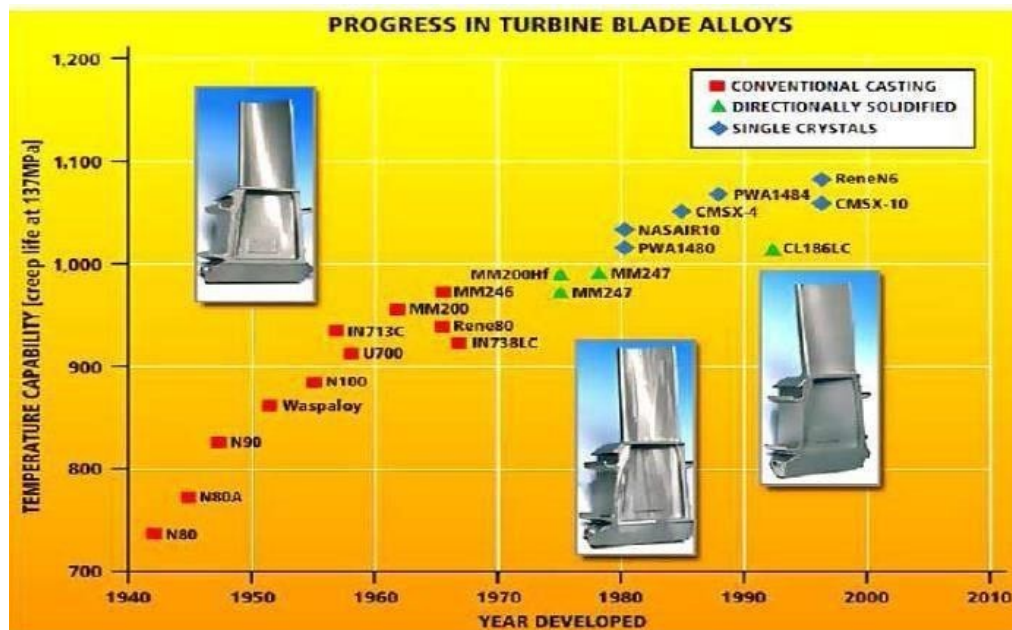


Figure II.7 : Développement de matériel de code de 1940 à nos jours.[12]

II.4. Les superalliages :

Un alliage ou alliage à haute performance est un alliage métallique contenant une excellente résistance mécanique et une bonne résistance à la haute température, généralement 0,7 à 0,8 fois de sa température de fusion, une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation. Les super alliages sont généralement formés d'une structure cristalline cubique avec une face centrée de type austénite. le métal de base des super alliages est souvent le nickel, le cobalt et le fer, mais Aussi du titane ou de l'aluminium. [12]

Les super alliages sont des matériaux métalliques pour des utilisations haut de gamme de température telle que les points chauds des turbines à gaz .

On peut diviser les superalliages en trois familles :

- 1) Alliages de fer, de nickel et de chrome.
- 2) Alliage à base de nickel.
- 3) Alliage à base de cobalt.

Sa haute résistance est principalement due à trois facteurs:

- Refroidir la matrice en ajoutant des éléments : molybdène, tungstène-Cobalt, néobium, tantale, vanadium.
- La présence d'une phase entre les métaux est soigneusement déposée.
- Présence de carbures.

II.4.1. Les superalliages à base de nickel :

Il est particulièrement connu sous des noms de marque: Inconel. Ils ont également de nombreuses qualités, y compris des alliages Super thermes utilisés à haute température. [12]

II.4.2. Structure d'un superalliage :

Les superalliages à base de nickel contiennent des dépôts de phase cohérents γ' classés dans la matrice des CFC.

un superalliage et un solide biphasique:

- une **matrice** : système cF désordonné (appelé phase γ)
- des **précipités** : formant un système cF ordonné NiAl₃ (phase γ')

Ces deux phases sont mélangées sans aucune fracture dans la structure:

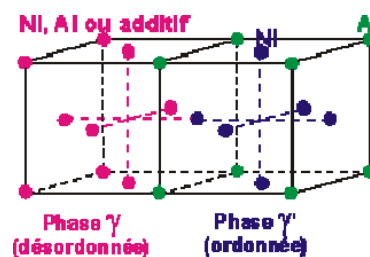


Figure 811 Structure d'un superalliage. [12]

Facteur de durcissement de ces alliages et en particulier de l'étape entre les métaux γ' à Structure cubique, cohérente avec la matrice de nickel et de chrome. Sa composition est Ni₃ Intelligence Artificielle, Ti Il peut également contenir, dans une solution, du chrome ou du cobalt. Les inter-métaux peuvent être déposés dans des super alliages à base de nickel, tels que la phase Ni₃Nb orthopédique.

Le mouvement des dislocations est contraint de suivre les couloirs très étroits qui séparent les précipités cubitiaux.

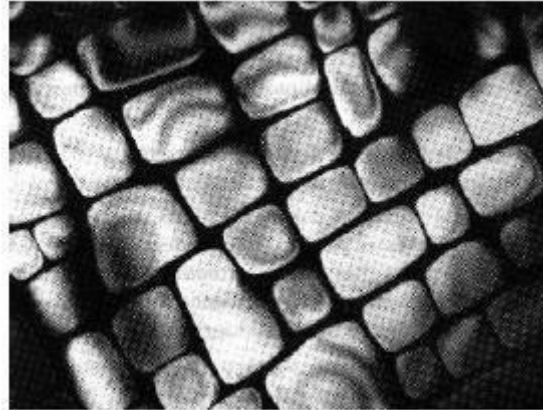


Figure II.9 : Morphologie des précipités γ' (MET).[12]

Les dimensions des dépôts γ (environ 64 angström) dans la phase γ diminuent . Effectuer une température très élevée. La taille de ceux-ci et les sédiments peuvent être contrôlés en conduisant deux naissances en super-alliage.

II.5. L'INCONEL 738 :

II.5.1. Introduction:

L'alliage Inconel est composé de nickel, de fer et de chrome. Il semble à l'acier inoxydable et est entièrement à base de fer et allié avec du nickel et du chrome . Les inconels sont à base de nickel et mélangés avec du chrome et du fer, tels que Inconel 738. Le terme « Inconel » est une marque déposée de métaux spécialisés. [24]

II.5.2. Les propriétés de l'inconel :

Ses propriétés mécaniques et son apparence peuvent être comparées à celles de l'acier inoxydable. La résistance mécanique à la traction varie de 690 à 1 275 MPa , selon l'alliage. Ils ont les mêmes avantages en acier inoxydable. La résistance à la chaleur est beaucoup plus Important (± 900 degrés). Évidemment, c'est aussi beaucoup plus cher.

Inconel738 est un alliage à base de super nickel pour une utilisation généralisée pour applications à haute température, en particulier pour la fabrication d'aubes de turbine à gaz . Il a une bonne résistance à la corrosion sèche.

Deux versions de cet alliage sont produites:

- Inconel 738C (high carbon version)
- Inconel 738LC (low carbon version).

II.5.3. Composition de l'inconel :

Le tableau II.4. Présente la composition chimique de l'inconel 738 :

Elément	Composition (% en masse)			
	IN-738C (high carbon)		IN-738LC (low carbon)	
	Gamme	Nominale	Gamme	Nominale
Carbone	0.15-0.20	0.17	0.09-0.13	0.11
Cobalt	8.00-9.00	8.50	3.00-9.00	8.5
Chrome	15.70-16.30	16.00	15.70-16.30	16.00
Molybdène	1.50-2.00	1.75	1.50-2.00	1.75
Tungstène	2.40-2.80	2.60	2.40-2.80	2.60
Tantale	1.50-2.00	1.75	1.50-2.00	1.75
Niobium	0.60-1.10	0.90	0.60-1.10	1.75
Aluminium	3.20-3.70	3.40	3.20-3.70	3.40
Titan	3.20-3.70	3.40	3.20-3.70	3.40
Zirkonium	0.05-0.15	0.10	0.03-0.08	0.05
Bore	0.005-0.015	0.010	0.007-0.012	0.10
Fer	0.05max	*	0.05max	*
Manganèse	0.02max	*	0.02max	*
Silicium	0.30max	*	0.30max	*
Sulfure	0.015max	*	0.015max	*
Nickel	Balance	Balance (61)	Balance	Balance (61)

* minimum possible

Tableau II.4 : Composition chimique de l'Inconel 738.

La stabilité de l'inconel 738 est confirmée par un essai de rupture à chaud (contrainte de rupture): Après plus de 5000 heures, A une température de 815°C sous pression de 280 MPa et après traitement thermique, aucune trace de la phase Sigma (σ) n'a été trouvée sur alliage, sachant que cette étape est instable.

II.5.4. La fabrication de l'inconel:

L'IN-738, comme presque tous les super alliages à base de nickel, est fabriqué par Fonderie de précision (perte de moulage à la cire).

Ces alliages sont généralement considérés comme imparables. Pour le soudeur, Il est recommandé de prendre toutes les précautions nécessaires pour choisir le procédé de soudage. Température de pré/post-chauffage, traitement thermique... [25]

II.6. Les matériaux composites :

I.6.1. Définition :

Le matériau composite peut être largement défini comme une compilation, Deux ou plusieurs substances, l'assemblage final a des propriétés supérieures à celles des propriétés de chacun des matériaux constitutifs. Nous appelons maintenant d'une manière ou d'une autre Dispositions communes en « matériaux composites » pour les renforts inclus dans la matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible, entre le renfort et la matrice. Il existe

une zone de connexion appelée interface. Ces matériaux composites sont les plus hétérogènes [26].

La matrice assure la cohésion et la direction des fibres.

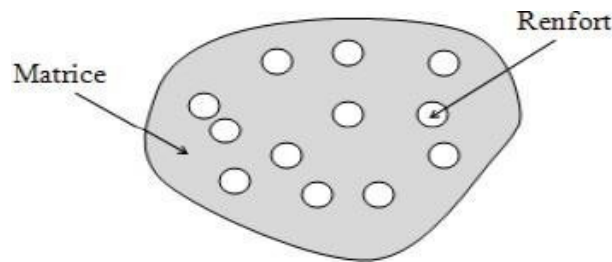


Figure II.10 : Matériau composite [26]

II.6.2. Classification des matériaux composites :

La nature du matériau qui forme la matrice permet d'énumérer trois matériaux principaux considérées ici dans l'ordre croissant de résistance à la température :

Les matrices sont : (CMP, CMM, CMC). Pour se connecter à ces trois types de matrice sont soit des renforts intermittents, y compris toutes les dimensions beaucoup plus petites que les dimensions de la pièce, c'est-à-dire des renforts continus, dont au moins une dimension est du même ordre de taille que la pièce. Matériaux utilisés comme renforts ayant de bonnes propriétés mécaniques substantielles (carbone, Alumine, silice, bore, kevlar, Acier, nitrure et carbure de silicium...).

Lorsque les températures de fonctionnement sont supérieures à 1000°C. Les composites de matrice céramique. Dans ce type de comportement, le renforcement est généralement. Se compose de longues fibres de carbure de carbone, de silice ou de silicium collectées par un tissu multidimensionnel. Ce renfort poreux est pénétré par la matrice (carbone, silice, Carbure de silicium) qui est soit au stade liquide, soit en phase gazeuse. La dernière étape de développement consiste à intensifier le composé en habillant à haute pression à haute température. Ces matériaux sont développés principalement dans l'aérospatiale en tant que structure thermique (disques de frein, buse, plaques, tuiles ablatives...) car sa résistance thermique et mécanique élevée est spécifiée. [27]

II.6.3. Les renforts :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et de grande taille. Le nombre de fibres disponibles sur le marché en fonction des coûts de production

requis pour la structure qui a été réalisée. Les renforts de fibres se présentent sous les formes suivants : linéaire (filaments, filaments), tissus de surface (tissus, tapis), multidirectionnels (tresse , Tissus complexes, tissu à trois voies ou plus).[26]

a) Classification des renforts :

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée

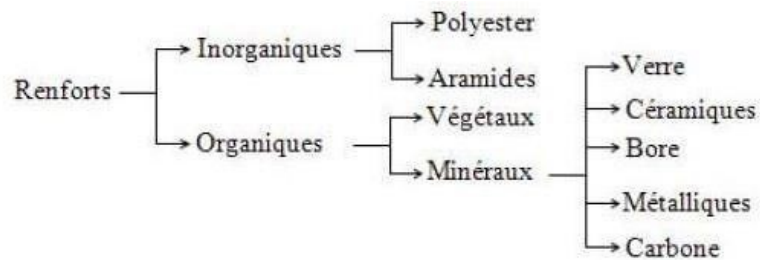


Figure II .11 : Classification des renforts.[26]

sur la figure(II.11) :

II.6.4. Structure de renforcement :

Les structures composites sont différentes. La plupart des renforts fonctionnent bien, mais fournissent une performance plus faible en pression et en cisaillement. Il faut donc jouer sur le tissu et les renforts d'ingénierie pour créer une structure Adaptée. Il existe différentes formes géométriques et renforts.

a) Les unidirectionnels (UD) :

Dans une nappe unidirectionnelle, la fibre est assemblée en parallèle les unes avec les autres. Par rapport à d'autres qui utilisent un cadre très léger, forme (II.12). Le taux d'équilibre est très élevé.

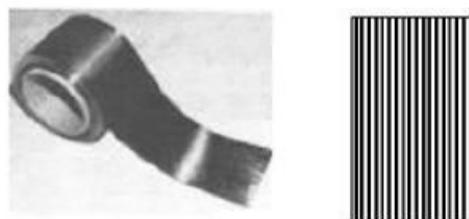


Figure II.12 : Nappe unidirectionnelle.[26]

b) Les tissus :

Les tissus sont constitués de fils torsadés et d'une matrice verticale, les uns sur les

autres. Le mode enchevêtrement ou les boucliers le distinguent.

- **Toile :**

Chaque fil passe les chaînes vers le haut, puis sous chaque fil à matrice, et au inversement, figure (II.13). Le tissu a une bonne planéité et une dureté relative, Mais ils ne sont pas trop déformés pour être mis en œuvre. De nombreuses intersections successives Générer un embaumement important et réduire les propriétés mécaniques.

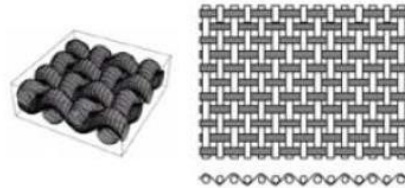


Figure II.13 : Tissu forme toile.[26]

- **Serge:**

chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne, figure (II.14). Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils [28].



Figure II.14 : Tissu forme serge.[26]

II.6.5. Les matrices:

Le rôle de la matrice est de connecter les fibres, pour assurer la distribution spatiale de renforts homogènes, transportant les efforts externes pour les renforts et leur distribution,

a) Les Matrices organiques :

Les réseaux de polymères synthétiques sont les plus courants dans une large diffusion, associée au verre, aux aramides ou à la fibre de carbone. Ils ont des faibles unité et faible résistance à la traction, mais cèdent facilement la place à l'imprégnation du renfort.

Actuellement, les résines de contrôle thermique sont principalement utilisées (TD), qui sont intégrées à la fibre longue, mais l'utilisation de polymères thermiques renforcés de fibres (TP) se développe fortement. Il est important d'identifier les différences fondamentales.

de ces deux types de tableaux :

1-La structure (TP) sous forme de chaînes linéaires, doit être chauffée pour les former (puis plier les chaînes), et les refroidir pour les fixer (la défaillance de la chaîne). Ce processus est réversible.

2-La structure (TD) a une forme de réseau 3D qui met (double liaison de polymérisation) pour durcir sous une forme permanente. La transformation est donc irréversible. [26]

b) Les matrices métalliques :

Imprégnation de renforts avec un alliage liquide en tant que procédé technique sensibles, dans la pratique, les alliages d'aluminium ne sont utilisés que dans ce type de technique associés à des fibres ou à des molécules de graphite ou de céramique. C'est facile à mettre dedans fonctionnent parce que leur température de fusion est relativement basse et que leur densité est faible. C'est peu coûteux. Compromis atteint entre la rigidité de la matrice métallique et les renforts de rigidité confèrent aux véhicules des propriétés mécaniques intéressantes en rapport avec l'alliage seul, en particulier au-dessus de 200 ° C.

c) Matrices Céramiques :

Les composés de matrice céramique peuvent être obtenus par imprégnation La fibre est préformée (métaux, verre, armure, carbone et céramique) ou par suspensions Liquides, puis enduits à haute pression, soit par des gaz réactifs. Permettre le dépôt entre les fibres (en particulier pour le carbone et les composés carbonés) [29].

II.6.6. Ingénierie des matériaux composites :

Toutes les procédures de mise en œuvre montrent la prépondérance de la conception des pièces composites:

- 1) Par surface : plaques, coques
- 2) par la division des classes successives

a) Monocouches :

La monocouche est le composant essentiel de la structure composite. Les différents types de monocouche sont améliorés : fibres longues (UD unidirectionnel, distribué aléatoirement), fibres tissées, fibres courtes.

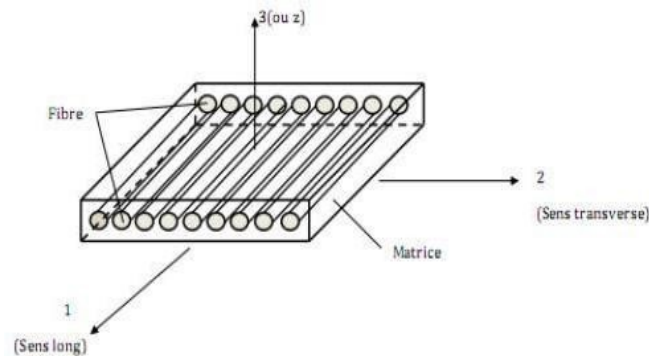


Figure II.14 : Pliez les renforts unidirectionnels.[29]

b) Stratifiés :

Il consiste en un tas de monocouches, chacune prend une direction spéciale avec un cadre de référence commun pour les couches, connue sous le nom de référentiel commun entre les couches, disponible en tant que cadre de référence . (figure II.15).

le choix de l'empilement et plus particulièrement des directions permettra d'obtenir les propriétés mécaniques spécifiques. On peut avoir les types : [26]

- 1) Équilibré : comportement de l'enveloppe comme de nombreux couches orientés, tendance φ Couches orientées vers la couche selon la direction $-\varphi$
- 2) Symétrique: Stratifié avec des couches disposées de manière similaire pour un niveau moyen.
- 3) Asymétrique: Stratifié avec des couches disposées de manière asymétrique pour un niveau moyen.
- 4) Hybride : Le comportement des couches successives de fibres d'une nature différente, c'est un stratifié hybride.

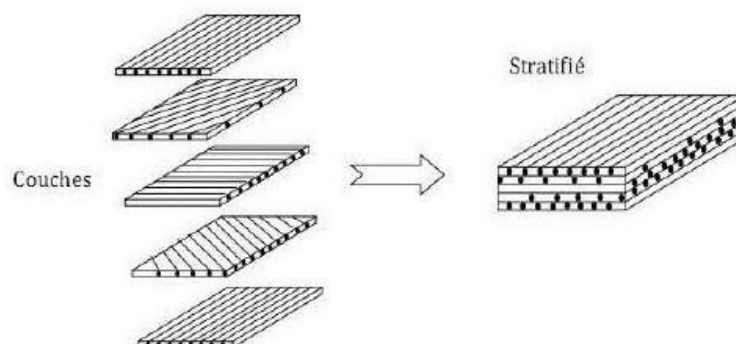


Figure II.15 : Constitution d'un stratifié.[30]

II.6.7. Composites sandwiches :

Le principe de la technologie sandwich consiste en une application à l'âme (formée d'un matériau ou d'une structure légère ayant de bonnes propriétés de compression) deux Feuilles , appelées cuir, avec de bonnes propriétés de traction, le but de cette procédure est la formation d'une structure pour obtenir la légèreté et dureté.

En général, les matériaux sont sélectionnés dans le but initial d'obtenir un bloc minimum tenant compte des conditions d'utilisation (conditions thermiques Corrosion, prix). Pour que les structures sandwich, elles jouent pleinement leur rôle, elles nécessitent pour s'assurer que nous avons une solidarité parfaite pour toute l'âme - le cuir, d'une manière ou d'une autre pour diviser les efforts entre l'âme et la peau. L'assemblage est effectué par une image groupée à l'aide de résines compatibles avec les matériaux existants.

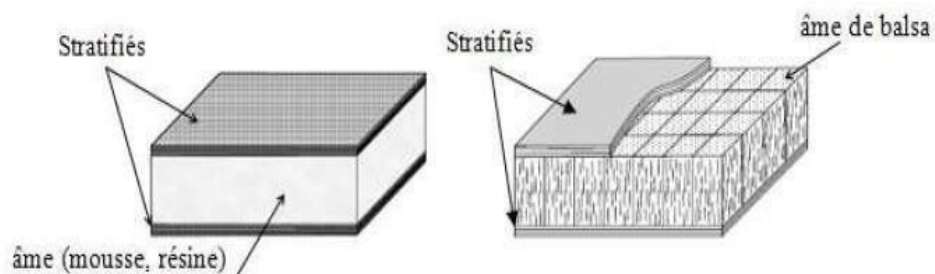


Figure II.16 : Matériau sandwich avec noyaux solides.[30]

II.6.8. Etapes de la mise en œuvre des matériaux composites :

Les étapes de la fabrication de matériaux composites consistent en l'assemblage des renforts et la matrice polymère avec bonne création d'interface entre les deux matériaux. Au cours de l'exécution, la nature, physique, chimique et Les thermiques de différents composants affectent les mécanismes de transformation . La matrice peut passer de l'état liquide à l'état solide ou se dissoudre à haute température avant qu'il ne soit durci. Comprend la fabrication de matériaux composites (TD) Imprégnation de renfort de résine.

II.7. L'ALUMINE :

La matrice sélectionnée est la céramique technique ou l'alumine (oxyde Aluminium Al_2O_3) : Bonne résistance mécanique aux hautes températures, bonne conductivité thermique, haute résistance électrique, dureté élevée, bonne résistance à la corrosion. Cette

matrice est renforcée par la fibre de carbone.

II.7.1. Composite à matrice céramique :

Les composés à matrice céramique ou CMC sont des matériaux composites qui sont fabriqués par partie de la céramique technique. Il dispose d'une gamme de fibres céramiques intégrées dans une matrice céramique égale. La fibre et la matrice peuvent être constituées en principe de toutes les céramiques connues, y compris le carbone. [27]

II.7.2. Propriétés des composites à matrice céramique :

a) Propriété mécanique :

Amélioration mentionnée dans l'introduction des propriétés mécaniques par l'introduction des fibres céramiques dans la matrice céramique dépendent du mécanisme suivant :

Formes de traction dans la matrice d'ouverture, comme dans le non-matériau composite, pour des longueurs supérieures à 0,05%, selon le type de matériau, forment un pont à travers la fente. Ce mécanisme suppose que la matrice peut glisser le long de la matrice de fibre, c'est-à-dire qu'ils ne s'y attachent que faiblement mécaniquement. Cela signifie que dans le cas d'une forte présence, l'adhérence et l'ouverture de la matrice briseront également la fibre, la céramique composite. Cela montrerait le même comportement fragile que les céramiques non ensemencées.

b) Propriétés thermiques et électriques :

Les propriétés thermiques et électriques des céramiques composites dépendent de : fibres, matrice et pores, ainsi que leur ordre. Direction de la fibre. Cela conduit également à des valeurs basées sur la tendance (variations de tendance). Parmi les céramiques composites les plus courantes aujourd'hui Il peut être résumé comme suit:

Les isolants électriques à oxyde à base de composite céramique sont toujours très bons, et ils ont une meilleure isolation thermique que les céramiques homogènes, car Poreux. L'utilisation de la fibre de carbone soulève les connexions électriques et thermiques dans direction de la fibre, dans la mesure où le contact direct est apporté. [27]

Conclusion :

La technologie moderne essaie plusieurs fois de concevoir des matériaux bonne construction de dureté, haute résistance mécanique, dureté élevée et grande légèreté. Dans ce même contexte, l'ingénieur souhaite, dans un grand nombre de Mode, concevoir des structures avec un rapport performance/masse, aussi élevé que possible. Pour atteindre cette performance, toujours à la recherche de matériaux avec Propriétés spécifiques élevées.

Les matériaux qui répondent à cette norme tels que le verre, Carbone et bore Très fragile, un défaut suffisamment petit pour déclencher la rupture totale du Châssis. Pour pouvoir réaliser des structures suffisamment tolérantes aux dommages Il est nécessaire d'utiliser des matériaux améliorant les fibres qui sont liés entre Ils sont à travers la résine. Il n'y a pas de matériaux traditionnels qui permettent de combiner ces propriétés D'où la nécessité d'utiliser des matériaux composites, des matériaux sandwich et Matériaux intelligents...

Chapitre III: Simulation de l'aube d'une turbine

III Simulation de l'aube d'une turbine

III.1. Partie de conception :

III.1.1. Introduction :

L'aube a deux surfaces complexes qui se manifestent à intrados (l'intérieur) et extrados (l'extension). Il est obtenu soit par déformation ou coupure.

Son obtention par déformation nécessite l'usinage des deux parties de la matrice. Ces dernières doivent avoir des poches qui reflètent la forme et les dimensions de l'extrados pour la demi-matrice de dessus et la forme et les dimensions de l'intrados pour la demi-matrice de dessous. La fabrication de poches de moussure sophistiquées est utilisée par le broyage CNC avec quatre ou cinq axes.

Il est nécessaire par un traitement direct pour déterminer le cours de catégorie. C'est la question de la définition de toutes les coordonnées de tous les points de la courbe qui entoure l'aube. Une bonne finition de la surface de l'aube est toujours requise, et cela nécessite que la courbe soit déterminée dans des éléments précis et donc le nombre de points sera inséré dans le programme de contrôle numérique est très élevé, et ce nombre peut dépasser cent mille points et ainsi, plus de cent mille lignes d'instructions logicielles pour l'écriture dans le programme de contrôle. Voir. Un autre point sensible est la détermination exacte des coordonnées de chaque point appartenant à la courbe du modèle 3D de l'aube.

Pour ces raisons, la génération du programme ISO, compréhensible par la machine à CN représente une tâche qui doit être confiée à un outil informatique.

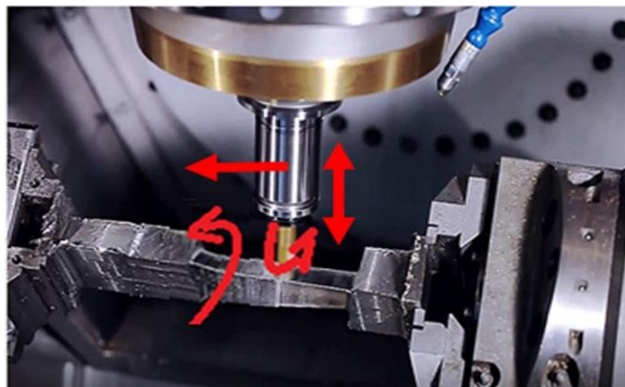


Figure III.1 : Fraisage 4 axes d'une aube

Pour ces raisons, il sera nécessaire de trouver un outil informatique (CAO) qui permet de créer un modèle 3D de l'aube en dessinant deux courbes. Ces courbes qui offrent des intrados et des extrados sont arrondies par un ensemble limité de points. Le modèle 3D de l'aube peut être obtenu en appliquant une série d'opérateurs: extraction, élimination des matériaux, ...

L'outil doit contenir la partie FAO capable d'extraire les données géométriques du modèle 3D et de les traduire sous forme d'entités d'exploitation automatiques. Cependant, l'utilisateur doit intervenir pour déterminer certains points (La partie finale et la pièce brute, le modèle de machine et les paramètres, Le type de l'opération pour chaque surface et son paramétrage, Le modèle de l'outil à utiliser et son paramétrage...).

III.1.2. Présentation de CATIA :

CATIA, acronyme de Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée, est un logiciel de CAO mis au point par la société Dassault Aviation pour ses propres activités. Il regroupe un nombre important de modules totalement intégrés dans un seul et même environnement de travail. Ces modules permettent de modéliser une géométrie (CAO), de réaliser des analyses et des simulations (IAO), de mener une étude d'industrialisation (conception des outillages), de générer les programmes de commande numérique pour les machines-outils (FAO), d'établir les plans d'usines ...

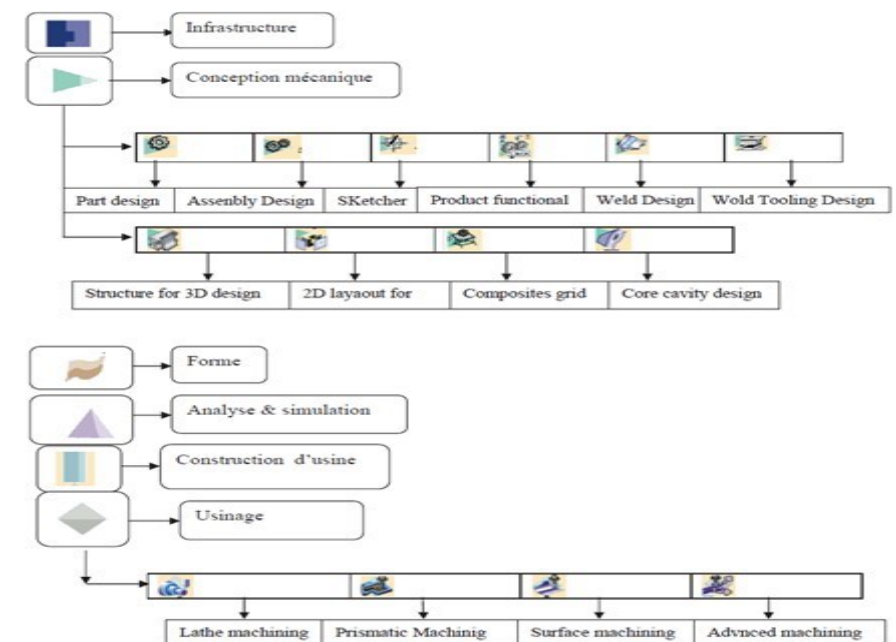


Figure III.2 : Architecteur du logiciel CATIA v5

III.1.3. Présentation de SOLIDWORKS :

SOLIDWORKS est un logiciel pour des modèles de taille pour créer des pièces 3D complexes. Ces pièces peuvent ensuite être utilisées pour créer des dessins à deux dimensions et des assemblages de plusieurs parties ensemble.

III.1.4. ETUDE L'USINAGE DE L'AUBE PAR SOLIDWORKS :

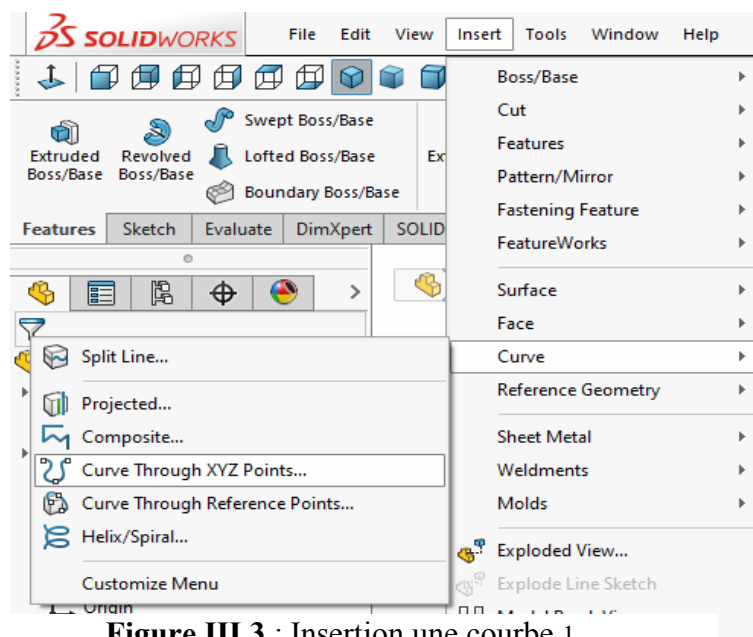
a) Création de la pièce :

Les courbes qui définissent la section au pied de l'aube sont données par le tableau :

- 1- En cliquant sur l'icône Insert nous incluons le tableau coordonné ci-dessus pour dessiner la courbe graphique.

X	Y	X	Y
0.0000000	0.0000000	0.2498462	0.0650390
0.0075149	0.0101442	0.2998375	0.0672827
0.0125046	0.0136584	0.3998371	0.0658704
0.0249843	0.0204940	0.4998552	0.0580585
0.0499554	0.0301654	0.5998839	0.0465468
0.0749328	0.0376370	0.6999180	0.0331352
0.0999142	0.0437086	0.7999519	0.0198236
0.1498843	0.0533519	0.8999808	0.0082119
0.1998618	0.0603954	0.9499917	0.0036560
		1.0000000	0.0000000

Tableau III.1 : Les coordonnées de la courbe



Après avoir

Figure III.3 : Insertion une courbe 1

fait cette

étape, une fenêtre spéciale apparaît pour insérer les coordonnées précédentes.

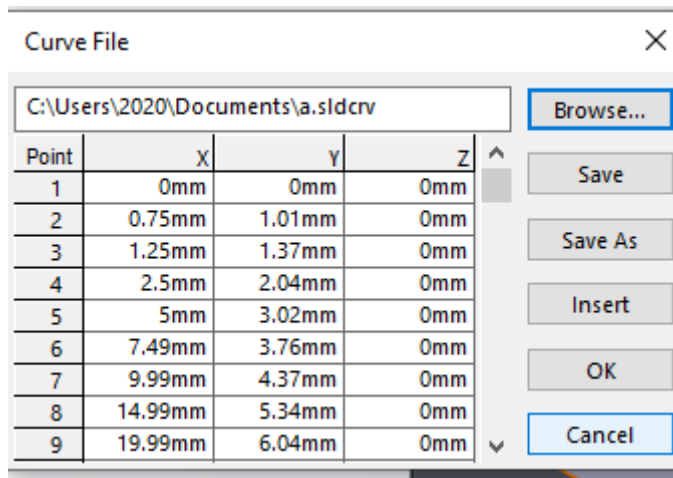


Figure III.4 : Coordonnées de la courbe 1

Donc la courbe résultante

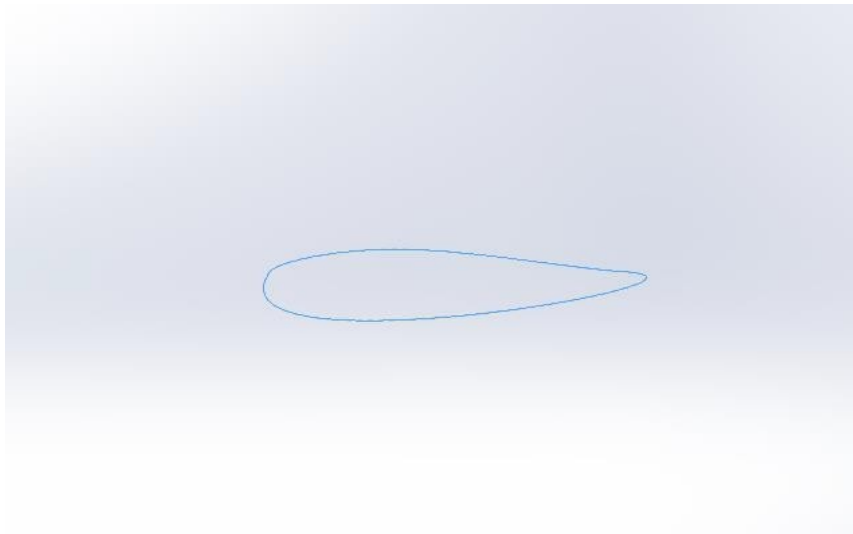


Figure III5 : La courbe

2- À l'aide de l'icône



Nous envoyons la courbe à front plane :

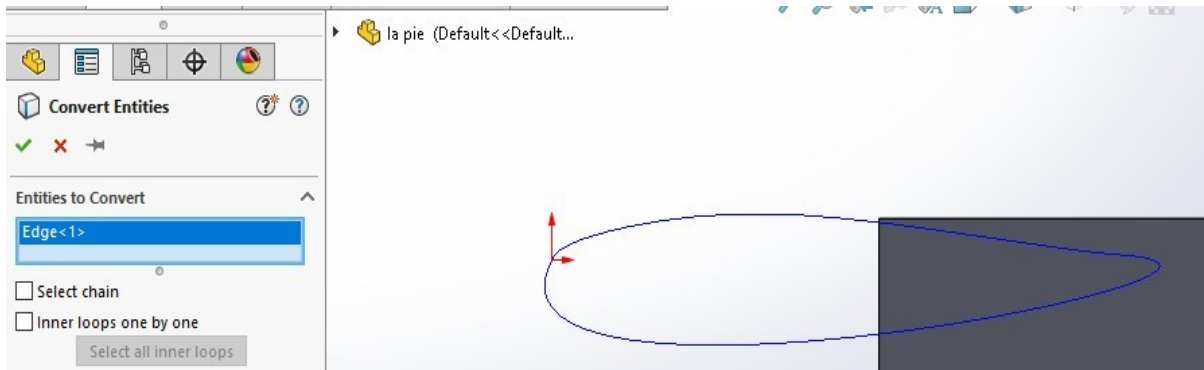



Figure III6 : Conversion de courbe a front plan

3- Application  montrée dans l'icône **Opérateur d'extrusion** Nous créons la formetridimensionnelle de l'aube.

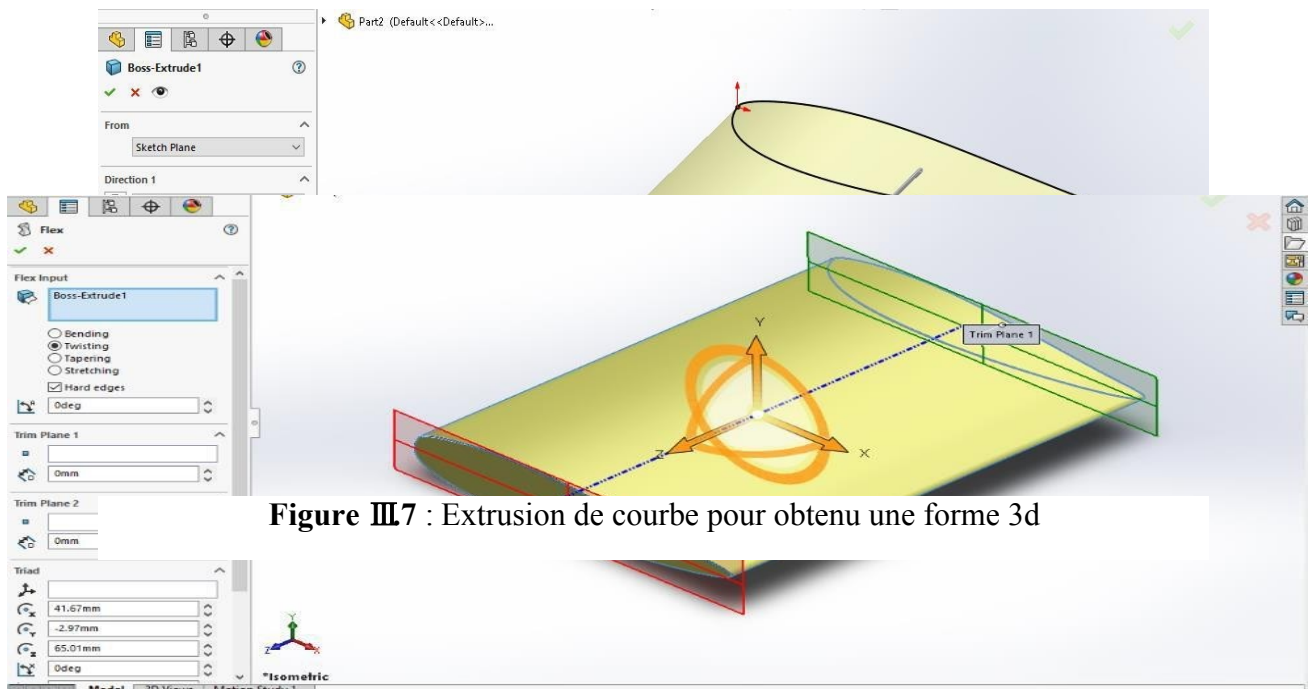


Figure III7 : Extrusion de courbe pour obtenu une forme 3d

Figure III8 : Utilisation l'opérateur de flexion

4- Afin d'obtenir la forme finale de l'aube. En ajustant l'angle de rotation à 20 degréé vial'icône **Insert** puis en choisissant **Opérateur – Flex**.

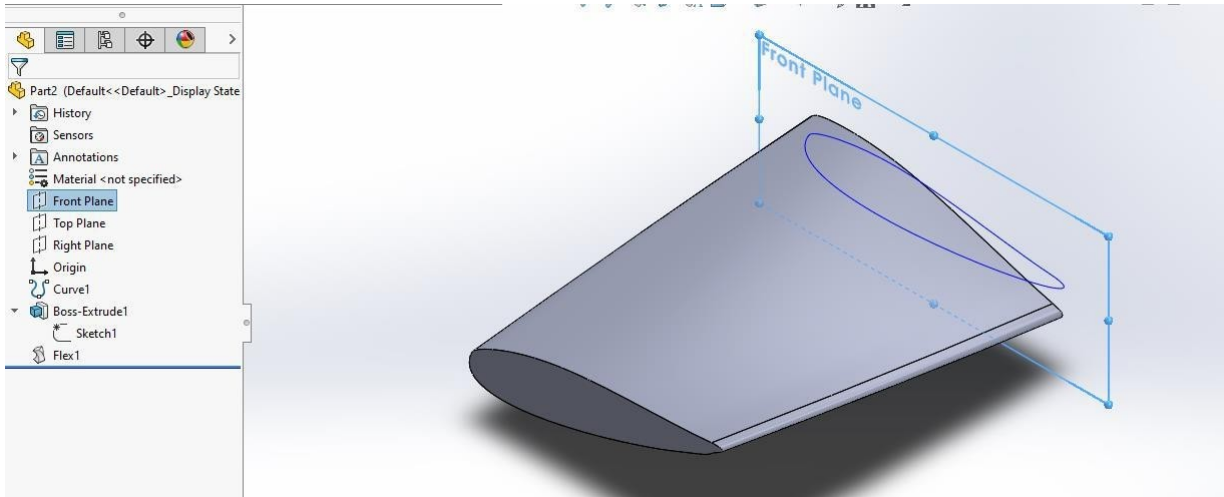
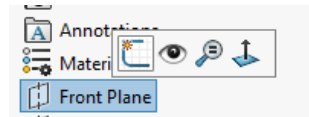


Figure III.9 : L'aube après la flexion

5- Sur **Front plane** nous choisissons **Sketch**



et nous

insérons un rectangle



de certaines dimensions .

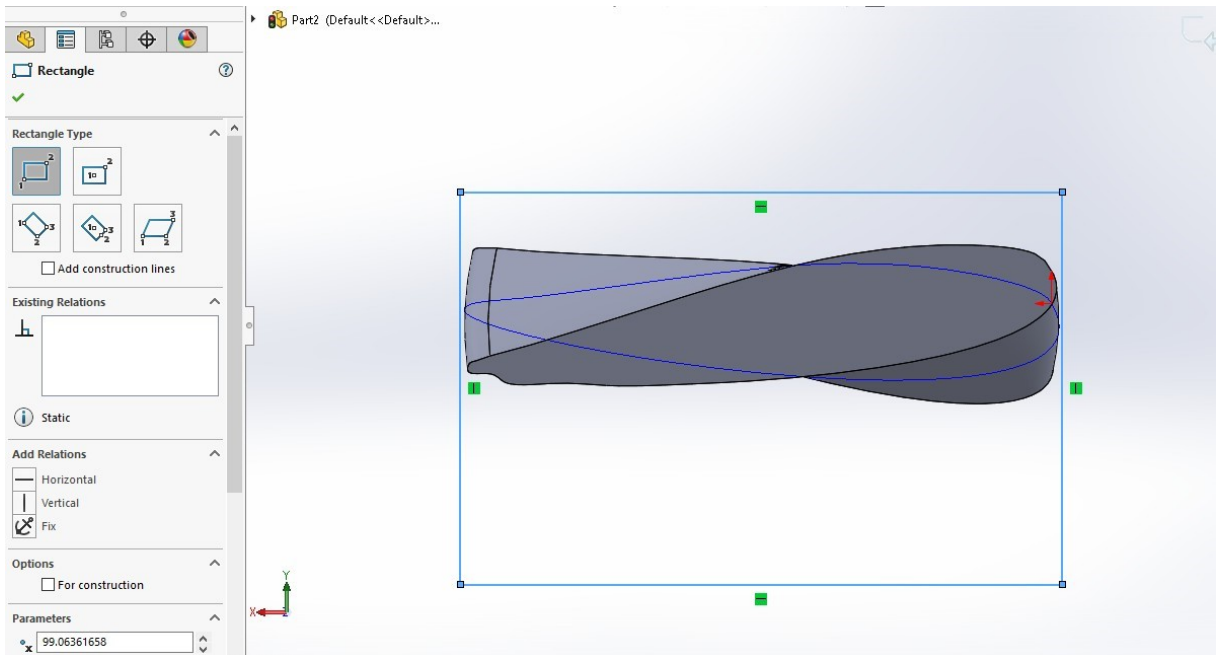


Figure III.10 : Insertion de rectangle

6- Ensuite on fait **Extrusion** avec  pour obtenir la forme initiale du pied.

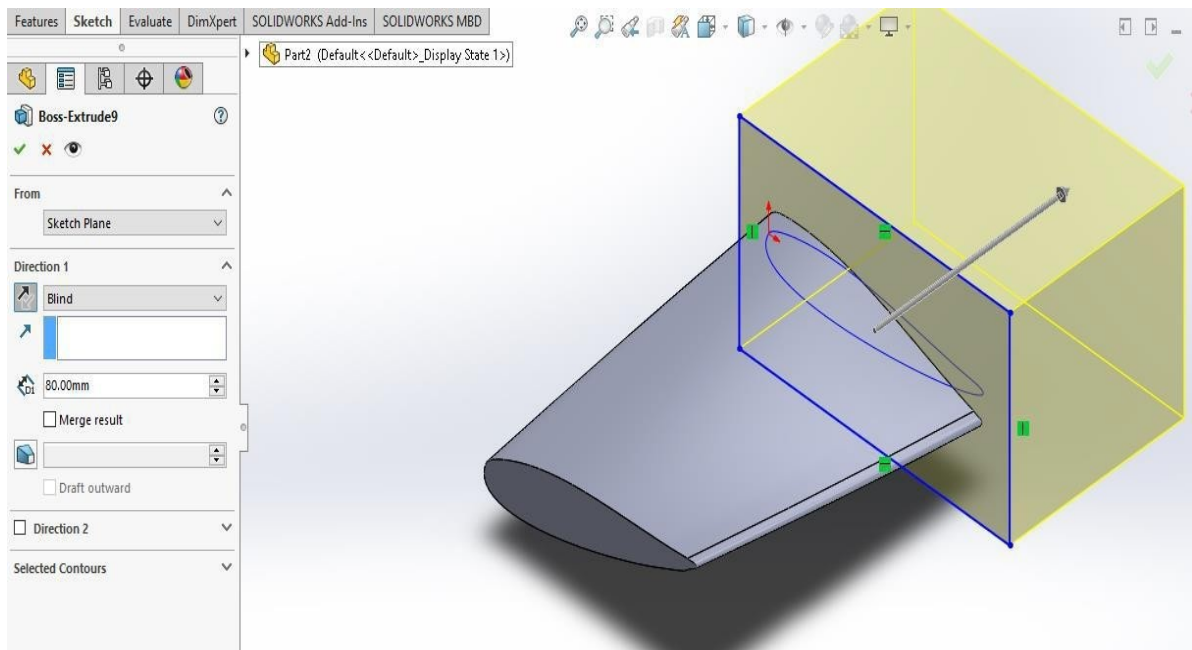


Figure III.11 : Extrusion de rectangle pour obtenu un forme 3d

7- Nous allons à **Front plane** sur **Rectangle** ensuite on choisit **Sketch** pour insérer une forme avec des dimensions spécifique

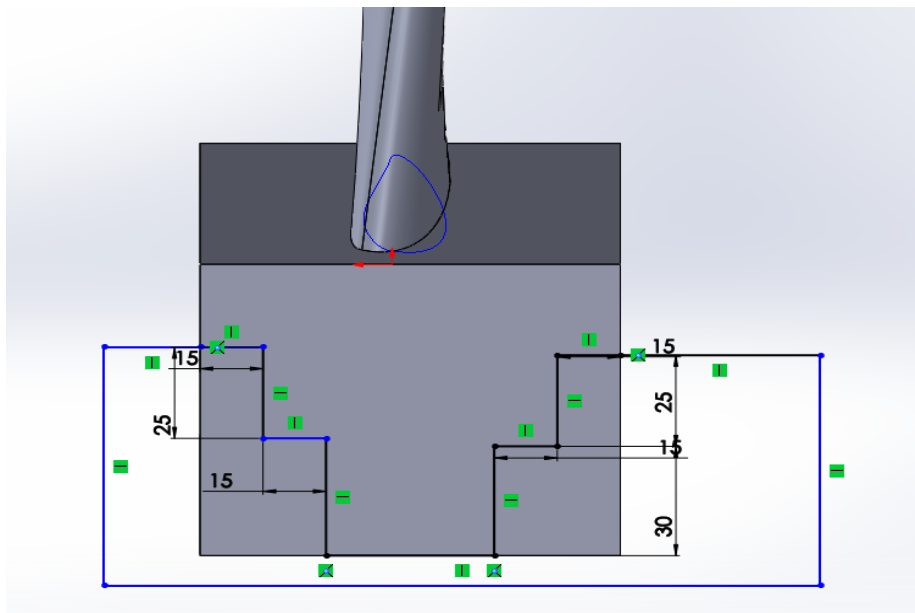



Figure III.12 : Insérassions un sketch en forme de tiroir

- 8- Autoriser l'icône **Extruded cut**  en extrudant un modèle solide (dessin sur le pied) dans la direction spécifiée.

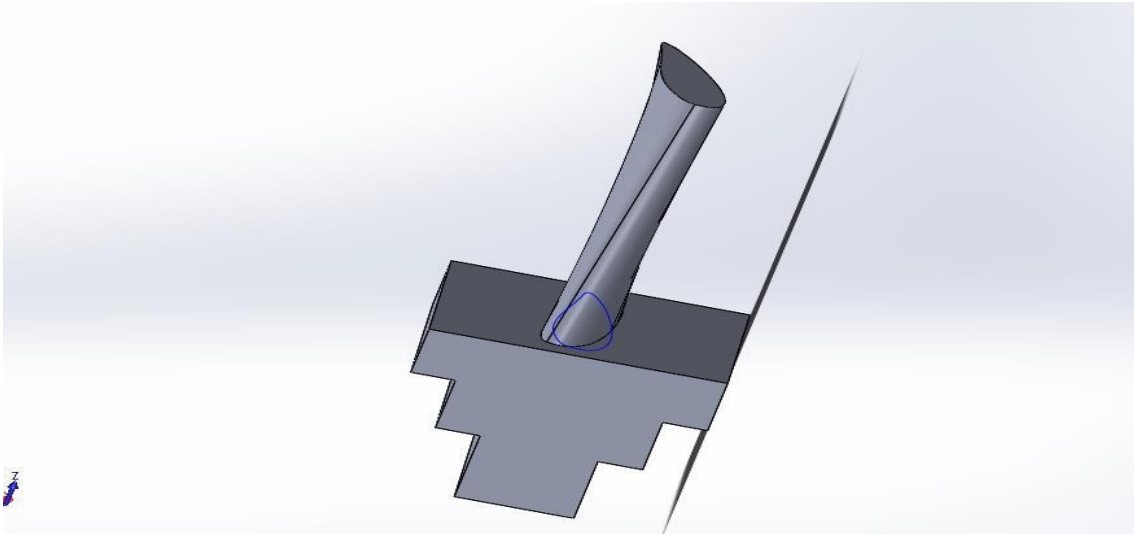



Figure.III.13 : Extrusion inverse pour obtenu la forme de pied

- 9- La dernière étape de l'achèvement du pied consiste à adoucir les bords à travers

l'icône  Pour obtenir la forme du pied :

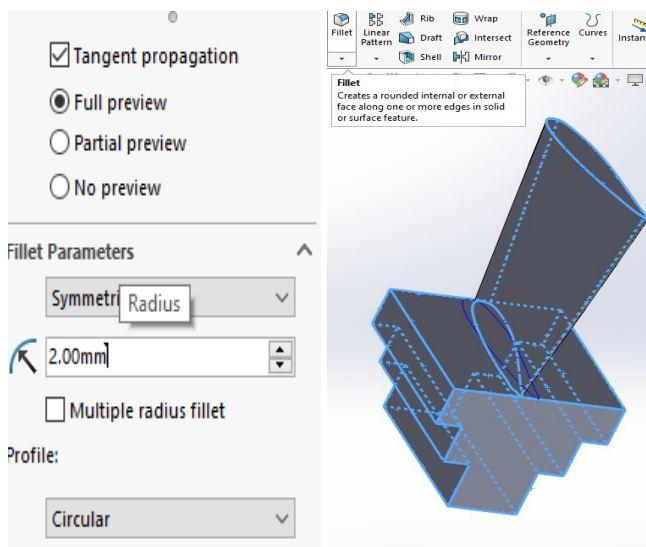


Figure.III.14 : paramètre de fillet

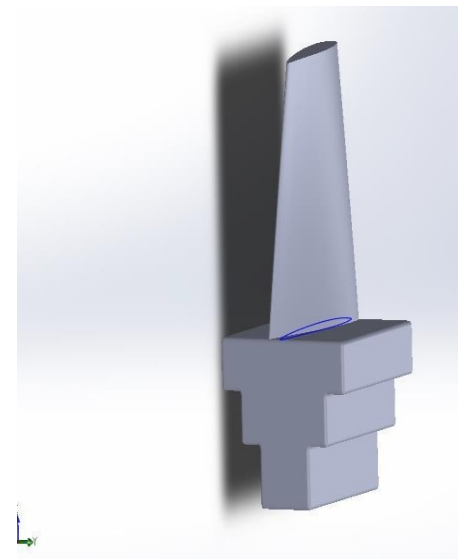


Figure III.16 : Aube fillet

- 10- Nous devons ajouter des trous de ventilation (refroidissement) en choisissant la surface appropriée et en utilisant l'opérateur **Extruded cut**.

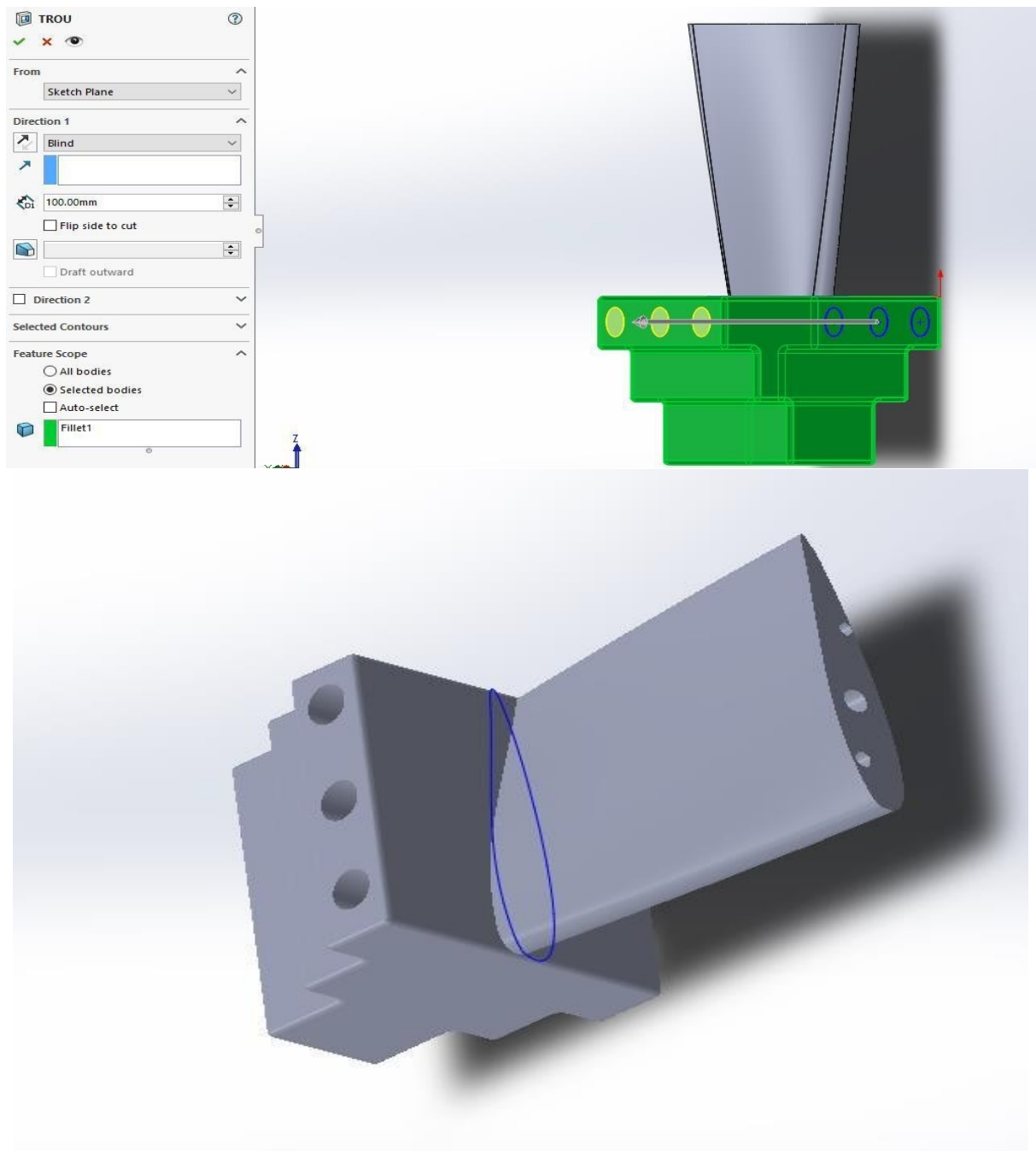


Figure III.15 : Ajouter les trous de refroidissement horizontal et verticale

III.2. Génération du programme en code iso CN:


III.2.1. Pièce brute :

La conception de la pièce brute est nécessaire pour obtenir la pièce finale, elle est donc conçue de manière à couvrir la pièce finale.

-Choisir :



Figure III.19 : Fenêtre de la pièce brute

Nous allons éditer un autre diagramme au même niveau, à l'aide d'un outil  sur Suivre la base de la pièce brute : puis la jeter selon les directives (Figure III.20) :

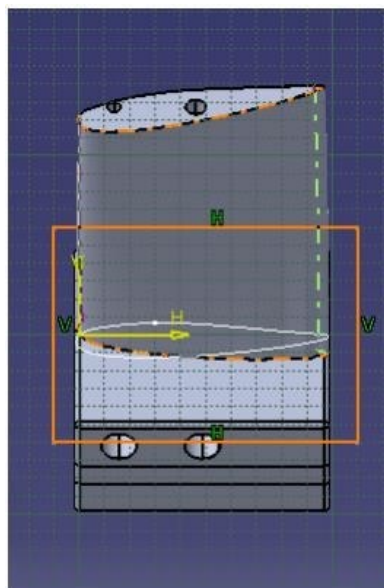


Figure III.17 : début de dessin du brut 1



Figure III.18 : Définition de la pièce brute .

Et après avoir entré les propriétés de la pièce brut, on obtient lui sous forme 3D comme la figure ci-dessus

On peut visualiser les deux pièces faites avec transparence (Figure III.16, III.17, III.18):

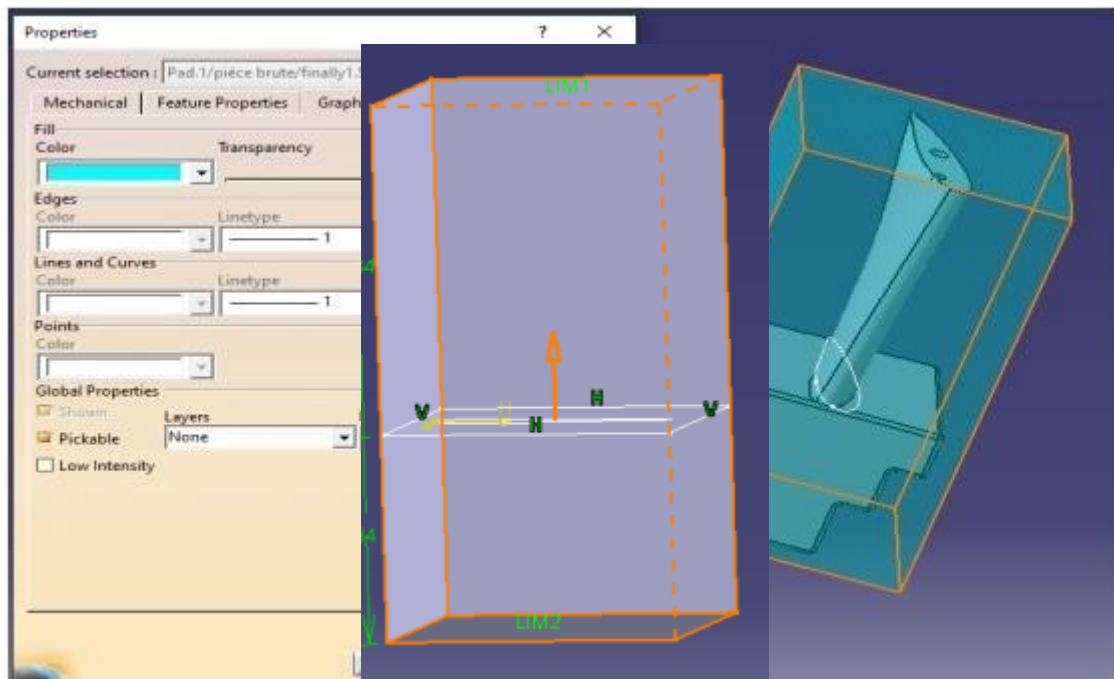


Figure III.19 : La partie brute qui recouvre la partie finale en 3D.


III.2.2. Pièce de fabrication :

a) Définir la phase d'usinage :

Choisissez dans la liste de fenêtre de -start- dans CATIA l'atelier dont nous avons besoin



Figure III.20 : Ouverture de l'atelier de machines.

- Activez la phase d'automatisation en double-cliquant sur  Part Operation.1 la fenêtre Phase de fabrication et configurez-la.
- Choisissez le type de machine « rectifieuse 5 axes », puis entrez les informations de la machine utilisée (Figure III.25) :
- Informations sur l'automatisation à trois surfaces : (Figure III.26)
 - 1) Cliquez sur le parent et placez l'origine du repère dans le coin de la pièce brute.
 - 2) Dans chaque processus, cliquez sur Z et choisissez une pièce verticale sur la pièce rugueuse qui lui convient.
 - 3) Cliquez sur X et choisissez une diapositive le long de la base pro.

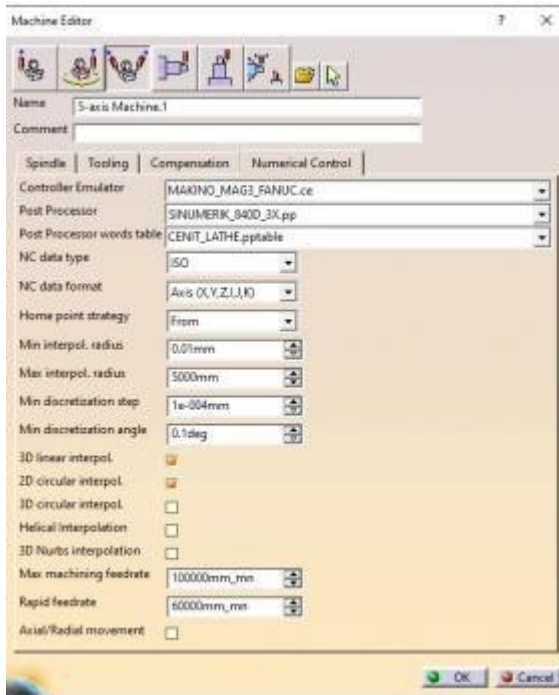


Figure III.21 paramètres de fraiseuse

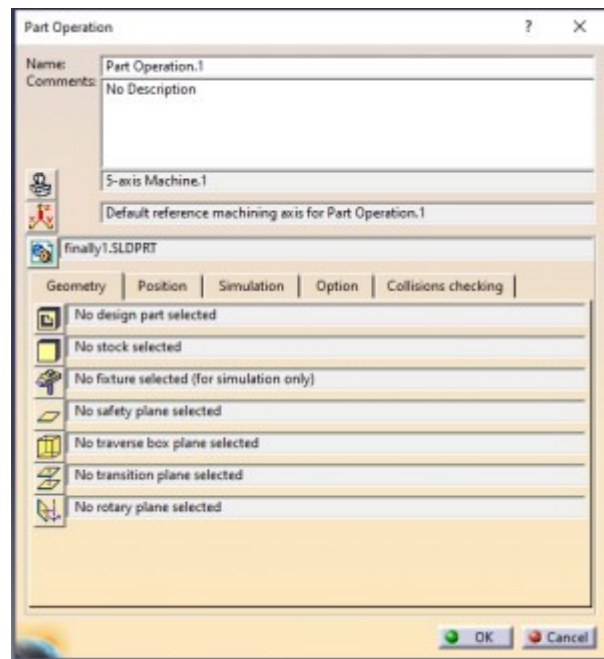


Figure III.22 : fenêtre phase d'usinage

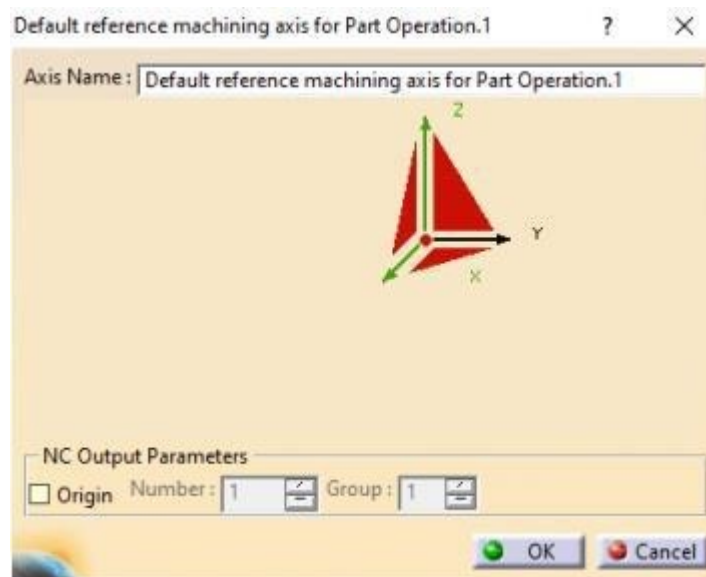




Figure III.23 : Trièdre d'usinage

Entrez les informations " Références Simulation »

1) Masquer la pièce dans l'arbre de construction (clic droit sur Masquer).

2) Cliquez sur  /finally1.SLDPRT/finally1.SLDPRT/Geometrical Set.1

3) Double-cliquez sur la dernière partie à l'écran.

4) Cliquez sur  /finally1.SLDPRT/finally1.SLDPRT/pièce brute

5) Faire apparaître l'œuvre.

6) Double-cliquez sur la partie brute à l'écran.

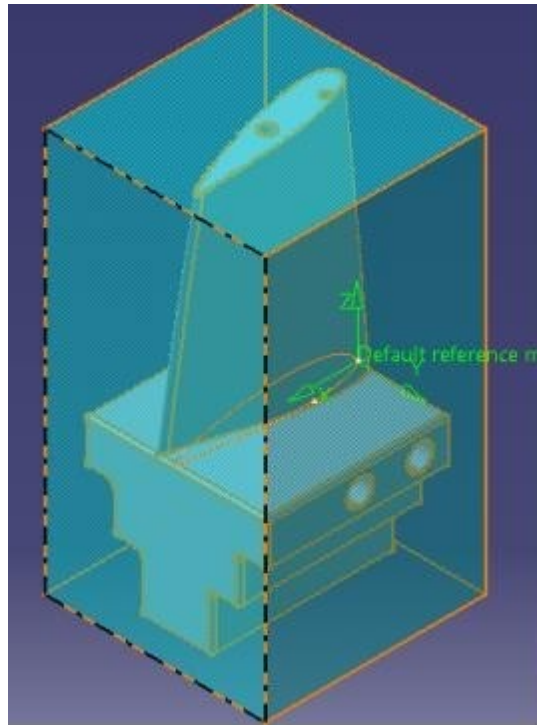



Figure III.24 : Point de changement d'outil

b) Définir les opérations d'usinage :

- Ebauche 1 :

Après avoir sélectionné l'opération d'usinage , vous devez sélectionner l'activité mère, comme indiqué dans la barre de cas, en bas à gauche de la fenêtre.

Sélectionner, dans l'arbre **Manufacturing program.1**  Manufacturing Program.1

Une nouvelle fenêtre s'ouvrira alors, vous permettant de sélectionner chaque opération d'usinage.

Paramètres nécessaires pour générer le programme de machines. Il y a 3 onglets principaux, dont chacun correspond à une famille de paramètres à déterminer :

- Identification de la stratégie d'automatisation.
- Définition de la géométrie à former.
- Identifier l'outil à utiliser.
- Modifier les paramètres de coupe.

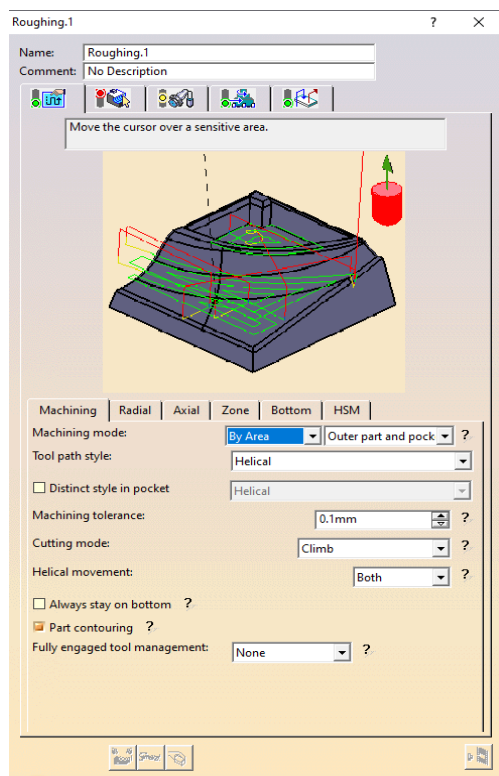


Figure III.25 : Identification de la stratégie d'automatisation.

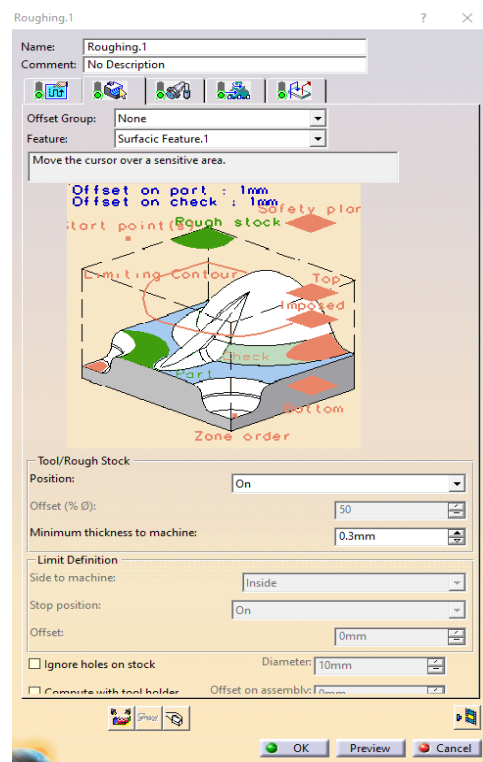


Figure III.26 Définition de la géométrie à former.

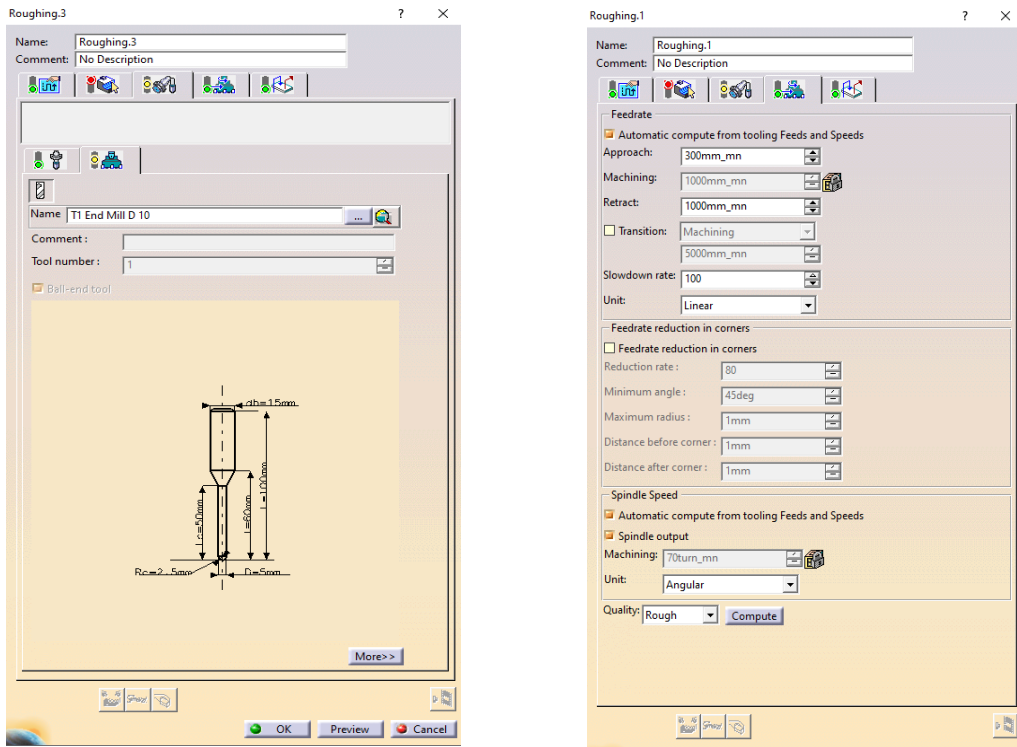


Figure III.28 Modifier les paramètres de coupe.

Après avoir défini la pièce, les paramètres d'automatisation et l'outil, il est possible de

commencer à calculer les trajectoires ainsi que des animations, en cliquant sur le code

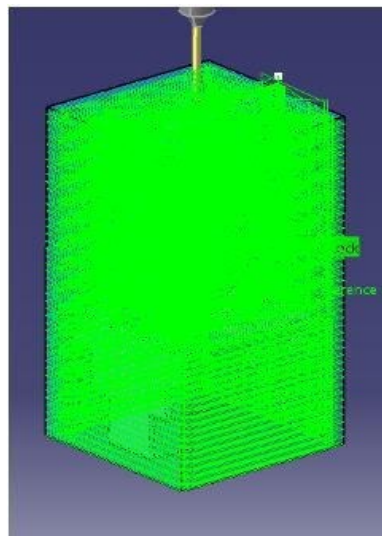


Figure III.29 : Trajet d'outil 1. 1

D'autre part, on peut visualiser la simulation de la progression

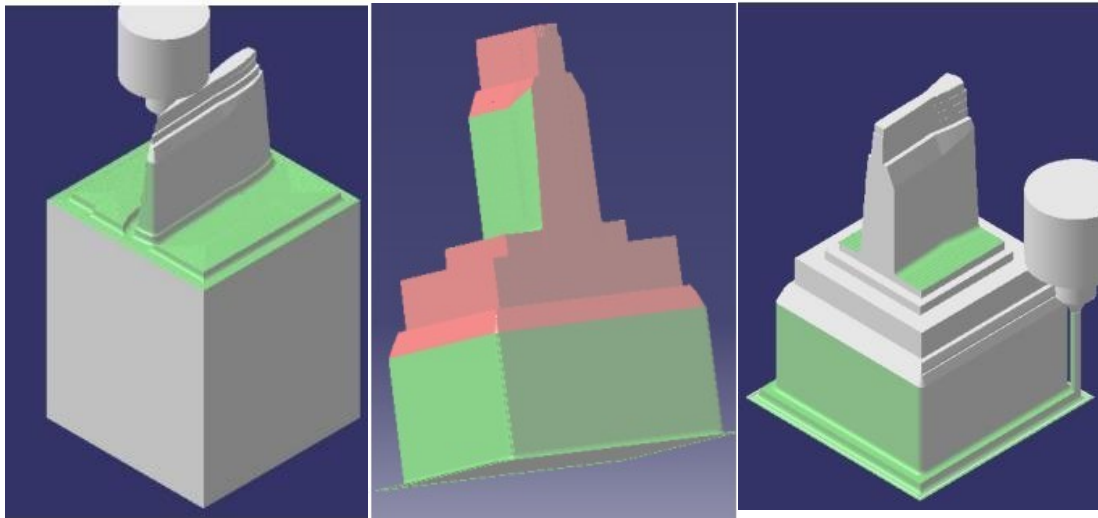


Figure III.30 : Simulation de l'usinage du projet 1.

- **Contournage niveau Z :**



Pour la deuxième opération, le chemin de définition du paramètre ressemble au chemin de l'étape précédente :

- Sélectionner la stratégie d'automatisation 2.
- Sélectionnez la géométrie à former et le niveau inférieur de l'aube.
- Sélectionnez l'outil à utiliser.
- Définition de la stratégie de partie macros.

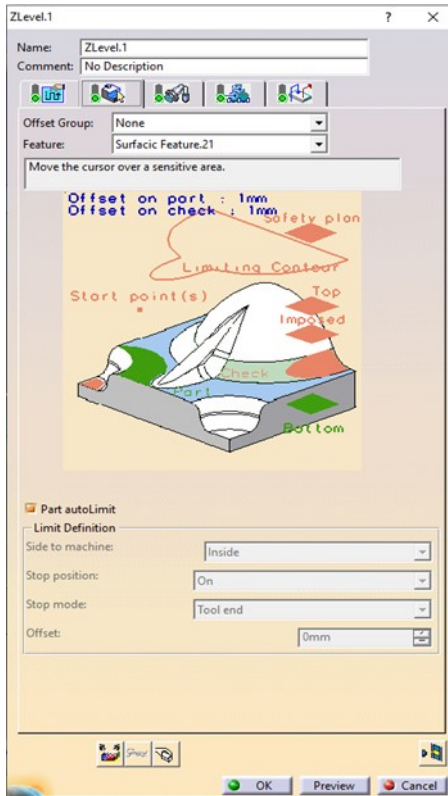


Figure III.32 : stratégies d'automatisation 2. géométries à former et le niveau inférieur de l'aube.

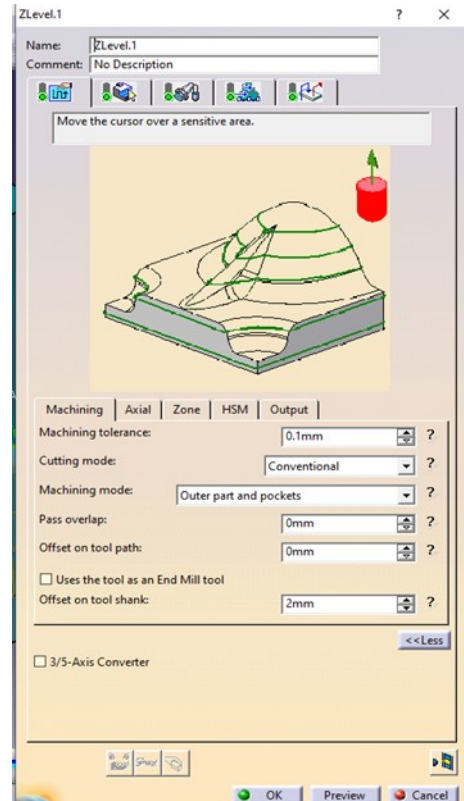


Figure III.32 : stratégies d'automatisation 2.

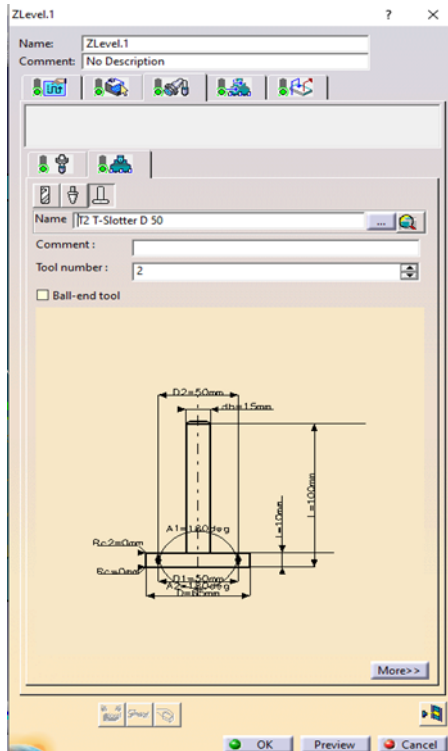


Figure III.33 : Sélectionnez l'outil à utiliser

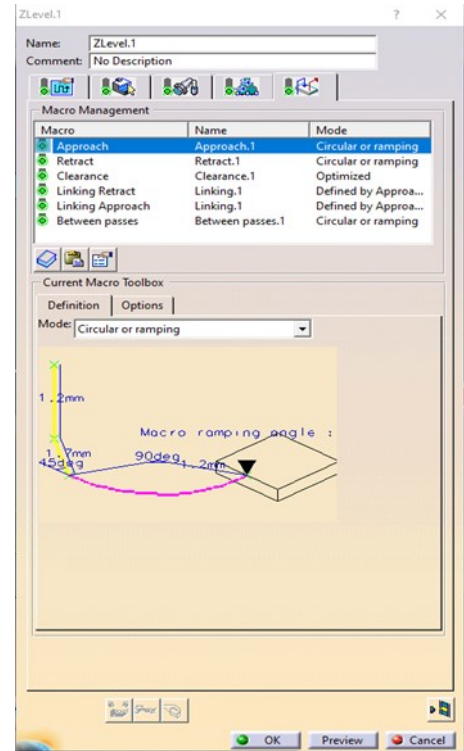


Figure III.34 : Définition de la stratégie de partie macros.

Toutes ces étapes montrent la pièce et l'outil utilisés. (Figure III.34) :

On peut ensuite simuler ce processus en appliquant : simulation automatisée du modèle Total (Figure III.35):

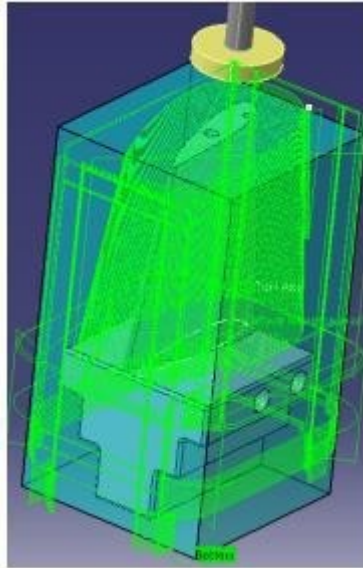



Figure III.35 : Trajectoire d'outil 2.

On peut visualiser la simulation de la progression 

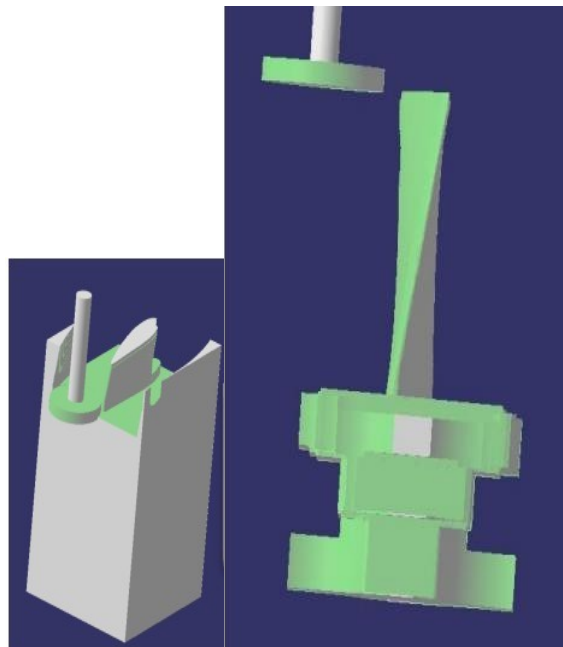


Figure III.36 : Simulation de contournage.

III.2.3 GENERATION DU PROGRAMME EN CODE ISO CN :

Le fichier est créé en cliquant avec le bouton droit de la souris dans l'arborescence du programme de fabrication (Figure III.31), puis une fenêtre s'ouvre, afin de sélectionner les paramètres d'entrée et de sortie. Cette fenêtre contient 4 onglets, et la plupart des paramètres mentionnés (Figure III.15 b) sont suffisants pour retirer le fichier ISO, seulement pour commencer en bas à gauche, pour obtenir le programme qui contient une extension NCCODE. Ce dernier peut être ouvert par n'importe quel éditeur de texte pour apporter des modifications.

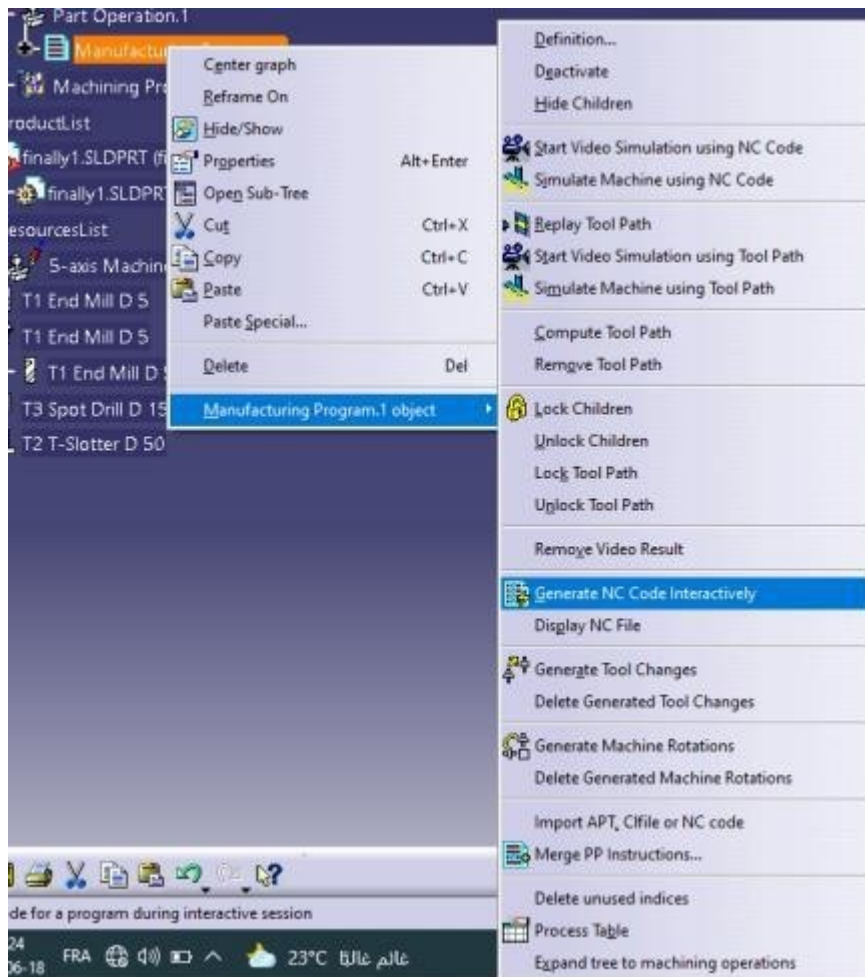


Figure III.37 : Créer un code CN.

Une partie du programme généré :

```
cPost Standard PP for SINUMERIK 840 D=====;N10
G0 G90 G40
```

N20 ;===== TOOL CHANGE=====;

N30 ; DESC :

N40=====; N50 T1

M06

N60 D1

N70 G0 G90 G40 G17 N80 F0 S0

N90 G64 SOFT N100 S70 M3

N110 G1 X45.29 Y-2.52 Z144.1 F300 G94 N120 Z134.1

N130 X45.131 Y-2.955 Z133.976 N140 X45.476 Y-3.683 Z133.76 N150 X45.915 Y-3.761

Z133.64 N160 X46.354 Y-3.839 Z133.521 N170 X46.893 Y-3.38 Z133.331 N180 X46.973 Y-

2.738 Z133.158 N190 X46.568 Y-2.167 Z132.97 N200 X45.829 Y-2.042 Z132.77 N210

X45.357 Y-2.34 Z132.62 N220 X45.131 Y-2.955 Z132.444 N230 X45.476 Y-3.683 Z132.228

N240 X45.915 Y-3.761 Z132.109 N250 X46.354 Y-3.839 Z131.989 N260 X46.893 Y-3.38

Z131.8 N270 X46.973 Y-2.738 Z131.626 N280 X46.568 Y-2.167 Z131.439 N290 X45.829 Y-

2.042 Z131.238 N300 X45.357 Y-2.34 Z131.088 N310 X45.131 Y-2.955 Z130.912 N320

X45.476 Y-3.683 Z130.697 N330 X45.915 Y-3.761 Z130.577 N340 X46.354 Y-3.839

Z130.458 N350 X46.893 Y-3.38 Z130.268 N360 X46.973 Y-2.738 Z130.095 N370 X46.568 Y-

2.167 Z129.907

N380 X45.829 Y-2.042 Z129.706 N390 X45.357 Y-2.34 Z129.557 N400 X45.131 Y-2.955

Z129.381 N410 X45.476 Y-3.683 Z129.165 N420 X45.915 Y-3.761 Z129.045 N430 X46.354

Y-3.839 F1000 N440 X46.893 Y-3.38

N450 X46.973 Y-2.738 N460 X46.568 Y-2.167 N470 X45.829 Y-2.042 N480 X45.357 Y-2.34

N490 X45.131 Y-2.955 N500 X45.476 Y-3.683 N510 X45.915 Y-3.761

N520 X46.042 Y-3.775 Z129.08 N530 X46.17 Y-3.773 Z129.114 N540 Z139.114 F2000

N550 ;===== TOOL CHANGE=====; N560 ; DESC :

N570=====; N580 T2 M06

N590 D2

N600 G0 G90 G40 G17 N610 G94 F2000 S70 M3 N620 G64 SOFT

N630 G0 X-16.841 Y24.503 Z134 N640 G0 Z132.201

III.3. Analyse de l'aube :

III.3.1. Présentation ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM, utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

ANSYS peut être utilisé dans les domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

III.3.2. Analyse modèle de l'aube :

Une analyse modale détermine les caractéristiques de vibration (fréquences naturelles et formes de mode) d'une structure ou d'un composant de machine. Il peut également être utilisé comme point de lancement pour une autre analyse plus détaillée et dynamique, telles que l'analyse dynamique transitoire, une analyse harmonique ou une analyse de spectre. Les fréquences naturelles, les formes de modes et les forces centrifuges sont des paramètres importants dans la conception d'une structure pour les conditions de chargement dynamiques. On peut également effectuer une analyse modale sur une structure pré-stressée, telle qu'une aube de turbine.

Après avoir importé l'aube enregistré dans un format compatible avec logiciel ANSYS (Figure III.38).

Et après avoir défini les propriétés de matériaux que nous utiliserons dans l'analyse. Letableau ci-dessous montre les caractéristiques mécaniques :

Module de cisaillement	77.2 K.N/mm ²
Module de Young	204.9 K.N/mm ²
Contrainte à la limite d'élasticité	[800 - 1450] N/mm ²
Contrainte à la rupture	1200 MPa
Coefficient de poisson	0.3
La densité	8.12
La dureté brinell	330
température defusion	1400 °C

Tableau III.2 : Propriétés de INCONEL 718

Nous appliquerons l'opérateur de maillage qui permet de deviser l'aube en petites éléments . Le maillage a l'avantage d'être hautement automatisés et d'avoir un degré de contrôle modéré à élever. Cet outil est le processus dans lequel la géométrie de l'aube est discrétisée spatialement en éléments et noeuds. Ce maillage ainsi que les propriétés du matériau sont utilisés pour représenter la rigidité et la répartition des champs de contraintes, de déformations et de déplacements. (Figure III.38).

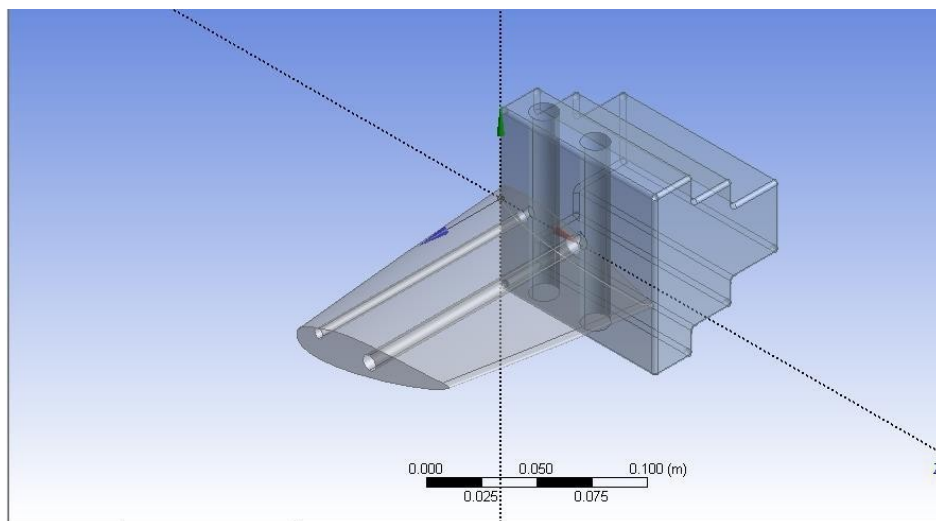


Figure III.38 : Aube conçue avec CATIA puis importé dans Design Modeler de ANSYS

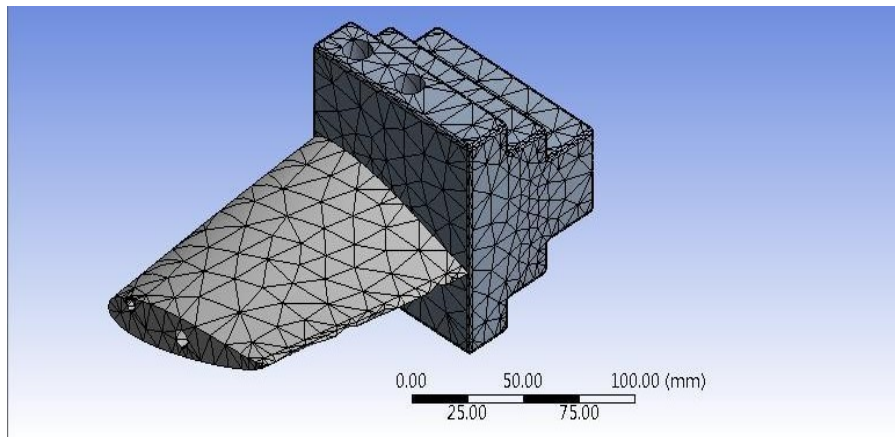


Figure III.39 : Aube maillée

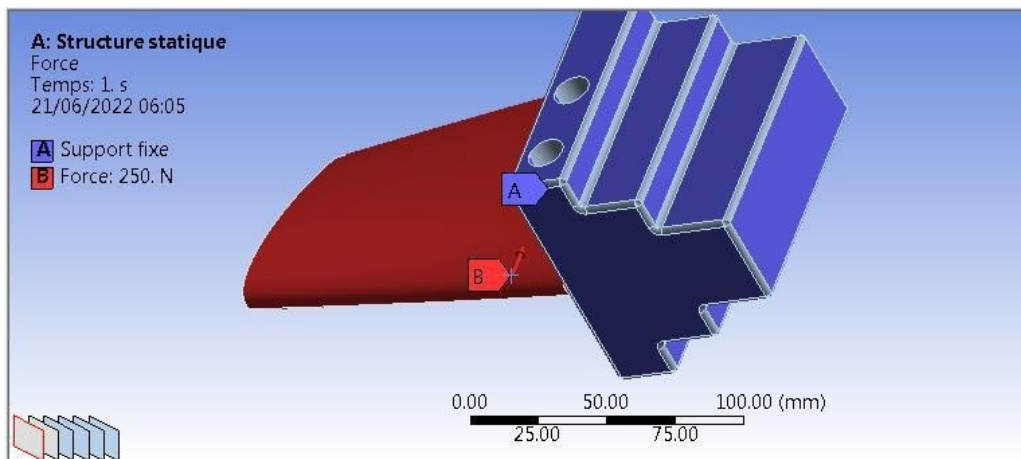


Figure III.40 : Chargement de l'aube 1

Donc on va appliquer des forces horizontales de 250N sur l'aube

L'aube est simulée à une poutre et encastrée du côté de son pied alors qu'une force de 250 N est appliquée face au bord d'attaque.

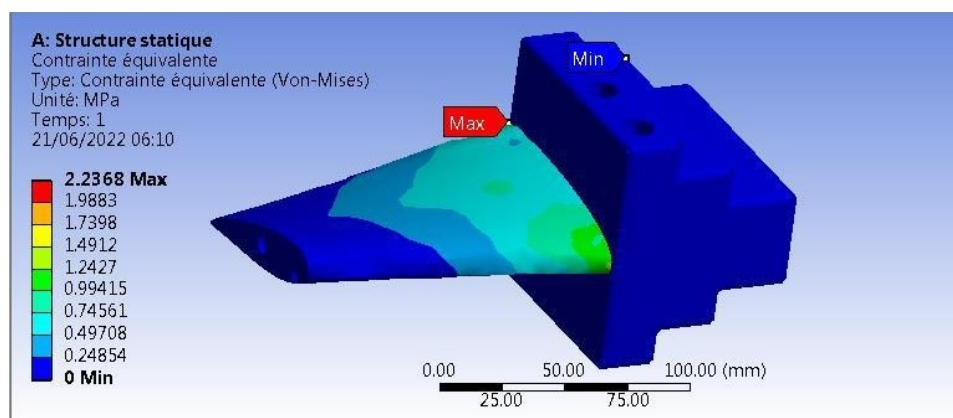


Figure III.41 : Distribution des contraintes

Les contraintes se concentrent bien au voisinage de l'encastrement. Il est évident que l'extrémité libre de l'aube soit la zone la moins contrainte. La valeur de contrainte équivalente maximale est de 2.2368 MPa. Cette valeur est beaucoup moins que la valeur de la contrainte admissible du matériau qui est inconel718.

Enfin, on peut dire que l'aube n'est pas exposée à aucun risque de rupture vis-à-vis des sollicitations appliquées.

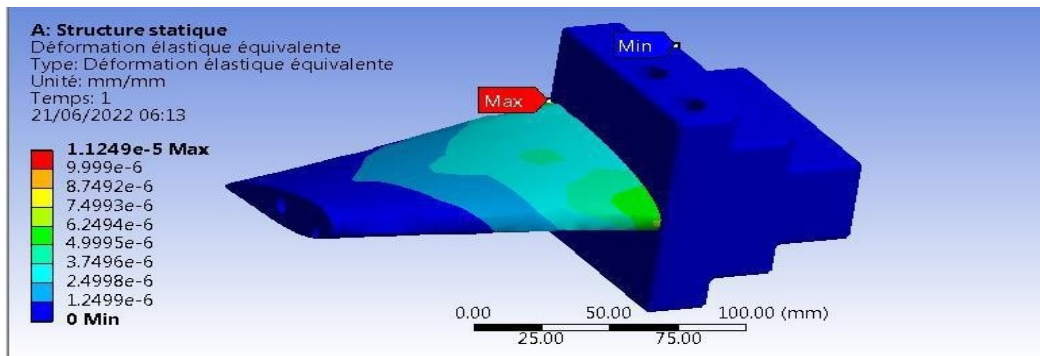


Figure III.42 : Distribution des déformations

Les déformations suivent les contraintes quant à leurs concentrations. Cette dépendance entre les déformations et les contraintes est justifiée par la loi de Hook généralisée. Les déformations se concentrent bien au voisinage de l'encastrement. Il est évident que l'extrémité libre de l'aube soit la zone la moins déformée. La valeur de déformation totale maximale est de 0.112 mm.

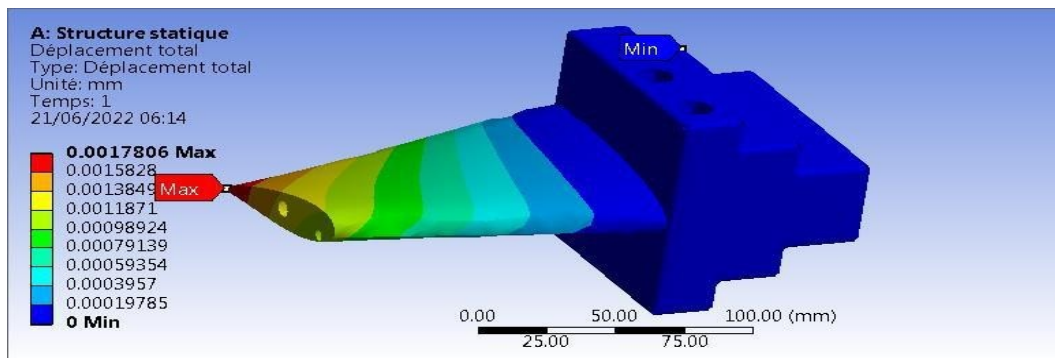


Figure III.43 : Distribution des déplacements

Il est évident que l'extrémité libre de l'aube se déplace le plus. La valeur de déplacement qu'un 0.001 mm, cette valeur ne représente aucun risque pendant le fonctionnement de l'aube

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié comment, à partir d'un poste de CFAO, on obtient un programme d'usinage de l'aube de turbine sur une machine de production à commande numérique (fraiseuse 5 axes). L'élaboration du programme d'usinage prend en compte la géométrie spécifique de la pièce finie et leur brut, le processus de coupe, les paramètres de la machine et les outils de fraisage utilisés.

Vu la complexité des surfaces de l'aube, le nombre de blocs du programme CN obtenua atteint les 50748 lignes. Ceci peut faire un document de 1270 pages de 40 lignes par page.

Nous avons appris à analyser la pièce en utilisant L'ANSYS et la placer dans un milieu qui simule le support réel (forces centrifuge, extérieur...etc.), et nous avons pu remarquer les changements qui se produisent sur la pièce.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

L'aube est la pièce maîtresse dans la turbine à gaz, Elle doit supporter toutes les sollicitations statiques, dynamiques, vibratoires, thermiques et de fatigue . Donc la l'étude, la conception, la simulation et la fabrication de l'aube d'une turbine à gaz est une tâche qui demande plusieurs compétences

Le choix du matériau et le dimensionnement de l'aube sont les clés principales qui permettent d'arriver à répondre à toutes les défis exposés plus haut.

De son côté, le matériau utilisé a vécu plusieurs évolutions partant de l'acier qui souffrirait d'énormes problèmes jusqu'au superalliages à base de nickel monocristallin et récemment les céramiques .

Le dimensionnement de son côté englobe le type de profil, la précision des côtes et l'état de surface, tous ceux-ci permettent un écoulement de l'air chaude proche de l'idéale.

Comme la fabrication des aubes nécessitent plusieurs étapes, donc un processus long et coûteux, il est impératif de recourir aux moyens qui permettent d'accélérer ces étapes en profitant des moyens de conception, simulation concernant le calcul thermomécanique, d'écoulement, de vibration, de fatigue et encore la simulation de fabrication en profitant des moyens de la VNC (Virtual Numerical Control) et la CAM (Computer Aided Manufacturing)

Dans ce travail, on a commencé par une recherche bibliographique sur les turbines à gaz et les aubes . Dans le deuxième chapitre, on fait un état de l'art sur les matériaux utilisés pour les aubes et les moyens de les fabriquer .

Dans le troisième chapitre, on a mis en œuvre un exemple d'aube sollicitée par les forces des gaz brûlés. on choisit le profil ensuite on trace ce profil et génère l'aube grâce au logiciel de CAO (SolidWorks), Ensuite, on a passé au code de calcul par éléments finis ANSYS pour analyser les champs de contraintes, de déformations et de déplacements et s'assurer que l'aube puisse résister aux sollicitations appliquées. puis on a travaillé avec le logiciel CATIA pour faire la simulation du fraisage à commande numérique et générer le code ISO compréhensible par la fraiseuse à commande numérique . Ce code a atteint plusieurs dizaines de milliers de lignes, donc il n'est pas possible de rédiger ce code manuellement vu que l'aube présente une surface curviligne complexe . Cette étude montre que la réalisation d'une aube qui peut résister dans un champ thermo mécanique n'est pas une tâche aisée . Elle nécessite la maîtrise des sciences des nouveaux

CONCLUSION générale

matériaux, c'est dire les matériaux hautement résistant à la température élevée, et encore des compétences en analyse par éléments finis, et comme les aubes sont des solides curvilignes, leurs analyses nécessitent la maîtrise des codes de calcul par éléments finis.

Pour la fabrication, il n'est pas possible d'écrire le programme ISO compréhensible par la fraiseuse à commande numérique ou un centre d'usinage à grande vitesse, car, plus de la complexité des formes de l'intrados et de l'extrados et la section qui est variable et le vrillage de l'aube rendent la présence d'un logiciel spécialisé en CAD/CAM plus qu'obligatoire.

Enfin, Ce travail mérite d'être complété par d'autres études telles que l'analyse thermomécanique et l'analyse vibratoire et de fatigue. Donc ce sujet reste ouvert aux futurs étudiants.

Les références bibliographiques

Les références bibliographiques :

- [01] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/turbines-a-gaz/3-compresseur/>
- [02] Manuel d'exploitation de turbine à gaz type (Taurus 60) par « solar turbine » (sonatrach SP3 lotaya W. Biskra).
- [03] <http://mobile.lavionnaire.fr/MobTurbElemCompres.php>
- [04] Étude d'une turbine à gaz de puissance 120KW, (Kettani Sid Ahmed, Sebih Mohamed), 1996
- [05] L'avionnaire cour sur les turbomachines, et les éléments composant d'une turbine à gaz ; <http://www.lavionnaire.fr/MotorTurboMot.php>
- [06] GE oil & gas - Nuovo Pignone. Manuel de formation pour la conduite et l'entretien d'une turbine à gaz MS 5002 C
- [07] Total. Exploration et Production Les Équipements Les Turbines. 2007
- [08] Meherwan P. Boyce, Gas Turbine Engineering Handbook (fourth edition), Elsevier, 2012.
- [09] <https://www.thermal-engineering.org>
- [10] Pier Marzocca, « The NACA airfoil series » Clarkson Université (consulté le 07-03-2009).
- [11] E.N. Jacobs, K.E. Ward, & R.M. Pinkerton. NACA Report No. 460, "The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel".
- [12] N.P. Padture, M. Gell, E.H. Jordan, Thermal Barrier Coatings for Gas- Turbine Engine Applications, Science, 296 (2002) 280-284
- [13] Aircraft Engineering and Aerospace Technology Emerald Article: Ceramic engine considerations for future aerospace Propulsion Amir S. Gohardani, Omid Gohardani (2012), "Ceramic engine considerations for future aerospace propulsion", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 84 Iss: 2 pp. 75 – 86.
- [14] fiche technique les superalliages www.secotools.com/fr.
- [15] Yahya, SM (2011). *Turbines Compresseurs et Ventilateurs*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- [16] S. Ashforth-frost et K. Jambunathan, _E_ect of nozzle geometry and semiconnement on the potential core of a turbulent axisymmetric jet, dans 10th Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, vol. 23, no. 2, Brighton, 1996, p. 155_162.
- [17] Volume 1. Phase d'essais en vol de performance. Chapitre 7. Aéropropulsion page 7.122. *Edwards Air Force Base, Air Force Test Center*
- [18] C.G. Levi, Emerging Materials and Processes for Thermal Barrier Systems, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8 (2004) 77-91.
- [19] D.R. Clarke, C.G. Levi, Materials Design for the Next Generation Thermal Barrier Coatings, Annual Reviews of Materials Research, 33 (2003) 383-417.
- [20] MSM portail de l'industrie suisse Technique d'usinage - Fraisage – Commandement numérique CNC www.msm.ch/automatisation/articles/376247/
- [21] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [22] Taurus 60 Turbine Generator Set General Description, each Unit Support equipment and tools, one set per site BASIC PACKAGE
- [23] La fonderie cire perdue Zone artisanale 35320 PANCE France. Lien vers le site de NOWAK.

- [24] Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : Application aux aubes de turbines ; Présentée par Daniel THIBAUT École doctorale: Sciences pour l'Ingénieur et Aéronautique.
- [25] S. Hagen, P. Hofmann, G. Schanz, L. Sepold, "Interactions in Zry/UO₂ Fuel Rod Bundles with Inconel Spacers at Temperatures above 1200°C; (Post-test Results of Severe Fuel Damage Experiments CORA-2 and CORA-3)", KfK 4378 (1990).
- [26] Laurent Gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes, 2008.
- [27] Kuntz, « Ceramic Matrix Composites », *Bericht der DKG*, Deutsche Keramische Gesellschaft, vol. 49, no 1, 1992, p. 18 universitaires, Romandes, 2004.
- [28] Michel Dupeux, « Aide mémoire science des matériaux », Dunod, Paris, 2004.
- [29] Rikard B. Heslehurst, « Design of composite structures », PhD (UNSW), MEng(Aero), BEng(Aero) CPEng, FIEAust, FRAeS SMAIAA, SAMPE, SAE, ACSS
- [30] Pierre Etienne Buban, Leif Carlsson, Jean Pierre Mercier, Jean Anders E. Manson, Matrice « Composite à matrice organique, propriétés », Presses polytechniques