



N° Ordre...../Faculté/UMBB/2022
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQ
UEUNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
Département transport et équipement des hydrocarbures

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

ZIANE AMAR ABD ERRAZEK

ATTAFI HAITHEM

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : mécanique des unités pétrochimique

Thème

**Influence du refroidissement des aubes d'une turbine à gaz
sur ses performances mécanique**

Mr. Mohammedi	kamal	PR	Président
Mr. Bettayeb	mourad	M.A	Examineur
Mme. Meftah	siham	M.A	Examineur
Mr. Sahnoune	khaled	M.A	Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

- REMERCIEMENTS -

En premier lieu, nous remercions **ALLAH** de tout Puissant de nous avoir donné le courage et la force pour accomplir ce travail.

Nous remercions notre promoteur **Mr SAHNOUN khaled** maitre de conférences à l'UMBB à boumerdes Pour Sa contribution au travail que nous avons réalisé.

Nous remercions **Mr ZAHAF bilal** maitre-assistant à l'UMBB pour leurs aides, ainsi que l'ensemble de nos enseignants du département du transport et équipements des hydrocarbures.

Nous avons l'honneur d'envoyer mes remerciements à l'encadreur de stage **Mme BEN AICHA Nadjat** ingénieur procèce pour sa gentillesse et ces efforts pour réaliser notre travail et tous les ingénieurs qui ont nous aidé pendant tout la période de stage.

Nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui nousont aidés de près ou de loin, par leurs encouragements, leurs conseils et leurs critiques.

Enfin, notre meilleurs remerciements distingués aux membres de jury qui vont examiner ce mémoire.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
"وَمَا بِكُمْ مِنْ نِعْمَةٍ فَمِنَ اللَّهِ"

(ZIANE AMAR ABD ERRAZEK)

Je dédie ce travail à ma très chère mère et mon père.

*A mes frères surtout mon petit frère hassan (school bag) et
mes sœurs.*

A toute la classe de MAUP17.

Ainsi qu'à tous mes amis et proches.

(ATTAFI HAITHEM)

Je dédie ce travail à ma très chère mère et surtout mon père.

A mes frères et mes sœurs.

Ainsi qu'à tous mes amis et proches.

A toute la classe de MAUP17.

Résumé

L'augmentation de la température à la sortie de la chambre de combustion d'une turbine à gaz est une condition nécessaire pour améliorer les performances mais cette dernière influe négativement sur l'intégrité de la structure des aubes de la turbine haut pression, qui lui faut un refroidissement continu et permanent.

Cette problématique, nous incite à la recherche des méthodes de refroidissement qui permette de garder un bon état des éléments de turbine, tout en assurant un bon fonctionnement de ce dernier.

Et pour comprendre mieux ce problème on a fait une étude numérique pour une aube refroidie par la technique de refroidissement interne par convection forcée en utilisant du logiciel ANSYS R2. A cet effet, on a étudié l'influence de refroidissement sur les performances mécaniques de l'aube (les contraintes et les déplacements).

On a trouvé que : pour que l'aube conserve leurs performances mécaniques, il faut choisir un bon refroidissement par l'accroissement de la vitesse de l'air froid à l'entrée et la diminution de la température à l'entrée de ce dernier ; cet effet diminue les contraintes et les déplacements, c'est pourquoi l'aube stabilise leur température de fonctionnement ce qui donne un rendement désirable.

Mots clés: turbine à gaz, aube, ANSYS, performances mécaniques.

Abstract

The increase of the temperature at the exit of the combustion chamber of a gas turbine is a necessary condition to improve the performances but this last one influences negatively on the integrity of the structure of the blades of the high pressure turbine, which needs a continuous and permanent cooling.

This problem, incites us to the research of the methods of cooling which allows to keep a good state of the elements of turbine, while assuring a good functioning of this last.

And to better understand this problem we have made a numerical study for a blade cooled by the technique of internal cooling by forced convection using the software ANSYS R2. For this purpose, we studied the influence of cooling on the mechanical performance of the blade (stresses and displacements).

It was found that: in order for the blade to keep their mechanical performance, it is necessary to choose a good cooling by increasing the speed of the cold air at the inlet and decreasing the temperature at the inlet of the latter; this effect decreases the stresses and displacements, therefore the blade stabilizes their operating temperature which gives a desirable performance.

Keywords: gas turbine, blade, Ansys, mechanical performance.

ملخص

تعد زيادة درجة الحرارة عند مخرج غرفة الاحتراق في توربينات الغاز شرطا ضروريا لتحسين الأداء، لكن هذا الأخير يؤثر سلبا على سالمة بنية شفرات التوربينات عالية الضغط، والتي تحتاج إلى تبريد مستمر ودائم.

هذه المشكلة، تحدثنا على البحث في طرق التبريد التي تسمح بالحفاظ على عناصر التوربينات في حالة جيدة، مع ضمان الأداء الجيد لهذا الأخير.

ولفهم هذه المشكلة بشكل أفضل، أجرينا دراسة عددية لشفرة مبردة بتقنية التبريد الداخلي عن طريق الحمل الحراري القسري، باستخدام برنامج ANSYS. لهذا الغرض، درسنا تأثير التبريد على الأداء الميكانيكي للشفرة (الإجهاد والإزاحة).

وجد أن: من أجل أن تحافظ الشفرة على أدائها الميكانيكي، من الضروري اختيار تبريد جيد عن طريق زيادة سرعة الهواء البارد عند المدخل وتقليل درجة الحرارة. هذا يقلل من الضغوط المطبقة على الشفرة ويحسن أدائها الميكانيكي.

الكلمات المفتاحية: توربينات

غازية، شفرة، ANSYS، ضغوط

ميكانيكية.

GLOSSAIRE

h : coefficient d'échange thermique par convection

c_p : chaleur massique à pression constante

r_p : rapport de pression

m : masse

k : conductivité thermique

Nu : nombre de nusselt

P : pression

V : volume

Pr : nombre de prandtl

Re : nombre de reynolds

Q : flux de chaleur

T : température

S : surface

W : travail

u, v : composantes de vitesse

δ_{ij} : symbole de kronecker

ε : efficacité de refroidissement

η : rendement

γ : Coefficient adiabatique

ρ : masse volumique

ν : viscosité cinématique

μ : viscosité dynamique

τ_{ij} : tenseur des contraintes de visqueuses

σ_{ij} : tenseur des contraintes

f_i : la force de volume par unité de masse

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: GÉNÉRALITÉS SUR LES TURBINES ÀGAZ	
I. 1 Introduction	3
I. 2 Développement historique de la turbine à gaz.....	3
I. 3. Définition.....	4
I. 4.Composition de turbine.....	4
I. 5 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz.....	7
I.6 Cycle théorique d'une turbine à gaz	8
I.7 Système d'air	8
I. 8 Les domaines d'application des turbines à gaz.....	9
I. 9 Classification des turbines à gaz.....	10
I. 10 Aube de turbine.....	12
I.11 Avantages des Turbines à gaz.....	14
I.12 Inconvénients des turbines à gaz	15
I.13 Conclusion	15
CHAPITE II : Techniques de refroidissement des aubes de turbine à gaz	
II.1 Introduction.....	16
II.2 Transfert de chaleur sur les aubes des turbines à gaz.....	17
II.3 Paramètres influençant la conception d'aubes refroidies par air	18
II.4 Techniques de refroidissement	19
II.5 Couplages des méthodes de refroidissement.....	22
II.6 Conclusion.....	22
CHAPITRE III : SIMULATION NUMIRIQUE THERMIQUE	
III.1. Introduction.....	23
III .2 Méthode numériques de simulation	23
III.3 Modélisation mathématique	24
III.4 Simulation.....	27
III.5 Présentation du cas étudié	29
III.6 Présentation de la géométrie	29
III.7 Génération du maillage	30
III.8 Conditions aux limites	31
III.9 Convergences des résultats	33
III.10 Résultat et interprétation	34
III.11 Conclusion	51

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE MECANIQUE

IV.1 Introduction	52
IV.2 Modélisation mathématique.....	52
IV.3 Influence de refroidissement sur les performances mécaniques de l'aube (à faible refroidissement et à refroidissement élevé)	53
IV.4 Conclusion	62
Conclusion générale.....	63
Référence	64

Introduction générale

Il est connu que la puissance de la turbine dépend de la température des gaz à l'entrée de celle-ci. Ainsi pour augmenter la puissance, les lois thermodynamiques ont conduit à rechercher une température entrée turbine la plus élevée possible. Le niveau de température est cependant limité par la résistance mécanique de la matière qui compose les aubes de la turbine qui conduits au phénomène de déformations excessive de la géométrie de la turbine et influence négativement sur ses performances et sa durée de vie. Un volume important de travaux de recherches est donc à réaliser dans le but de repousser cette barrière technologique. Les matériaux développés doivent supporter à la fois :

- Les températures élevées.
- Les contraintes (mécaniques, thermiques, chimiques)

Les parties turbine à gaz qui ont reçu un intérêt particulier de refroidissement sont les aubes de turbines. Celles-ci peuvent être refroidies par différentes méthodes, chacune d'elles utilise un fluide de refroidissement qui passe à travers l'aube afin que celle-ci garde sa résistance.

Les critères d'un bon refroidissement découlent des principes de transfert de chaleur dans une conduite fermée. Par conséquent pour obtenir un bon échange de chaleur dans de tels systèmes il est nécessaire de satisfaire les deux exigences suivantes :

- Un écoulement du fluide de refroidissement bien étudié.
- Une grande surface de transfert.

Le présent travail intéressé à l'étude numérique de refroidissement (par convection forcé) des aubes d'une turbine à gaz haut pression.

Notre étude est composée de quatre chapitres dont le déroulement est :

Le premier chapitre expose une vue générale sur les turbomachines en particulier les turbines à gaz, principe de fonctionnement, composant, types,...etc.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la description des techniques de refroidissement des aubes des turbines à gaz, refroidissement par (convection interne forcée, impact de jet de fluide, eau, air et par film) ; ainsi que la théorie de calcul des flux de chaleur dans les aubes et étude bibliographique sur le refroidissement des aubes des turbines à gaz.

Le troisième chapitre sert à présenter la modélisation mathématique de logiciel ANSYS avec les étapes de simulation et comment obtenir un bon refroidissement par modification des

Introduction générale

paramètres d'entrée de l'air froid.

Le quatrième chapitre pose précisément la problématique étudiée, il représente les étapes de simulation par logiciel ANSYS CFX, ainsi que les résultats numériques obtenus qui sont interprétés et discutés.

Enfin, nous achevons notre travail par une conclusion générale

I. 1 Introduction

Les turbomachines sont des machines composées d'une ou plusieurs séries d'aubages alternativement sur le stator et le rotor. Les turbomachines thermiques permettent la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un fluide de travail. La transformation de l'énergie entre l'arbre tournant et continu et se produit par l'intermédiaire d'aubes en rotation.

Elles sont utilisées aujourd'hui dans un très large domaine de la technique moderne (production de l'électricité, propulsion des véhicules et dans divers procédés technique et chimique) leur taille peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Le constructeur des turbomachines doit faire face à un très large éventail de domaines techniques qui comprend:

- La mécanique des fluides
- La thermique et la combustion
- La mécanique des vibrations
- La science des matériaux
- Les procédés de fabrication
- Les techniques des mesures
- L'acoustique
- Le réglage

Les problèmes se multiplient encore par le fait que les turbomachines doivent travailler dans des conditions différentes en dehors de leur point de fonctionnement nominal et supporter des changements brutaux de conditions de fonctionnement. L'art de l'ingénieur consiste à trouver la solution optimale pour des exigences souvent contradictoires entre les paramètres aérodynamiques et structurels.

L'ingénieur doit concevoir et dimensionner les éléments de la machine dans le but d'obtenir la meilleure performance avec des solutions de fabrication simples et économiques tout en garantissant la durée de vie et la fiabilité avec un minimum de risque. [1]

I. 2 Développement historique de la turbine à gaz

La première machine à vapeur fut breveté en 1629 par un mécanicien Italien Giovanni Branca, une machine dans laquelle un jet était dirigé vers une roue horizontale connecté à un système d'engrenage pour actionné un presse. Apres Branca plusieurs mathématiciens ont contribué à l'amélioration de cette technologie.

Dans les années 1820-1833 Claude Bourdin un professeur français à réaliser plusieurs installations des machines hydraulique qui les a nommées Turbine, mot dériver du Latin Turbins signifiant qui tourne, mais il n'a pas réussi à passer au stade des machines industriellement stable, et c'est qu'en 1830 que Benoît Fourneyron un brillant élève de Bourdin améliora le conception de son professeur et installa une turbine industrielle d'une puissance

de 50 CV. En 1844 les turbines de Fourneyron furent installées en Europe et en Etats Unis ou des améliorations furent apportées.

Les turbines à gaz ont commencées à se matérialiser entre la fin du XIX ème siècle et le début du XX ème siècle, on mentionne qu'une première turbine à gaz capable de fournir du travail fut construite en 1903 par l'ingénieur mécanicien Elling en Norvège. En 1910 l'ingénieur mécanicien Henri Coanda essaya un avion dans le moteur était une turbine à gaz élémentaire composée d'un compresseur d'une chambre de combustion et d'une tuyère, mais c'est qu'en 1930 que l'idée de turbine à gaz a été réellement présentée aux Etats-Unis, en France, en Grande Bretagne, en Italie et en Allemagne.

A ces inventions s'ajoutèrent celles développées par l'équipe de Secundo Comini qui construisit un turbopropulseur en 1940, et la contribution Frank Whittle d'Angleterre en 1930 au quel ont attribué la création pratique de la turbine à gaz moderne.

I. 3. Définition

Les turbines à gaz font partie des TURBOMACHINES définies par râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent. C'est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure.

Dans sa forme la plus simple elle comprend trois éléments principaux :

- Le compresseur
- La chambre de combustion
- La turbine

I. 4. Composition de turbine

I.4.1 les compositions principaux

Les principaux composants d'une turbine à gaz :

- Section compression
- Section combustion
- Section turbine

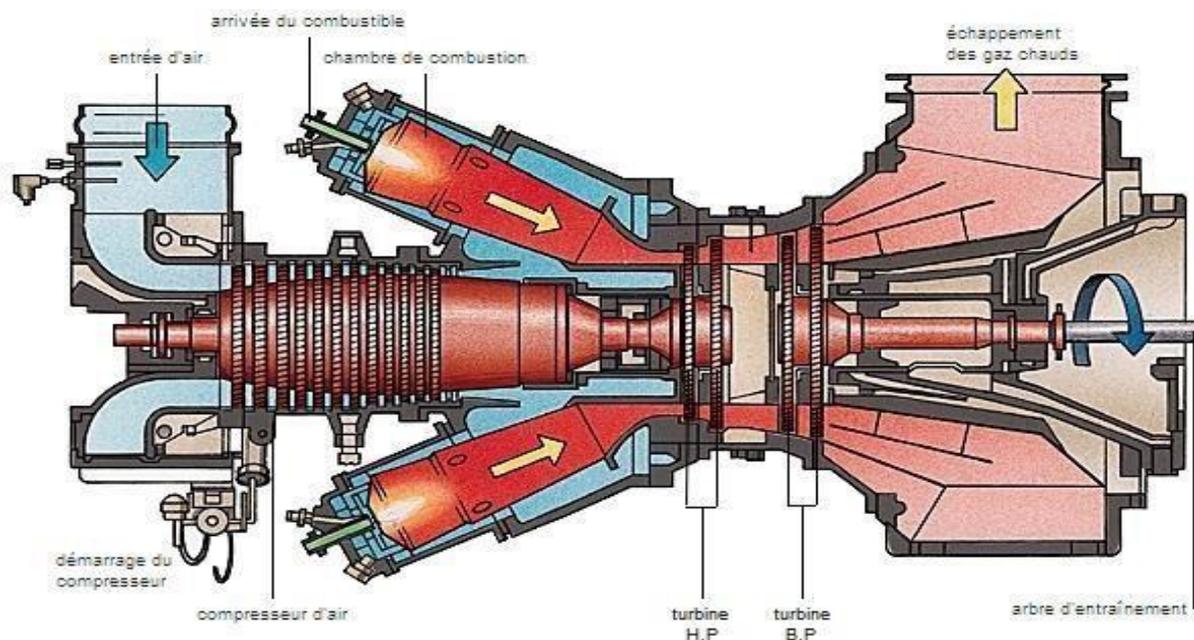


Figure: I-1 schéma générale de la turbine à gaz

I.4.1.1 Section compression

Le compresseur axial qui a pour rôle de fournir le débit nécessaire d'air à la condition de marche (Pression et température) se compose de 15 étages avec un rapport de compression de 8.



Figure I-2: compresseur axial

I-4-1-2-Section combustion

La combustion du mélange air-gaz a lieu dans cette section. Elle est déclenchés par des

bougies, lorsque l'allumage se produit dans une des chambres, les gaz chauds de combustion passent dans des tubes foyers et vont allumer le mélange des autres chambres.

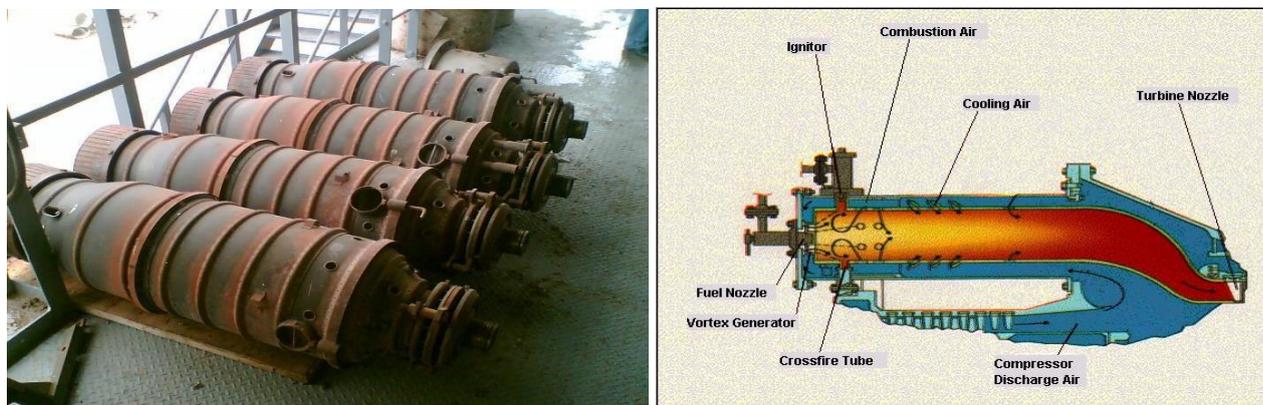


Figure: I-3 Schéma de la chambre de combustion.

I.4.1.3. Section Turbine

La turbine proprement dite est du type trois étages, les deux Premiers (Turbine de charge) sont désignés à entraîner le compresseur axial, le troisième étage (Turbine de puissance) a pour fonction de fournir la puissance nécessaire à l'arbre de sortie.

- **La turbine de charge :**

Elle se compose de deux étages ; le premier à haute pression et le second à basse pression



Figure : I.4 Roues de la turbine de charge.

- **La turbine puissance**

Elle est montée sur un arbre indépendant de celui de la turbine de charge (Fig. 1.5), elle est constituée d'un distributeur et d'une roue (un étage). Les aubes de stator de la turbine à étage simple sont soutenues par le support d'aubes qui est en commun à la turbine de charge et celle de puissance (stator commun).



Figure : I. 5 Roue de la turbine de puis

I. 5 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Le compresseur (C), constitué des roues munies d'ailettes comprime d'air extérieur (E) simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars vers 30 bars pour certains modèles, du gaz (G) ou un combustible liquide atomisé, et injecté dans la chambre combustion (Ch) où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (T), où l'énergie thermique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique, la dite turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes et s'échappent par la cheminée (Ec) à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre (A) qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part d'une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur (pompe, alternateur ...) accouplé à son extrémité droite. Pour la mise en route, on utilise un moteur lancement (M) qui joue le rôle d'un démarreur. Le réglage de la puissance et la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant. [19]

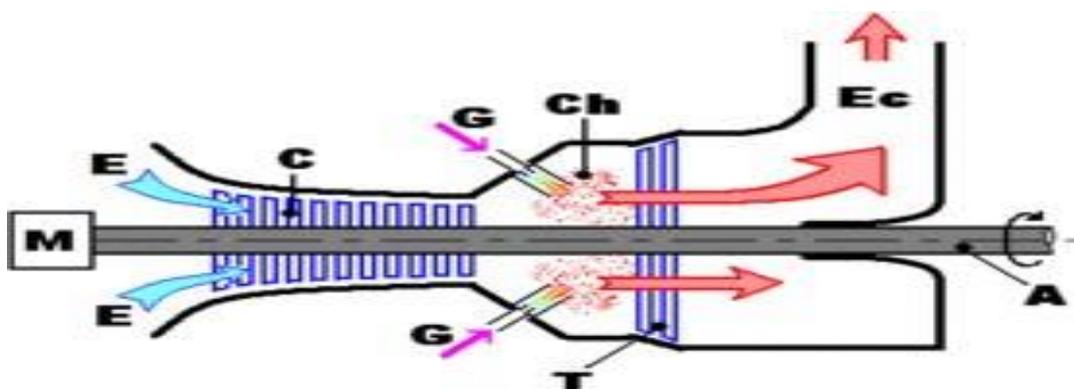


Figure : I. 6 : Schéma synthétique d'une turbine à gaz

I.6 Cycle théorique d'une turbine à gaz

Le cycle thermodynamique qui représente bien les transformations des turbines à gaz est le cycle de Brayton

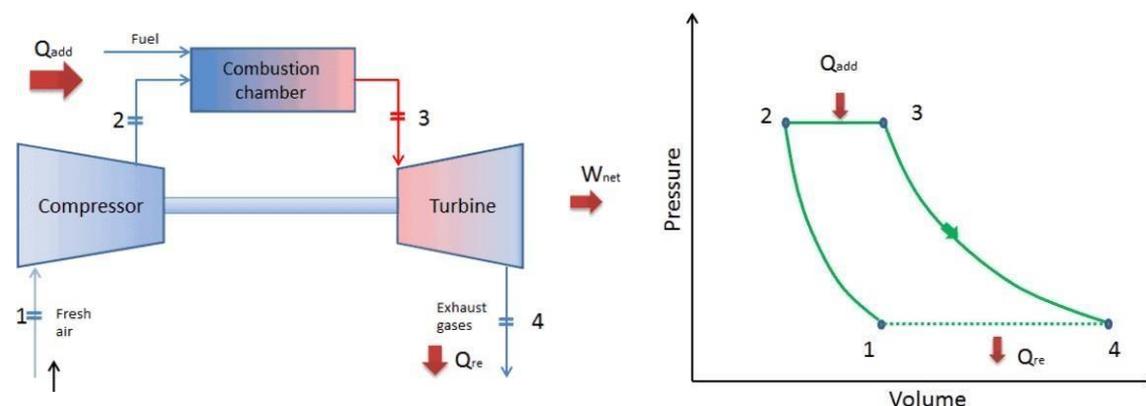


Figure I.7 : les transformations des turbines à gaz est le cycle de Brayton

➤ Le cycle réversible de Brayton

Le cycle réversible de Brayton est composé des quatre transformations suivantes :

- une compression isentropique 1-2
- un apport de chaleur ou combustion isobare 2-3
- une détente isentropique 3-4
- un retrait de chaleur isobare 4-1 [20]

I.7 Système d'air

La fonction principale du système d'air est de produire de l'air comprimé pour les chambres de la combustion de la turbine à gaz à cet effet, un compresseur axial d'air un système d'admission d'air est utilisé. Une partie de cet air est utilisée comme air de barrage (empêche l'huile en provenance des paliers centraux de passer dans le gaz chaud) et de refroidissement interne au niveau du turbine à gaz (refroidissement du disque du rotor de la turbine à gaz). [8]

I.7.1 Air Basse Pression BP

L'air BP est produit au 9ème étage de compresseur axial est utilisé comme :

- **Air barrage** : fournir le palier N°1 et N°3
- **Air propulsion** : fournir l'extracteur d'huile pour créer le vide dans le réservoir d'huile.

L'air BP est sorti vers atmosphère à travers la COV101 pour éviter l'anti pompage de compresseur axial.

I. 7.2 Air de refroidissement BP

Fournir le disque de rotor entre le 2eme et le 3ème étage de la turbine.

- **Air haute pression HP** : L'air HP est produit au 17eme étage de compresseur axialest utilisé comme :
- **Air barrage** : fournir le palie N° 2
- **Air de refroidissement HP** : fournir ou bien refroidie les chambres de gaz combustion, refroidissement des ailettes rotoriques (par des canaux séparés).
- **Air combustion** : petit quantité d'air pour allumage des pilotes Air de commande : la commande (les vanne..... instrumentation) [8]

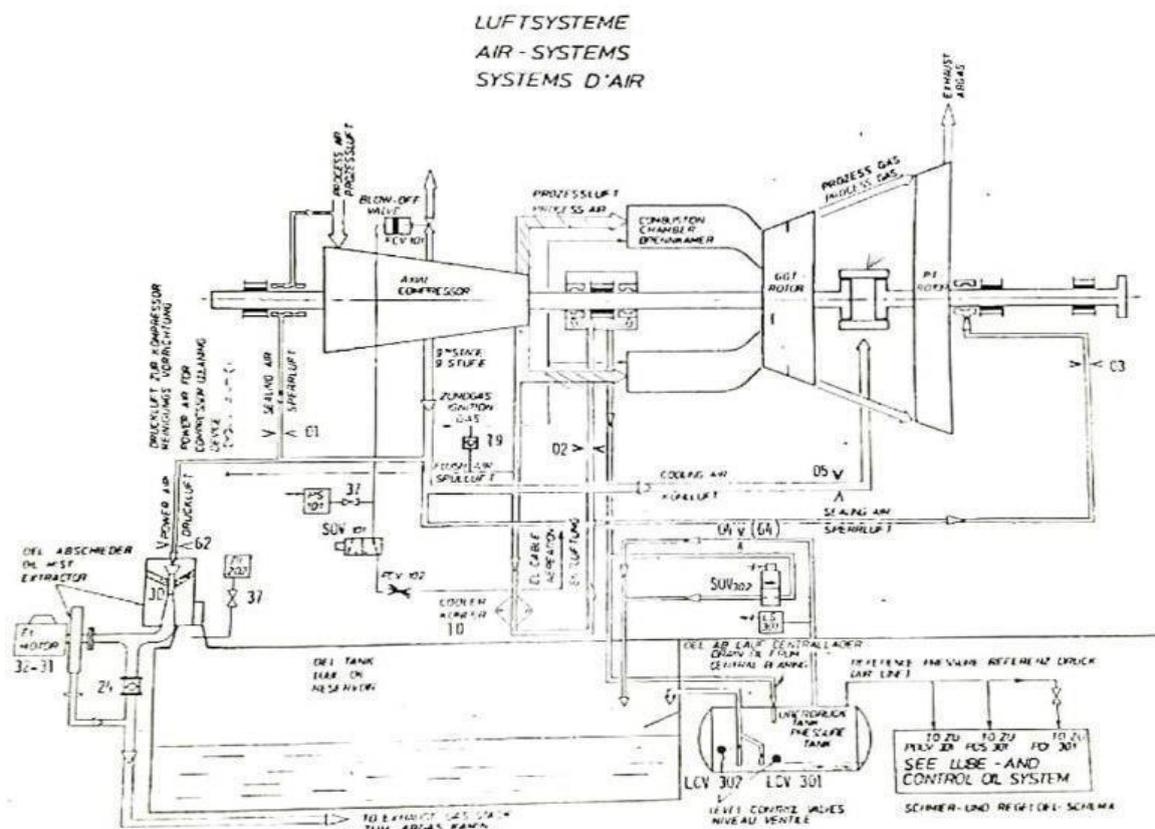


Figure : I.8 Système d'air.

I. 8 Les domaines d'application des turbines à gaz

Les domaines d'application des turbines à gaz peuvent être divisés en deux catégories :

I.8.1 Domaines fixes (utilisation industrielle)

Les turbines industrielles sont des machines lourdes et assez rustiques dont l'objectif principal est la longévité. Ce critère de longévité conduit à l'utilisation de paramètres de fonctionnement peu sévères :

- Taux de compression en général compris entre 6 et 8.

- Température entrée turbine limitée à 950 °c.
- Leur fonction est :
- entraînement des compresseurs.
- entraînement des pompes.
- entraînement des alternateurs

I. 8. 2 Domaines mobiles (aviation, maritime) :

Les turbines type aviation (turbo réacteur) également appelée turbine « jet » sont constituées d'un réacteur générateur de gaz chaud suivi d'une turbine de détente (en place de la tuyère) permettant de produire l'énergie mécanique. Il s'agit donc d'une turbine à 2 arbres utilisant les techniques aérodynamiques très répandues.

La conception est évidemment bien différente des turbines industrielles puisque les. Critères de poids et d'efficacité sont primordiaux

I. 9 Classification des turbines à gaz

On peut classer les turbines selon différents points

- Par le mode de travail.
- Par le mode de fonctionnement thermodynamique.
- Par le mode de construction.

I. 9. 1 Par le mode de travail

On distingue deux types de turbines :

- **Etage à Réaction**

Dans les turbines à réaction, nous savons que la détente se fait aussi bien dans les canaux fixes que dans les canaux mobiles, c.-à-d. qu'une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique, $p_1 > p_2 > p_3$. Le degré de réaction caractérise la répartition de l'énergie thermique totale.

- **Etage à Action**

Le principe de fonctionnement d'une turbine à action, est que la transformation thermodynamique du fluide se fait uniquement dans les canaux fixes, désignés sous le nom de distributeur, ou encore tuyère de détente, les aubes mobiles n'ont qu'un rôle à jouer, c'est de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente en travail mécanique communiqué au rotor, donc l'évolution des gaz dans les aubes mobiles se fait sans variation de la pression statique $P_1 > P_2 = P_3$

I. 9. 2 Par le mode de construction

- **Turbine à un seul arbre « mono arbre »** : ce type de turbine est caractérisé par la stabilité de sa vitesse de rotation du fait que le bloc compresseur d'air ; turbine d'entraînement et turbine de puissance sont montés sur le même arbre.

- **Turbine à deux arbres « bi arbre »** : dans ce type la turbine de puissance n'est pas mécaniquement liée à l'ensemble constitué par le compresseur d'air et la turbine génératrice de gaz (TGG). L'équipement entraîné peut être réglé en vitesse tout en conservant au compresseur une vitesse de rotation proche de celle assurant son rendement optimal. La turbine à gaz du type S3 a été conçue pour être construite en série, pour une ou deux lignes d'arbre [19]

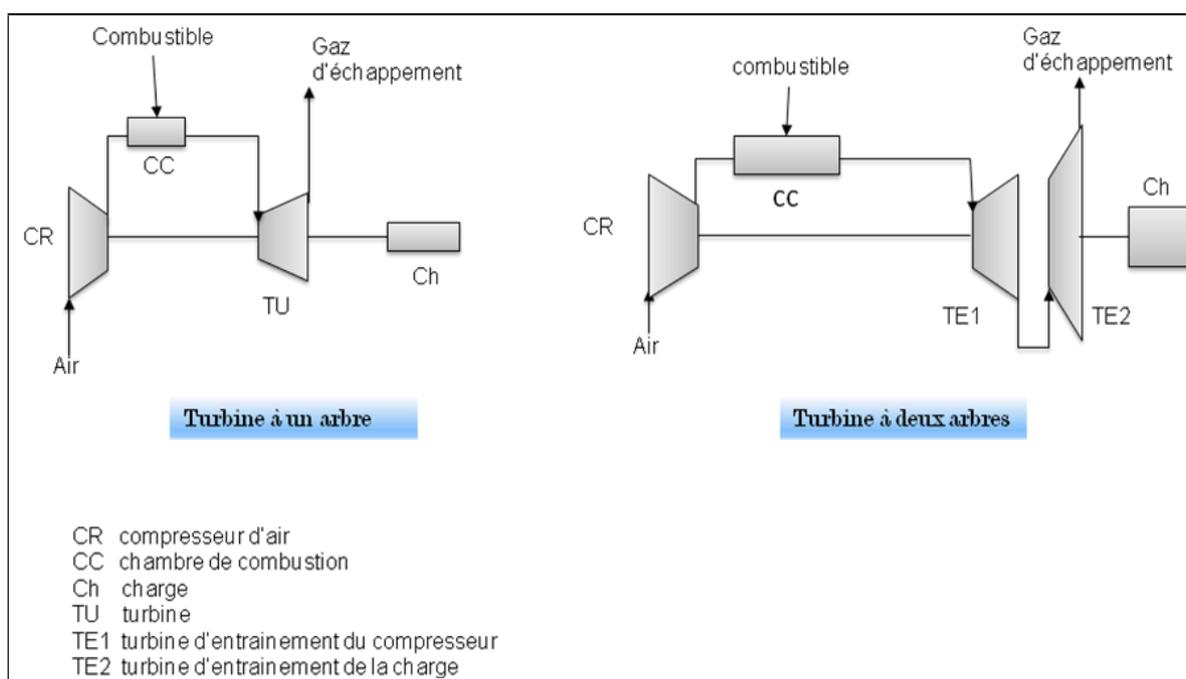


Figure : I.9 Turbine à gaz à un arbre et à deux arbres

I. 9. 3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamiques :

-Turbine à gaz à cycle fermé

Dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.

-Turbine à gaz à cycle ouvert

C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère et d'efficacité sont primordiaux.

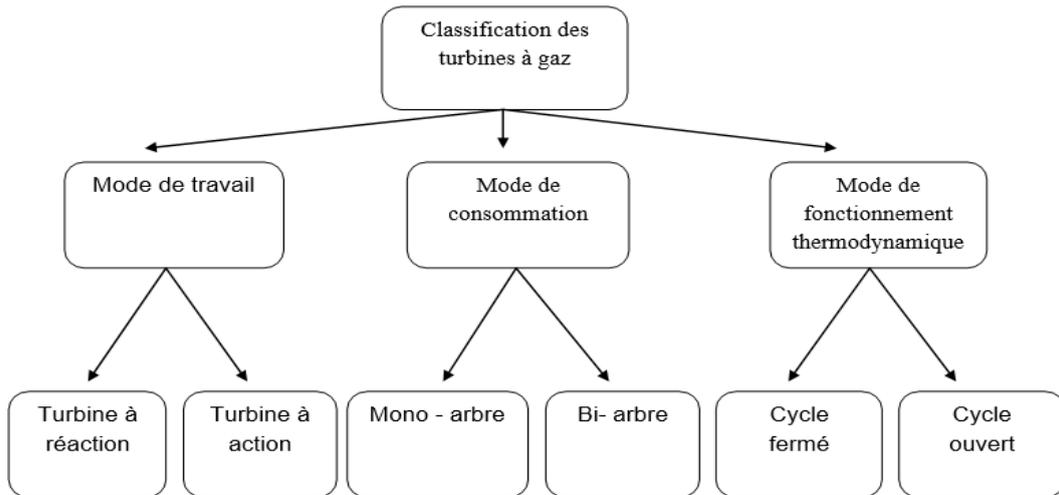


Figure: I. 10 Classification des turbines à gaz

I. 10 Aube de turbine

C'est l'organe utilise pour réaliser la détente dans la turbine par une géométrie bien déterminée et qui n'est pas systématique car l'écoulement accélère pose moins de problèmes que l'écoulement décéléré dans le compresseur. L'exemple de deux grilles avec la même ligne de squelette mais une distribution différente de l'épaisseur des aubes, dans le canal B on obtient une accélération continue tandis que dans le canal A on obtient après l'accélération une décélération de l'écoulement dans l'aubage qui peut provoquer un décollement de celui-ci Dans l'aubage d'une turbine on essaye toujours d'obtenir la surface minimale à la sortie du canal entre les aubes de turbine.



Figure : I. 11 aube de turbine

I. 10. 1 Description aérodynamique de l'aube

Comme toutes les pales aérodynamiques y compris les turbines, les aubes de la turbine sont constituées d'une partie inférieure appelée l'intrados et une autre partie extérieure dite extrados, la ligne reliant le bord d'attaque et le bord de fuite nommée la corde, l'espace formé par les deux lignes la corde et la ligne moyenne appelé la cambrure maximale, le bord d'attaque est caractérisé par un angle par rapport au vent relatif appelé l'angle d'incidence.

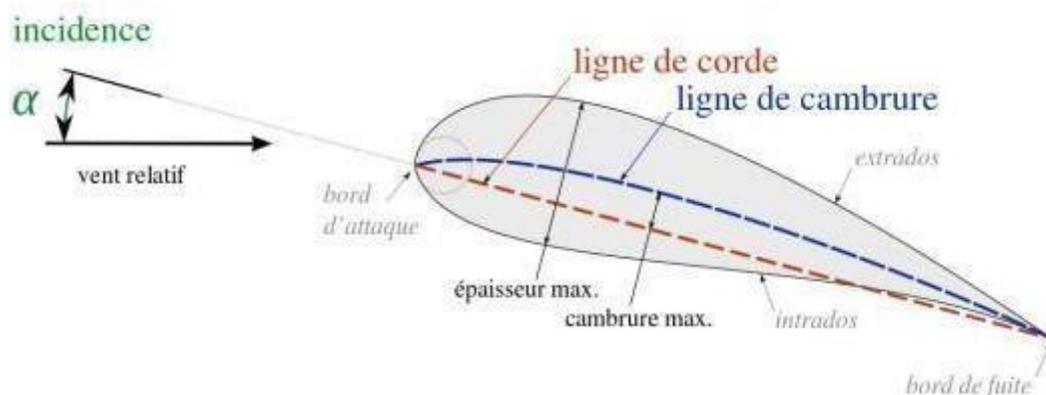


Figure : I.12 : Les éléments principaux de l'aube.

I.10.2 La fabrication des aubes

La compétitivité de l'usinage d'ailette de turbines à gaz et à vapeur est un défi car ces pièces regroupent la plupart des caractéristiques les plus difficiles à usiner :

- l'usinabilité des matières dans lesquelles sont faites les pièces est variable (certaines matières nécessitent des plaquettes spécifiques).
- des quantités très importantes de matière doivent être enlevées et de bons états de surface doivent être produits (sans effets négatifs sur les aubes, notamment des contraintes résiduelles).
- la forme des pièces est complexe (certaines aubes demandent une programmation FAO avancée avec les meilleures méthodes).
- les aubes sont sujettes aux vibrations pendant l'usinage (pièces longues et minces qui demandent des outils avec une coupe légère capables d'absorber les vibrations).
- l'efficacité de la production est importante (production de grands volumes).
- plusieurs outils sont nécessaires et ils doivent être appliqués correctement (du simple surfacage au profilage avec 4 ou 5 axes).

I.10.3 Grille d'aubes

On appelle une grille d'aube, un ensemble fixe ou mobile d'aubes (obstacles) placées les unes près des autres par un déplacement géométrique périodique, utilisée pour guider l'écoulement du fluide et pour échanger l'effort mécanique avec lui

Les grilles d'aubes peuvent être

- grille plane parallèle

- grille plane radiale
- grille cylindrique
- grille toriques

I.10. 4 Ecoulement dans les grilles d'aubes

Le principe du choix de l'aubage d'une turbomachine consiste à réaliser la déviation demandée avec un minimum de perte, il est exigé en plus que l'aubage fonctionne sans décollement dans un large domaine en dehors du point nominale de fonctionnement de la machine.

Les aubages de turbomachines sont obtenus par différentes méthodes de calcul et d'essais sur modèle. L'étude théorique et expérimentale, a pour but de déterminer l'influence de la géométrie de la grille (profil, pas, angle de calage...) sur les propriétés de déviation et sur les pertes dans l'aubage.

L'écoulement réel dans les aubes des turbomachines est visqueux tridimensionnel et Instationnaire, les équations de Navier Stokes décrivant ce type d'écoulement, ne peuvent pas être résolues pour les conditions réelles. Pour cette raison, on néglige dans la plupart des cas les composantes radiales de l'écoulement et on remplace les surfaces de l'écoulement par des surfaces cylindriques autour de l'axe de la machine. Le développement de cette coupe cylindrique définit une grille d'aube linéaire bidimensionnelle, afin d'assurer la périodicité de l'écoulement dans la grille, le nombre d'aubes doit être infini.

L'approximation bidimensionnelle de l'écoulement dans l'aubage d'une turbomachine est valable strictement seulement pour de très faible rapport B/Dm . et pour des écoulements sans frottements sur les parois latérales de la grille, la comparaison des essais dans les machines avec des mesures et des calculs bidimensionnels montre cependant que l'approximation peut être utilisée même pour les coupes coaxiales d'un aubage vrillé, si les écoulements secondaires ne sont pas trop importants.

Pour des écoulements transsoniques et supersoniques par contre les différences entre un calcul bidimensionnel et tridimensionnel peuvent être non négligeables. [2]

I.11 Avantages des Turbines à gaz

La turbine à gaz représente des avantages remarquables :

- Simplicité d'installation.
- Génération simultanée d'électricité et de chaleur utilisable soit directement, soit indirectement dans les procédés industriels.
- Possibilité de fonctionnement avec différents combustibles.
- Grand sécurité de fonctionnement.
- Entretien facile.
- Marché régulière.

- Valeur d'émission favorable sans équipement.

I.12 Inconvénients des turbines à gaz

- Mauvais rendement : moins de 30% de l'énergie calorifique contenue dans le carburant est transformée en énergie mécanique.
- Faibles pressions de travail.
- Régimes souvent beaucoup trop élevés.
- Coût de fabrication élevé.
- Importante consommation de carburant.
- Mal adaptée aux faibles puissances.
 - Bruyante par la vitesse des gaz.
- Nécessite des réducteurs coûteux.

I.13 Conclusion

Le but de ce chapitre était de faire une étude bibliographique des turbines à gaz afin de connaître leur histoire, leur composition (dans sa forme la plus basique, un compresseur, une chambre de combustion et une turbine) et leurs principes de fonctionnement. Par ailleurs, les applications des turbines à gaz sont nombreuses et variées.

II. 1 Introduction

Il est connu que la puissance de la turbine dépend de la température des gaz à l'entrée de celle-ci. Ainsi pour augmenter la puissance, les lois thermodynamiques ont conduit à rechercher une température entrée turbine la plus élevée possible.

La température du gaz dans les premiers étages de turbines à gaz dépasse souvent la limite admissible par les matériaux constituant.

Par conséquent, le refroidissement des aubes de turbine est nécessaire pour réduire la température du métal des aubes à des niveaux acceptables pour les matériaux, ce qui augmente la capacité thermique du moteur. Grâce à la contribution et au développement des systèmes de refroidissement des turbines, la température d'entrée de la turbine (TET) a plus que doublé au cours des 60 dernières années.

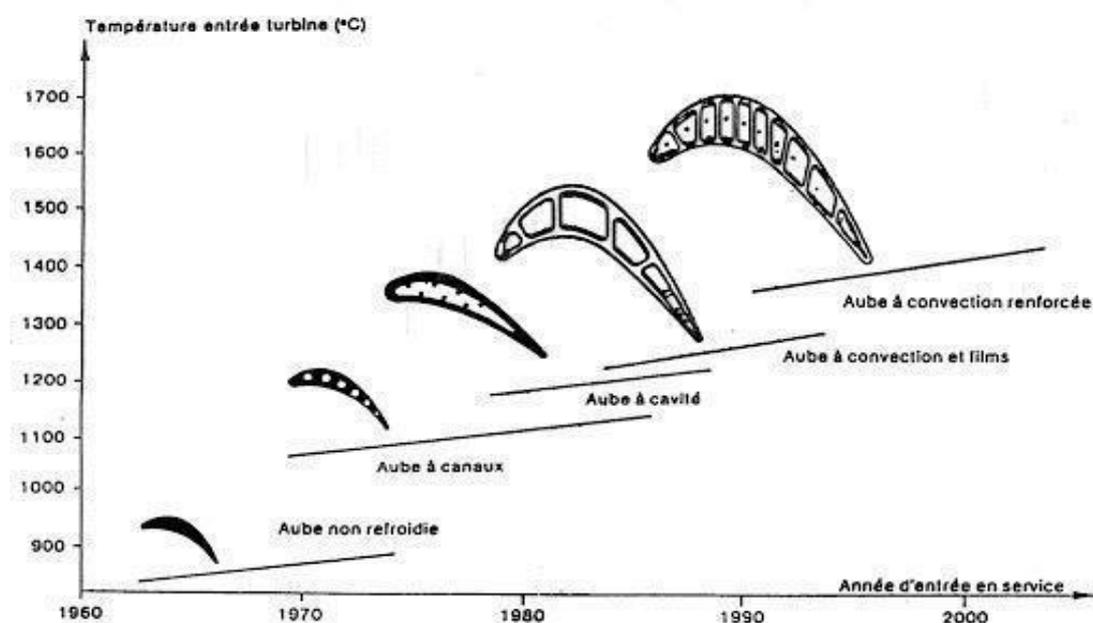


Figure : II.1 : Évaluation de la valeur de la température d'entrée des turbines au cours des dernières années.

Le refroidissement avec du liquide est plus efficace mais une installation de refroidissements de ce genre est très complexe. Cependant le refroidissement par air est très souvent utilisé car il permet une efficacité appréciable.

Les critères d'un bon refroidissement découlent des principes de transfert de chaleur dans une conduite fermée. Par conséquent pour obtenir un grand échange de chaleur dans de tels systèmes, il est nécessaire de satisfaire les deux exigences suivantes :

- Un écoulement du fluide de refroidissement bien étudié.
- Une grande surface d'échange

Le refroidissement des aubes de turbine peut être classé en deux grandes catégories : Le refroidissement interne, où la chaleur est évacuée par une variation des configurations de refroidissement par convection et par impact, où l'air à grande vitesse circule et frappe les surfaces internes des aubes et des aubes de la turbine, et le refroidissement externe des aubes,

Où l'air froid est injecté par les trous de refroidissement en film sur la surface externe des aubes afin de créer une fine couche de refroidissement en film. Une large gamme de dispositifs de refroidissement interne et externe a été appliquée dans le passé ; cependant, dans les deux cas, l'objectif est de maintenir l'ensemble de l'aube suffisamment froide et de veiller à ce que les gradients de température à l'intérieur de l'aube (qui pourraient entraîner des contraintes thermiques) soient maintenus à un niveau acceptable. [21]

II. 2 Transfert de chaleur sur les aubes des turbines à gaz

D'une manière générale, trois modes de transfert de chaleur peuvent être distingués dans les turbomachines :

- Transfert de chaleur par conduction.
- Transfert de chaleur par convection.
- Transfert de chaleur par rayonnements.

Particulièrement au transfert de chaleur qui a lieu sur les aubes. Seul le transfert de chaleur Par convection forcé sera abordé ici et deux situations seront distinguées :

- Le modèle a deux températures qui prennent en compte le transfert de chaleur convectif sans refroidissement.
- Le modèle a trois températures qui prennent en compte le transfert de chaleur convectif lorsque la surface est refroidie

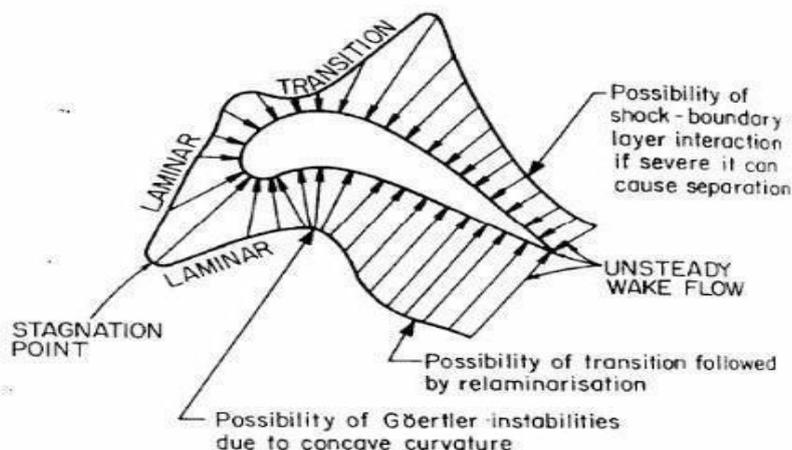


Figure : II .2 Détails du taux du transfert de chaleur autour d'une aube de turbine

-Région de stagnation

La région de stagnation est une région très critique du point de vue transfert de chaleur, c'est la région où la couche limite commence à se développer et influence l'échange de chaleur sur l'aube.

Le transfert de chaleur dans cette zone peut devenir très important, et elle est souvent la région où le flux de chaleur est maximal. Le transfert de la chaleur dans cette région dépend beaucoup de la turbulence d'entrée. Pratiquement un haut niveau de turbulence de l'écoulement libre (plus que 10%) peut augmenter le transfert de la chaleur dans la région de stagnation par 50% comparé au cas laminaire.

-Région laminaire

Le flux de chaleur dans la couche limite laminaire est inférieur par rapport à celle turbulente. L'état le plus critique dans la partie laminaire de la couche limite est certainement quand elle devient turbulente. Dans la couche limite laminaire, il y a une relation directe entre le frottement et le profil de vitesse et le profil de la température et le transfert de la chaleur. Ça veut dire, que dans le cas laminaire simple, l'accouplement entre température et vitesse à travers une variation de la densité peut être négligé, le problème de la maîtrise du transfert de chaleur dépend essentiellement du phénomène de frottement.

- Région transitionnelle

Quand on parle au sujet de la région transitionnelle pour le transfert de la chaleur dans l'aube de la turbine, on fait habituellement référence à la transition qui se produit sur l'extrados. Il y a bien sûr aussi une transition qui se produit sur l'intrados, mais elle a, habituellement, un effet moins dramatique sur le transfert de la chaleur, car l'accélération près du bord de fuite a tendance à cacher la transition sur l'intrados

-Région turbulente

La région turbulente sur le côté de l'extrados n'est pas influencée habituellement beaucoup par l'écoulement libre. La courbure de l'aube peut être importante quelquefois, notamment pour les aubes avec courbure très concave, cela mène à un transfert de la chaleur diminué. Par exemple, l'expérience montre que le transfert de la chaleur peut être réduit de 15% à 20% sur une surface concave comparée au même cas de la plaque plane

-Région séparée avec ré-attachement

Les régions séparées affectent le transfert de chaleur naturellement. La séparation considérable peut être réalisée par un gradient de pression adverse trop fort, qui se présente sous certaines conditions. Elle se produit souvent près de la pointe sur le côté de l'intrados ou près du bord de fuite sur le côté de l'extrados

II. 3 Paramètres influençant la conception d'aubes refroidies par air

Pour concevoir une aube refroidie par air, différents facteurs doivent être pris-en Considération pour avoir un produit fini satisfaisant. Ces facteurs sont :

- L'aérodynamique de l'aube.
- Le Choix du fluide réfrigérant.
- Les propriétés des matériaux.
- Les contraintes sur l'aube.
- Les conditions d'approvisionnement du fluide réfrigérant.
- La configuration géométrique des fentes de refroidissement

II .3 .1 Aérodynamique de l'aube

- La vitesse de l'écoulement d'injection UC et celle de l'écoulement principal U_{∞} .
- Le taux d'injection $M = \frac{\rho c U c}{\rho_{\infty} U_{\infty}}$

- La masse volumique ρ_{∞} de l'air de l'écoulement principal et celle ρ_c de l'air de l'écoulement d'injection.
- L'intensité de turbulence.
- Les températures des deux écoulements : celle de l'écoulement principal et celle de l'écoulement d'injection. [22]

II. 3. 2 Choix du fluide réfrigérant

Il y a deux façons de refroidir les aubes. Le choix du réfrigérant divise le système de refroidissement en deux catégories :

- Refroidissement par liquide.
- Refroidissement par gaz ou l'air.

➤ Refroidissement par liquide

Le mode de refroidissement interne par un réfrigérant liquide peut-être divisé en deux phases :

- Convection forcée : Dans ce cas l'échange se fait sous l'écoulement forcé du liquide (eau) qui est pompé à travers des passages dans l'aube de turbine.
- Convection libre : Cette méthode de refroidissement est actuellement abandonnée, parce qu'il est impossible d'éliminer la corrosion et la formation de dépôts et il est trèsdifficile d'avoir une surface d'échange adéquate.

➤ Refroidissement par air

Les principaux domaines qui nécessitent un refroidissement par air sont la chambre de combustion et la turbine. L'air de refroidissement est utilisé pour contrôler la température des arbres et des disques du compresseur en les refroidissant ou en les chauffant. Cela permet d'assurer une répartition uniforme de la température et donc d'améliorer le rendement du moteur en contrôlant la croissance thermique et en maintenant ainsi des jeux minimums au niveau de l'extrémité des pales et des joints

L'air de refroidissement est prélevé du dernier étage compresseur haut pression pour la simplicité mécanique. L'air après avoir quitté le compresseur passe à travers des injecteurs L'air, après avoir quitté le compresseur, passe par l'injection aux pièces à refroidir. [22]

II. 4 Techniques de refroidissement

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre au cours de ces dernières années et les technologies qui y sont liées ont évolué en fonction des performances visées.

Ces techniques rencontrées dans les aubages sont décrites dans les lignes suivantes.

II .4. 1 Convection interne

Le refroidissement par convection interne est la plus ancienne des techniques de refroidissement.

Cette technique consiste à faire circuler l'air frais à l'intérieur de l'aubage par des canaux afin d'évacuer le flux de chaleur reçu par l'aube. Pour améliorer l'efficacité de cette technique, il faut augmenter les échanges convectifs entre le fluide et la paroi en plaçant à l'intérieur des canaux qui vont perturber l'écoulement. Ces canaux peuvent être des ailettes, des picots, des pontets ou des perturbateurs (Figure II.5). [2]

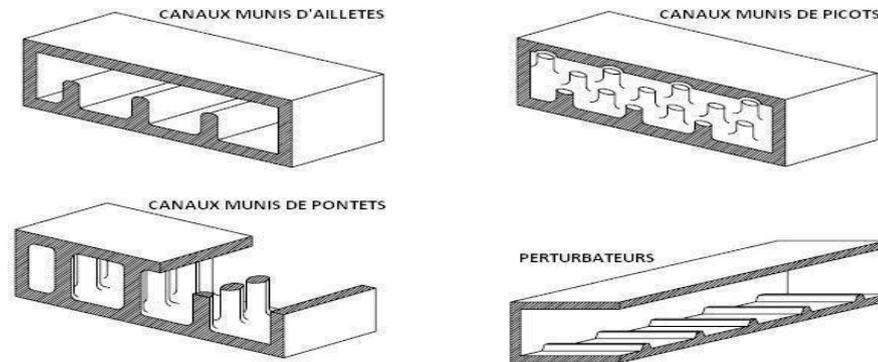


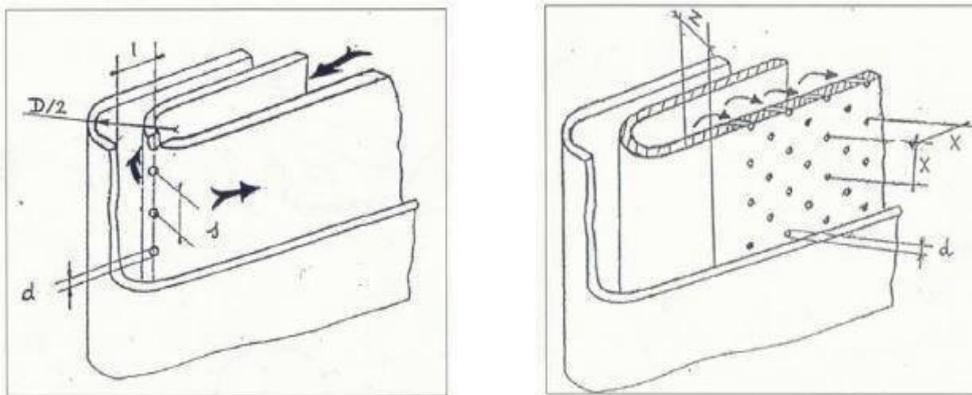
Figure : II .3 Refroidissement par convection interne.

II. 4. 2 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.

Le refroidissement par impact de jets est classé en deux technologies : l'impact concentré (l'air frais injecte à travers une rangée unique de jets **a**) et l'impact réparti (l'air frais injecte à travers une matrice de jets **b**).

L'impact de jets est une des techniques de refroidissement efficace. Toutefois, le rapport du cout de fabrication et l'efficacité de refroidissement pose le problème de leur utilisation. [2]



(a)

Impact concentré

(b)

Impact réparti

Figure : II. 4 Refroidissement par impact de jets.

II. 4. 3 Refroidissement par film

La technique de refroidissement par film est aujourd’hui la protection thermique externe la plus largement utilisée pour refroidir les aubes de turbines grâce à son bon rapport entre le cout de fabrication et la performance de refroidissement.

Dans cette technique, l'air de refroidissement est directement prélevé de la sortie du compresseur et est injecté à travers des rangées de trous placés dans les zones critiques l'aube à refroidir. Le but de cette technique est de créer une couche d'air refroidissante entre les gaz chauds venant de la chambre de combustion et la surface de l'aube à refroidir. L’efficacité d’un tel procédé dépend de nombreux paramètres, qui sont principalement de deux types : les paramètres géométriques et les paramètres aérodynamiques. [2]

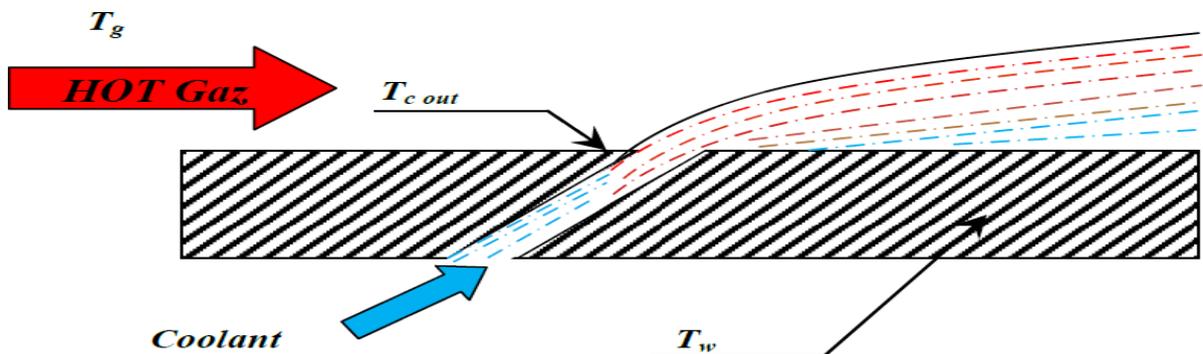


Figure : II. 5 Refroidissement par film

II. 4. 4 Refroidissement par transpiration

Il consiste à faire circuler le fluide de refroidissement dans des micro-canaux lisses à l’intérieur de la paroi. Leur implantation près des surfaces exposées au flux permet de bien évacuer la chaleur. Plusieurs techniques de fabrication sont envisageables. La fonderie ne permettant pas de concevoir des parois d’épaisseur inférieures à 0,6 mm, une solution consiste à construire l’aubage en plusieurs parties, ensuite brasées entre elles. Une fabrication originale, initialement élaborée pour refroidir les chambres de combustion, consiste à superposer des lamelles préalablement gravées, puis à les assembler. On obtient un matériau poreux et le refroidissement s’effectue par transpiration. Bien que prometteuse sur le plan de la réduction du débit de refroidissement, cette méthode possède un coût de production élevé. [2]

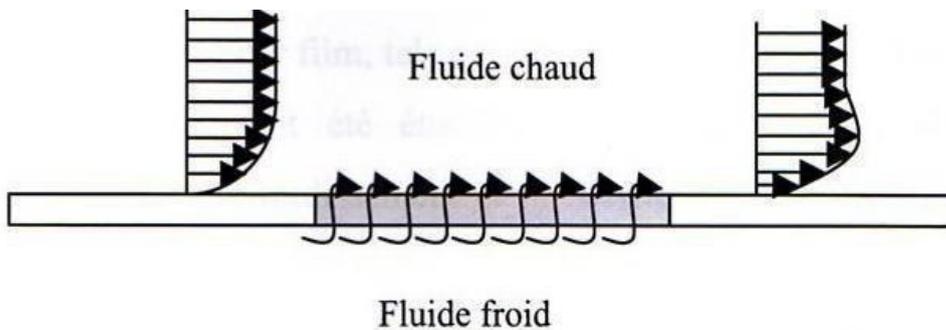


Figure : II .6 Refroidissement par transpiration.

II. 4. 5 Prélèvement de l'air de refroidissement

L'air est extrait soit en fond de chambre de combustion (juste avant le mélange avec le combustible), d'où il est emmené par une canalisation puis éjecté dans les parties à refroidir, soit directement dans un étage du compresseur depuis lequel une veine externe le conduit à destination.

Le prélèvement direct dans le compresseur est quant à lui utilisé pour refroidir les étages suivants, il permet de réguler le débit du fluide de refroidissement.

II. 5 Couplages des méthodes de refroidissement

Ces méthodes sont souvent combinées pour optimiser le refroidissement des aubes Turbine (Figure II 8). Cela rend la conception de ces éléments complexe et nombreuse. Ensuite, les paramètres géométriques et aérodynamiques entrent en jeu. Par conséquent, les ingénieurs responsables de la conception de ces composants doivent tenir compte des coûts de fabrication, de la protection thermique, de l'efficacité aérodynamique, de la résistance mécanique et la vie [23]

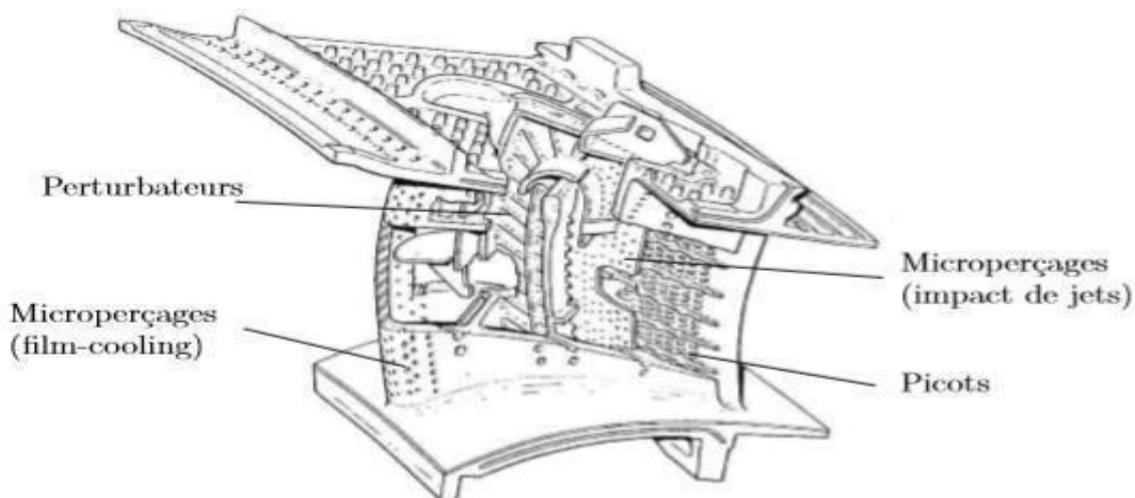


Figure : II.7 Représentation d'une aube et de ses systèmes de refroidissement

II.6 Conclusion

L'objet de ce chapitre est de décrire les paramètres qui influencent la conception des aubes refroidies par air et les différents procédés de refroidissement qui se répartissent en deux catégories :

Les procédés de refroidissement interne et les procédés de refroidissement externe. Le premier implique la convection forcée et l'impact interne du jet, tandis que le second implique le refroidissement à travers des films minces et la transpiration à travers des surfaces poreuses. L'étude complète la description théorique des calculs de flux de chaleur des aubes et l'étude bibliographique sur le refroidissement des aubes de turbine à gaz.

III.1. Introduction

La simulation numérique en mécanique des fluides a pour but de déterminer numériquement les propriétés d'écoulement (vitesse, température, pression, flux de chaleur, dissipation, etc.) d'un fluide dans diverses configurations et domaines (aérodynamique, turbines, dynamique des fluides, combustion, etc...).

La discipline, qui n'a cessé d'évoluer depuis 50 ans, a atteint un stade de développement suffisamment avancé pour que les ingénieurs puissent y voir avec confiance un moyen d'appréhender la réalité physique, au même titre que les mesures obtenues lors de recherches.

A l'heure actuelle, la simulation numérique de l'écoulement des fluides (CFD Computational Fluid Dynamic) est reconnue comme l'un des outils indispensables dans le processus de conception, et est largement utilisée dans le domaine industriel.

III .2 Méthode numériques de simulation

L'étude scientifique des phénomènes physiques implique la formulation numérique des phénomènes physiques en formulant une ou plusieurs lois sous forme d'équations mathématiques qui relient les différentes variables impliquées dans le développement du phénomène en question.

Une fois le problème bien formulé, il faut créer une grille de calcul qui couvre toute la zone étudiée dans l'espace et dans le temps. Le type de grille de calcul dépend du type de méthode numérique que vous utilisez. Actuellement, vous pouvez choisir parmi trois méthodes numériques différentes : la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis.

III 2.1 Méthode des éléments finis

Développé à l'origine pour les structures informatiques, il est très puissant lorsqu'il s'agit de géométries complexes. Elle a ensuite trouvé un domaine d'application particulier en mécanique des fluides. Cette méthode est bien adaptée à la discrétisation à l'aide de maillages non structurés

III .2.2 Méthode des différences finis

C'est le résultat des travaux de plusieurs mathématiciens (Euler, Taylor, Leibniz...) au XVIIIe siècle. La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées partielles aux points de la grille par des approximations à partir des développements de Taylor.

III .2.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à intégrer des équations écrites sous forme intégrale sur un volume de base. Contrairement aux éléments finis, c'est une méthode particulièrement adaptée à la discrétisation de l'espace des lois de conservation, elle est donc largement utilisée en mécanique des fluides.

La mise en œuvre est simple si le volume de base ou "volume de contrôle" est un rectangle 2D ou un parallélépipède 3D. Cependant, contrairement aux différences finies, les méthodes de volumes finis peuvent fonctionner avec des volumes de n'importe quelle forme et peuvent donc gérer des géométries complexes. De nombreux codes de simulation numérique en mécanique des fluides sont basés sur cette méthode, tels que Fluent, CFX, Fine Turbo, etc.

Dans ce mémoire, nous avons choisi la méthode des volumes finis pour résoudre numériquement le problème de mécanique des fluides formalisé par les équations de dialogue masse, quantité de mouvement et énergie sur un maillage structuré.

III.3 Modélisation mathématique

La modélisation des phénomènes physique repose sur la résolution d'équation aux dérivées partielles, ces équations correspondent à la traduction mathématique des lois physique.

III.3.1 Mise en équations

En général, les équations de continuité et de Navier-Stokes sont des ensembles couplé d'équations différentielles partielles non linéaires pour quatre inconnues : deux composantes de vitesse, u , v , et deux des variables d'état, p , ρ ou et qui sont reliées par une équation d'état. Pour les flux à faible vitesse, nous pouvons formuler l'équation de l'énergie en utilisant la température statique, T , comme variable dépendante. Cela est pratique pour les applications de transfert de chaleur où la compressibilité est faible.

Les équations sont les mêmes mais les domaines sont différent ainsi les conditions aux limites.

➤ Equations de continuité

L'équation qui exprime la conservation de la masse est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = 0 \quad \text{III.1}$$

Dans le cas d'une fluide permanent (stationnaire), et incompressible, ou la masse volumique est invariable, l'équation de continuité se réduit à :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{III.2}$$

➤ Equations de Navier-Stokes

L'équation de la quantité de mouvement est donnée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad \text{III.3}$$

Où : σ_{ij} est le tenseur des contraintes.

f_i La force de volume par unité de masse.

p et ρ sont respectivement la pression statique et la masse volumique.

➤ **Equation d'énergie :**

Pour les problèmes de transfert de chaleur, cette équation nous permettra d'obtenir la température du fluide. Pour un fluide incompressible on a :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_p u_j + q_j) = \frac{\partial P}{\partial t} - \sigma_{ij} \frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} \quad \text{III.4}$$

Où : c_p est la chaleur spécifique à pression constante.

Avec :

$$\sigma_{ij} = \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \text{ tel que } \delta_{ij} = \{1 \text{ } i = j ; 0 \text{ } i \neq j\} \quad \text{III.4}$$

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

δ_{ij} : Etant le coefficient de kronecker.

Et pour étudier la conduction thermique dans le solide pour obtenir la distribution de la température dans ce domaine, et puisque on étudie un phénomène permanent sans source interne de production chaleur, on va utiliser l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} = 0 \quad \text{III.6}$$

III.3.2 Conditions aux limites

Dans le but de bien poser le problème, les conditions aux limites doivent obéir au

Problème physique et doivent être incorporées sur les frontières d'études. Pour le cas de refroidissement par convection forcée, les conditions aux limites sont nécessaires sur toutes Les frontières du domaine de calcul et qui sont essentiellement: entrée, sortie, paroi. Ces conditions aux limites peuvent être sous forme de : valeur imposée ou gradient imposé.

➤ A l'extérieur de l'aube

On va modéliser les effets thermique exercés par les gaz chauds de la turbine ont de température T_g sur l'aube par une convection forcée avec un coefficient de convection h_g constant sur tout le contour, donc sur les limites extérieurs de l'aube on a une condition du 3^{em} type (condition de Fourier) :

$$k_s S \frac{\partial T_s}{\partial \eta} = h_g S (T_s - T_g) \quad \text{III.7}$$

k_s : Conductivité thermique de solide.

S : Surface élémentaire de contact d'échange thermique.

➤ A l'intérieur de l'aube

On va modéliser le refroidissement interne de l'aube au niveau de canal par une convection forcée avec un coefficient de convection h_f constant sur tout le contour, donc sur les limites intérieures de l'aube on a une condition du 3^{em} type (condition de Fourier) :

$$k_s S \frac{\partial T_s}{\partial \eta} = h_f S (T_s - T_{fi}) \quad \text{III.8}$$

III.3.4 Modélisation de la turbulence

Par définition, un modèle de turbulence est un système additionnel d'équations algébriques ou aux dérivées partielles, régissant le mouvement moyen permettant le calcul des paramètres liés à la turbulence, ou une façon de progresser vers un schéma consistant à déduire des valeurs d'une ou plusieurs fonction transportables telle que :

- Les contraintes de la turbulence.
- L'énergie cinétique de turbulence k .
- Le taux de dissipation de l'énergie cinétique ε

Les modèles de turbulence les plus populaires utilisés aujourd'hui pour des calculs d'écoulement et de transfert thermique sont les modèles de viscosité à deux -équations pour un bas nombre de Reynolds. Les modèles k - ε et k - ω sont les plus utilisés. Ces modèles offrent souvent un bon équilibre entre la complexité et l'exactitude. La capacité d'imiter la transition à la turbulence qui est souvent présente sur les aubes de turbine ainsi que leur capacité de s'intégrer aux parois sont d'autres raisons de leur popularité Vijay & Ameri (2001). Ces modèles ont été appliqués à une variété de cas expérimentaux et leur précision a été évaluée, Malgré qu'ils n'offrent pas une bonne comparaison pour certains cas.

➤ **Modèle standard k-ε**

Pour des nombres de Reynolds élevés, les termes des contraintes de Reynolds sont estimés par Launder & Spalding, (1974)

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2\nu_t S_{ij} \quad \text{III.9}$$

$$\text{Avec : } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

Tel que ν_t est calculée, pour le modèle standard, par la relation suivante :

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{III.10}$$

Dans laquelle : $C_\mu = 0,09$ constante du modèle.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \overline{v \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}$$

L'adaptation des constantes standards du modèle donné par Launder et Spalding (1974) rend le système d'équation opérationnel.

$$\begin{cases} C_\mu = 0.09 \\ C_1 = 1.44 \\ C_2 = 1.92 \\ \sigma_k = 1 \\ \sigma_\varepsilon = 1.3 \end{cases}$$

Dans cette étude, nous adoptons uniquement le modèle k-ε

III.4 Simulation

III.4.1 Définition CFD:

La CFD ("Computational Fluid Dynamics") est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir des solutions approchées à des problèmes de dynamique des fluides et/ou de transfert de chaleur.

Les codes de calcul CFD résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces équations traduisent la conservation de masse et de la quantité de mouvement du fluide (équation de Navier Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

Pour résoudre notre problème, nous aurons recours au logiciel ANSYS CFX 2020.

III.4.2 Description du logiciel ANSYS CFX

ANSYS CFX est un code CFD (Computational Fluid Dynamics) à usage général. ANSYS CFX fait partie du portefeuille de logiciels ANSYS depuis 2003 (anciennement détenu par AEA Technology). En tant que code CFD à usage général, ANSYS CFX fournit une grande variété de modèles physiques pour les écoulements turbulents, l'acoustique, la modélisation des écoulements multiphasiques eulériens et lagrangiens, le rayonnement, la combustion et les réactions chimiques, le transfert de chaleur et de masse, y compris le CHT (transfert de chaleur conjugué dans les domaines solides). ANSYS CFX est particulièrement puissant grâce à son langage de commande et d'expression CEL/CCL facile à utiliser, qui permet l'extension ou la modification des modèles physiques mis en œuvre sans avoir besoin de programmation. Grâce au langage CEL et aux variables supplémentaires définies par l'utilisateur, de nombreux modèles physiques peuvent être mis en œuvre en incorporant simplement les formules, les expressions algébriques et même les équations de transport requises dans la configuration d'ANSYS CFX sans avoir besoin de routines User-FORTRAN.

Ainsi ce logiciel est caractérisé par :

- La facilité d'utilisation.
- La bonne précision dans les résultats.
- La variante des écoulements.

III.4.3 Etapes de simulation

Pour étudier le refroidissement des aubes de turbine à gaz, nous devons simuler la méthode en l'utilisation de quelques logiciels assistés par ordinateur. Dans cette méthode, nous suivons une liste d'étapes pour compléter l'analyse. Dans notre projet, il est nécessaire de comparer la différence de température entre l'aube par vitesse d'entrée l'air froid défèrent.

La première étape consiste à passer par le module Géométrie 20.0 pour créer et modifier la géométrie en suit le module Maillage pour discrétisation du domaine de calcul et la définition des sélections nommées de toutes les bordures. Deux options sont offertes à l'utilisation lui permettant de travailler soit avec un maillage structuré ou non structuré. Le fichier du maillage sera exporté vers le premier module de l'ANSYS CFX pre 20.0 dédié à la tâche de Configuration préliminaire. Cette étape permet à l'utilisateur d'imposer les conditions aux limites. Les conditions initiales et les paramètres de calcul. Plusieurs scénarios son envisageable et permettent le choix entre différentes variables de schémas de convection et de modèles de turbulence.

Le deuxième module qui s'intitule CFX-Solver permet de résoudre le système d'équations et l'obtention des résultats.

L'étape finale est effectuée dans le troisième module qui est la visualisation et l'analyse des résultats (Post-processing) qui présente un large éventail d'outil de calcul. Il permet de tracer les Iso- Contours, les lignes de courant et les vecteurs ainsi que le calcul de n'importe quel paramètre d'hydro thermodynamique.

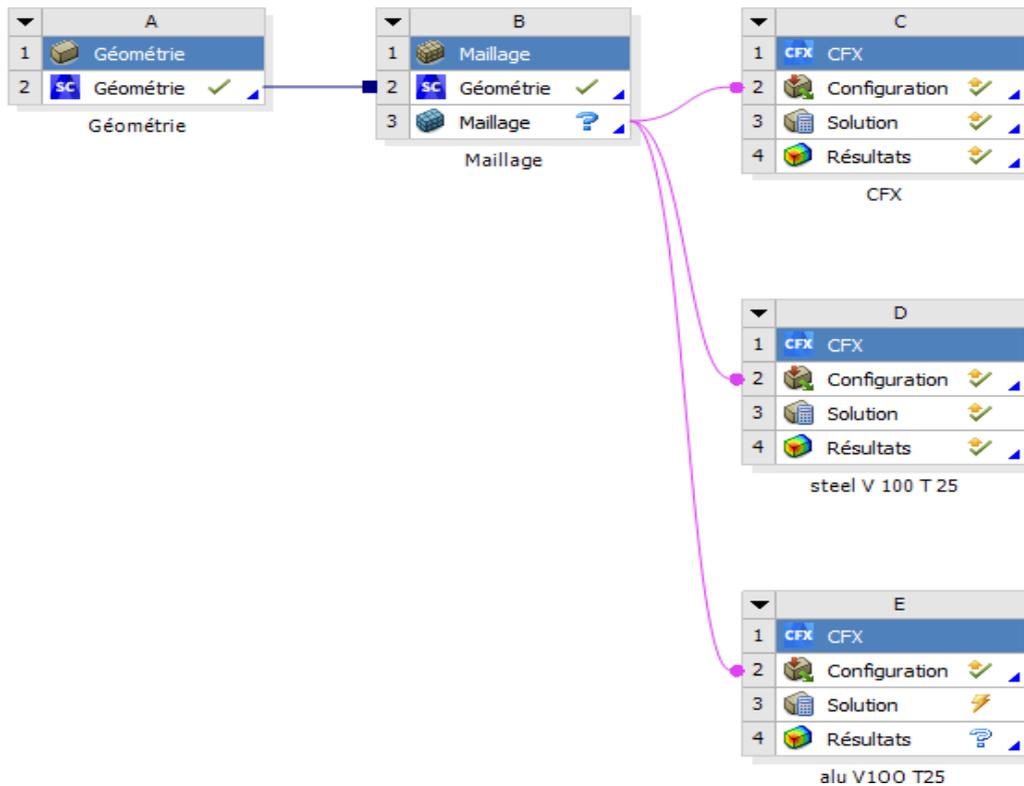


Figure III.1: Organigramme du code de calcul ANSYS.

III.5 Présentation du cas étudié

La procédure numérique de cette étude utilise la méthode des volumes finis avec des volumes de contrôles, Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel de simulations numériques de mécanique des fluides CFX 20.0.

Afin de mieux comprendre l'étude aérothermique pour notre étude (avec une vitesse d'entrée de l'air froid 50m/s et température d'entrée de l'air froid 25 °C). On va présenter les résultats obtenu pour ce cas précis. Après Nous sommes intéressés aussi à l'influence de la vitesse d'entrée d'air froid pour lequel on a testé les valeurs (10, 20, 30, 40, 50, 60 , 80, 100, 120) m/s et l'influence de la température de l'air de refroidissement sur la température max, flux de chaleur min et max et l'efficacité du refroidissement de l'aube pour lequel on a testé les valeurs (10, 20, 25, 30, 50, 80, 100, 120) C°.

III.6 Présentation de la géométrie

Nous rappelons que le présent travail s'intéresse à l'étude numérique du refroidissement des aubes de turbine à gaz HP par convection forcé. Notre première motivation est la compréhension des mécanismes physiques de ce procédé de refroidissement, pour cela et dans le but de mieux cerner le phénomène de transfert de chaleur sur l'aube de turbine. Nous avons choisi de considérer une géométrie relativement simple constituée de trois domaines :

- L'Aube.
- Le domaine air chaud
- Le domaine air froid l'aube.

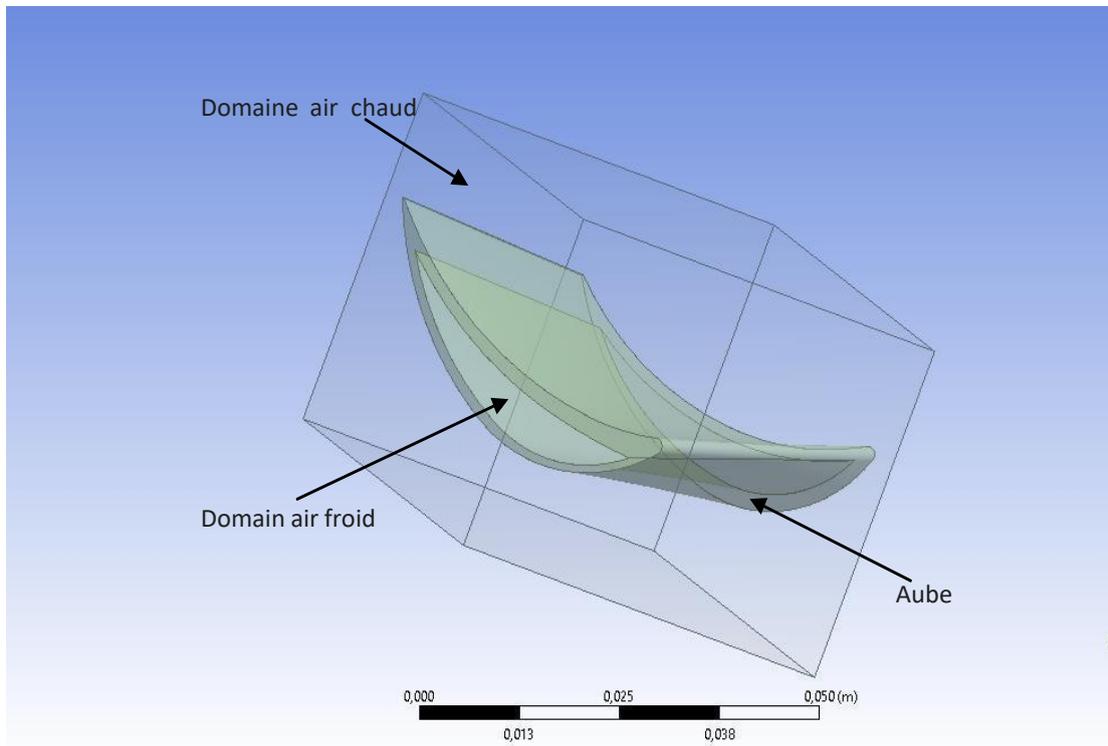


Figure III.2: Géométrie étudiée

III.7 Génération du maillage

Le code de calcul CFX dans sa version 20.0 traite plusieurs types de maillage structurés, non-structurés ou hybrides.

Un maillage structuré est généralement composé des cellules quadrilatérales en deux dimensions (maillage surfacique) et hexaédriques en trois dimensions (maillage volumique)

tandis qu'un maillage non-structuré va être composé des mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D et hexaédriques ou tétraédriques en 3D.

Dans un maillage hybride les mailles proches des parois sont des quadrilatères en 2D et des hexaèdres en 3D et les mailles du reste du domaine sont des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D. En proche paroi, il est nécessaire d'avoir des mailles les plus petites possibles pour bien modéliser les écoulements à cet endroit, cette particularité est d'autant plus importante en régime turbulent, on l'appelle (l'inflation). En 3D, les mailles qui font les liaisons entre les hexaèdres et les tétraèdres sont des prismes ou des pyramides.

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

Pour notre étude est la génération du maillage se fait a l'aide du ANSYS-meshing, En s'appuyant sur la géométrie précédente, le module permet de générer un maillage quadrilatérale en 2D (surfactive), et hexaédrique en 3D.

Puis nous définissons les sélections nommées de toutes les bordures, nous fixons les dimensionnements du maillage ainsi la nature du corps surfactive,

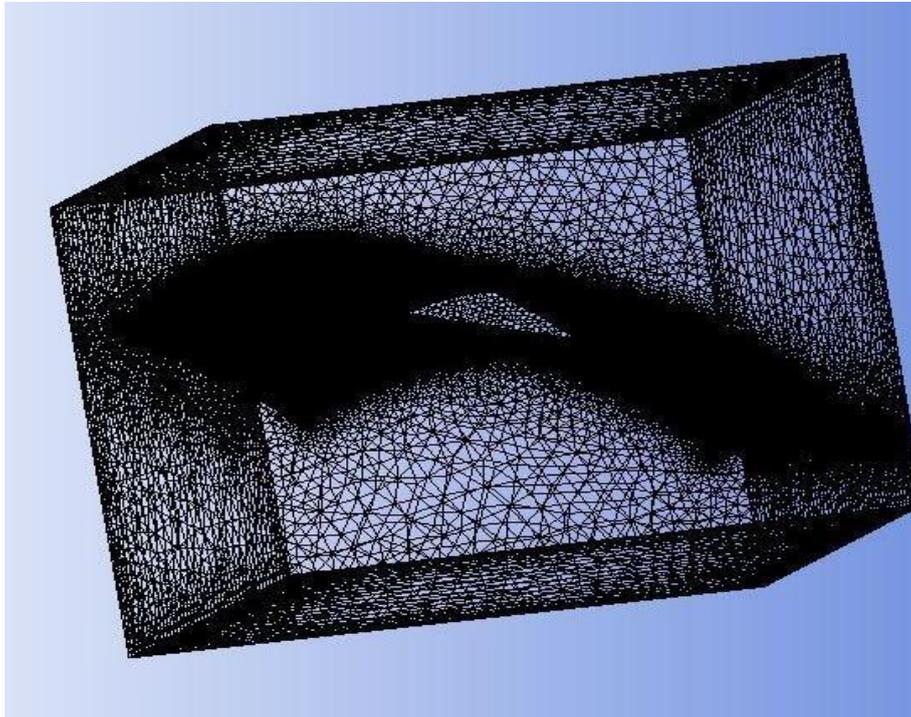


Figure III.3: Maillage de géométrie étudiée.

La taille totale de la grille est de 908440 nœuds et de 4363123 éléments

Tableau III.1:Le nombre des nœuds et des éléments .

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	908440
<input type="checkbox"/> Elements	4363123

III.8 Conditions aux limites

En plus d'un maillage adéquat, les conditions aux limites bien définies, sont très importantes pour obtenir une solution précise avec une convergence rapide.

Il faut donner au logiciel ANSYS CFX-Pré des conditions initiales qui représentent l'état de base de modèle à l'instant où on commence la simulation. Ils sont définis comme suit :

- La nature de fluide est un gaz parfait.
- Le régime subsonique

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

- Le modèle de turbulence utilisé est le modèle (k- ϵ) standard.

Il reste à déterminer les conditions aux limites dans chaque surface du domaine de calcul pour toutes les simulations, les conditions aux limites sont les suivantes :

Domaine air froid :

- L'air de refroidissement a une température d'entrée (10.20.25.30.50.80.100.120) °C.
- La vitesse de l'air de refroidissement était (10.20. 30. 40. 50.60.80.100.120) m/s.
- L'intensité de turbulence est de 5 %.

Domaine air chaud :

- L'air chaud à une température d'entrée = 650 °C.
- Pour l'air chaud écoulé avec une vitesse $U = 10$ m/s.
- L'intensité de turbulence est de 5 %.

Domaine aube :

- Matière de l'aube est l'aluminium
- Conductivité thermique = $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

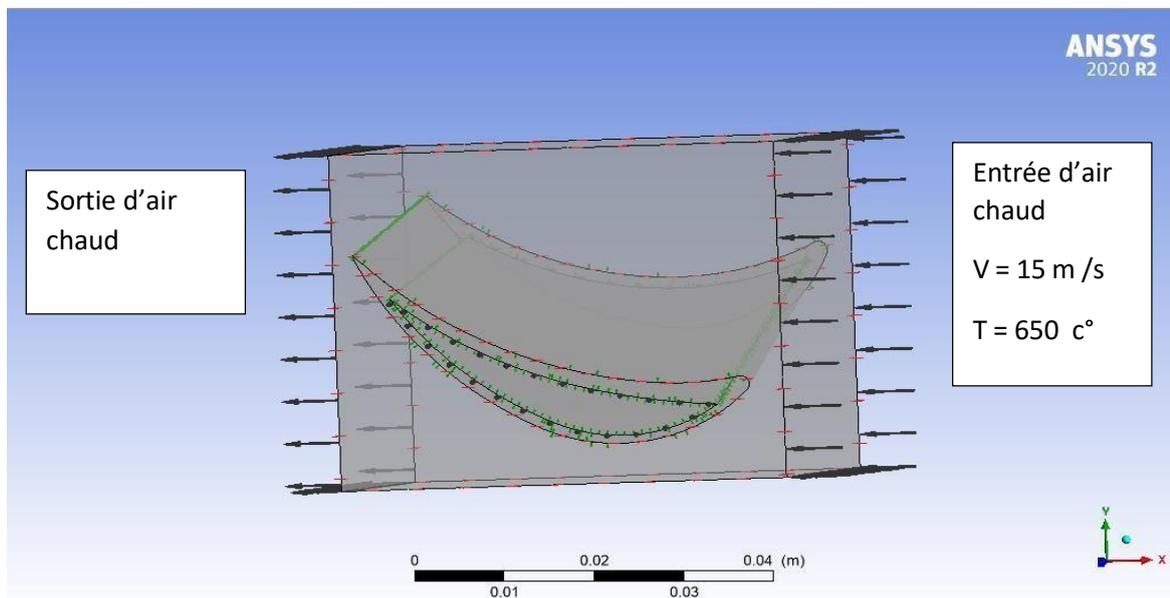


Figure III.5: Condition aux limites sur le domaine chaud.

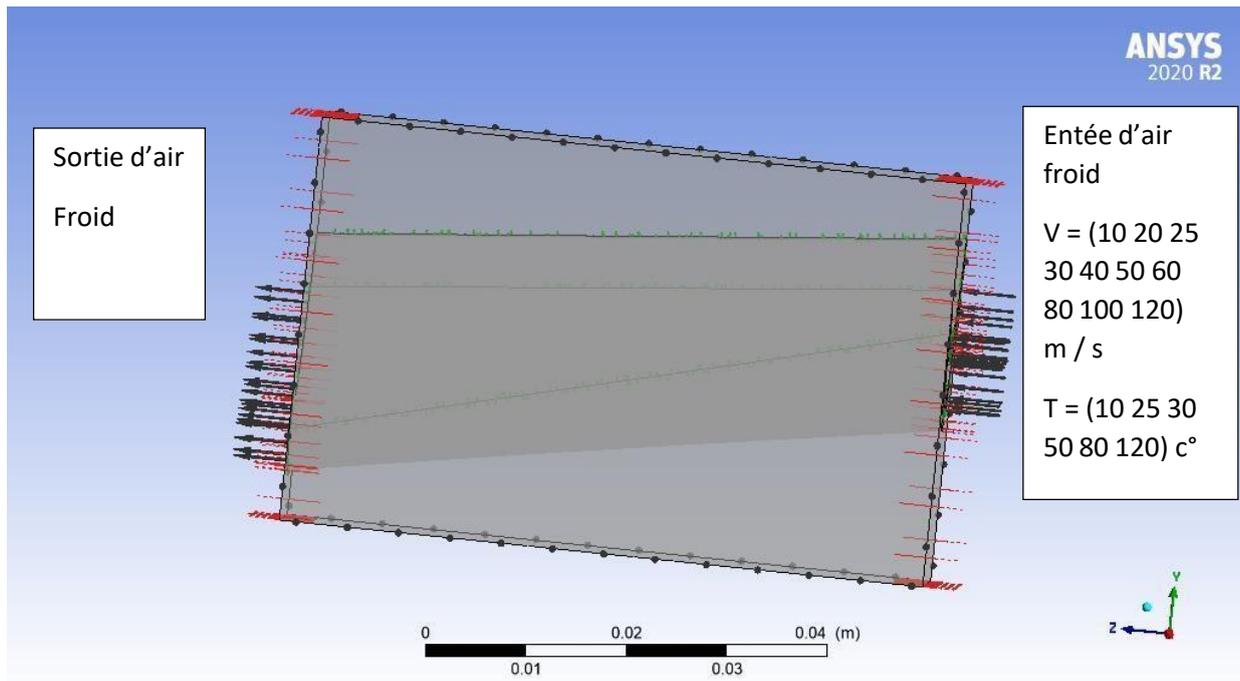


Figure III.6: Condition aux limites sur le domaine froid

III.9 Convergences des résultats

Après qu'on termine la configuration du problème on passe à l'étape de résolution. Le module solver va lancer la résolution des équations, avec des itérations successives jusqu'à la convergence en suivant un critère donné. Lors de l'exécution du programme de solveur, on observe des graphiques colorés qui indiquent la résolution du programme jusqu'à la limite de convergence.

Les graphes des résidus pour ce calcul sont présentés par la figure (III-7), Comme nous constatons la convergence est atteinte après environ 100 itérations avec tous les résidus sont inférieurs à 10^{-04} .

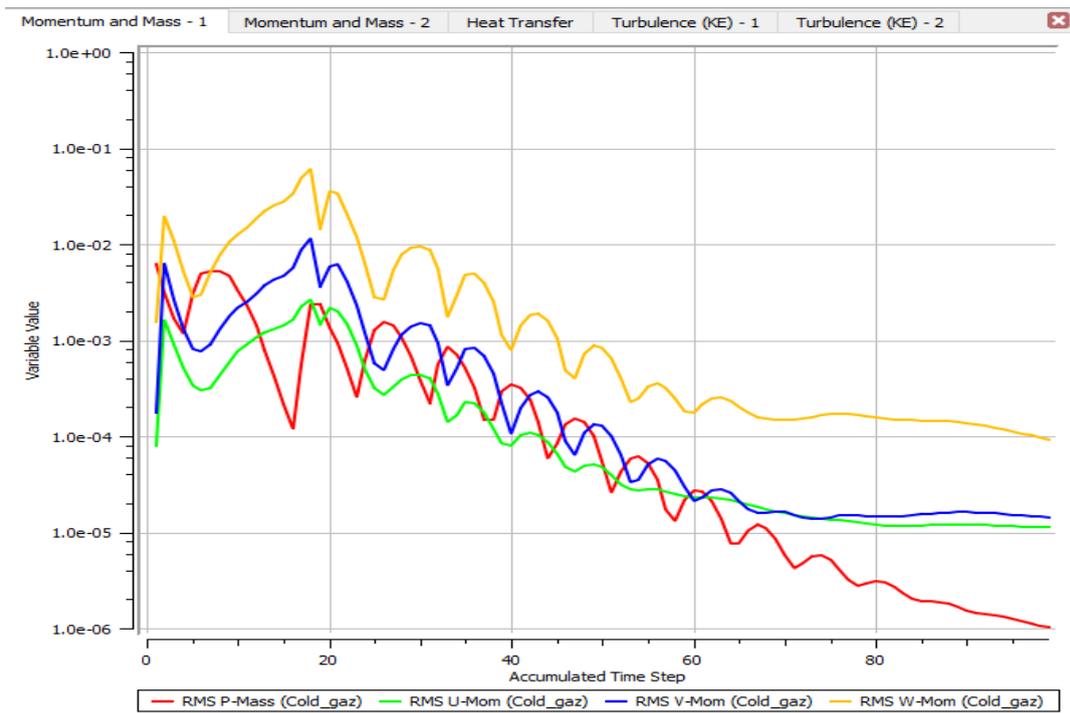


Figure III.7: Convergence des résultats.

III.10 Résultat et interprétation

Rappelons que on va représenter et interpréter les résultats d'une étude aérothermique pour notre étude (avec une vitesse d'entrée de l'air froid 50 m/s et température d'entrée de l'air froid 25 °C) et nous avons étudié l'influence de la vitesse d'air du refroidissement sur la température moyenne et maximale, le flux de chaleur moyen et maximal de l'aube et l'efficacité de refroidissement ont pris la température de l'air froid à 25 C° et ont changé la vitesse (10,20, 30, 40,50,60. 80. 100 .120) [m/s].

Puis on étudie l'influence de la température de l'air de refroidissement sur la température moyenne, le flux de chaleur moyen de l'aube et l'efficacité de refroidissement j'ai pris la vitesse de l'air froid à 50 m/s et j'ai changé la température (10, 20, 25, 30, 50,80, 100 120) [C°].

Après la réalisation de la géométrie et son maillage et par suite utilisé les conditions initiales et limites de notre géométrie on a pu obtenir les résultats de calculs exécutés.

III.10.1 Interprétation des résultats

III.10.1.1 Champ thermique et champ de vitesse

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

Donne cette partie on va présenter le champ de vitesse et le champ thermique sur toute la géométrie avec une vitesse d'entrée de l'air froid 50 m/s et une température d'entrée de l'air froid 25 °C.

➤ *Champ thermique*

Domaine d'air chaud :

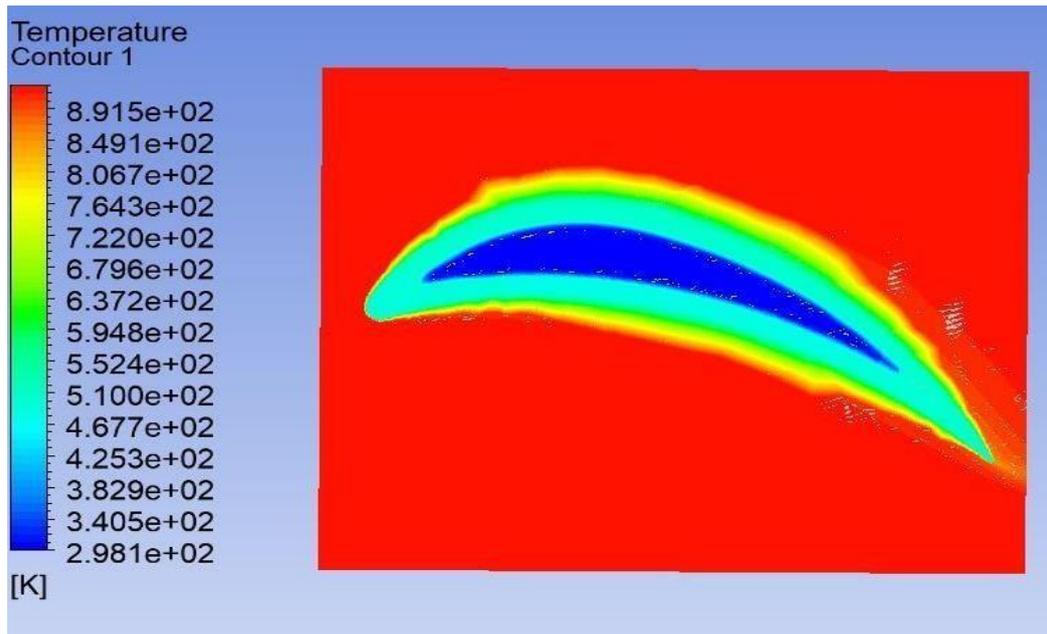


Figure III.10: Contour de température sur le domaine d'air chaud.

Dans ce qui suit, on présente le champ de température dans le domaine de fluide chaud. La figure (III-10) représente le contour de température. L'observation de ce contour montre que le bord d'attaque est soumis à une grande température qui est de l'ordre de 891.5K, elle diminue progressivement jusqu'à avoir 298.1K au bord de fuite. Cette chute de température est due à l'injection de fluide froid.

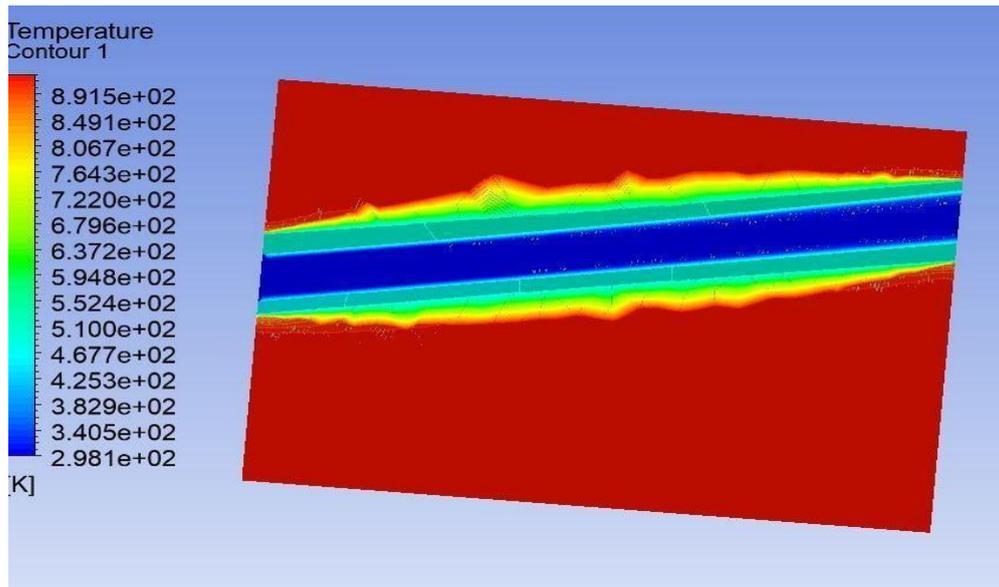


Figure III.11 : contour de température domaine d'air chaud

Domaine d'air froid :

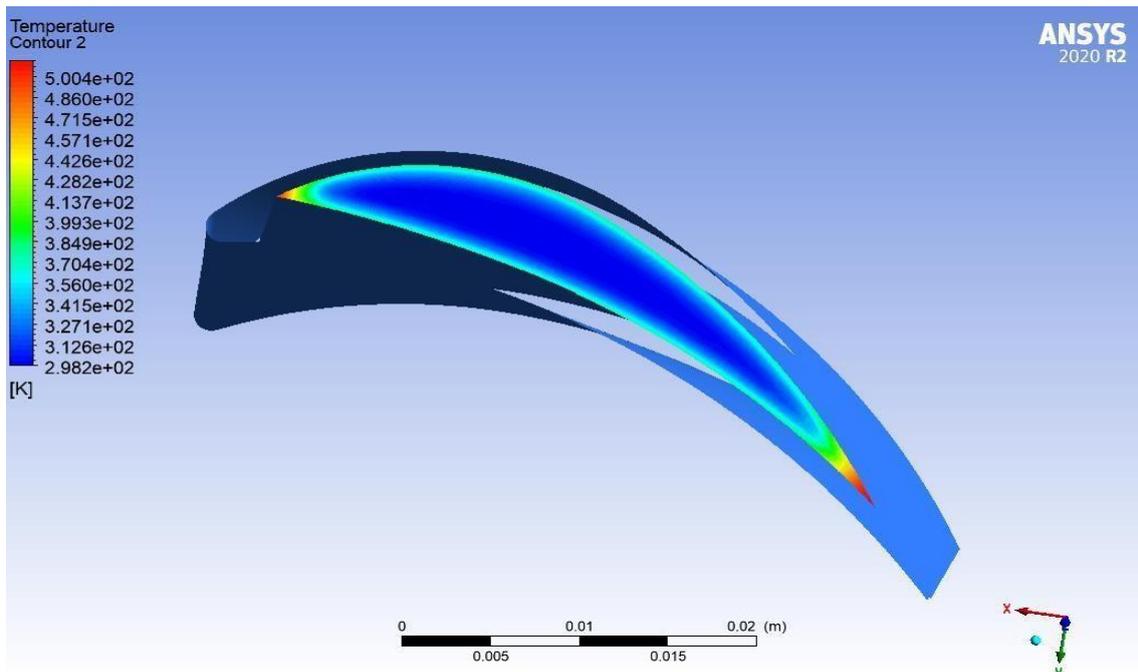


Figure III.12: Contour de température sur le domaine d'air froid.

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

Imposée comme condition à la limite (25 °C). Sur la figure (III-12) on note une température uniforme au domaine d'air froid égale presque à la température imposée.

Domaine aube :

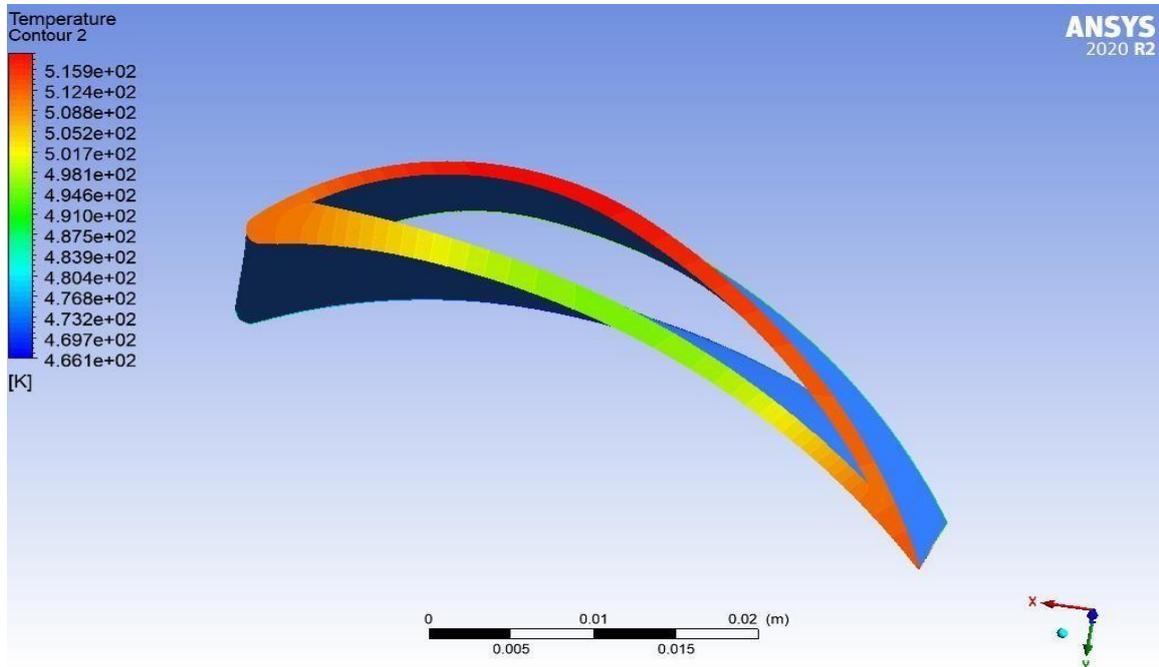


Figure III.13: Contour de température sur le domaine aube.

On note qu'au niveau de l'aube, la variation de température est remarquable, dû à l'effet de refroidissement, il y a donc transfert de chaleur par convection entre l'air froid et l'aube, ensuite cette chaleur est transférée par conduction dans l'aube. En raison de la conductivité thermique élevée de l'aluminium, la température de l'aube est presque uniforme, varie entre 466 K et 515.9K.

On remarque que la température la plus élevée est au niveau de l'extrados, et la température la plus basse est trouvée au niveau de l'intrados.

➤ Champ de vitesse

Domaine d'air chaud :

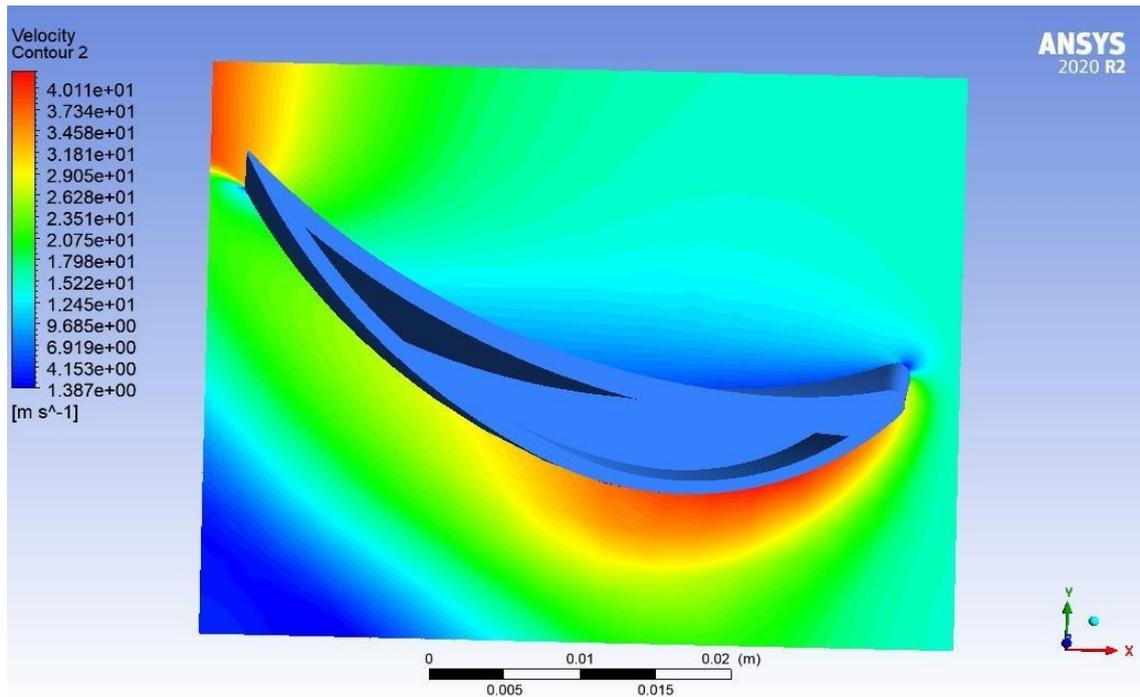


Figure III.14: Contour de vitesse sur le domaine d'air chaud.

D'après les contours des vitesses qui traduisent la variation de la vitesse d'écoulements entre (1.38–40,1) m/s, on remarque que l'écoulement de l'air chaud arrive à une vitesse de 15 m/s qui ;par la suite ; est en contact avec le bord d'attaque de l'aube ou il y a une zone de faible vitesse qui est expliqué par le freinage du fluide lors de son impact avec la surface.

Ce qui concerne l'extrados, on observe une accélération du fluide qui est du à la strangulation de l'espace inter-aube qui tend à augmenter la vitesse (vérification du principe $\rho v s = const$). Ce phénomène crée une zone de faible pression.

On voit ainsi une zone de faible vitesse au niveau de l'intrados qui est expliquée par la recirculation du fluide par le phénomène de la concavité de la surface qui fait face à l'écoulement et qui tend à impacter le fluide et fait naissance au phénomène d'un gradient de pression très élevé.

Domaine d'air froid :

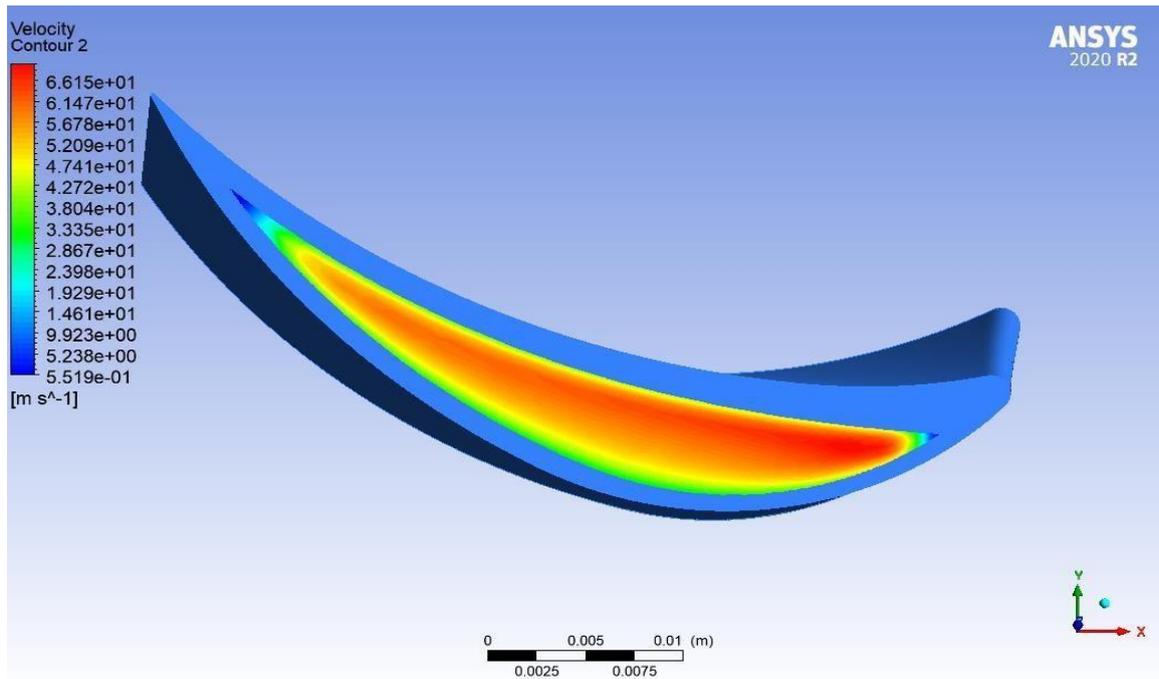


Figure III.15: Contour de vitesse sur le domaine d'air froid.

Sur la figure (IV.15) on note une vitesse uniforme au domaine d'air froid qui est égale à la valeur imposée comme condition à la limite (50 m/s). Une accélération du fluide est observée de part et d'autre du profil.

On remarque qu'il y a une accélération du fluide à l'intérieur de bord d'attaque, cela peut être observé dans la région rouge près de l'entrée du canal, cette augmentation de la vitesse est attribuée à la réduction de la section de canal et elle est requise par la conservation de masse car la même quantité d'air est déplacé à travers la plus petite section du canal.

III.10.1.2 L'influence de la vitesse et de la température d'air de refroidissement sur la température moyenne, le flux de chaleur moyen de l'aube et l'efficacité de refroidissement

On a étudié l'influence de vitesse et de température d'air de refroidissement sur les paramètres de l'aube (température moyenne, flux de chaleur moyen) ainsi que l'efficacité de refroidissement qui définit comme un paramètre réuni le niveau du refroidissement réalisé en considérant que le refroidissement parfait se produit quand la température moyenne de la paroi de l'aube est refroidie à celui du fluide froid . Est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{T_c - T_m}{T_c - T_f}$$

T_c : La température de gaz chaud ;

T_m : La température moyenne de la paroi à refroidir;

T_f : La température de l'air froid.

III.10.1.2.1 L'influence de la vitesse d'air de refroidissement sur la température moyenne, le flux de chaleur moyen de l'aube et l'efficacité de refroidissement

➤ pour l'aluminium :

Tableau III.2: La température moyenne et l'efficacité de refroidissement du l'aube pour une vitesse d'air froid.

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K]	Température Moyenne de l'aube [K]	Flux de chaleur moyen de l'aube [W]	L'efficacité de refroidissement
10	25	711.01	699.32	20627	0.381
20	25	632.46	615.17	28850	0.517
30	25	581.15	561.04	33852	0.6
40	25	545.12	523.91	37282	0.656
50	25	518.57	496.83	39797	0.698
60	25	498.24	496.22	41614	0.729
80	25	469.05	446.83	44479	0.773
100	25	448.32	425.88	46526	0.809
120	25	431.18	408.86	48185	0.830

Après plusieurs calculs effectués en changeant la vitesse de l'air froid et en fixant la température de l'air froid. On a arrivé aux certains résultats observés dans les figures (IV 16. IV17. IV18)

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

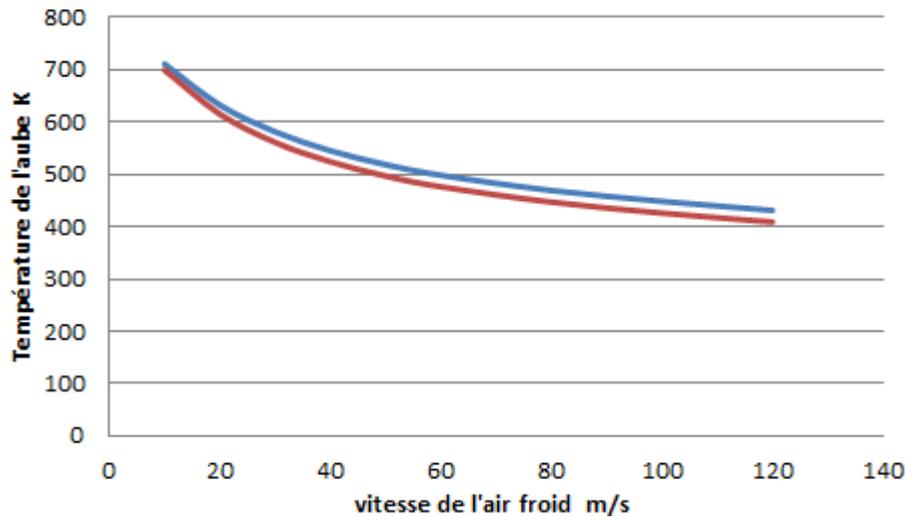


Figure III.16: Température moyenne et maximale de l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid.

D'après la figure ci-dessus, On remarque qu'il y a une relation inverse entre la température de l'aube et la vitesse d'air froid, quand la vitesse de l'air froid augmente, la température de l'aube diminue, l'échange de chaleur diminue avec l'augmentation de la température.

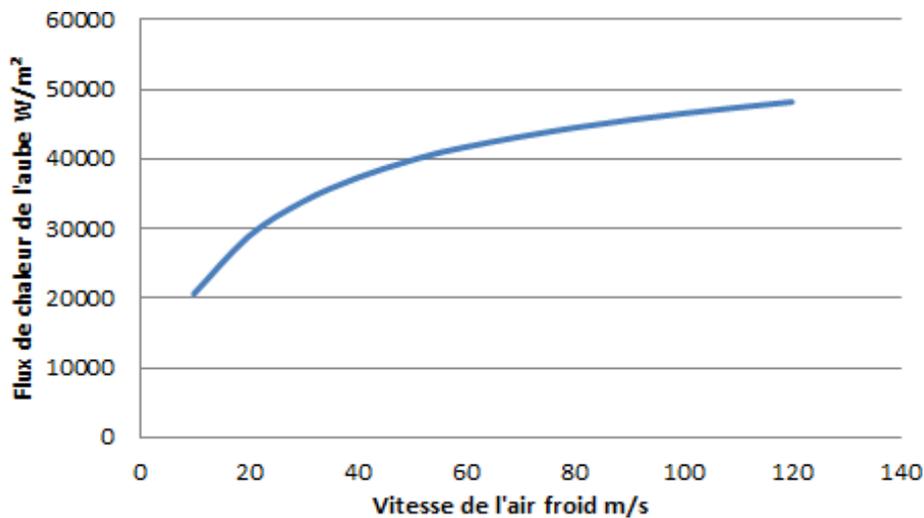


Figure III.17: Flux de chaleur moyen de l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid.

La figure (III.17) montre que : Si on fait augmenter la vitesse de l'air froid, on aura un grand débit d'air, donc on va augmenter ainsi la capacité thermique du transfert de chaleur due à l'augmentation du coefficient de convection et la grande quantité d'air passant par unité de temps. Ainsi, la zone de refroidissement serait relativement plus grande.

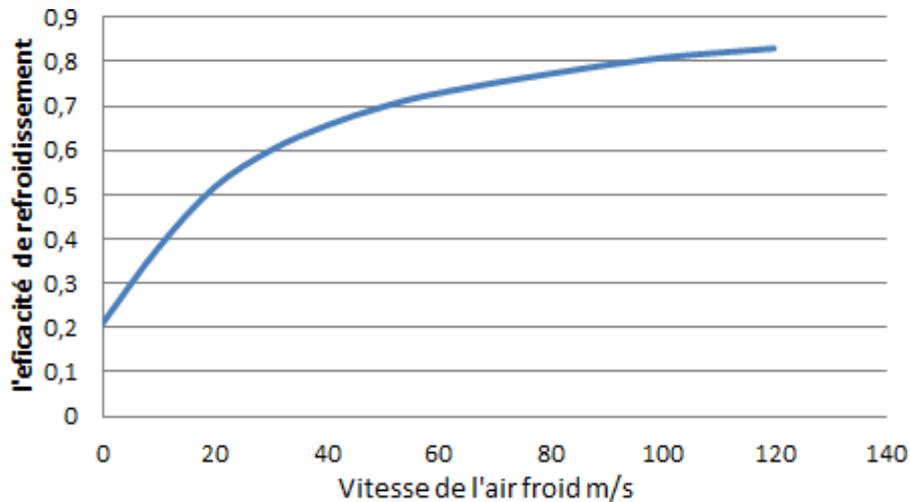


Figure III.18: Efficacité de refroidissement de l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid.

Sur la Figure III -18 on représente la variation de l'efficacité de refroidissement en fonction de la vitesse d'air froid, cela montre que l'efficacité de refroidissement augmente avec l'augmentation de la vitesse de l'air froid; donc l'aube est refroidi d'une manière plus accentuée quand la vitesse de l'air froid est plus grande.

III.10.1.2.2 L'influence de la température de l'air de refroidissement sur la température moyenne et le flux de chaleur moyen de l'aube

Le tableau ci-après représente l'influence de la température de l'air de refroidissement sur la température moyenne et le flux de chaleur moyen de l'aube en regroupant les valeurs de la vitesse de l'air froid avec les températures, le flux de chaleur et l'efficacité de refroidissement

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

Tableau III.3: La température moyenne et l'efficacité de refroidissement de l'aube en fonction de la température d'air froid.

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K]	Température Moyenne de l'aube [K]	Flux de chaleur moyen de l'aube [W]	L'efficacité de refroidissement
50	10	505.45	482.85	41127	0.703
50	20	514.25	492.24	40235	0.7
50	25	518.57	496.83	39363	0.698
50	30	522.85	501.38	37626	0.696
50	50	539.5	519.17	35151	0.689
50	80	564.01	545.11	33556	0.679
50	100	579.85	561.87	32000	0.673
50	120	595.33	578.24	39797	0.668
50	150	617.6	601.96	29704	0.659

Après plusieurs calculs effectués en changeant la température de l'air froid et en fixant la vitesse de l'air froid. On discutera les résultats d'après les figures (III.19 ; III.20 ; III.21)

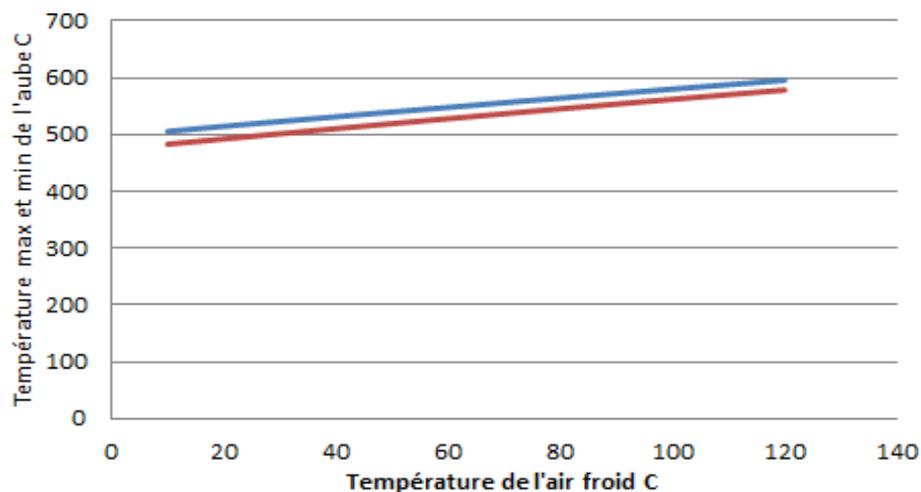


Figure III.19: Température moyenne de l'aube par rapport à la température de l'air froid.

Dans cette figure, on remarque qu'il y a une élévation de température de l'aube avec

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

L'augmentation de la température de l'air froid, ce qui confirme les principes de transfert de chaleur.

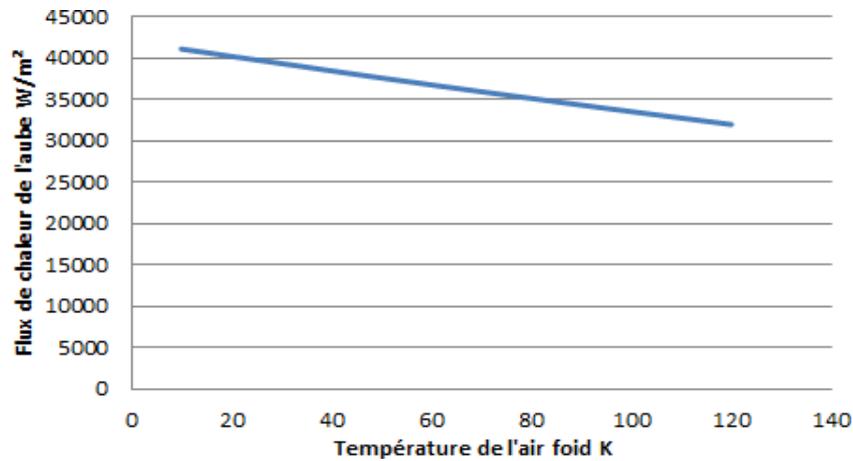


Figure III.20: Flux de chaleur moyen de l'aube par rapport à la température de l'air froid.

D'après la figure ci-dessus, on note que le flux de chaleur de l'aube diminue à chaque fois lorsqu'on augmente la température de l'air froid.

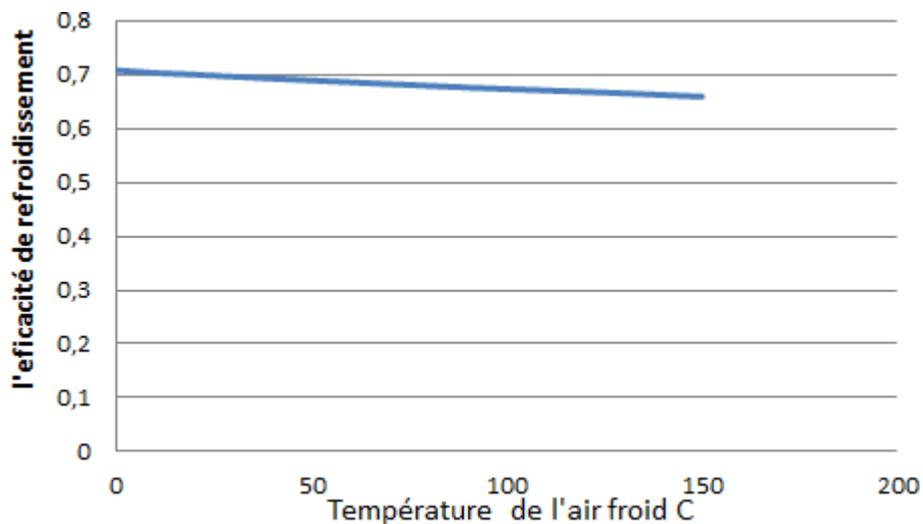


Figure III.21: Efficacité de refroidissement de l'aube par rapport à la température de l'air froid.

On peut mentionner que l'efficacité du processus de refroidissement diminue quand la température d'air froid et la température moyenne de l'aube augmente, ce qui confirme la loi d'efficacité de refroidissement.

On résume d'après les résultats précédents, lorsqu'on varie la vitesse de l'air froid et fixe la température de l'air froid, on a obtenu un bon refroidissement, et lorsque on varie la

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

température de l'air froid et fixe la vitesse de l'air, on a obtenu un faible refroidissement, donc l'aube est refroidi d'une manière plus accentuee quand la vitesse de l'air froid est plus grande.

III.10.1.1.1 L'influence de la vitesse d'air de refroidissement sur la température moyenne, le flux de chaleur moyen de l'aube et l'efficacité de refroidissement

➤ Pour l'acier :

Tableau III.4 : La température maximale et moyenne et l'efficacité de refroidissement du l'aube pour une vitesse d'air froid.

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K]	Température Moyenne de l'aube [K]	Flux de chaleur moyen de l'aube[W]	L'efficacité de refroidissement
10	25	729.31	695.92	20440	0.386
20	25	655.77	610.35	28325	0.523
30	25	607.6	558.22	33189	0.604
40	25	573.155	522.59	36551	0.658
50	25	546.61	496.4	39042	0.698
60	25	526.37	476.45	40931	0.728
80	25	496.33	447.68	43709	0.772
100	25	472.74	424.7	46014	0.807
120	25	459.49	411.02	47538	0.827

Après plusieurs calculs effectués en changeant la vitesse de l'air froid et en fixant la température de l'air froid. On obtient les résultats sur les figures ci-après :

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

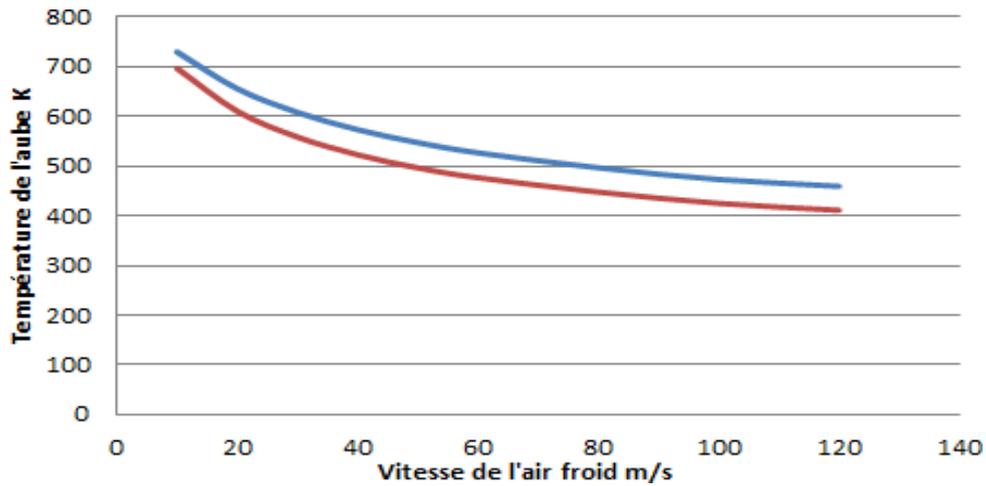


Figure III.22: Température moyenne de l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid.

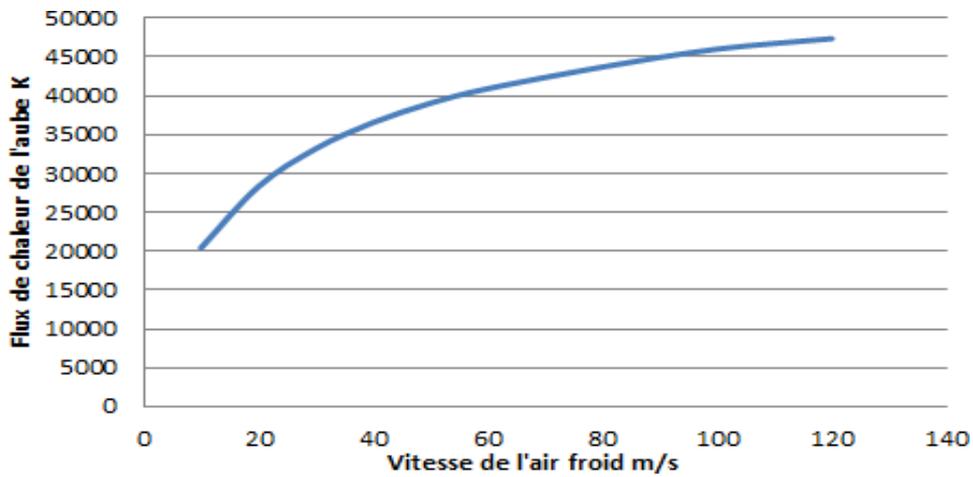


Figure III.23: Flux de chaleur moyen de l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid.

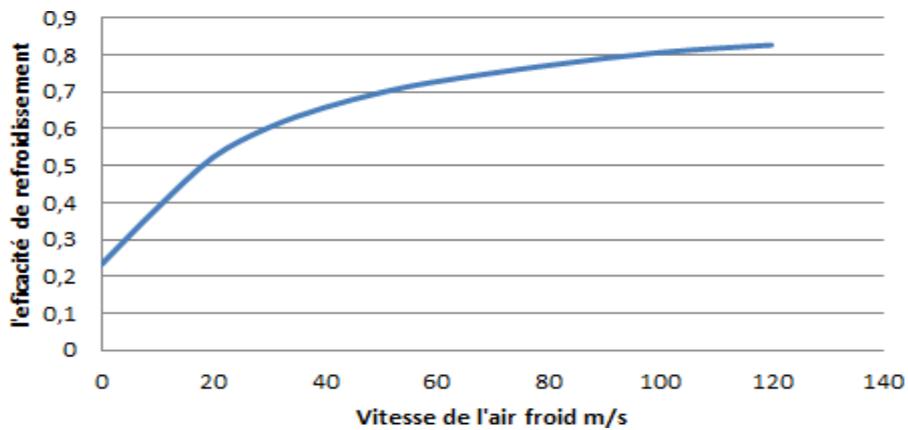


Figure III.24: Efficacité de refroidissement du l'aube par rapport à la vitesse de l'air froid

III.10.1.1.1 L'influence de la température de l'air de refroidissement sur la température moyenne et le flux de chaleur moyen de l'aube

Tableau III.5 : La température maximale moyenne et l'efficacité de refroidissement de l'aube en fonction de la température d'air froid.

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K]	Température Moyenne de l'aube [K]	Flux de chaleur moyen de l'aube[W]	L'efficacité de refroidissement
50	10	534.78	482.6	40350	0.703
50	20	542.1	491.63	39470	0.7
50	30	511.06	501.01	38611	0.696
50	40	559.01	509.97	37767	0.693
50	50	566.82	518.08	36936	0.689
50	60	574.54	527.54	36115	0.686
50	80	589.69	544.67	34510	0.680
50	100	604.49	561.41	32945	0.674
50	120	618.94	577.76	31420	0.668

Après plusieurs calculs effectués en changeant la vitesse de l'air froid et en fixant la température de l'air froid. D'après les figures (III.25, 26 ,27) on a arrivé aux certaines résultats

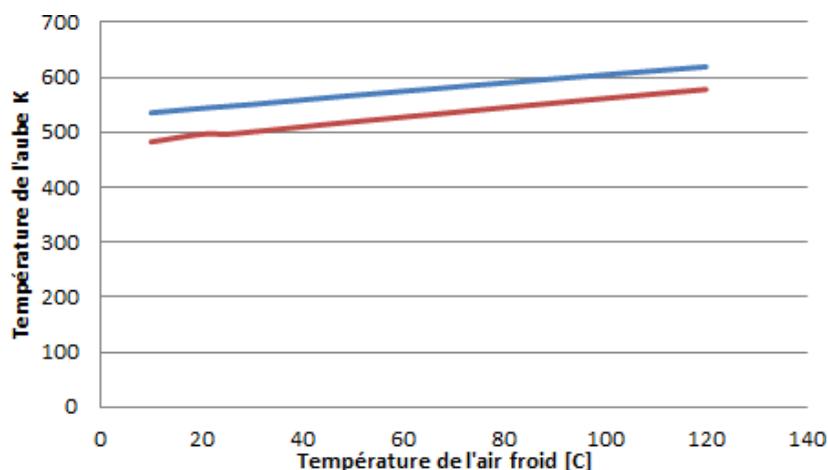


Figure III.25 : Température moyenne et max de l'aube par rapport à la température de l'air froid.

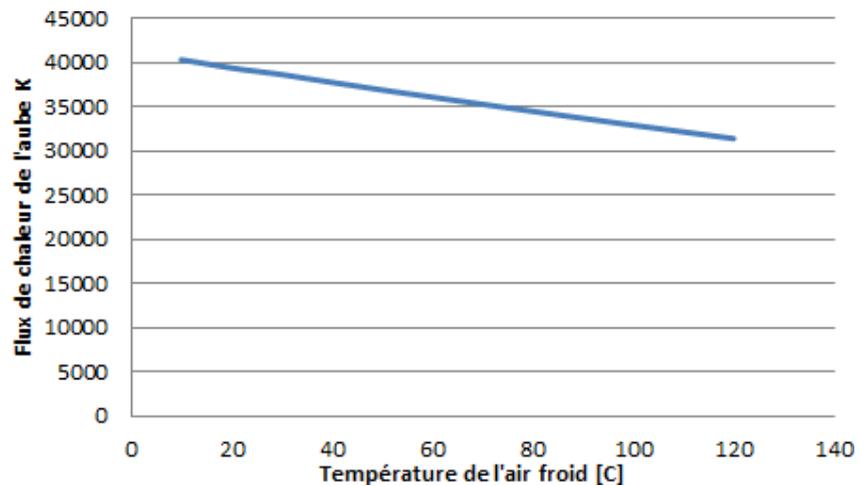


Figure III.26: Flux de chaleur moyen de l'aube par rapport à la température de l'air froid.

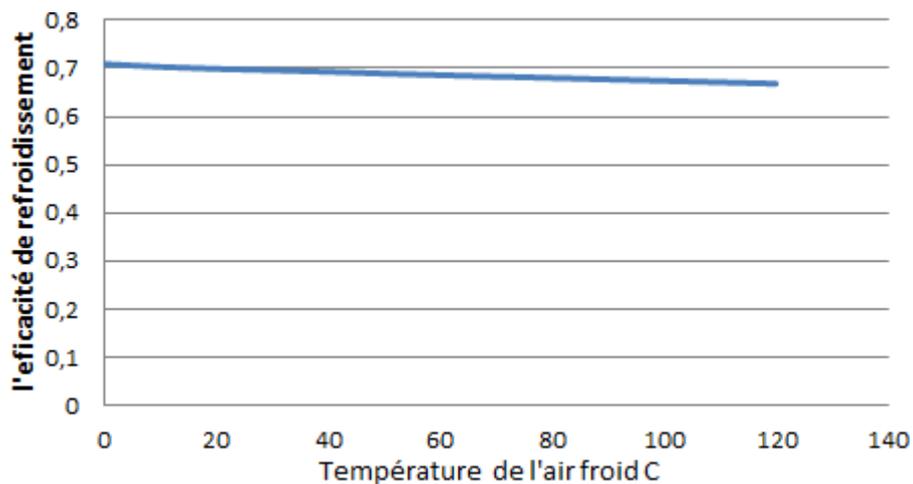


Figure III.27: Efficacité de refroidissement du l'aube par rapport à la température de l'air froid

➤ **Interprétation des résultats pour l'acier :**

A partir de ces résultats, nous avons remarqué que l'augmentation de la vitesse de l'air froid nous donne le meilleur refroidissement par contre à l'augmentation de la température de l'air froid qui donne l'inverse.

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

III.10.1.2 Comparaison entre les résultats de l'aluminium et l'acier

- Variation de la vitesse à une température constante :

Tableau III.6 : Comparaison entre les résultats de l'aluminium et l'acier

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K] Aluminium	Température Maximale de l'aube [K] acier	Flux de chaleur moyen de l'aube Aluminium [W]	Flux de chaleur moyen De l'aube acier [W]
10	25	711.01	729.31	20627	20440
20	25	632.46	655.77	28850	28325
30	25	581.15	607.6	33852	33189
40	25	545.12	573.155	37282	36551
50	25	518.57	546.61	39797	39042
60	25	498.24	526.37	41614	40931
80	25	469.05	496.33	44479	43709
100	25	448.32	472.74	46526	46014
120	25	431.18	459.49	48185	47538

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE THERMIQUE

➤ La variation de la température à une vitesse constante :

Tableau III.7: Comparaison entre les résultats de l'aluminium et l'acier

Vitesse de l'air froid [m/s]	Température de l'air froid [°C]	Température Maximale de l'aube [K] aluminium	Température Maximale de l'aube [K] acier	Flux de chaleur moyen de l'aube [W] aluminium	Flux de chaleur moyen de l'aube [W] acier
50	10	505.45	534.78	41127	40348
50	20	514.25	542.1	40235	39423
50	25	518.57	547.08	39797	39044
50	30	522.85	551.01	39363	38670
50	50	539.5	566.82	37626	36936
50	80	564.01	574.54	35151	34510
50	100	579.85	589.69	33556	32946
50	120	595.33	618.93	32000	31422

D'après la comparaison entre les résultats de l'acier et de l'aluminium, on peut noter que :

- La température maximale de l'aube d'acier est plus élevée par rapport la température maximale de l'aube d'aluminium (la différence de température est 20 à 30°C)
- Le flux de chaleur de l'aube d'aluminium est plus élevé par rapport au flux de chaleur de l'aube d'acier (la différence est d'environ 900 à 1200 [W]).
- Le meilleur transfert de chaleur était dans l'aube en aluminium, contrairement au l'aube en acier (la conductivité thermique d'aluminium est plus élevé par rapport à la conductivité thermique de l'acier), alors ; le meilleur refroidissement est pour l'aube en aluminium .

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le logiciel ANSYS CFX et les étapes de la simulation numérique thermique. Dans le même chapitre on a présenté les méthodes numériques de simulation (volume finis, élément finis, défient finis). La présentation de cas étudie, la description et la géométrie, la génération de maillage et les conditions aux limites faites aussi partie de ce chapitre.

Les résultats de simulation obtenus du refroidissement par convection forcée avec plusieurs configurations de vitesse et température d'entrés d'air froid montrent que l'efficacité de refroidissement augmente proportionnellement avec l'augmentation de la vitesse et la diminution de la température d'écoulement d'air froid, on note que il y-a une différence entre l'efficacité de refroidissement de l'aube en acier et en aluminium à cause la conductivité thermique de l'aluminium plus élève par rapport l'acier donc quand la conductivité thermique plus grand le transfert de chaleur est élève ainsi l'efficacité de refroidissement est bonne.

IV.1 Introduction

Dans les turbines à gaz, l'aube d'une turbine subit des charges mécaniques et aérodynamiques. Une analyse mécanique est nécessaire pour s'assurer que l'aube peut supporter ces charges pendant le fonctionnement de la turbine.

Dans cette étude, l'analyse a été réalisée en utilisant ANSYS STRUCTURE STATIQUE qui est un outil efficace pour modéliser les contraintes et les déformations dans notre aube, les contraintes mécaniques et les déformations causées par la charge de pression mécanique du fluide sont calculées au moyen de l'analyse par éléments finis (FEA) qui utilise la distribution de la pression sur la surface de l'aube, calculée par la simulation numérique de l'écoulement (CFD) comme une condition limite majeure.

IV.2 Modélisation mathématique

- **Equations de la Mécanique des structures**

Afin de déterminer la distribution des déplacements statiques ou dynamiques dans une structure évoluant sous un ensemble de charges de force externe et de température prescrites, les équations de base de la théorie de l'élasticité doivent être formulées et résolues. Pour une structure générale tridimensionnelle. Dans cette section, toutes les équations de base de l'élasticité sont résumées, et le principe du travail virtuel, sur lequel la méthode des éléments finie est basée, est présenté pour fournir des solutions numériques à ces équations [18] :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{IV.1}$$

La contrainte normale et la déformation normale sont en général linéairement proportionnelles les uns aux autres et la constante de proportionnalité est appelée Le module de Young « E ». Dans le cas d'une contrainte uni-axiale, les déformations latérales sont également liées par le rapport de Poisson « ν ». Si le matériau est isotrope, c'est-à-dire si ses propriétés mécaniques sont non dépendantes de la direction, tous les modules de Young et les rapports de Poisson sont identiques.

De plus, dans les relations linéaires contrainte-déformation, toutes les composantes de la contrainte sont données par superposition linéaire. Ce qui donne la relation de comportement suivant : [18]

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-2\nu)\varepsilon_y + \delta_y \nu (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})] \tag{IV.3}$$

Enfin, les équations de mouvement reliant les composantes de la contrainte sont dérivées en considérant l'équilibre des forces internes et externes agissant sur une petite particule en mouvement avec un volume unitaire.

- **Equation de Lamé-Navier**

Afin de trouver directement un champ de déplacement tel que le champ de contrainte associé sera en équilibre, on peut combiner toutes les équations en volume du problème en une seule de la manière suivante. L'équation d'équilibre s'écrit : [18]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} + \vec{f}_v = \rho \vec{\gamma} \quad \text{IV.4}$$

En écriture indicelle, l'équation d'équilibre peut donc se réécrire : [18]

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 2\mu \cdot \varepsilon_{ij,j} + \lambda(\varepsilon_{kk} \delta_{ij})_{,j} + f_i \quad \text{IV.5}$$

IV.3 Influence de refroidissement sur les performances mécaniques de l'aube (à faible refroidissement et à refroidissement élevé)

IV.3.1 Les étapes de la simulation

Dans cette étude, l'analyse a été réalisée en utilisant **ANSYS structure statique** pour définir et calculer les contraintes mécaniques et la déformation dans l'aube pour un refroidissement faible et élevé ; on suit les étapes suivantes :

- Géométrie et maillage.
- Propriétés du matériau et choix du critère de résistance.
- Conditions aux limites.
- Résultats et discussions.

➤ Structure du code ANSYS

ANSYS CFX est un module principal de la suite de calcul ANSYS Workbench qui se compose de plusieurs modules communiquant entre eux comme représentés sur la figure IV.1. Un logiciel qui permet la réalisation de la géométrie et du maillage qui sont nécessaires pour exécuter une analyse numérique d'écoulement, en plus des modules pour la résolution des équations et la visualisation des résultats.

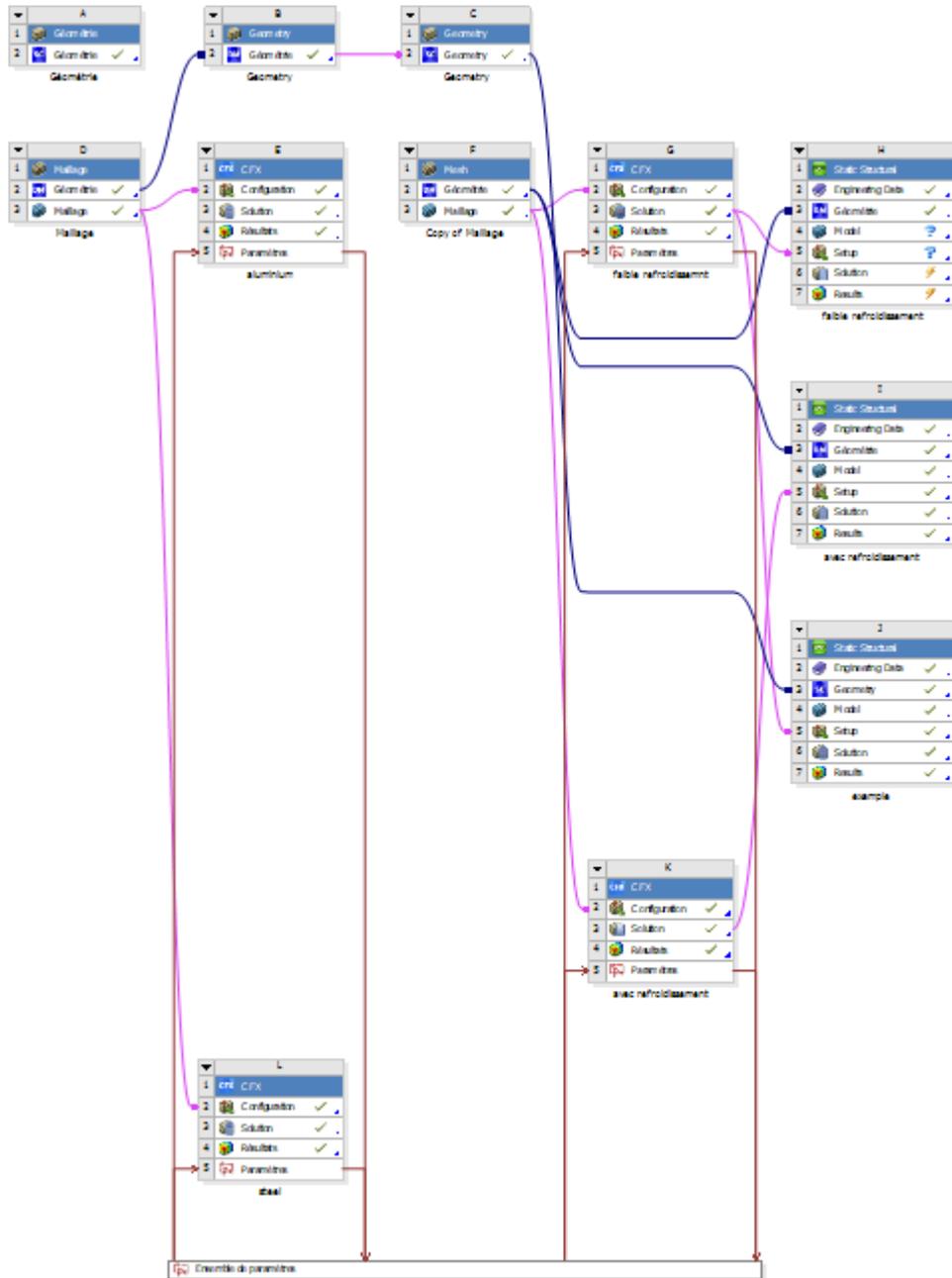


Figure IV.1 : Une fenêtre de travail ANSYS Workbench

❖ **Géométrie et maillage**

Après l'étude précédente de simulation d'écoulement on prend la même géométrie en éliminant le domaine chaud et froid, pour effectuer l'analyse des contraintes sur l'aube.

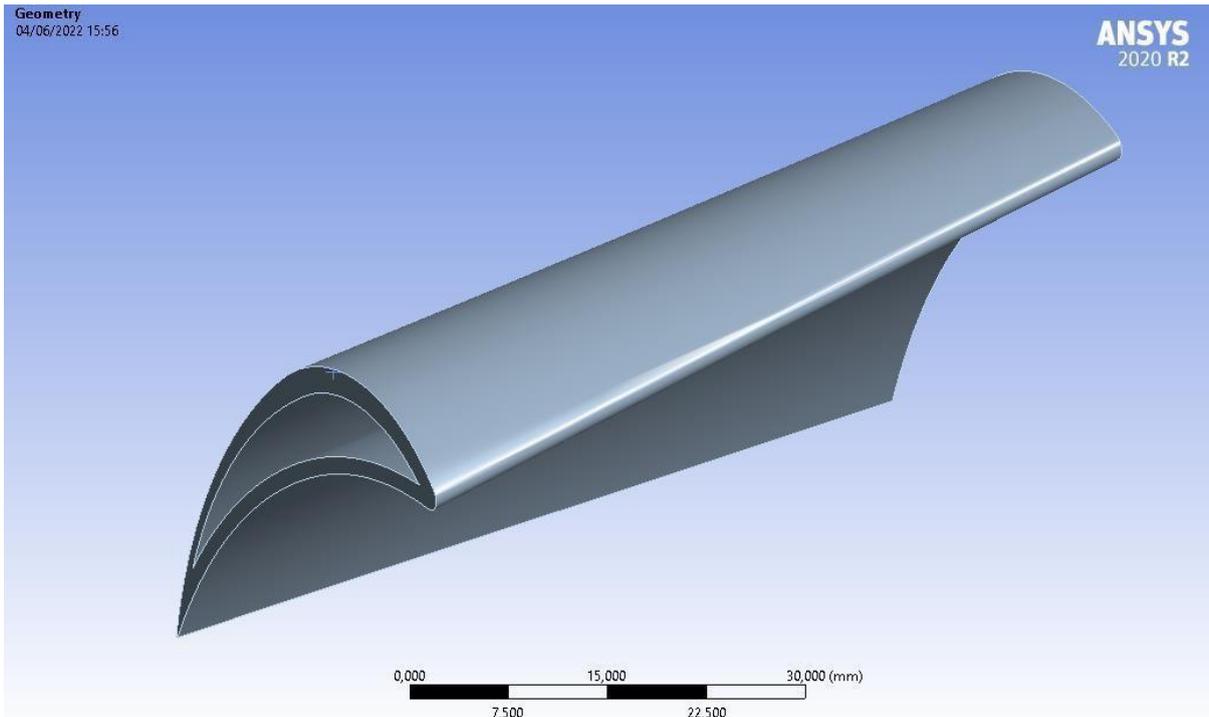


Figure IV.2 : Géométrie d'une aube 3D

❖ Maillage :

Pour améliorer la précision du calcul il faut choisir des nombres et tailles suffisants des éléments et des nœuds

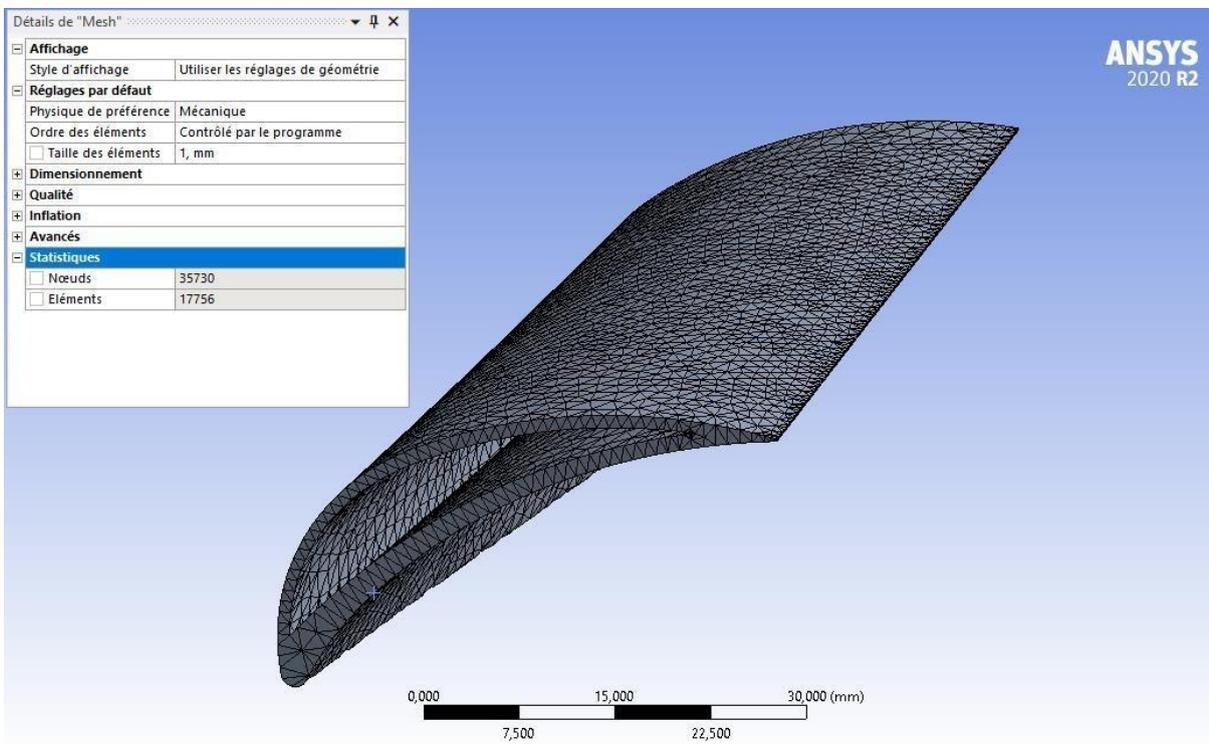


Figure IV.3 : Maillage d'aube

❖ Propriétés du matériau et choix du critère de résistance

Tableau IV.1: Propriété de l'acier standard

Masse volumique	7850 kg/m ³
Module de Young	200 Gpa
Coefficient de Poisson	0.3
Conductivité thermique	0,060500 W/mm·°C
Module de compression	166 Gpa
Contrainte limite de traction	250 Mpa
Contrainte limite élastique (σ _{el})	250 Mpa
Contraintes limite de rupture	460Mpa

Acier standard

Structural

▼ Elasticité isotrope

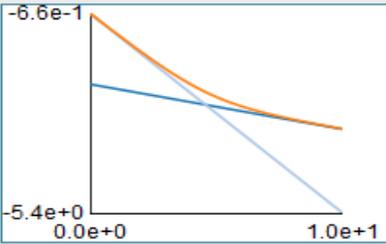
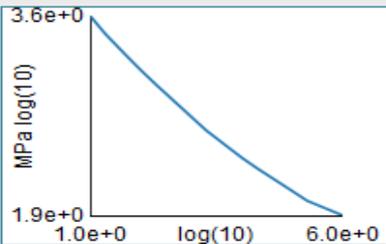
Dériver de	Module de Young et coefficient de Poisson
Module de Young	2e+05 MPa
Coefficient de Poisson	0,30000
Module d'élasticité	1,6667e+05 MPa
Module de cisaillement	76923 MPa
Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique	1,2e-05 1/°C
Limite à la rupture en compression	0 MPa
Limite élastique en compression	250,00 MPa
Paramètres de fatigue basée sur les déformations	
Courbe S-N	
Limite à la rupture en traction	460,00 MPa
Limite élastique en traction	250,00 MPa

Figure IV.4: propriétés élastiques de l'acier standard (ANSYS)

❖ Conditions aux limites :

Les conditions aux limites pour l'aube sont les suivantes :

- Les déplacements nuls (appui fixe) sont supposés au bord supérieur ou inférieur de l'aube (**Figure IV.5**)
- Le champ de pression est appliqué comme condition de chargement sur toute la surface extérieure d'aube, et distribué sur la surface extérieure.

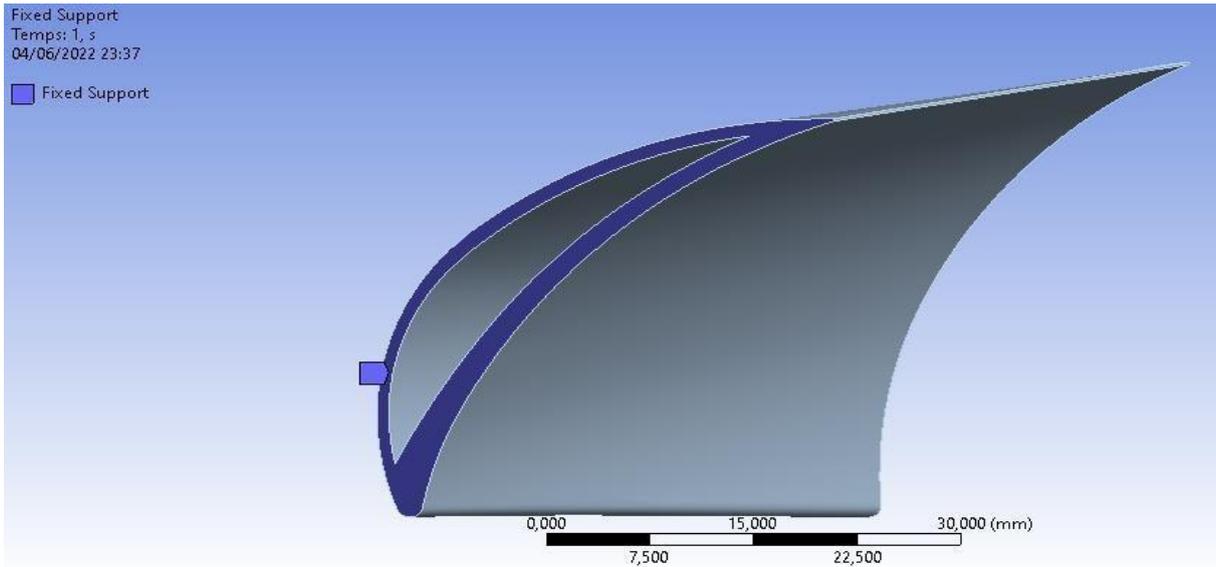


Figure IV.5: Conditions de chargement au niveau d'aube (appui fixe)

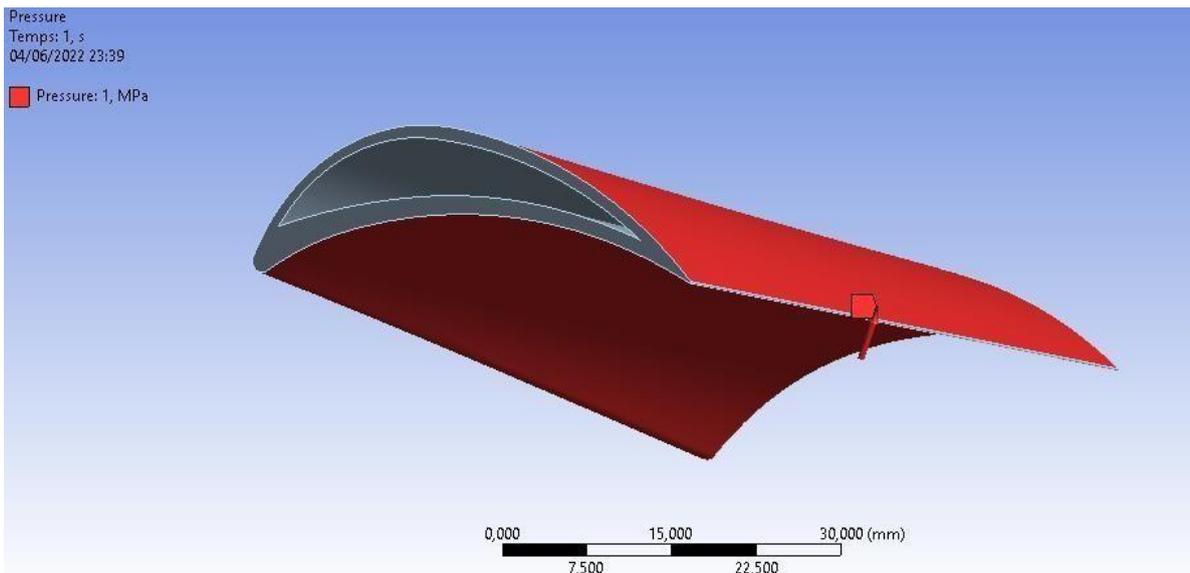


Figure IV.6: Distribution de pression au niveau d'aube

CHAPITRE IV: SIMULATION NUMERIQUE MECANIQUE

❖ Les conditions d'écoulement de refroidissement (refroidissement faible et élevé)

Ces tableaux expliquent les conditions de faible et fort refroidissement (vitesse d'entrée de l'air froid, température de l'air froid, température de l'aube, flux de chaleur et l'efficacité de refroidissement) :

➤ Faible refroidissement :

Tableau IV.2 : les conditions de faible refroidissement

vitesse d'entrée de l'air froid (m/s)	température de l'air froid (°c)	Température max de l'aube K	température moyenne de l'aube K	flux de chaleur W	l'efficacité de refroidissement
5	150	828.38	825	9245.2	0,211284

➤ Refroidissement élevé:

Tableau IV.3 : les conditions avec refroidissement

vitesse d'entrée de l'air froid (m/s)	température de l'air froid (°c)	Température max de l'aube K	température moyenne de l'aube K	flux de chaleur W	l'efficacité de refroidissement
120	10	416,64	393,55	49681,6	0,835

❖ Résultats et discussions :

Distribution des contraintes et des déformations :

➤ Faible refroidissement :

- Distribution de contraintes :

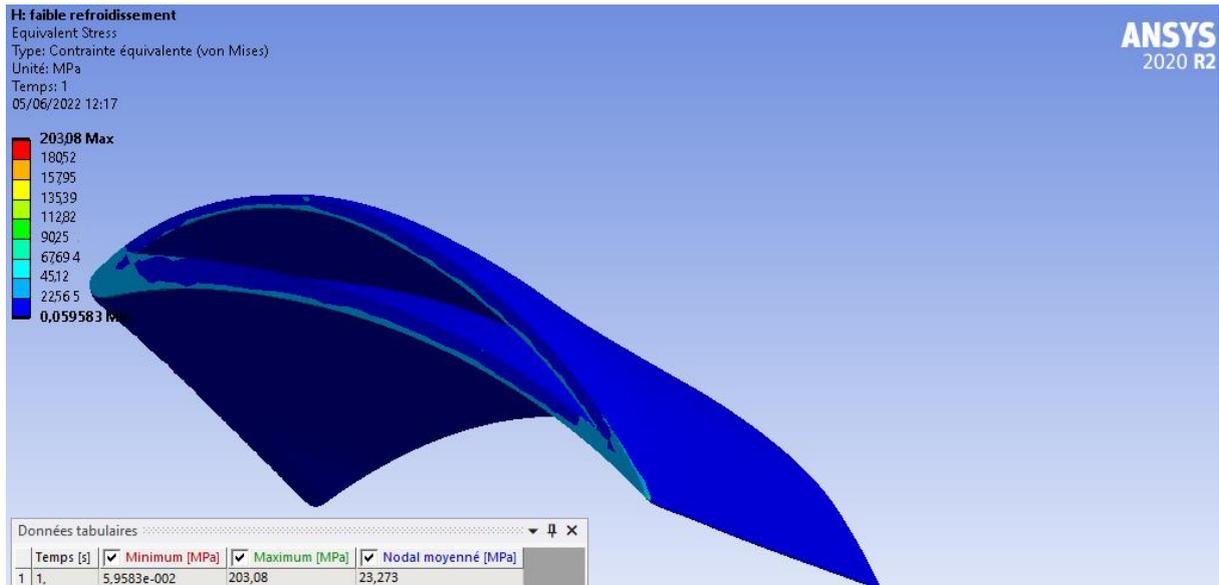


Figure IV.7 : Distribution de Contraintes dans l'aube

- **Déformation totale :**

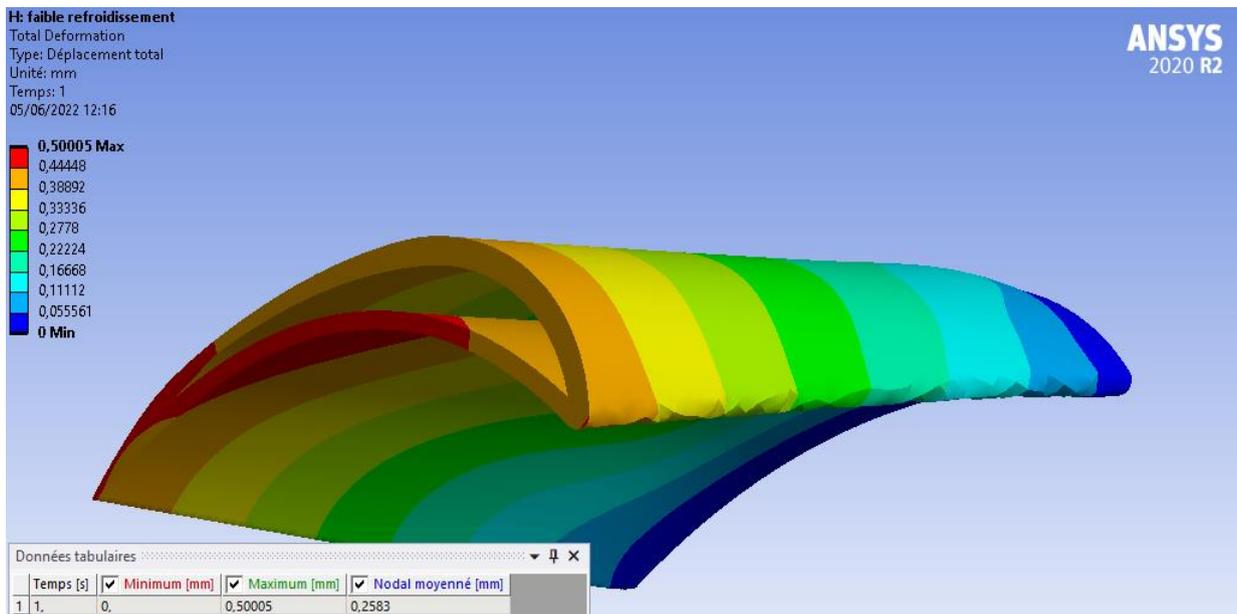


Figure IV.8 : Distribution déformation totale dans l'aube

- **Refroidissement élevé :**
- **Distribution de contraintes :**

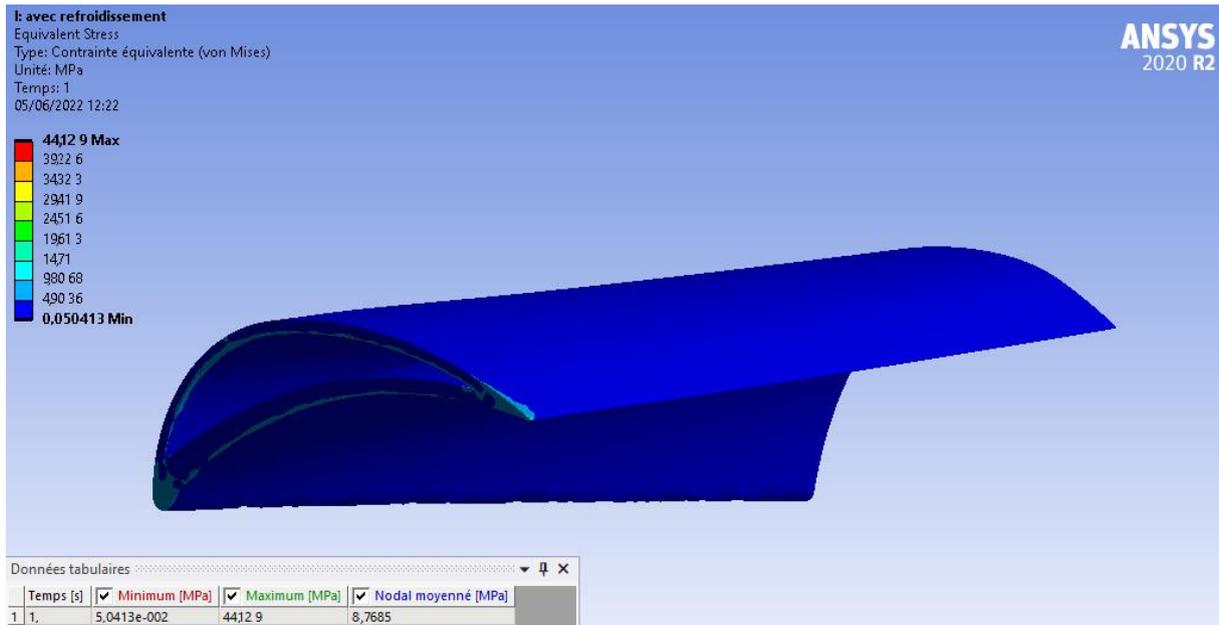


Figure IV.9 : Distribution de contraintes avec refroidissement

- **Déformation totale**

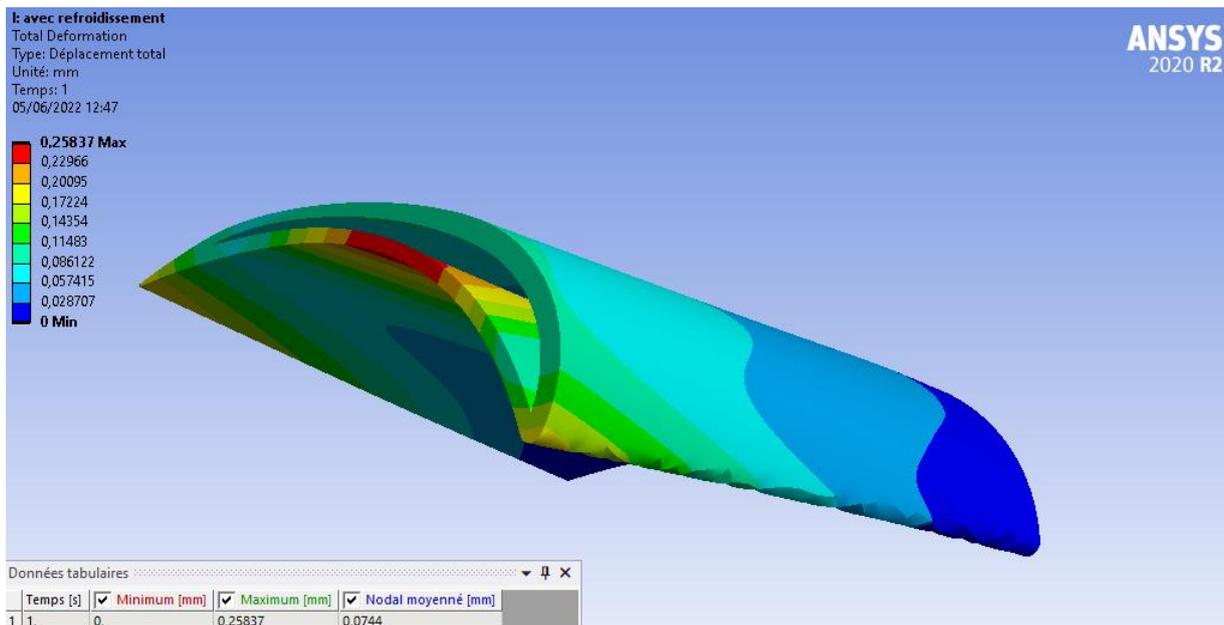


Figure IV.10 : Distribution de Contraintes dans l'aube.

- La distribution des contraintes et des déformations est largement influencée les conditions de charge. Commençons par les déplacements dont on remarque que la zone libre de l'aube présente les plus grandes valeurs plus précisément la pointe haute du bord d'attaque ce qui est très attendu dans une configuration proche de l'exemple type de flexion.

- Les contraintes (équivalentes de Von Mises, et maximale) sont plus concentrées sur la zone de fixation de l'aube

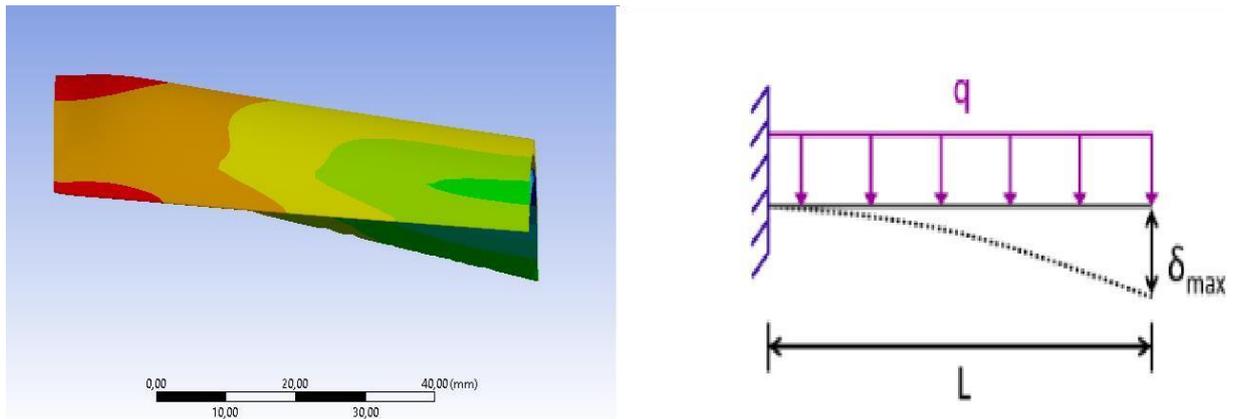


Figure IV.11: Poutre encastrée sous charge répartie (flexion)

- On termine cette partie par une comparaison entre les valeurs mécaniques d'intérêt entre l'aube à fort refroidissement (déplacement, contraintes) et l'aube à faible refroidissement qui sont calculées par le logiciel ANSYS. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.4 : Comparaison des contraintes et déplacements entre le refroidissement faible et élevé.

	Faible refroidissement			Refroidissent élevé		
	Min	Max	Moyen(ne)	Min	Max	Moyen(ne)
Déplacements (mm)	0	0.5005	0.2583	0	0,25837	0.0744
Contrainte équivalente (Mpa)	0	203,08	23,273	0	44,129	8,7685

La différence de comportement mécanique entre l'aube avec refroidissement fort et faible est bien évidente, vu la différence en type et en intensité des charges supportées ;les contrainte sont plus importants pour les cas à faible de refroidissement .

c'est pour le déplacement qu'on rencontre le plus grand écart avec une valeur moyenne pour l'aube à faible refroidissement qui est trois fois plus grande que celle obtenue pour l'aube à refroidissement élevé, l'écart est encore plus grand pour la valeur maximale (deux fois).

Ce qui concerne la contrainte équivalente moyenne et la contrainte maximale, l'écart entre l'aube à faible refroidissement et ce à refroidissement élevé est très important, la valeur d'écart est d'environ 15 Mpa. On remarque ainsi qu'on approche plus de la limite élastique pour l'aube à faible refroidissement vue l'intensité plus grande des charges de fonctionnement pour ce dernier.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le logiciel ANSYS STRUCTURE STATIQUE et les étapes de la simulation numérique.). La représentation de cas étudié, la description et la géométrie, la génération de maillage et les conditions aux limites faites aussi partie de ce chapitre.

D'après nos résultats on a pu vérifier les performances mécanique d'aube pour un bon refroidissement et faible refroidissement, pour le premier on conserve que les contraintes mécanique et reste confortablement inférieure à la limite élastique en raison des températures peu élevée, a contrairement au deuxième cas l'aube subit des contraintes thermique extrême (température élevé) qui risque de compromettre sa structure mécanique.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était l'étude Influence de refroidissement sur les performances mécaniques de l'aube d'une turbine à gaz.

Dans ce mémoire on présente généralité sur la turbine à gaz et on a cités plusieurs techniques de refroidissement des aubes de la turbine à gaz. Parmi ces procédés, nous avons choisis la méthode de refroidissement par convection forcée interne, qui s'applique sur une aube avec un canal de refroidissement. P u r effectuer l'étude on s'est appuyé sur le logiciel « ANSYS CFX student », qui résout les équations thermiques et aérodynamique, plusieurs vitesse température d'entrée ont été considérés. Pour tester l'effet de refroidissement. Des graphes de distribution de la température et la vitesse dans la partie aube, domaine air froid et domaine air chaud, ainsi que des tableaux des résultats pour l'efficacité et les températures de l'aube en été évaluer et analysés.

A travers cette étude, nous avons cherchés à comprendre l'influence de refroidissement sur les performances mécaniques de l'aube, la contrainte mécanique et le déplacement par une comparaison entre un bon refroidissement et faible refroidissement de l'aube d'une turbine à gaz

Nous avons conclu d'après notre étude que pour l'aube conserver ses performances mécanique par diminution des contraintes mécanique et thermique, il faut un bon refroidissement obtenu par l'augmentation de la vitesse de l'écoulement d'air froid en diminuant sa température cependant le bon refroidissement des aubes n'est pas suffisant, il, faut fabriquer les aubes avec des matériaux avec bonne une conductivité thermique.

Ce travail, nous a donné l'occasion d'approfondir nos connaissances dans le domaine des turbines à gaz et d'acquérir quelques nouvelles notions fondamentales sur la thermique la mécanique et d'utilisation des logiciels de simulation (ANSYS CFX).

Référence (bibliographie)

1. Albin Bölcs, "Turbomachines thermiques", Ecole Polytechnique Fédérale, 1993
2. GUELAILIA Ahmed ; ÉTUDE DU REFROIDISSEMENT D'UNE AUBE DE TURBINE
3. KLAA EFTIKHAR conception d'une aube de turbine à gaz en matériaux composites
4. Harasgama, S. P. Aerothermal Aspects of Gas Turbine Flows. Heat Transfer and Cooling in Gas Turbines.
5. THIBAUT, Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : application aux aubes de turbine. Daniel, thèse de docteur de l'école nationale supérieur de mécanique et d'aérotechnique de Poitiers.
6. GHEZALI Faiza. Couplage du refroidissement interne et externe des aubes de turbine à gaz.
7. TOM, I,P,SHIH VINGOR YANG "turbine aerodynamics , heat transfer, materials, and mechanics"
8. Fiche sonatrach GP1Z ARZEW "formation turbine gaz type s3"
9. MATTHIEU Fénot, Etude du refroidissement par impact de jets : application aux aubes de turbines.
10. BUNKER R.S. Gas Turbine Heat Transfer: Ten Remaining Hot Gas Path Challenges. Journal of Turbomachinery. ASME, Avril 2007, Vol. 129, pp. 193-201.
11. Azzi, A. (2001). Investigation numérique du refroidissement par film appliqué aux aubes des turbines à gaz (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat USTO Oran).
12. K.C. Civinskas, G.J. Van Fossen, P.W. Giel, D.R. Thurman. Blade Heat transfer measurement and predictions in a transonic turbine cascade. Book Park, OH, NASA / CASI.
13. LUO J. & al. Conjugate Heat Transfer Analysis of a Cooled Turbine Vane Using the V2F Turbulence Model. Journal of Turbomachinery. ASME, Octobre 2007, Vol. 129, pp.773-781.
14. Rigby et Lepicovsky. Conjugué code de transfert de chaleur pour les applications de turbomachines.

15. **HARIZI A. et al. Simulation 3D de l'écoulement et de l'échange de chaleur dans un canal de refroidissement. Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi. 2008, 164, pp. 153-164.**
16. **Takahashi et al. Analyse de transfert de chaleur dans une aube de turbine refroidie par des canaux lisses ronds.**
17. **WANG Z. & al. BEM/FDM Conjugate Heat Transfer Analysis of a Two-dimensional Air-cooled Turbine Blade Boundary Layer. Journal of Thermal Science. March 2008, Vol. 17, pp. 199-206.**
18. **K. Sahnoune''Cours mécanique du milieu continu, Université de Boumerdes**
19. **Site internet <https://www.techno-science.net/>**
20. **Site internet <https://www.lavionnaire.fr/>**
21. **site internet : www.epfl.ch/labs/gtt**
22. **FACCHINI B. Refroidissement des turbines à gaz (influence sur le rendement). Techniques de l'ingénieur. 10 Octobre 2006, BM 4565, pp. 1-12**
23. **Taylor & Francis, '' Gas turbine heat transfer and cooling technology'', 2ened,20**