



Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique

Université d'Oran 2  
Institut de Maintenance et  
de Sécurité Industrielle  
Département de  
Maintenance en  
électromécanique

Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master  
**Filière** : Electromécanique  
**Spécialité** : Electromécanique Industrielle

Thème

Amélioration du refroidissement adiabatique par film  
cooling d'une aube de turbine à gaz

➤ **Présenté par :**

- BEN MAHAMMED Rachid.
- AMROUN Yacine.

	Nom et Prénom	Grade	Etablissement
➤ Encadrant:	Dr HAMMAMI Zineb	M.C.A	IMSI-UNV/ORAN2
➤ Président de jury :	Dr GHOUARI Adel	M.C.B	IMSI-UNV/ORAN2
➤ Examineur :	Dr CHAREF djilali	M.C.B	IMSI-UNV/ORAN2

# Remerciemen t

---

---

Nous commençons par exprimer notre gratitude envers Dieu, qui nous a accordé la force nécessaire pour achever ce modeste travail.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement nos chers parents pour leur soutien tout au long de notre parcours éducatif.

Nous exprimons une profonde reconnaissance envers notre superviseure, Madame **HEMMAMI Zineb**, pour son encadrement et ses précieuses contributions.

Nous tenons également à remercier les membres du jury qui ont honoré notre travail de leur jugement.

Nos sincères remerciements vont à nos enseignants du département Maintenance en Electromécanique et tous les enseignants de l'institut.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude et notre respect envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

# Dédicac e

---

---

➤ Je dédie ce travail à :

- ❖ **Ma chère mère qui a consacré sa vie à m'éduquer et à me guider sur le bon chemin, sans Allah et elle, je n'aurais pas pu arriver jusqu'ici, qu'Il la préserve.**
- ❖ **Mon père, que Dieu prolonge sa vie.**
- ❖ **Tous les membres de notre famille, petits et grands, en particulier à mes oncles qui sont toujours à mes côtés, qu'Allah les protège de tout mal.**
- ❖ **Ceux qui nous ont toujours soutenus dans nos études et qui ont été un pilier pour nous.**
- ❖ **Tous nos chers enseignants, que Dieu prolonge leur vie et les protège de tout mal.**
- ❖ **Tous nos amis,**
- ❖ **Tous nos camarades dans le parcours académique,**
- ❖ **Toute personne qui nous a aidés à accomplir ce modeste travail.**

# Dédicac e

---

---

➤ **Je dédie humblement ce travail à :**

- ❖ **Ma mère, que Dieu prolonge sa vie,**
- ❖ **Mon père, que Dieu ait son âme et l'accueille dans ses vastes paradis,**
- ❖ **Tous mes frères, que Dieu les préserve,**
- ❖ **Ma famille entière et à mes chers amis.**

## ❖ Sommaire :

- **Résumé**
- **Abstract**
- **Listes des figures**
- **Listes des tableaux**
- **Nomenclature**

➤ **Introduction générale.....01**

## ❖ **Chapitre 01 : Le Refroidissement Par Film.**

### **I- Les centrales thermiques :**

I-1\ Introduction :.....	02
I-2\ Les types :.....	02
I-3\ Les centrales thermiques à combustibles fossiles :.....	03

### **II- Les cycles thermodynamique :**

II-1\ Introduction :.....	05
II-2\ Les types :.....	05
II-3\ Le cycle de Brayton (cycle de joule) :.....	06

### **III- La turbine à gaz :**

III-1\ Introduction et fonctionnement :.....	08
III-2\ Historique :.....	09
III-3\ Les composants :.....	10
III-4\ Les lois :.....	11
III-5\ La puissance et le rendement :.....	11

### **IV- Le refroidissement d'une turbine à gaz :**

IV-1\ Introduction :.....	12
IV-2\ Historique :.....	12
IV-3\ Le mécanisme de refroidissement :.....	13

### **V- Le refroidissement des aubes de turbine à gaz :**

V-1\ Introduction :.....	14
V-2\ Les types de refroidissement :.....	14
<b>V-3\ Le refroidissement par film :</b>	
V-3.1\ Introduction :.....	15
V-3.2\ Les lois de refroidissement par film :.....	17
V-3.3\ Les effets du refroidissement par film :.....	17

### **V-4\ Couche Limite :**

V-4.1\ Introduction :	18
V-4.2\ Étapes de développement de la couche limite :	20
V-4.3\ Les lois de La couche limite :	20
V-4.4\ Modèles mathématiques pour représenter la couche limite :	21
V-4.5\ Épaisseur et structure de la couche limite :	22
➤ <b>Conclusion :</b>	<b>23</b>

## ❖ **Chapitre 02 : La Modélisation de la Turbulence.**

### **I- Les volumes finis :**

I-1\ Introduction :	24
I-2\ Les Principes fondamentaux du Volume Fini :	24
I-3\ Maillage et discrétisation en Volume Fini :	25
I-4\ Résolution des équations de conservation avec le Volume Fini :	27

### **II- Les volumes finis pour le refroidissement par film :**

II-1\ Introduction :	27
II-2\ Modélisation du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement :	29
II-3\ Optimisation du processus de refroidissement par film grâce à la méthode des Volumes Finis:...	30
II-4\ Limitations et perspectives futures de la méthode des Volumes Finis pour le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz:	31

### **III- la turbulence :**

III-1\ Définition :	32
III-2\ Mécanismes de turbulence :	33
III-3\ Modélisation de la turbulence :	34
III-3.1\ Modélisation des grandes échelles (LES) :	35
III-3.2\ Modélisation à petite échelle (RANS) :	36
III-3.3\ Approches hybrides (LES-RANS) :	36
III-4\ Équations de la turbulence :	37
III-4.1\ Équation de transport de la turbulence de Reynolds :	38
III-4.2\ Équation de transport de la turbulence de la moyenne conditionnelle (CMT) :	39

### **IV- La modélisation des turbulences :**

IV-1\ Introduction :	41
<b>IV-2\ Modèle de turbulence RANS :</b>	
IV-2.1\ Description du modèle k-ε :	42
IV-2.1.a\ Équation du modèle k-ε :	44
IV-2.1.b\ Limitations du modèle k-ε :	45
IV-2.2\ Description du modèle k-ω :	46
IV-2.2.a\ Équation du modèle k-ω :	48
IV-2.2.b\ Limitations du modèle k-ω :	49

➤ <b>Conclusion.....</b>	<b>50</b>
--------------------------	-----------

## ❖ **Chapitre 03 : Simulation Numérique.**

<b>I-1\ Introduction :</b>	<b>51</b>
----------------------------	-----------

<b>I-2\ Description des produits :</b> .....	<b>51</b>
I-2.1\ Limites et avantages de la simulation :	52
I-2.2\ Présentation du code de calcul :	52
I-2.2.a\ Pré-processeur GAMBIT :	53
I-2.2.b\ Solveur FLUENT 16.0 :	53
I-2.2.c\ Post-processeur :	54
<b>I-3\ La Simulation numérique :</b> .....	<b>54</b>
I-3.1\ la géométrie du flux, grilles et conditions aux limites :	54
I-3.2\ Domaine de calcul et conditions aux limites :	56
➤ <b>Conclusion :</b> .....	<b>58</b>

❖ **Chapitre 04 : Résultats et discussions.**

<b>I-1\ Introduction :</b> .....	<b>59</b>
<b>I-2\ Résultats et discussions :</b> .....	<b>59</b>
➤ <b>Conclusion :</b> .....	<b>71</b>
➤ <b>Conclusion générale.....</b>	<b>72</b>
▪ <b>Références bibliographiques.</b>	

## ➤ Résumé :

Le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est une technique essentielle dans le domaine de l'électromécanique visant à maintenir des températures de fonctionnement optimales et à prévenir les dégradations thermiques dans les turbines à gaz. Les aubes des turbines à gaz sont soumises à des températures extrêmes et à des contraintes thermiques élevées, ce qui peut entraîner des déformations, des fissures et une réduction de leur durée de vie.

Le refroidissement par film consiste à créer une fine couche d'air ou de fluide réfrigérant le long des surfaces internes des aubes de turbine, formant ainsi une barrière thermique entre les gaz chauds de combustion et les parois des aubes. Cette technique permet de maintenir les aubes à des températures acceptables tout en améliorant l'efficacité et la performance globale de la turbine.

Le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz repose sur des principes thermodynamiques et des connaissances en transfert de chaleur. Des études approfondies, des simulations numériques et des expérimentations sont menées pour optimiser la conception des aubes et des systèmes de refroidissement, en considérant des facteurs tels que la distribution du film de refroidissement, la géométrie des aubes, les matériaux utilisés et les contraintes de fonctionnement.

L'objectif ultime du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est d'améliorer l'efficacité énergétique, d'augmenter la durée de vie des composants et de réduire les coûts de maintenance des turbines à gaz. Cette technique joue un rôle crucial dans l'industrie de l'énergie, en permettant une utilisation plus efficace des ressources et en garantissant des performances optimales des turbines à gaz dans différentes applications, telles que la production d'électricité, l'aviation et les applications industrielles.

Notre étude consiste à étudier le refroidissement d'une aube d'une turbine à gaz en utilisant la technique du refroidissement par film et en modifiant la géométrie de l'aube afin d'obtenir de meilleurs résultats en comparaison avec le cas Baseline qui est une configuration standard qu'on trouve dans l'industrie.



## ➤ Abstract :

Film cooling of gas turbine blades is an essential technique in the electromechanical field aimed at maintaining optimal operating temperatures and preventing thermal degradation in gas turbines. Gas turbine blades are subjected to extreme temperatures and high thermal stresses, which can lead to deformations, cracks, and reduced lifespan.

Film cooling involves creating a thin layer of air or coolant along the internal surfaces of turbine blades, thus forming a thermal barrier between the hot combustion gases and the blade walls. This technique allows the blades to be maintained at acceptable temperatures while improving overall turbine efficiency and performance.

Film cooling of gas turbine blades is based on thermodynamic principles and knowledge of heat transfer. In-depth studies, numerical simulations, and experiments are conducted to optimize the design of blades and cooling systems, considering factors such as film cooling distribution, blade geometry, materials used, and operating constraints.

The ultimate goal of film cooling of gas turbine blades is to enhance energy efficiency, increase component lifespan, and reduce maintenance costs of gas turbines. This technique plays a crucial role in the energy industry by enabling more efficient resource utilization and ensuring optimal gas turbine performance in various applications, such as electricity generation, aviation, and industrial applications.

Our study aims to investigate the cooling of a gas turbine blade using the film cooling technique and modifying the blade's geometry to achieve better results compared to the Baseline case, which represents a standard configuration found in the industry.

## ❖ Listes des figures :

• <b>Figure I.1 :</b> Centrale thermique.....	<b>02</b>
• <b>Figure I.2 :</b> Centrale thermique à turbine à gaz.....	<b>03</b>
• <b>Figure I.3 :</b> Centrale thermique à turbine à vapeur.....	<b>04</b>
• <b>Figure I.4 :</b> Centrale thermique à cycle combiné.....	<b>04</b>
• <b>Figure I.5 :</b> Cycle de Brayton.....	<b>07</b>
• <b>Figure I.6 :</b> Diagramme P-V.....	<b>07</b>
• <b>Figure I.7 :</b> Diagramme T-S.....	<b>07</b>
• <b>Figure I.8 :</b> Turbine à gaz.....	<b>09</b>
• <b>Figure I.9 :</b> Les composants de turbine à gaz.....	<b>11</b>
• <b>Figure I.10 :</b> Evolution des technologies de refroidissement.....	<b>13</b>
• <b>Figure I.11 :</b> Aube de turbine à gaz.....	<b>14</b>
• <b>Figure I.12 :</b> Différents types de refroidissement d'une aube.....	<b>15</b>
• <b>Figure I.13 :</b> Principe du refroidissement par film.....	<b>16</b>
• <b>Figure I.14 :</b> Aube sans (a) et avec (b) le refroidissement par film.....	<b>18</b>
• <b>Figure I.15 :</b> Couche limite.....	<b>19</b>
• <b>Figure I.16 :</b> Épaisseur et structure de la couche limite.....	<b>23</b>
• <b>Figure II.1 :</b> Les types de maillage.....	<b>26</b>
• <b>Figure II.2 :</b> Simulation pour turbine à gaz.....	<b>28</b>
• <b>Figure II.3 :</b> Modélisation de la couche limite.....	<b>30</b>
• <b>Figure II.4 :</b> Un champ de température sur une aube de turbine à gaz.....	<b>32</b>
• <b>Figure II.5 :</b> Les modèles de turbulence.....	<b>35</b>
• <b>Figure II.6 :</b> Classification des modèles de turbulence.....	<b>42</b>
• <b>Figure III.1 :</b> Configurations géométriques de la rampe.....	<b>55</b>
• <b>Figure III.2 :</b> Domaine de calcul et conditions aux limites.....	<b>56</b>

- **Figure IV.1:** L'efficacité latérale de refroidissement par film Cas  $M=0.5$ .....**59**
- **Figure IV.2 :** Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=0.5$  par rapport à X...**60**
- **Figure IV.3 :** Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=0.5$  par rapport à Y...**61**
- **Figure IV.4:** L'efficacité latérale de refroidissement par film Cas  $M=1.0$ .....**62**
- **Figure IV.5:** Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=1.0$  par rapport à X...**63**
- **Figure IV.6 :** Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=1.0$  Par rapport à X...**64**
- **Figure IV.7 :** L'efficacité de refroidissement par film sur la plaque “ cas Baseline”.....**65**
- **Figure IV.8 :** L'efficacité de refroidissement par film sur la plaque pour les trois cas.....**66**
- **Figure IV.9:** Le coefficient de pression Cas  $M=0.5$ .....**67**
- **Figure IV.10:** Gradient de pression.....**68**
- **Figure IV.11 :** Contour de vitesse pour le cas  $M=0.5$  et  $M=1.0$ .....**69**
- **Figure IV.12:** Contour de température pour le cas  $M=0.5$  et  $M=1.0$ .....**70**

❖ **Listes des tableaux :**

- **Tableau III.1 :** Les cas étudiés.....**58**

## ❖ Nomenclature :

- **Q** : la quantité de chaleur transférée.
- **H** : le coefficient de transfert thermique.
- **A** : la surface de transfert.
- **T<sub>s</sub>** : la température de la source chaude.
- **T<sub>f</sub>** : la température de la source froide.
- **h** : le coefficient de transfert thermique.
- **Re** : le nombre de Reynolds.
- **μ** : la viscosité dynamique.
- **μ<sub>w</sub>** : la viscosité de l'eau.
- **k** : la conductivité thermique.
- **D** : le diamètre caractéristique.
- **Nu** : le nombre de Nusselt.
- **Pr** : le nombre de Prandtl.
- **ρ** : la densité.
- **k** : l'énergie cinétique turbulente.
- **u** : la vitesse.
- **μ<sub>t</sub>** : la viscosité turbulente.
- **ε** : la dissipation turbulente.
- **S** : la source de turbulence.
- **C<sub>1ε</sub>** et **C<sub>2ε</sub>** sont des constantes.
- **S<sub>ε</sub>** : la source de dissipation turbulente.
- **τ<sub>ij</sub>** : le tenseur de contrainte de Reynolds.
- **(∂u<sub>i</sub>/∂x<sub>j</sub>)** : le gradient de vitesse.
- **c** : la concentration.
- **P** : la pression.
- **τ** : le tenseur des contraintes visqueuses.
- **g** : l'accélération gravitationnelle.
- **T** : la température.
- **Q** : la source de chaleur.
- **ρ<sub>CMT</sub>** : la densité de masse volumique de la phase continue.
- **μ<sub>CMT</sub>** : la viscosité dynamique de la phase continue.
- **e** : l'énergie totale.
- **k<sub>CMT</sub>** : la conductivité thermique de la phase continue.
- **C<sub>μ</sub>** : une constante.
- **σ<sub>k</sub>** : une constante.
- **P<sub>k</sub>** : la production de turbulence.
- **α\*** et **β\*** sont des constantes.
- **D** : une source supplémentaire.
- **< η >** : la valeur moyenne de l'efficacité de séparation.
- **L** : longueur.
- **η** : l'efficacité de séparation.
- **T<sub>∞</sub>** : la température d'entrée du fluide chaud.
- **T** : la température de la paroi.
- **T<sub>c</sub>** : la température d'entrée du fluide froid.
- **M** : le coefficient de masse.
- **ρ<sub>f</sub>** : la densité du fluide séparé.
- **U<sub>f</sub>** : la vitesse du fluide séparé.
- **ρ<sub>∞</sub>** : la densité du fluide incident.
- **U<sub>∞</sub>** : la vitesse du fluide incident.
- **D** est le diamètre.

## ➤ Introduction générale :

L'utilisation de turbines à gaz dans diverses applications industrielles, telles que la production d'électricité et la propulsion aéronautique, est une pratique répandue de nos jours. Ces turbines à gaz sont essentielles pour générer une puissance mécanique à partir de l'énergie thermique produite par la combustion de carburants.

Cependant, le fonctionnement efficace des turbines à gaz est compromis par l'énorme quantité de chaleur générée lors de la combustion du carburant. Les aubes de turbine, qui sont exposées à ces gaz chauds et à haute pression, sont soumises à des températures élevées qui peuvent entraîner des dommages, une déformation ou une dégradation prématurée de leurs performances.

Pour faire face à ce défi, les concepteurs et les ingénieurs ont développé des techniques de refroidissement sophistiquées pour maintenir les températures des aubes de turbine à des niveaux acceptables. L'une de ces techniques est le refroidissement par film, qui consiste à créer une fine couche d'air entre les aubes et les gaz chauds.

La modélisation du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est un domaine de recherche essentiel pour comprendre et optimiser ce processus complexe. Les avancées dans la modélisation numérique et les simulations informatiques ont permis d'améliorer la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur et de flux d'air dans le système de refroidissement.

Cette modélisation permet aux ingénieurs d'analyser différentes configurations de refroidissement par film, de prédire les performances thermiques des aubes de turbine et d'optimiser les paramètres de conception pour maximiser l'efficacité et la durée de vie des turbines à gaz.

En combinant des approches expérimentales et numériques, les chercheurs peuvent étudier les interactions complexes entre les gaz chauds, l'air de refroidissement et les aubes de turbine dans des conditions réelles. Cela permet de développer de nouvelles stratégies de refroidissement, de réduire les contraintes thermiques et mécaniques sur les aubes et d'améliorer la fiabilité et les performances globales des turbines à gaz.

Dans cette optique, la modélisation du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz joue un rôle crucial dans l'innovation continue de cette technologie, en contribuant à des solutions plus efficaces, durables et économiquement viables pour répondre aux besoins énergétiques modernes.

### **On a divisé ce travail en quatre chapitres :**

- Le premier chapitre contient une généralité sur la turbine à gaz et le refroidissement par film.
- Le deuxième chapitre présente la modélisation de la turbulence et les équations de la turbulence.
- Le troisième chapitre traite de la simulation numérique et du domaine de calcul.
- Et dans le dernier chapitre, nous avons discuté sur les résultats obtenus.



***Chapitre I***  
***Le Refroidissement Par Film***

## I- Les centrales thermiques :

### I-1\ Introduction :

Les centrales thermiques sont des installations industrielles utilisées pour produire de l'électricité à grande échelle. Elles utilisent la chaleur pour produire de l'électricité en faisant tourner une turbine qui entraîne un alternateur. Cette technologie est largement utilisée dans le monde entier pour répondre à la demande croissante en électricité.(1)

Elles sont généralement alimentées par des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, mais elles peuvent également utiliser d'autres sources d'énergie, telles que l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire. Les centrales thermiques à combustibles fossiles sont les plus courantes, mais leur impact environnemental est important en raison des émissions de gaz à effet de serre et de particules fines.(2)

Les centrales thermiques sont souvent utilisées pour produire de l'électricité en grandes quantités et sont donc un élément clé de notre système énergétique. Elles sont souvent situées près des centres de consommation d'électricité pour minimiser les pertes en ligne, et leur développement est crucial pour répondre à la demande croissante en électricité dans le monde entier.(3)

Cependant, les centrales thermiques sont également soumises à des réglementations environnementales strictes pour réduire leur impact sur l'environnement. Les progrès technologiques ont permis de développer des centrales thermiques plus propres et plus efficaces, mais il reste encore beaucoup à faire pour réduire leur impact sur l'environnement et favoriser une transition vers des sources d'énergie renouvelables.



Figure I.1 : Centrale thermique

### I-2\ Les types :

Il existe plusieurs types de centrales thermiques, chacune utilisant une technologie différente pour produire de l'électricité. Les types de centrales thermiques les plus courants sont les suivants :

**1. Centrales à combustibles fossiles :** Ces centrales utilisent des combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine à vapeur ou à gaz pour produire de l'électricité.(4)

**2. Centrales nucléaires :** Ces centrales utilisent l'énergie nucléaire pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Les centrales nucléaires sont souvent utilisées pour produire de l'électricité de manière constante et fiable.(5)

**3. Centrales hydroélectriques :** Ces centrales utilisent l'énergie de l'eau en mouvement pour faire tourner une turbine, qui produit de l'électricité. Les centrales hydroélectriques sont souvent utilisées pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables.(6)

**4. Centrales éoliennes :** Ces centrales utilisent l'énergie éolienne pour faire tourner des éoliennes, qui produisent de l'électricité. Les centrales éoliennes sont également souvent utilisées pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables.(7)

**5. Centrales solaires :** Ces centrales utilisent l'énergie solaire pour produire de l'électricité. Les panneaux solaires captent l'énergie du soleil et la convertissent en électricité. Les centrales solaires sont également souvent utilisées pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables.(8)

Chacune de ces technologies a ses avantages et inconvénients en termes de coûts, de fiabilité et d'impact environnemental, et leur choix dépend souvent des conditions locales, de la disponibilité des ressources et des réglementations en vigueur.

### I-3) Les centrales thermiques à combustibles fossiles :

Les centrales thermiques à combustibles fossiles sont des installations industrielles utilisées pour produire de l'électricité à grande échelle. Les deux types de centrales thermiques les plus courantes sont les centrales à turbine à gaz et les centrales à turbine à vapeur.

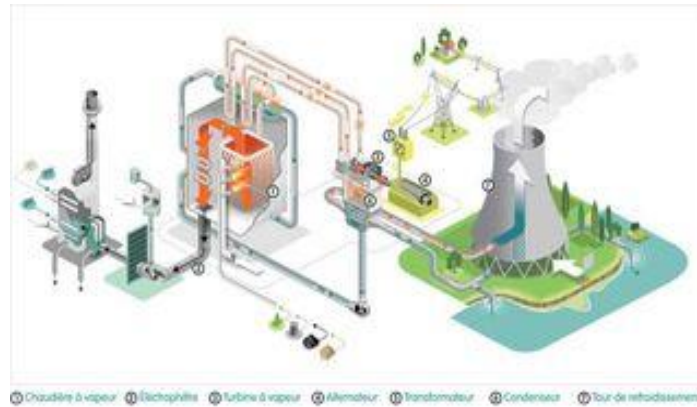
**1-Les centrales à turbine à gaz :** utilisent des turbines à gaz pour produire de l'énergie mécanique qui est ensuite convertie en électricité. Dans une centrale à turbine à gaz, le combustible est brûlé dans une chambre de combustion, ce qui génère de la chaleur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine à gaz, qui entraîne un alternateur pour produire de l'électricité. Les centrales à turbine à gaz sont connues pour leur grande efficacité, leur faible coût d'investissement et leur flexibilité opérationnelle.(9)



Figure I.2 : Centrale thermique à turbine à gaz

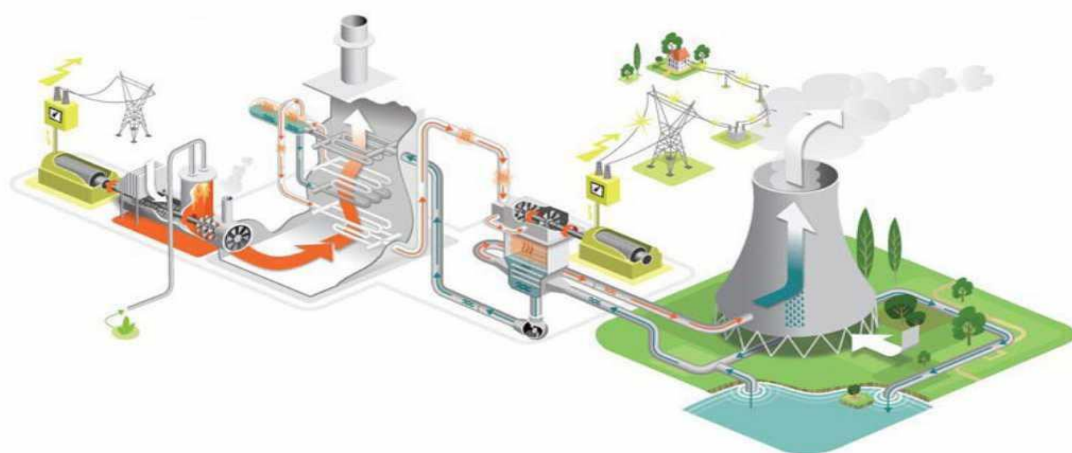


**2-Les centrales à turbine à vapeur :** utilisent de la vapeur pour produire de l'énergie mécanique qui est ensuite convertie en électricité. Dans une centrale à turbine à vapeur, l'eau est chauffée pour produire de la vapeur, qui fait tourner une turbine à vapeur pour produire de l'électricité.(10) Les centrales à turbine à vapeur sont souvent utilisées pour produire de l'électricité en continu, car elles sont plus efficaces lorsqu'elles fonctionnent à pleine charge.



**Figure I.3 : Centrale thermique à turbine à vapeur**

**3-Les centrales à cycle combiné :** sont une combinaison de ces deux technologies. Elles utilisent à la fois une turbine à gaz et une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Le combustible est brûlé dans une chambre de combustion pour produire de la chaleur, qui est utilisée pour faire tourner une turbine à gaz.(11) La chaleur résiduelle de l'échappement de la turbine à gaz est ensuite utilisée pour produire de la vapeur, qui fait tourner une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Les centrales à cycle combiné sont connues pour leur grande efficacité énergétique, car elles utilisent la chaleur résiduelle pour produire plus d'électricité à partir du même combustible.



**Figure I.4 : Centrale thermique à cycle combiné**

En conclusion, les centrales thermiques à turbine à gaz et à turbine à vapeur et à cycle combiné sont des technologies importantes pour la production d'électricité à grande échelle. Chacune a ses propres avantages et inconvénients en termes d'efficacité énergétique, de coûts d'investissement et de flexibilité opérationnelle.

## II- Les cycles thermodynamique :

### II-1\ Introduction :

Un cycle thermodynamique est un processus qui décrit les transformations d'un système thermique à travers différentes étapes, permettant le transfert d'énergie thermique entre une source chaude et une source froide. Ces cycles sont essentiels pour comprendre et analyser le comportement des systèmes thermiques tels que les moteurs, les réfrigérateurs, les climatiseurs et les centrales électriques.

Le concept de cycle thermodynamique repose sur deux principes fondamentaux : la conservation de l'énergie et la conservation de la masse. Pendant le cycle, le système peut subir des transformations telles que la compression, l'expansion, le chauffage, le refroidissement et la détente, tout en maintenant un équilibre énergétique global.(12)

Le but d'un cycle thermodynamique peut varier en fonction de l'application spécifique. Par exemple, dans le cas d'un moteur thermique, le cycle a pour objectif de convertir l'énergie thermique en travail mécanique, tandis que dans un réfrigérateur ou un climatiseur, le cycle est utilisé pour transférer la chaleur d'un espace à un autre.

La compréhension des cycles thermodynamiques est essentielle pour concevoir, analyser et améliorer l'efficacité énergétique des systèmes thermiques, ainsi que pour trouver des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.

### II-2\ Les types :

Il existe plusieurs types de cycles thermodynamiques couramment utilisés dans différents systèmes et applications. Voici quelques-uns des types les plus importants :

**1. Cycle de Carnot :** Le cycle de Carnot est un cycle thermodynamique idéalisé qui représente la limite théorique de l'efficacité des moteurs thermiques réversibles. Il se compose de deux transformations isothermes (à température constante) et de deux transformations adiabatiques (sans transfert de chaleur). Ce cycle est utilisé comme référence pour comparer les performances des autres cycles.(13)

**2. Cycle de Rankine :** Le cycle de Rankine est utilisé dans les centrales thermiques à vapeur pour produire de l'électricité. Il implique la vaporisation de l'eau à haute pression dans une chaudière, l'expansion de la vapeur dans une turbine pour produire du travail mécanique, la condensation de la vapeur dans un condenseur et le retour de l'eau condensée vers la chaudière. Ce cycle utilise principalement des transformations isobares (à pression constante).

**3. Cycle de Brayton :** Le cycle de Brayton est utilisé dans les turbines à gaz. Il implique la compression d'un gaz (généralement de l'air) dans un compresseur, le chauffage du gaz comprimé dans une chambre de combustion, puis l'expansion du gaz chauffé dans une turbine pour produire du travail. Ce cycle utilise des transformations isobares et des transformations isentropiques (adiabatiques réversibles) pour maximiser l'efficacité.

**4. Cycle de compression-réfrigération :** Ce cycle est utilisé dans les systèmes de réfrigération et de climatisation. Il implique la compression d'un fluide frigorigène dans un compresseur, le rejet de la chaleur à travers un condenseur, l'expansion du fluide dans une vanne d'expansion, puis l'absorption de la chaleur de l'environnement à travers un évaporateur. Ce cycle permet de transférer la chaleur d'un espace à un autre, créant ainsi un effet de refroidissement.

Il convient de noter qu'il existe d'autres cycles thermodynamiques utilisés dans des applications spécifiques, tels que le cycle de Stirling, le cycle Otto (utilisé dans les moteurs à combustion interne à essence), le cycle Diesel (utilisé dans les moteurs à combustion interne diesel), etc. Chaque cycle a ses propres caractéristiques et avantages, en fonction des besoins particuliers du système dans lequel il est appliqué.

### II-3\ Le cycle de Brayton (cycle de joule) :

Le cycle de Brayton également connu sous le nom de cycle de turbine à gaz, est un cycle thermodynamique utilisé pour convertir l'énergie thermique en un travail mécanique dans les turbines à gaz. Il est largement utilisé dans les centrales électriques, les avions à réaction et d'autres applications nécessitant une puissance élevée. Ce cycle se compose de quatre étapes principales :

**1. Compression :** L'air ambiant est aspiré par le compresseur de la turbine à gaz. Le compresseur augmente la pression de l'air en le comprimant. Lors de cette étape, la température de l'air augmente également en raison de la compression adiabatique. Le compresseur est généralement composé de plusieurs étages pour augmenter la pression de manière progressive.

**2. Combustion :** Une fois que l'air a été comprimé, il est acheminé vers la chambre de combustion. Dans la chambre de combustion, du carburant, généralement du gaz naturel ou du kérosène, est injecté et brûlé en présence de l'air comprimé. La combustion produit une augmentation de la température et de la pression du mélange air-carburant. L'énergie libérée par la combustion est utilisée pour augmenter la température des gaz de combustion.

**3. Expansion :** Les gaz de combustion chauds et à haute pression résultant de la combustion sont dirigés vers la turbine. En passant à travers les pales de la turbine, les gaz en expansion exercent une force sur les pales, ce qui entraîne leur rotation. L'énergie cinétique des gaz en expansion est convertie en énergie mécanique sous forme de travail de rotation de la turbine.

**4. Rejet :** Après avoir traversé la turbine, les gaz de combustion refroidis et à basse pression sont évacués vers l'extérieur de la turbine à gaz. Certains systèmes de turbine à gaz utilisent un échangeur de chaleur pour récupérer une partie de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement avant leur rejet.(14)

Le cycle de Brayton est un cycle ouvert, car le fluide d'entrée (généralement de l'air) est continuellement aspiré de l'extérieur et le fluide de sortie est rejeté dans l'environnement. Ce cycle utilise principalement des transformations isobares (à pression constante) pour la compression et l'expansion, et des transformations isentropiques (adiabatiques réversibles) pour modéliser les processus de combustion et de détente dans la turbine.

L'un des avantages clés du cycle de Brayton est sa capacité à atteindre des taux de compression et des températures élevées, ce qui permet d'obtenir des rendements énergétiques élevés. Cependant, le cycle de Brayton a également des limites en termes d'efficacité thermodynamique, et des améliorations continues sont recherchées pour optimiser les performances et réduire les émissions dans les turbines à gaz modernes.(15)

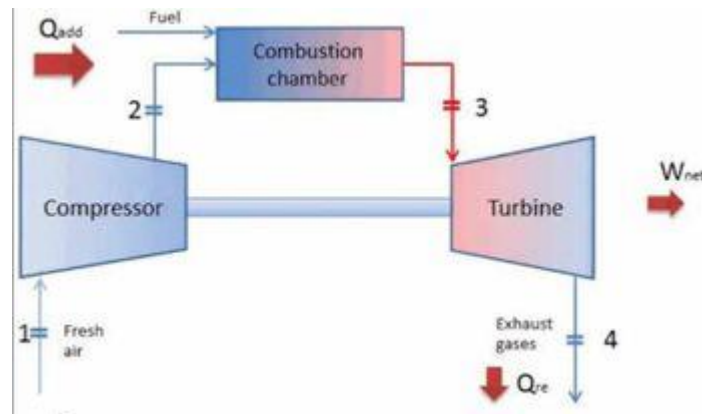


Figure I.5 : Cycle de Brayton

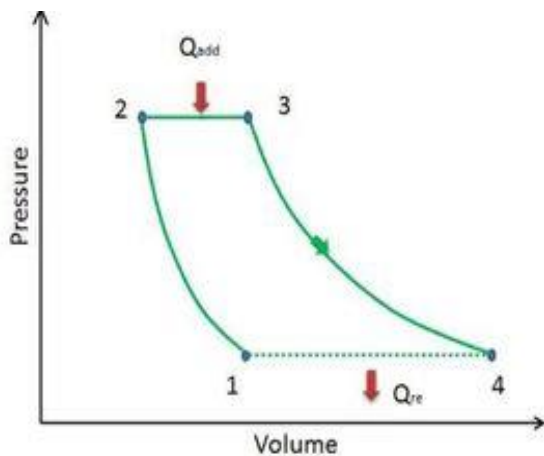


Figure I.6 : Diagramme P-V

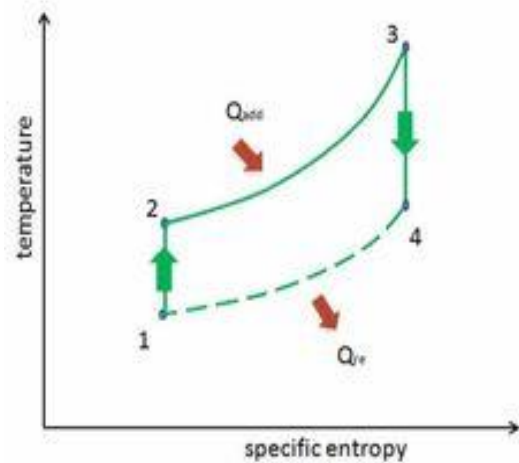


Figure I.7 : Diagramme T-S

**-Processus 1-2:** La compression adiabatique réversible ou l'air ambiant de compression isentropique est aspiré dans le compresseur.

**-Processus 2-3:** Ajout de chaleur à pression constante, de la chaleur est ajoutée à l'air comprimé lorsqu'il traverse une chambre de combustion.

**-Processus 3-4:** Expansion adiabatique réversible ou expansion isentropique; L'air comprimé chauffé passe à travers la turbine.

**-Processus 4-1:** rejet de chaleur à pression constante, la chaleur est rejetée dans l'air ambiant.

### III- La turbine à gaz :

#### III-1\ Introduction et fonctionnement :

La turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne qui convertit l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique.

Elle est largement utilisée dans de nombreux domaines tels que l'industrie pétrolière, l'aviation, la production d'énergie électrique, les navires, les trains, etc.

**Le processus de fonctionnement d'une turbine à gaz** peut être divisé en plusieurs étapes. Tout d'abord, l'air ambiant est aspiré dans la turbine à travers un compresseur. Le compresseur comprime l'air et le propulse vers la chambre de combustion.

Dans la chambre de combustion, le carburant, généralement du gaz naturel ou du kérosène, est injecté et mélangé avec l'air comprimé. Une étincelle est ensuite créée pour enflammer le mélange air-carburant, produisant une combustion continue. Cette combustion libère une grande quantité de chaleur et de gaz à haute pression.

Les gaz chauds et sous pression produits par la combustion sont ensuite dirigés vers la turbine. La turbine est composée de plusieurs rangées de pales montées sur un arbre central. Lorsque les gaz chauds passent à travers la turbine, ils transfèrent leur énergie cinétique aux pales, les faisant tourner.

L'arbre de la turbine est connecté à un générateur ou à un compresseur, selon l'application de la turbine à gaz. Dans le cas d'une turbine à gaz utilisée pour produire de l'électricité, l'arbre est relié à un générateur, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans le cas d'une turbine à gaz utilisée pour la propulsion d'un avion, l'arbre est relié à un compresseur qui comprime l'air entrant dans les moteurs à réaction.

Après avoir traversé la turbine, les gaz d'échappement chauds sont évacués vers l'extérieur, généralement à travers un tuyau d'échappement. Cependant, certains systèmes de turbines à gaz utilisent également l'énergie des gaz d'échappement pour entraîner une autre turbine, créant ainsi un cycle combiné.

**La température de fonctionnement d'une turbine à gaz** varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la conception de la turbine, le type de carburant utilisé et l'application spécifique de la turbine. En général, les turbines à gaz sont conçues pour fonctionner à des températures élevées afin d'optimiser leur efficacité.

Les températures de fonctionnement des turbines à gaz peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius. Les parties les plus chaudes d'une turbine à gaz sont les sections de combustion et de combustion externe, où le carburant est brûlé pour générer de l'énergie. Dans ces zones, les températures peuvent dépasser 1 000 degrés Celsius.

Pour supporter de telles températures élevées, les turbines à gaz sont construites avec des matériaux spéciaux résistants à la chaleur, tels que des alliages de nickel et de cobalt. De plus, des techniques de refroidissement sophistiquées, telles que le refroidissement par air ou par film, sont utilisées pour maintenir les températures de fonctionnement dans des limites acceptables et protéger les composants de la turbine contre les dommages thermiques.

En résumé, la turbine à gaz fonctionne en comprimant l'air ambiant, en le combinant avec du carburant pour créer une combustion, en dirigeant les gaz chauds résultants à travers une turbine pour produire de l'énergie

mécanique, et en utilisant cette énergie pour générer de l'électricité ou propulser des appareils. C'est un système efficace et fiable qui est utilisé dans de nombreuses applications industrielles et de transport.

**La turbine à gaz à des avantages** tels que des taux élevés de production d'énergie, sa capacité à démarrer rapidement, une faible émission de polluants et une faible consommation de carburant. Cependant, elle présente également quelques inconvénients, tels que le coût élevé de fabrication et de maintenance et le bruit généré lors de son fonctionnement.

Malgré ses limitations, la turbine à gaz reste une technologie très importante et est devenue une pierre angulaire de l'industrie moderne.



**Figure I.8 : Turbine à gaz**

### **III-2\ Historique :**

L'histoire de la turbine à gaz remonte au début du XXe siècle. En 1903, le physicien britannique William Parsons a construit la première turbine à gaz fonctionnelle, qui était utilisée pour générer de l'électricité. Cette turbine était une turbine à gaz à action, dans laquelle les gaz d'échappement étaient dirigés sur des pales fixes pour générer de l'énergie.<sup>(16)</sup>

Au cours des années suivantes, plusieurs améliorations ont été apportées à la conception de la turbine à gaz. En 1910, l'ingénieur suisse Georges de Mestral a conçu la première turbine à gaz à réaction, dans laquelle les gaz d'échappement étaient dirigés sur des pales mobiles pour générer de l'énergie. Cette conception est toujours utilisée aujourd'hui dans les turbines à gaz modernes.

Dans les années 1930 et 1940, les turbines à gaz ont été largement utilisées pour propulser des avions et des navires. Les turbines à gaz ont également été utilisées pour produire de l'électricité dans des centrales électriques. Cependant, les premières turbines à gaz étaient relativement inefficaces et n'étaient pas très fiables.

Dans les années 1950 et 1960, les progrès technologiques ont permis de construire des turbines à gaz plus efficaces et plus fiables. Les turbines à gaz ont été utilisées de plus en plus pour produire de l'électricité, ainsi que pour propulser des navires et des avions.

Au cours des dernières décennies, les turbines à gaz ont connu une évolution significative avec l'introduction de nouvelles technologies telles que le refroidissement par film, les aubes en céramique et les matériaux composites. Ces améliorations ont permis de développer des turbines à gaz plus efficaces, plus durables et plus respectueuses de l'environnement.

En résumé, l'histoire de la turbine à gaz est marquée par des avancées significatives dans la conception et la technologie de ces machines au fil du temps, ce qui a permis d'améliorer leur efficacité, leur fiabilité et leur durée de vie.

### III-3\ Les composants :

Une turbine à gaz est composée de plusieurs éléments, chacun remplissant une fonction spécifique dans le processus de production d'énergie mécanique. Voici les principaux composants d'une turbine à gaz :

**1. Le compresseur :** il sert à comprimer l'air ambiant avant qu'il ne soit introduit dans la chambre de combustion. Le compresseur est généralement composé de plusieurs étages de pales tournantes qui compriment progressivement l'air.

**2. La chambre de combustion :** c'est l'endroit où le combustible est brûlé pour produire de la chaleur et des gaz chauds et sous pression. La forme et la taille de la chambre de combustion peuvent varier en fonction de la conception de la turbine.

**3. Les turbines :** ce sont des éléments rotatifs qui extraient l'énergie des gaz chauds et sous pression produits par la combustion du combustible. Les turbines sont généralement composées de plusieurs étages de pales tournantes et fixes qui transforment l'énergie cinétique des gaz en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre de la turbine.

**4. L'arbre :** c'est l'élément qui est mis en rotation par les turbines et qui transmet l'énergie mécanique produite à l'extérieur de la turbine.

**5. Les systèmes de contrôle :** ils permettent de réguler le fonctionnement de la turbine, notamment en modifiant le débit de combustible, la pression et la température des gaz dans la chambre de combustion.

**6. Le système d'échappement :** il permet de diriger les gaz d'échappement hors de la turbine et de les éliminer de manière sûre.

**7. Le système de refroidissement :** il permet de maintenir une température de fonctionnement optimale de la turbine et de prévenir les dommages dus à la chaleur.

Ces composants sont souvent combinés en différents agencements pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application de turbine à gaz.

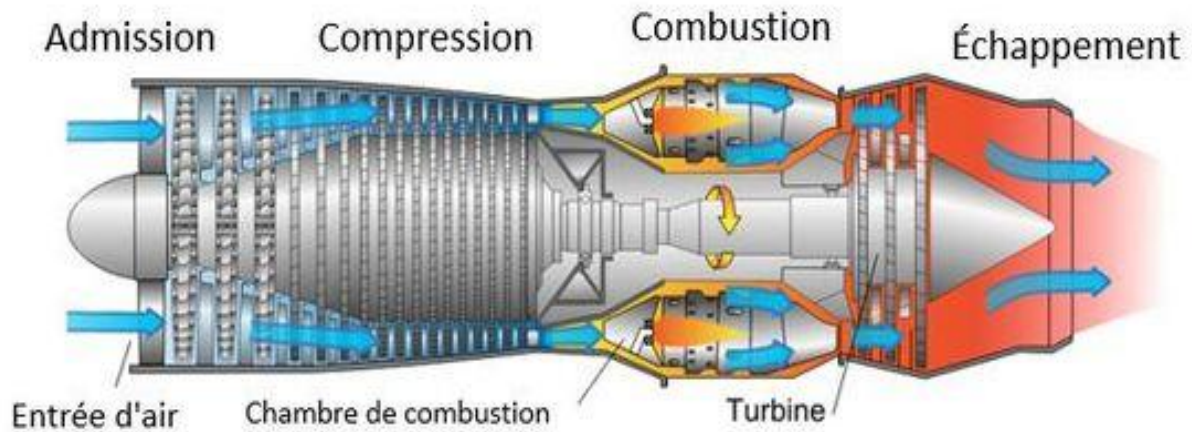


Figure I.9 : Les composants de turbine à gaz

### III-4\ Les lois :

Les turbines à gaz fonctionnent selon des principes physiques bien établis. Les lois de la turbine à gaz décrivent les relations entre les différents paramètres qui influencent la performance d'une turbine à gaz. Les principales lois de la turbine à gaz sont :

1. **La loi de Boyle-Mariotte** : cette loi décrit la relation entre la pression et le volume d'un gaz. Elle indique que, à température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume.
2. **La loi de Charles** : cette loi décrit la relation entre la température et le volume d'un gaz. Elle indique que, à pression constante, le volume d'un gaz est proportionnel à sa température absolue.
3. **La loi de Gay-Lussac** : cette loi décrit la relation entre la pression et la température d'un gaz. Elle indique que, à volume constant, la pression d'un gaz est proportionnelle à sa température absolue.
4. **La loi de Joule** : cette loi décrit la relation entre l'énergie et la température d'un gaz. Elle indique que, à volume constant, l'énergie interne d'un gaz est proportionnelle à sa température absolue.
5. **La loi de Bernoulli** : cette loi décrit la relation entre la pression, la vitesse et la hauteur d'un fluide en mouvement. Elle indique que, à mesure que la vitesse d'un fluide augmente, la pression diminue.

Ces lois sont appliquées dans la conception et l'optimisation des turbines à gaz pour maximiser leur efficacité et leur performance. Par exemple, la loi de Boyle-Mariotte est utilisée pour déterminer la taille optimale de la chambre de combustion et la pression du gaz à la sortie de la turbine, tandis que la loi de Joule est utilisée pour calculer la quantité d'énergie produite par la turbine.

### III-5\ La puissance et le rendement :

La puissance et le rendement d'une turbine à gaz sont des aspects essentiels de son fonctionnement.

**La puissance d'une turbine à gaz** est généralement mesurée en mégawatts (MW) et dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de la turbine, la pression et la température des gaz d'échappement, ainsi que du



taux de combustion du carburant. Plus la turbine est grande et plus les gaz d'échappement sont chauds et sous pression élevée, plus la puissance produite sera importante.

**Le rendement d'une turbine à gaz** est défini comme le rapport entre la puissance de sortie et l'énergie fournie. Il est exprimé en pourcentage et reflète l'efficacité de la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique. Le rendement des turbines à gaz modernes peut atteindre jusqu'à 40 à 50 %, ce qui en fait l'une des options les plus efficaces pour la production d'électricité.

Plusieurs facteurs influencent le rendement d'une turbine à gaz. Tout d'abord, un compresseur efficace est essentiel pour augmenter la pression des gaz d'admission avant la combustion. Ensuite, une combustion complète et efficace dans la chambre de combustion est cruciale pour obtenir un rendement élevé. Enfin, l'utilisation de matériaux avancés dans la turbine permet de résister aux températures élevées des gaz d'échappement, réduisant ainsi les pertes thermiques et améliorant le rendement global.

Il est également important de noter que les turbines à gaz sont souvent utilisées dans des cycles combinés, où la chaleur des gaz d'échappement est récupérée pour produire de la vapeur et générer de l'électricité supplémentaire dans une turbine à vapeur. Cela permet d'augmenter le rendement global du système.

En conclusion, la puissance et le rendement d'une turbine à gaz dépendent de plusieurs facteurs, tels que la taille, la pression, la température et le taux de combustion. Avec les avancées technologiques, les turbines à gaz modernes atteignent des rendements élevés, ce qui en fait une option attrayante pour la production d'électricité et d'autres applications industrielles.

## IV- Le refroidissement d'une turbine à gaz :

### IV-1\ Introduction :

Le refroidissement joue un rôle essentiel dans le fonctionnement optimal et la durabilité d'une turbine à gaz. Les turbines à gaz sont des machines extrêmement puissantes qui fonctionnent à des températures très élevées, souvent supérieures à 1000 degrés Celsius. Pour maintenir les composants internes de la turbine à des niveaux de température acceptables, un système de refroidissement efficace est nécessaire. Le refroidissement permet de prévenir les dommages causés par la chaleur excessive, d'améliorer la performance et la fiabilité de la turbine, et d'augmenter sa durée de vie. Dans cette discussion, nous examinerons les différents mécanismes et technologies de refroidissement utilisés dans les turbines à gaz, ainsi que leur impact sur la performance globale de la machine.

### IV-2\ Historique :

Le refroidissement des turbines à gaz est une technique couramment utilisée pour améliorer l'efficacité et la durée de vie de ces machines. Au fil du temps, plusieurs méthodes de refroidissement ont été développées et améliorées pour répondre aux besoins de l'industrie.

Dans les années 1940, la première méthode de refroidissement consistait à utiliser de l'eau pour refroidir les aubes de la turbine. Cependant, cette méthode avait des limitations en termes de température de fonctionnement et de durée de vie des aubes.

Dans les années 1950, une nouvelle méthode de refroidissement par air a été développée. Cette méthode impliquait l'utilisation d'un système de refroidissement par air comprimé pour refroidir les aubes de la turbine. Cette méthode a permis d'augmenter la température de fonctionnement de la turbine, ce qui a augmenté l'efficacité de la machine.(17)

Dans les années 1970, une méthode de refroidissement plus avancée a été développée, appelée refroidissement par film. Cette méthode impliquait l'utilisation d'un film de liquide sur les aubes de la turbine pour les protéger de la chaleur intense produite pendant le fonctionnement. Cette méthode a permis d'augmenter encore davantage la température de fonctionnement de la turbine, ce qui a entraîné une amélioration significative de l'efficacité de la machine.(18)

Au cours des dernières décennies, d'autres méthodes de refroidissement ont été développées, notamment le refroidissement par convection forcée, le refroidissement par convection naturelle et le refroidissement par pulvérisation. Ces méthodes ont permis de développer des turbines à gaz plus efficaces et plus durables pour répondre aux besoins de l'industrie.

En résumé, le refroidissement des turbines à gaz a connu une évolution significative au fil du temps, avec l'introduction de nouvelles méthodes de refroidissement pour améliorer l'efficacité et la durée de vie des machines.

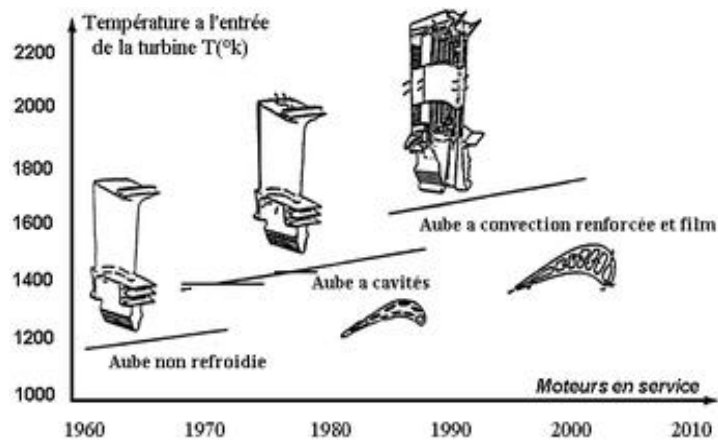


Figure I.10 : Evolution des technologies de refroidissement

### IV-3\ Le mécanisme de refroidissement :

Le refroidissement dans une turbine à gaz est essentiel pour prévenir la surchauffe des composants et garantir des performances durables. Différents mécanismes de refroidissement sont utilisés pour assurer une dissipation efficace de la chaleur générée lors du fonctionnement de la turbine. L'un des principaux mécanismes est **le refroidissement par air**, où de l'air frais est canalisé à travers des passages internes dans les aubes et les disques de turbine pour extraire la chaleur excessive. Ce processus permet de maintenir les températures à des niveaux acceptables. **Le refroidissement par film** est un autre mécanisme utilisé pour protéger les surfaces internes des chambres de combustion et des aubes de turbine. Une fine couche de film de refroidissement est créée en injectant de l'air ou un mélange d'air et de carburant le long des parois, ce qui aide à maintenir des températures contrôlées. **Le refroidissement par circulation** interne implique de faire circuler un fluide de refroidissement, tel que de l'eau, à travers des passages internes dans les composants de la turbine pour extraire la chaleur.(19) Enfin, **le refroidissement par injection de carburant** utilise l'injection de carburant dans la chambre de combustion pour absorber la chaleur et refroidir les composants adjacents.

Ces différentes méthodes de refroidissement sont souvent utilisées en combinaison pour maximiser l'efficacité de refroidissement et la durée de vie des turbines à gaz. Le choix des techniques de refroidissement dépend de divers facteurs tels que la conception de la turbine, l'application spécifique et les contraintes opérationnelles.

## V- Le refroidissement des aubes de turbine à gaz :

### V-1\ Introduction :

Le refroidissement des aubes de turbine à gaz est un aspect crucial de leur conception et de leur fonctionnement. Les turbines à gaz sont des machines qui convertissent l'énergie des gaz de combustion en énergie mécanique pour alimenter diverses applications industrielles, telles que la production d'électricité, la propulsion d'aéronefs et la compression de gaz. Cependant, en raison des températures élevées générées par les gaz de combustion, les aubes de turbine sont soumises à des contraintes thermiques sévères qui pourraient entraîner leur déformation ou leur défaillance.

Le mécanisme de refroidissement des aubes de turbine à gaz vise à maintenir les aubes à des températures acceptables, tout en maximisant leur performance et leur durabilité. Différentes techniques de refroidissement sont utilisées pour dissiper la chaleur des aubes et les protéger des températures extrêmes.

Le refroidissement des aubes peut être réalisé de différentes manières, notamment par l'utilisation d'air ambiant, par la création d'un film d'air protecteur, par le refroidissement par transpiration ou par le recours à des circuits internes de convection. Chaque méthode a ses propres avantages et est adaptée à des conditions et des exigences spécifiques.

L'objectif ultime du refroidissement des aubes de turbine à gaz est de maintenir leur intégrité structurelle, d'améliorer leur performance en permettant un fonctionnement à des températures plus élevées et de prolonger leur durée de vie. En assurant un refroidissement efficace, les turbines à gaz peuvent fonctionner de manière optimale, offrant une production d'énergie efficace et fiable dans diverses applications industrielles.

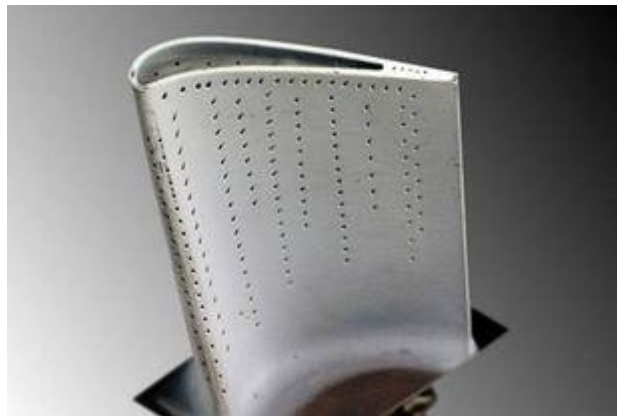


Figure I.11 : Aube de turbine à gaz

### V-2\ Les types de refroidissement :

Il existe plusieurs types de refroidissement pour les aubes de turbine à gaz, dont voici les principaux :

- 1. Refroidissement par convection :** L'air de refroidissement est soufflé sur la surface de l'aube, ce qui aide à dissiper la chaleur.
- 2. Refroidissement par film :** L'air de refroidissement est soufflé à travers des petits trous dans l'aube, formant une fine couche d'air entre l'aube et les gaz chauds, ce qui permet de protéger la surface de l'aube de la chaleur.
- 3. Refroidissement par transpiration :** Des canaux sont ménagés dans l'épaisseur de l'aube pour faire circuler un fluide de refroidissement qui se vaporise en passant à travers la paroi de l'aube, évacuant ainsi la chaleur.
- 4. Refroidissement par impact d'eau (pulvérisation) :** Des jets d'eau sont pulvérisés sur la surface de l'aube pour la refroidir.
- 5. Refroidissement par mélange :** L'air de refroidissement est mélangé avec les gaz chauds, ce qui diminue la température de ces derniers et donc de l'aube.
- 6. Refroidissement par film de combustible :** Dans certains cas, un film de combustible est utilisé pour refroidir les aubes de turbine à gaz. Une petite quantité de combustible est injectée dans les canaux internes des aubes, où elle s'évapore rapidement et absorbe la chaleur, puis est brûlée dans la chambre de combustion.

Chaque type de refroidissement a ses avantages et ses inconvénients, et le choix dépend de nombreux facteurs tels que la température et la pression des gaz chauds, les matériaux utilisés pour la fabrication des aubes, la géométrie des aubes, etc.(20)

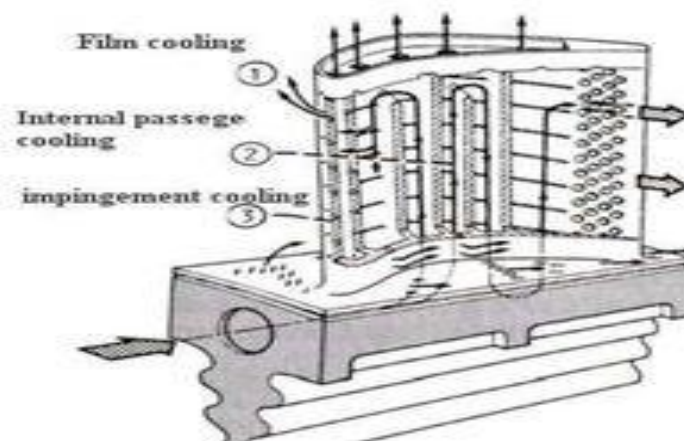


Figure I.12 : Différents types de refroidissement d'une aube

### V-3\ Le refroidissement par film :

#### V-3.1\ Introduction :

Le refroidissement par film est une technique couramment utilisée pour refroidir les aubes de turbine à gaz et éviter qu'elles ne se dégradent en raison des températures élevées auxquelles elles sont exposées. Cette technique de refroidissement consiste à faire circuler un film d'air ou d'air mélangé à un fluide de

refroidissement sur la surface externe de l'aube de la turbine, formant une couche protectrice qui diminue la température de la surface.

Il est souvent utilisé dans les turbines à gaz à haut rendement et à haute température, où la chaleur dégagée par la combustion du carburant est très élevée. Cette technique permet de maintenir la température de la surface de l'aube en dessous de la limite maximale autorisée pour éviter la déformation ou la fissuration de l'aube.

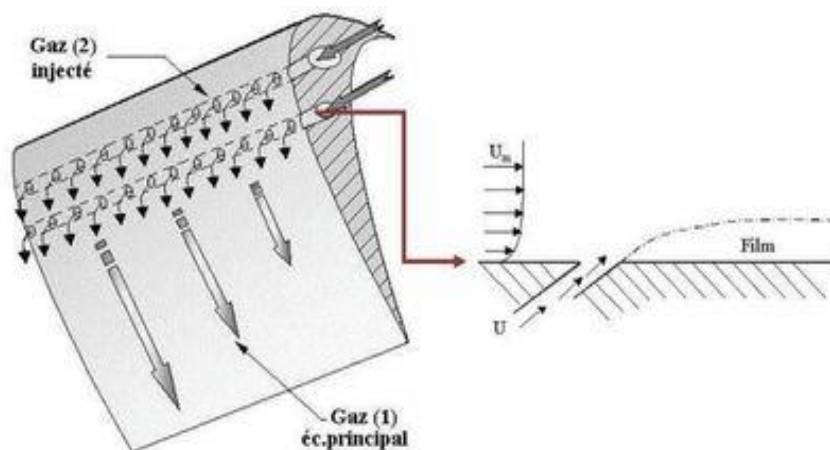
Le processus de refroidissement par film fonctionne grâce à des petits trous ou fentes ménagés dans la surface de l'aube. L'air de refroidissement est alors insufflé à travers ces trous, formant une fine couche d'air entre l'aube et les gaz chauds qui passent à travers la turbine. Cette couche d'air agit comme une barrière thermique, protégeant l'aube de la chaleur excessive.

Le choix de la taille et de l'emplacement des trous dépend de la géométrie de l'aube, de la température et de la pression des gaz chauds, ainsi que de la nature et de la quantité de fluide de refroidissement utilisé. Pour maintenir un flux d'air uniforme sur la surface de l'aube, les trous sont souvent disposés en rangées parallèles à la direction de l'écoulement des gaz chauds.

Les fluides de refroidissement utilisés dans le refroidissement par film peuvent être de l'air, de l'eau, de l'huile, ou une combinaison de ces fluides. Certains systèmes de refroidissement par film utilisent également des liquides de refroidissement à haute conductivité thermique, tels que les métaux liquides, pour améliorer l'efficacité du refroidissement.

En résumé, le refroidissement par film est une technique de refroidissement efficace pour les aubes de turbine à gaz soumises à des températures élevées.

Cette technique permet de maintenir la température de la surface de l'aube en dessous de la limite maximale autorisée, ce qui contribue à prolonger la durée de vie de la turbine et à améliorer son rendement.



**Figure I.13 : Principe du refroidissement par film**

### V-3.2\ Les lois de refroidissement par film :

Les lois de refroidissement par film sont des lois empiriques qui décrivent la manière dont un liquide refroidit une surface solide. Elles sont souvent utilisées en ingénierie pour calculer le transfert de chaleur d'une surface à un liquide en mouvement.

Les trois lois de refroidissement par film les plus couramment utilisées sont:

**1. La loi de refroidissement de Newton:** Cette loi stipule que le taux de transfert de chaleur entre une surface solide et un liquide en mouvement est proportionnel à la différence de température entre la surface et le liquide. Cette loi est souvent écrite sous la forme suivante:

$Q = h.A.(T_s - T_f)$ , où  $Q$  est le taux de transfert de chaleur,  $h$  est le coefficient de transfert de chaleur,  $A$  est la surface de la surface solide,  $T_s$  est la température de la surface solide, et  $T_f$  est la température du liquide en mouvement.

**2. La loi de refroidissement de Dittus-Boelter:** Cette loi est utilisée pour des liquides en écoulement turbulent et stipule que le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est proportionnel à la puissance **0.8** du nombre de Reynolds  $Re$ . Cette loi est souvent écrite sous la forme suivante:

$h = 0.023. (Re)^{0.8} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \left(\frac{k}{D}\right)$ , où  $\mu$  est la viscosité du liquide,  $\mu_w$  est la viscosité de l'eau,  $k$  est la conductivité thermique du liquide, et  $D$  est le diamètre hydraulique de l'écoulement.

**3. La loi de refroidissement de Sieder-Tate:** Cette loi est utilisée pour des liquides en écoulement laminaire et stipule que le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est proportionnel à la puissance **0.4** du nombre de Reynolds  $Re$  et à la puissance **0.6** du nombre de Prandtl  $Pr$ . Cette loi est souvent écrite sous la forme suivante:

$Nu = 0.664. (Re)^{0.5} \frac{(Pr)^{0.33}}{\left[1 + \left(\frac{0.044}{Pr}\right)^{0.667} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}\right]}$ , où  $Nu$  est le nombre de Nusselt, qui représente le rapport entre

le transfert de chaleur convectif et le transfert de chaleur conductif.

Ces lois sont souvent utilisées pour concevoir des échangeurs de chaleur, des radiateurs, des évaporateurs, des condenseurs et d'autres équipements de refroidissement où le transfert de chaleur est important.

### V-3.3\ Les effets du refroidissement par film :

Le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz a un impact significatif sur les performances globales de la turbine. Voici certains des effets du refroidissement par film sur les performances de la turbine à gaz :

**1. Amélioration de l'efficacité thermique :** Le refroidissement par film permet de maintenir les aubes de turbine à des températures acceptables, ce qui permet d'augmenter le rapport de compression et d'améliorer l'efficacité du cycle de la turbine à gaz. En réduisant les températures de fonctionnement, le refroidissement par film permet une plus grande différence entre les températures d'entrée et de sortie de la turbine, augmentant ainsi le rendement thermodynamique.

**2. Réduction des déformations structurelles :** Les températures élevées auxquelles les aubes de turbine sont soumises peuvent entraîner des déformations et des contraintes structurelles. Le refroidissement par film aide à maintenir les aubes à des températures plus basses, réduisant ainsi les contraintes mécaniques et les déformations qui pourraient affecter les performances et la durabilité de la turbine.

**3. Augmentation de la durée de vie des aubes :** En maintenant les aubes de turbine à des températures plus basses, le refroidissement par film contribue à prolonger leur durée de vie en réduisant les effets de la chaleur et de la fatigue. Cela permet une exploitation plus fiable et une réduction des coûts de maintenance liés au remplacement des aubes.

**4. Amélioration de la résistance aux dommages thermiques :** Les aubes de turbine peuvent être exposées à des conditions extrêmes, telles que des gradients de température élevés et des chocs thermiques. Le refroidissement par film aide à atténuer ces effets en maintenant des températures plus uniformes sur toute la surface de l'aube, améliorant ainsi la résistance aux dommages thermiques.

**5. Optimisation des performances à charge élevée :** Le refroidissement par film permet de fonctionner à des charges plus élevées en maintenant les aubes de turbine à des températures acceptables. Cela permet d'obtenir des performances accrues de la turbine à gaz à pleine charge, en augmentant la production d'énergie sans compromettre la durabilité des aubes.

**6. Réduction des émissions polluantes :** En maintenant les températures de fonctionnement des aubes de turbine à gaz à des niveaux contrôlés, le refroidissement par film contribue à réduire les émissions polluantes, en particulier les émissions d'oxydes d'azote (NOx). Cela permet de répondre aux normes environnementales plus strictes.

Il est important de noter que le refroidissement par film peut également présenter des défis, tels que la consommation d'air supplémentaire et les pertes de pression, qui peuvent affecter légèrement l'efficacité globale de la turbine à gaz. Cependant, les avantages en termes de performance, de durabilité et de réduction des émissions l'emportent généralement sur ces inconvénients.



Figure I.14 : Aube sans (a) et avec (b) le refroidissement par film

## V-4\ Couche Limite :

### V-4.1\ Introduction :

La couche limite de refroidissement par film est un élément essentiel dans la conception et le fonctionnement des aubes de turbine à gaz. Les aubes de turbine sont soumises à des températures

extrêmement élevées en raison des conditions de fonctionnement rigoureuses auxquelles elles sont exposées. Pour maintenir leur intégrité structurelle et optimiser leurs performances, il est crucial de contrôler efficacement la chaleur générée.

Le refroidissement par film est une technique couramment utilisée dans les turbines à gaz pour réduire la température de surface des aubes et protéger leur matériau structural contre les dommages thermiques. La couche limite de refroidissement par film joue un rôle central dans ce processus.

La couche limite se forme lorsque le film de refroidissement, généralement composé d'air, est injecté sur la surface des aubes de turbine. Ce film d'air crée une couche protectrice qui s'écoule le long de la surface de l'aube. La couche limite de refroidissement par film agit comme une barrière thermique en empêchant la chaleur de transférer directement à la surface de l'aube.

La formation et le développement de la couche limite de refroidissement par film sont influencés par divers facteurs, tels que la vitesse de l'air, la température, la rugosité de surface et la configuration des orifices d'injection. Comprendre ces mécanismes et caractéristiques est crucial pour optimiser l'efficacité du refroidissement par film et maximiser les performances des aubes de turbine à gaz.

Dans cette étude, nous explorerons les différents aspects de la couche limite de refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. Nous examinerons les mécanismes de formation de la couche limite, les caractéristiques de son développement et son influence sur les performances des aubes de turbine. Nous aborderons également les méthodes de modélisation et de simulation utilisées pour étudier la couche limite et les perspectives futures pour améliorer cette technique de refroidissement.

En comprenant en détail la couche limite de refroidissement par film des aubes de turbine à gaz, nous pourrions développer des stratégies de conception et de fonctionnement plus efficaces pour les turbines à gaz, garantissant ainsi une performance optimale, une durabilité accrue et une réduction des dommages thermiques des aubes de turbine.

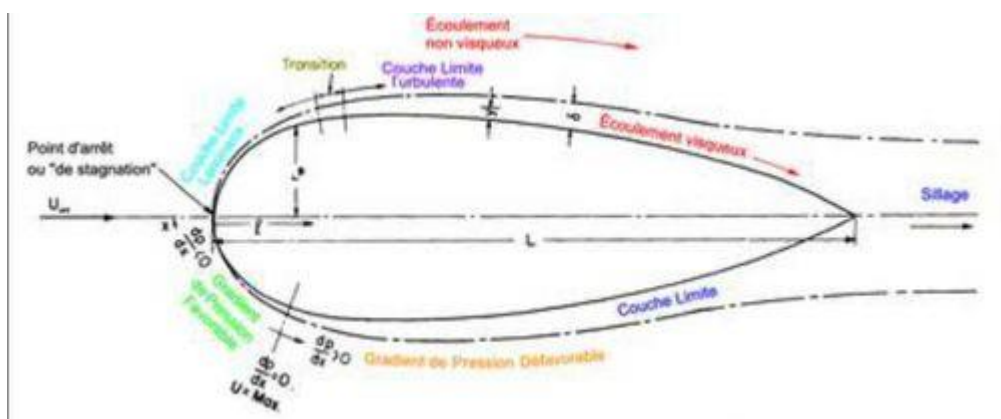


Figure I.15 : Couche limite



### V-4.2\ Étapes de développement de la couche limite :

Les étapes de développement de la couche limite de refroidissement par film des aubes de turbine à gaz peuvent être décrites comme suit :

**1. Injection du film de refroidissement :** La première étape du développement de la couche limite consiste à injecter le film de refroidissement sur la surface de l'aube de turbine. Le film de refroidissement est généralement composé d'air ou d'un mélange d'air et de vapeur d'eau. Il est injecté à travers de petits orifices spécialement conçus, placés stratégiquement le long de la surface de l'aube.

**2. Formation de la couche initiale :** Lorsque le film de refroidissement est injecté, il se forme une couche initiale sur la surface de l'aube. Cette couche est relativement mince et peut être affectée par la rugosité de surface de l'aube, la vitesse de l'air et d'autres conditions environnementales.

**3. Écoulement de la couche limite :** L'air du film de refroidissement s'écoule le long de la surface de l'aube, formant ainsi la couche limite de refroidissement. Cette couche limite agit comme une barrière thermique entre la surface de l'aube et le flux d'écoulement d'air chaud à haute pression.

**4. Épaississement de la couche limite :** Au fur et à mesure que l'écoulement de l'air se poursuit, la couche limite de refroidissement s'épaissit. Cela est dû à la diffusion et à la convection de la chaleur à travers la couche, ainsi qu'à l'interaction entre le film de refroidissement et le flux d'écoulement d'air environnant.

**5. Stabilisation de la couche limite :** Une fois que la couche limite de refroidissement a atteint une certaine épaisseur, elle se stabilise et maintient une température relativement constante sur la surface de l'aube. Cette stabilisation est cruciale pour assurer une protection thermique efficace de l'aube de turbine.

**6. Écoulement du film de refroidissement :** En fin de compte, le film de refroidissement s'écoule de la surface de l'aube, généralement à travers des ouvertures d'échappement spécifiques. Cela permet de maintenir un débit d'air constant pour assurer le refroidissement continu des aubes de turbine.

Il est important de noter que le développement de la couche limite de refroidissement par film est influencé par plusieurs facteurs, tels que la vitesse de l'air, la température du flux d'écoulement, la géométrie de l'aube, la rugosité de surface, ainsi que la conception et la configuration des orifices d'injection. Une compréhension précise de ces facteurs est cruciale pour optimiser l'efficacité du refroidissement par film et assurer des performances optimales des aubes de turbine à gaz.

### V-4.3\ Les lois de La couche limite :

Les turbines à gaz sont des machines complexes qui fonctionnent en utilisant l'écoulement de gaz pour produire de l'énergie mécanique. La couche limite joue un rôle important dans la conception et le fonctionnement des turbines à gaz.

Voici quelques lois de la couche limite qui sont importantes pour la conception d'une turbine à gaz :

**1. Loi de von Karman :** Comme mentionné précédemment, la loi de von Karman stipule que la vitesse de l'écoulement à l'intérieur de la couche limite est proportionnelle à la racine carrée de la distance de la surface solide. Dans une turbine à gaz, cette loi est utilisée pour déterminer l'épaisseur de la couche limite sur les pales de la turbine. Cela permet de concevoir des pales qui minimisent les pertes de pression et maximisent l'efficacité de la turbine.

**2. Loi de Prandtl :** La loi de Prandtl stipule que le coefficient de frottement sur la surface solide est proportionnel à la racine carrée de la distance de la surface solide. Dans une turbine à gaz, cette loi est utilisée pour déterminer la perte de pression due aux forces de frottement sur les pales de la turbine. Cela permet de concevoir des pales qui minimisent les pertes de pression et maximisent l'efficacité de la turbine.

**3. Loi de Reynolds :** La loi de Reynolds est également importante dans la conception d'une turbine à gaz. Elle permet de déterminer la transition entre l'écoulement laminaire et turbulent dans la couche limite sur les pales de la turbine. Cette transition a un impact significatif sur l'efficacité de la turbine.

Une conception adéquate de la turbine doit prendre en compte la transition de l'écoulement pour minimiser les pertes de pression et maximiser l'efficacité.

**4. Loi de Crocco :** La loi de Crocco décrit la relation entre la position de la couche limite et le taux de compression dans un écoulement compressible. Dans une turbine à gaz, cette loi est utilisée pour déterminer l'épaisseur de la couche limite sur les pales de la turbine en fonction du taux de compression. Cela permet de concevoir des pales qui maximisent l'efficacité de la turbine.

Ces lois de la couche limite sont utilisées pour concevoir des turbines à gaz efficaces et fiables, capables de produire de l'énergie avec un rendement élevé.

#### V-4.4\ Modèles mathématiques pour représenter la couche limite :

Il existe plusieurs modèles mathématiques qui peuvent être utilisés pour représenter la couche limite de refroidissement dans le contexte du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. Voici quelques-uns des modèles couramment utilisés :

**1. Modèle de couche limite laminaire :** Ce modèle est basé sur les équations de Navier-Stokes et suppose un écoulement laminaire de l'air dans la couche limite. Il utilise des équations simplifiées pour représenter les variations de vitesse, de pression et de température le long de la surface de l'aube.

**2. Modèle de couche limite turbulente :** Ce modèle suppose que la couche limite est caractérisée par un écoulement turbulent. Il utilise des équations de turbulence, telles que les équations de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) ou les modèles de turbulence à deux équations (comme le modèle  $k-\epsilon$ ), pour représenter les caractéristiques turbulentes de la couche limite.

**3. Modèle de couche limite thermique :** Ce modèle se concentre sur les aspects thermiques de la couche limite, en utilisant les équations de conservation de l'énergie pour représenter les variations de température à travers l'épaisseur de la couche. Il prend en compte les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement.

**4. Modèle de transfert de chaleur mixte :** Ce modèle combine à la fois les aspects de l'écoulement et du transfert de chaleur dans la couche limite. Il utilise des équations couplées pour représenter les variations de vitesse, de pression et de température, tout en tenant compte des mécanismes de transfert de chaleur convectif et conductif.

Ces modèles mathématiques peuvent être résolus à l'aide de techniques de simulation numérique, telles que la méthode des volumes finis, la méthode des éléments finis ou la méthode des différences finies. Ils permettent de prédire les caractéristiques de la couche limite, telles que les profils de vitesse, de pression et de température, et de quantifier l'efficacité du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz.

Il convient de noter que le choix du modèle dépend des conditions spécifiques de fonctionnement de la turbine à gaz et des objectifs de l'étude. Les modèles mathématiques doivent être validés expérimentalement pour s'assurer de leur précision et de leur adéquation dans la représentation de la couche limite de refroidissement.

#### V-4.5\ Épaisseur et structure de la couche limite :

L'épaisseur et la structure de la couche limite dans le contexte du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz peuvent être décrites comme suit :

L'épaisseur de la couche limite fait référence à la distance entre la surface de l'aube de turbine et la limite externe du film de refroidissement. Cette épaisseur varie le long de la surface de l'aube et peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la vitesse de l'air, la température du flux d'écoulement, la rugosité de surface, la géométrie de l'aube et la conception des orifices d'injection.

Dans le contexte du refroidissement par film, une couche limite plus épaisse peut offrir une meilleure protection thermique en réduisant le transfert de chaleur à la surface de l'aube. Cependant, une couche limite trop épaisse peut entraîner une augmentation des pertes de pression et une réduction de l'efficacité du refroidissement. Il est donc important de trouver un équilibre entre l'épaisseur de la couche limite et les performances globales de la turbine à gaz.

La structure de la couche limite se réfère à la distribution de vitesse et de température à travers l'épaisseur de la couche. La structure peut être influencée par des facteurs tels que la convection de chaleur, la diffusion thermique et l'interaction entre le film de refroidissement et le flux d'écoulement environnant.

Typiquement, la vitesse de l'air est plus élevée près de la surface de l'aube et diminue progressivement à travers l'épaisseur de la couche limite. La température, quant à elle, est plus basse près de la surface de l'aube en raison du refroidissement effectué par le film. Au fur et à mesure que l'air s'écoule le long de la surface de l'aube, la température augmente progressivement, mais reste relativement inférieure à celle du flux d'écoulement principal.

La structure de la couche limite peut être modélisée et analysée à l'aide de techniques de simulation numérique, telles que la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Cela permet de mieux comprendre les variations de vitesse et de température à travers l'épaisseur de la couche limite, ce qui est essentiel pour optimiser le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz.

En comprenant l'épaisseur et la structure de la couche limite, il est possible de concevoir des systèmes de refroidissement par film plus efficaces, permettant ainsi de maintenir les aubes de turbine à des températures acceptables et d'améliorer les performances globales de la turbine à gaz.

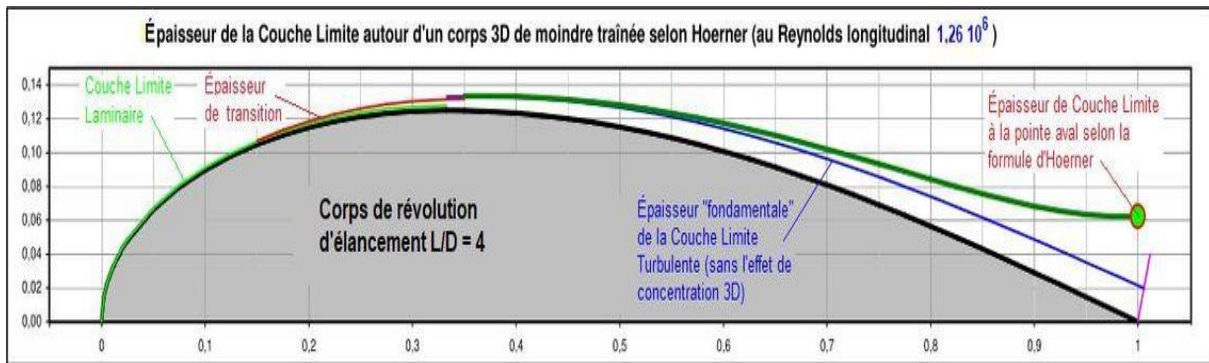


Figure I.16 : Épaisseur et structure de la couche limite

### ➤ Conclusion :

En conclusion, la turbine à gaz et le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz sont deux concepts importants dans le domaine de l'ingénierie des turbines à gaz. La turbine à gaz est un moteur largement utilisé pour la production d'électricité, la propulsion aéronautique et d'autres applications industrielles. Elle fonctionne en comprimant l'air ambiant, en le chauffant et en l'expulsant à haute pression à travers une turbine, ce qui entraîne la rotation de celle-ci et produit de l'énergie mécanique.

Cependant, les températures élevées atteintes à l'intérieur de la turbine peuvent entraîner une détérioration des aubes de turbine, ce qui peut réduire l'efficacité et la durée de vie de la turbine. C'est là qu'intervient le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. Ce processus consiste à former une fine couche d'air refroidi le long de la surface des aubes pour réduire la température de celles-ci et les protéger contre les dommages.

Le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz peut être réalisé de différentes manières, telles que l'injection d'air frais à travers des trous dans les aubes ou l'utilisation de conduits internes pour faire circuler un fluide de refroidissement. Ces techniques permettent de maintenir des températures de fonctionnement acceptables et d'améliorer les performances et la durabilité des turbines à gaz.

En résumé, la turbine à gaz est une technologie essentielle pour de nombreuses applications, mais les températures élevées à l'intérieur de la turbine peuvent poser des problèmes. Le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz offre une solution efficace pour prévenir les dommages causés par la chaleur excessive, assurant ainsi une meilleure performance et une plus grande durée de vie des turbines à gaz.



***Chapitre II***  
***La Modélisation de la***  
***Turbulence***

## I- Les volumes finis :

### I-1\ Introduction :

Les méthodes de Volume Fini sont une classe de techniques numériques utilisées pour résoudre les équations de conservation qui décrivent le comportement des fluides ou des phénomènes physiques dans un domaine donné. Ces méthodes offrent une approche discrète pour représenter les variables physiques à l'intérieur du domaine en les associant à des volumes finis. Le concept clé des méthodes de Volume Fini repose sur la discrétisation du domaine en un ensemble de volumes finis. Ces volumes, également appelés cellules, sont des sous-régions du domaine où les équations de conservation sont résolues. Chaque cellule est définie par ses frontières et contient des valeurs discrètes des variables physiques à l'intérieur de celle-ci. Pour résoudre les équations de conservation, les méthodes de Volume Fini utilisent une approche intégrale. Les équations sont intégrées sur chaque cellule du maillage, et les termes de flux sont évalués aux interfaces entre les cellules voisines. Cela permet d'obtenir une formulation discrète des équations de conservation qui peut être résolue numériquement.

Les méthodes de Volume Fini sont largement utilisées dans divers domaines scientifiques et d'ingénierie, tels que la mécanique des fluides, la thermodynamique, l'électromagnétisme, etc. Elles permettent de résoudre des problèmes complexes en fournissant une approximation numérique des solutions aux équations de conservation.

Une caractéristique importante des méthodes de Volume Fini est leur capacité à traiter des géométries complexes grâce à la flexibilité de leur maillage. Les maillages peuvent être structurés (grilles cartésiennes) ou non structurés (grilles triangulaires ou quadrangulaires) pour s'adapter à la géométrie du domaine d'étude. Cela permet une représentation précise des frontières et des discontinuités.

Les méthodes de Volume Fini présentent également des avantages en termes de conservation locale des quantités physiques. Les équations de conservation sont résolues sur chaque cellule de manière indépendante, ce qui garantit la conservation locale de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Cependant, il est important de noter que les méthodes de Volume Fini peuvent être sensibles à la qualité du maillage et nécessitent une validation rigoureuse pour garantir l'exactitude des résultats. De plus, le choix du schéma de discrétisation et des conditions aux limites peut influencer la précision et la stabilité de la méthode.

En résumé, les méthodes de Volume Fini fournissent une approche puissante pour résoudre numériquement les équations de conservation. Elles permettent de modéliser et de simuler des phénomènes physiques complexes dans des domaines variés, offrant ainsi une méthode polyvalente pour la modélisation et l'analyse numérique.

### I-2\ Les Principes fondamentaux du Volume Fini :

Les principes fondamentaux du Volume Fini sont essentiels pour comprendre et appliquer cette méthode de discrétisation numérique. Voici quelques éléments clés qui définissent les principes fondamentaux du Volume Fini :

- 1. Discrétisation du domaine :** Le domaine d'étude est divisé en un ensemble de volumes finis ou cellules. Ces cellules peuvent être de différentes formes et tailles, telles que des cubes, des prismes, des pyramides ou des tétraèdres, en fonction de la nature du problème et de la géométrie du domaine.
- 2. Points de Gauss et intégration numérique :** Pour évaluer les termes d'intégration et les flux aux interfaces des cellules voisines, des points de Gauss sont utilisés pour effectuer une intégration numérique. Les poids et les emplacements des points de Gauss sont choisis en fonction du degré de précision requis.
- 3. Approximation des variables physiques :** À l'intérieur de chaque cellule, les variables physiques telles que la pression, la température, la vitesse, etc., sont approximées par des fonctions interpolantes. Les valeurs de ces variables sont définies aux nœuds du maillage.
- 4. Équations de conservation :** Les équations de conservation, telles que les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, sont résolues sur chaque cellule du maillage. Ces équations sont discrétisées à l'aide de schémas numériques appropriés pour approximer les termes différentiels.
- 5. Conditions aux limites :** Les conditions aux limites sont spécifiées sur les bords du domaine ou sur les interfaces entre les différentes régions du domaine. Elles définissent les valeurs ou les comportements des variables physiques aux limites du système.
- 6. Assemblage des équations :** Une fois les équations discrétisées sur chaque cellule, elles sont assemblées pour former un système d'équations linéaires. Ce système est ensuite résolu numériquement pour obtenir les valeurs des variables physiques à l'intérieur du domaine.
- 7. Stabilité et convergence :** La stabilité et la convergence de la méthode du Volume Fini sont des aspects cruciaux. La stabilité garantit que la solution numérique ne diverge pas avec le temps, tandis que la convergence assure que la solution se rapproche de la solution exacte du problème continu lorsque la résolution du maillage est augmentée.

Les principes fondamentaux du Volume Fini fournissent les bases nécessaires pour appliquer cette méthode de discrétisation numérique dans divers problèmes scientifiques et d'ingénierie. Comprendre ces principes permet d'obtenir des approximations précises des solutions aux équations de conservation et d'analyser les phénomènes physiques à l'intérieur du domaine d'étude.

### I-3\ Maillage et discrétisation en Volume Fini :

Le maillage et la discrétisation en Volume Fini sont des étapes essentielles de la méthode pour représenter le domaine d'étude et résoudre les équations de conservation. Voici une description des concepts clés liés au maillage et à la discrétisation en Volume Fini :

- 1. Maillage du domaine :** Le domaine d'étude est subdivisé en un ensemble de cellules, également appelées éléments finis ou volumes finis. Le maillage peut être structuré (grilles cartésiennes) ou non structuré (grilles triangulaires ou quadrangulaires), en fonction de la géométrie et de la complexité du domaine.
- 2. Nœuds du maillage :** Chaque cellule du maillage est définie par des nœuds, qui sont les points d'intersection entre les cellules voisines. Les nœuds servent de points de référence pour l'approximation des variables physiques à l'intérieur des cellules.

**3. Variables nodales :** Les variables physiques, telles que la pression, la température, la vitesse, etc., sont définies aux nœuds du maillage. Ces variables nodales servent de points d'évaluation pour déterminer les valeurs approximatives à l'intérieur des cellules.

**4. Approximation des variables :** À l'intérieur de chaque cellule, les variables physiques sont approximées à l'aide de fonctions interpolantes. Ces fonctions permettent d'estimer les valeurs des variables dans les régions non nodales du maillage en utilisant les valeurs aux nœuds voisins.

**5. Discrétisation des équations :** Les équations de conservation sont discrétisées sur chaque cellule du maillage à l'aide de schémas numériques appropriés. Les schémas de discrétisation permettent d'approximer les termes différentiels des équations et de formuler les équations discrètes qui peuvent être résolues numériquement.

**6. Assemblage des équations :** Une fois les équations discrétisées sur chaque cellule, elles sont assemblées pour former un système d'équations linéaires. L'assemblage consiste à relier les contributions des différentes cellules et à construire la matrice de coefficient et le vecteur de terme source du système.

**7. Résolution numérique :** Le système d'équations linéaires obtenu est résolu numériquement pour obtenir les valeurs des variables physiques à l'intérieur du domaine. Différentes techniques de résolution, telles que la méthode directe ou la méthode itérative, peuvent être utilisées en fonction de la taille du système et de sa structure.

Le maillage et la discrétisation en Volume Fini permettent de représenter le domaine d'étude de manière discrète et d'approximer les variables physiques à l'intérieur des cellules. Ces étapes sont essentielles pour obtenir des solutions numériques aux équations de conservation et pour analyser les comportements physiques à l'intérieur du domaine. Le choix du type de maillage et du schéma de discrétisation dépend de la nature du problème et des objectifs de l'étude.(21)

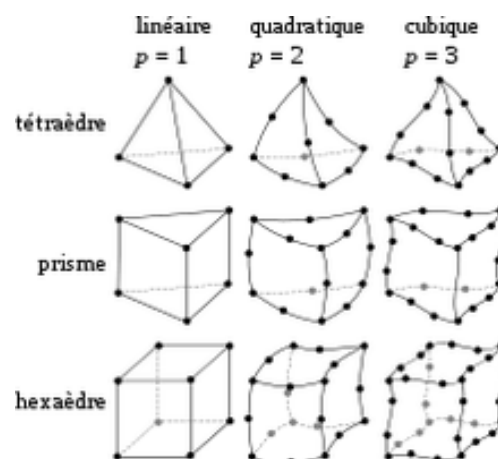


Figure II.1 : Les types de maillage



### I-4\ Résolution des équations de conservation avec le Volume Fini :

La résolution des équations de conservation constitue une étape cruciale dans l'application du Volume Fini. Cette méthode permet de résoudre numériquement les équations de conservation, telles que les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, pour obtenir des solutions approchées à l'intérieur du domaine d'étude. Voici les étapes clés de la résolution des équations de conservation avec le Volume Fini :

**1. Discrétisation des équations :** Les équations de conservation sont discrétisées sur chaque cellule du maillage à l'aide de schémas numériques appropriés. Les schémas de discrétisation approximent les termes différentiels des équations et forment des équations discrètes qui peuvent être résolues numériquement.

**2. Assemblage des équations :** Une fois les équations discrétisées sur chaque cellule, elles sont assemblées pour former un système d'équations linéaires. L'assemblage consiste à relier les contributions des différentes cellules et à construire la matrice de coefficient et le vecteur de terme source du système.

**3. Conditions aux limites :** Les conditions aux limites, spécifiées sur les bords du domaine ou sur les interfaces entre les différentes régions du domaine, sont prises en compte lors de l'assemblage des équations. Elles définissent les valeurs ou les comportements des variables physiques aux limites du système.

**4. Résolution du système d'équations :** Le système d'équations linéaires obtenu est résolu numériquement pour obtenir les valeurs des variables physiques à l'intérieur du domaine. Différentes techniques de résolution, telles que la méthode directe ou la méthode itérative, peuvent être utilisées en fonction de la taille du système et de sa structure.

**5. Itérations temporelles :** Si le problème étudié implique des phénomènes transitoires, des itérations temporelles peuvent être nécessaires pour résoudre les équations de conservation à chaque pas de temps. Les résultats obtenus à un pas de temps sont utilisés comme conditions initiales pour le pas de temps suivant.

**6. Analyse des résultats :** Une fois le système d'équations résolu, les valeurs des variables physiques à l'intérieur du domaine sont obtenues. Ces résultats peuvent être analysés et interprétés pour étudier les phénomènes physiques, évaluer les performances du système étudié et prendre des décisions appropriées.

La résolution des équations de conservation avec le Volume Fini permet d'obtenir des approximations numériques des solutions aux problèmes de fluides et de phénomènes physiques. Elle constitue une méthode puissante pour modéliser et simuler des systèmes complexes, et elle est largement utilisée dans les domaines de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, de l'aérodynamique et d'autres disciplines scientifiques et d'ingénierie.(22)

## II- Les volumes finis pour le refroidissement par film :

### II-1\ Introduction :

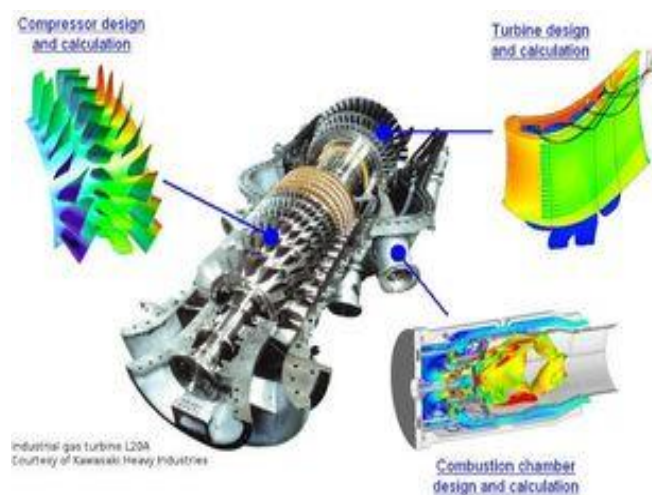
Le refroidissement par film est une technique essentielle pour protéger les aubes de turbine à gaz contre les températures élevées et assurer leur durabilité. Pour comprendre et optimiser cette technique, des méthodes de modélisation et de simulation sont utilisées. L'une de ces méthodes est le Volume Fini.

Le Volume Fini est une méthode numérique largement utilisée pour résoudre les équations de conservation, telles que les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, qui

gouvernent le comportement de l'écoulement d'air et du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement par film. Cette méthode divise le domaine de simulation en un maillage de volumes finis, où les équations de conservation sont discrétisées et résolues sur chaque volume. Le maillage est généralement non uniforme et peut être adapté pour capturer les variations spatiales de l'écoulement et du transfert de chaleur avec une résolution plus fine près de la surface de l'aube. En utilisant le Volume Fini, il est possible de simuler et de prédire les caractéristiques de l'écoulement d'air, telles que la vitesse, la pression et la température, ainsi que le transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement. Cette méthode permet de prendre en compte les interactions complexes entre l'écoulement d'air, le film de refroidissement et la surface de l'aube, offrant ainsi des informations détaillées sur les performances du refroidissement par film.

L'utilisation du Volume Fini pour le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz présente plusieurs avantages, tels que la capacité à modéliser des géométries complexes, à évaluer différentes configurations de refroidissement et à prédire les performances thermiques avec une résolution spatiale élevée. Cependant, il convient de noter que la modélisation par le Volume Fini pour le refroidissement par film nécessite une validation expérimentale rigoureuse pour garantir la précision des résultats et la représentation fidèle des phénomènes physiques. De plus, cette méthode doit être utilisée en conjonction avec d'autres approches de conception et d'optimisation pour maximiser l'efficacité du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz.

En résumé, le Volume Fini est une méthode de modélisation et de simulation puissante pour étudier et optimiser le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. Il permet de capturer les interactions complexes entre l'écoulement d'air, le film de refroidissement et la surface de l'aube, offrant ainsi des informations précieuses pour améliorer les performances et la durabilité des turbines à gaz. (23)



**Figure II.2 : Simulation pour turbine à gaz**

## II-2\ Modélisation du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement :

Le transfert de chaleur joue un rôle crucial dans le processus de refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. La modélisation précise de ce transfert de chaleur est essentielle pour comprendre et optimiser les performances du système de refroidissement. Voici les principaux aspects de la modélisation du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement :

**1. Modèles de conduction :** La conduction de chaleur à travers l'aube de turbine et le film de refroidissement est généralement modélisée à l'aide des équations de la chaleur en régime permanent ou transitoire. Les coefficients de conductivité thermique des matériaux utilisés, tels que les alliages à haute température, sont pris en compte dans ces modèles. Des conditions aux limites appropriées sont définies pour représenter les transferts de chaleur à l'interface entre l'aube de turbine et le film de refroidissement.

**2. Modèles de convection :** La convection de chaleur est dominée par l'écoulement du fluide dans la couche limite de refroidissement. Les équations de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie sont résolues pour déterminer les champs de vitesse et de température du fluide. Différents modèles de turbulence peuvent être utilisés pour représenter les caractéristiques turbulentes de l'écoulement. La modélisation de la convection convective du transfert de chaleur est cruciale pour capturer les variations locales du flux thermique.

**3. Modèles de rayonnement :** Dans certaines conditions, le rayonnement thermique peut également contribuer au transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement. Les modèles de rayonnement, tels que le modèle du corps gris ou les modèles plus avancés basés sur la résolution des équations du transfert radiatif, peuvent être utilisés pour estimer l'effet du rayonnement sur le transfert de chaleur. Ces modèles prennent en compte les propriétés radiatives des surfaces et des gaz présents dans la couche limite de refroidissement.

**4. Modèles de changement de phase :** Dans certains cas, le transfert de chaleur peut également impliquer un changement de phase, par exemple, lorsque le fluide de refroidissement se vaporise ou se condense. Des modèles spécifiques de changement de phase, tels que les modèles de condensation ou d'évaporation, peuvent être utilisés pour capturer ces phénomènes. Ces modèles tiennent compte des propriétés thermodynamiques du fluide et des conditions aux limites appropriées.

**5. Validation expérimentale et numérique :** Pour assurer la précision des modèles de transfert de chaleur, il est essentiel de les valider à l'aide de données expérimentales et de résultats de simulations numériques de référence. Des mesures de température et de flux thermique peuvent être réalisées expérimentalement sur des maquettes d'aubes de turbine à gaz. Ces données sont utilisées pour valider les modèles et ajuster les paramètres si nécessaire.

La modélisation précise du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement permet de mieux comprendre les mécanismes de refroidissement et d'optimiser les performances des aubes de turbine à gaz. Elle contribue à minimiser les contraintes thermiques sur les aubes, à améliorer l'efficacité du refroidissement et à prolonger la durabilité des turbines à gaz.(24)

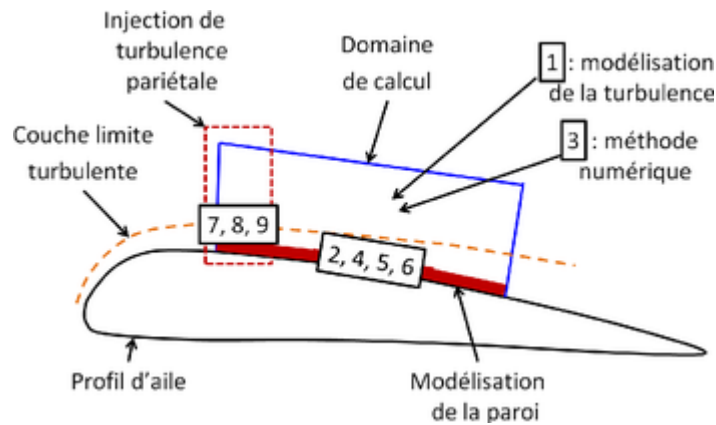


Figure II.3 : Modélisation de la couche limite

### II-3\ Optimisation du processus de refroidissement par film grâce à la méthode des Volumes

#### Finis:

L'optimisation du processus de refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est d'une importance capitale pour garantir des performances optimales et une durabilité accrue. La méthode des Volumes Finis offre une approche numérique efficace pour modéliser et optimiser ce processus. Voici comment la méthode des Volumes Finis peut être utilisée pour optimiser le refroidissement par film :

**1. Modélisation du processus de refroidissement par film :** La première étape consiste à modéliser le processus de refroidissement par film en utilisant les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces équations, combinées avec les modèles de turbulence et de transfert de chaleur appropriés, permettent de représenter les phénomènes physiques à l'intérieur de la couche limite de refroidissement. La géométrie de l'aube de turbine, les propriétés du fluide de refroidissement et les conditions aux limites thermiques sont pris en compte dans le modèle.

**2. Maillage du domaine :** Le domaine d'étude, comprenant les aubes de turbine et la couche limite de refroidissement, est discrétisé en un maillage de volumes finis. Ce maillage peut être structuré ou non structuré, en fonction de la géométrie et de la complexité du domaine. Il est important de choisir un maillage approprié qui capture correctement les caractéristiques de l'écoulement et du refroidissement.

**3. Paramètres de conception :** Pour l'optimisation du processus de refroidissement par film, des paramètres de conception pertinents sont identifiés. Il peut s'agir de l'épaisseur et de la distribution du film de refroidissement, de la vitesse d'injection du film, de la géométrie des canaux de refroidissement, etc. Ces paramètres sont définis comme variables de conception dans le modèle.

**4. Fonction objectif :** Une fonction objectif est définie pour quantifier les performances du processus de refroidissement par film. Cette fonction peut être basée sur des critères tels que la température maximale de l'aube, l'efficacité du refroidissement, la consommation d'énergie, etc. L'objectif est de minimiser ou maximiser cette fonction en ajustant les paramètres de conception.

**5. Méthode d'optimisation :** Différentes méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour rechercher les meilleurs paramètres de conception. Les méthodes classiques, telles que la méthode de descente de gradient,

et les méthodes d'optimisation plus avancées, telles que les algorithmes génétiques ou les algorithmes d'optimisation basés sur des essais de particules, peuvent être appliquées. Ces méthodes permettent d'explorer l'espace des paramètres et de trouver les configurations optimales.

**6. Analyse et validation des résultats :** Une fois les paramètres de conception optimisés, une analyse des résultats est effectuée pour évaluer l'impact des modifications sur les performances du refroidissement par film. Les résultats peuvent être validés en comparant avec des données expérimentales ou des simulations numériques de référence. Des analyses de sensibilité peuvent également être réalisées pour comprendre l'influence des différents paramètres de conception.

L'optimisation du processus de refroidissement par film grâce à la méthode des Volumes Finis permet d'identifier les configurations optimales qui maximisent l'efficacité du refroidissement, minimisent les contraintes thermiques sur les aubes et améliorent la durabilité globale des turbines à gaz. Cette approche offre une meilleure compréhension du comportement de l'écoulement et du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement, ce qui permet de prendre des décisions de conception plus éclairées et d'optimiser les performances des turbines à gaz.

#### **II-4\ Limitations et perspectives futures de la méthode des Volumes Finis pour le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz:**

La méthode des Volumes Finis est une approche puissante pour modéliser le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz, mais elle présente également certaines limitations et offre des perspectives d'amélioration pour l'avenir. Voici quelques limitations et perspectives futures de la méthode des Volumes Finis dans ce contexte :

**1. Résolution spatiale :** La résolution spatiale du maillage en Volumes Finis peut affecter la précision des résultats. Une résolution fine du maillage est souvent nécessaire pour capturer les variations locales des propriétés thermiques et des flux de chaleur. Cependant, cela peut entraîner une augmentation de la complexité et du coût de calcul. Des techniques de raffinement adaptatif du maillage, combinées avec des schémas numériques plus précis, pourraient être explorées pour améliorer la résolution spatiale sans augmenter excessivement la taille du maillage.

**2. Modélisation de la turbulence :** La modélisation de la turbulence est un défi important dans la méthode des Volumes Finis. Les modèles de turbulence actuellement utilisés, tels que le modèle  $k-\epsilon$ , présentent des limitations dans la représentation des flux turbulents complexes à l'intérieur de la couche limite de refroidissement. L'utilisation de modèles de turbulence plus avancés, tels que les simulations aux grandes échelles (LES) ou les simulations de turbulence des particules (LES-PDF), pourrait permettre de mieux représenter les caractéristiques turbulentes et d'améliorer la prédiction du transfert de chaleur.

**3. Interaction fluide-structure :** La méthode des Volumes Finis se concentre principalement sur la modélisation de l'écoulement du fluide et du transfert de chaleur, mais ne prend pas en compte de manière directe l'interaction fluide-structure. Dans le cas du refroidissement par film, il est important de considérer les effets de l'aube de turbine sur le comportement de l'écoulement et du transfert de chaleur. L'intégration de modèles d'interaction fluide-structure, tels que les méthodes couplées fluide-structure (FSI), pourrait permettre de mieux représenter les interactions entre l'écoulement du fluide, l'aube de turbine et le refroidissement par film.

**4. Optimisation multi-objectif :** L'optimisation du processus de refroidissement par film peut impliquer des objectifs multiples et souvent contradictoires, tels que maximiser l'efficacité du refroidissement tout en minimisant la consommation d'énergie ou la perte de charge. La méthode des Volumes Finis peut être étendue pour permettre une optimisation multi-objectif, où plusieurs fonctions objectifs sont prises en compte simultanément. Des techniques d'optimisation multi-objectif avancées, telles que les algorithmes génétiques multi-objectifs, pourraient être appliquées pour trouver des compromis optimaux entre les différents objectifs.

**5. Modèles de transfert de chaleur avancés :** Pour une modélisation plus précise du transfert de chaleur dans la couche limite de refroidissement, de nouveaux modèles de transfert de chaleur avancés peuvent être développés. Cela pourrait inclure la modélisation de phénomènes tels que la conduction anisotrope, la radiation thermique, les effets de surface rugueuse, etc. L'intégration de ces modèles dans la méthode des Volumes Finis permettrait de mieux représenter les mécanismes de transfert de chaleur et d'améliorer les prédictions des performances du refroidissement par film.

En résumé, bien que la méthode des Volumes Finis soit une approche solide pour modéliser le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz, des améliorations sont encore possibles pour surmonter ses limitations et étendre ses capacités. La résolution spatiale, la modélisation de la turbulence, l'interaction fluide-structure, l'optimisation multi-objectif et les modèles de transfert de chaleur avancés sont des domaines de recherche prometteurs pour améliorer la précision et l'efficacité de la méthode des Volumes Finis dans le contexte du refroidissement par film.(25)(26)(27)

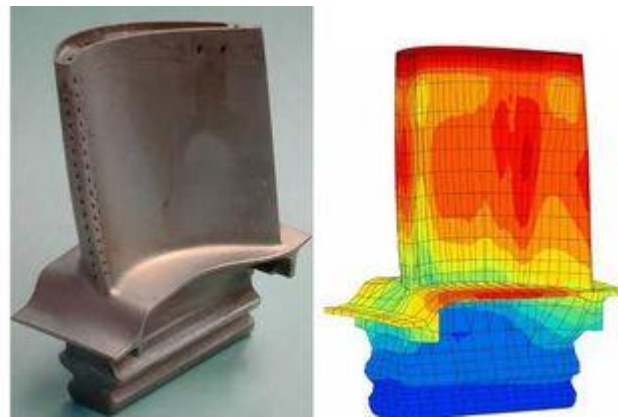


Figure II.4 : Un champ de température sur une aube de turbine à gaz

### III- la turbulence :

#### III-1\ Définition :

La turbulence est un phénomène complexe et désordonné qui se produit dans les écoulements de fluides. Elle est caractérisée par des fluctuations rapides et irrégulières de la vitesse, de la pression et d'autres propriétés du fluide, créant un écoulement chaotique et tourbillonnaire.(28)

Dans un écoulement turbulent, le fluide se déplace de manière irrégulière, avec la formation de tourbillons de différentes tailles à différentes échelles spatiales. Ces tourbillons sont créés par des variations locales de la vitesse et de la pression, qui induisent des mouvements de rotation dans le fluide. Ces tourbillons se forment et se dissipent continuellement, interagissant les uns avec les autres de manière complexe.(29)

La turbulence se produit dans de nombreux domaines, tels que l'aéronautique, l'ingénierie des fluides, la météorologie, l'océanographie, la géophysique, la chimie et la biologie. Elle peut être observée dans des échelles allant de l'atmosphère terrestre entière aux plus petits tourbillons dans un écoulement de fluide.(30)

Les écoulements turbulents ont plusieurs caractéristiques distinctives. Ils sont généralement chaotiques et imprévisibles, avec des fluctuations aléatoires des propriétés du fluide. Ces fluctuations se produisent à de multiples échelles, allant des grands tourbillons cohérents aux petites structures turbulentes. La turbulence est également caractérisée par une augmentation de la friction et de la résistance dans l'écoulement, ce qui peut entraîner une perte d'énergie et une augmentation de la consommation de puissance dans les systèmes de transport de fluides.(31)

La compréhension de la turbulence est essentielle pour de nombreux domaines d'application. La modélisation et la simulation numérique de la turbulence sont des outils importants pour étudier et prédire son comportement. Cependant, la turbulence reste un domaine de recherche actif et complexe, et la résolution exacte des équations fondamentales qui décrivent la turbulence, telles que les équations de Navier-Stokes, reste un défi scientifique.

En résumé, la turbulence est un phénomène de mouvement désordonné et chaotique dans les écoulements de fluides, caractérisé par des fluctuations rapides et irrégulières. Elle se produit dans de nombreux domaines et a des effets significatifs sur le comportement des fluides.

### III-2\ Mécanismes de turbulence :

Les mécanismes de turbulence sont les processus physiques qui sont à l'origine de la formation et de l'évolution des écoulements turbulents. Bien que l'ensemble des mécanismes de turbulence soit encore l'objet de recherches actives, voici quelques-uns des principaux mécanismes généralement reconnus :

**1. Instabilités hydrodynamiques :** Les instabilités hydrodynamiques sont à l'origine de la formation initiale des tourbillons dans un écoulement. Elles peuvent être dues à des gradients de vitesse, de pression ou de densité, qui génèrent des perturbations dans le fluide. Ces instabilités peuvent se propager et se développer, donnant lieu à la formation de structures tourbillonnaires.

**2. Cascade d'énergie :** La cascade d'énergie est un mécanisme fondamental dans la turbulence. Lorsque de l'énergie est injectée dans un écoulement turbulent, elle se propage des grandes échelles vers les petites échelles à travers des interactions non linéaires entre les tourbillons. Les grandes structures tourbillonnaires transfèrent progressivement leur énergie aux tourbillons plus petits par des processus de fragmentation et de fusion, créant ainsi une cascade d'énergie vers les échelles les plus petites.

**3. Dissipation visqueuse :** La dissipation visqueuse est le mécanisme par lequel l'énergie cinétique de l'écoulement turbulent est convertie en chaleur. À petite échelle, les tourbillons sont soumis à des forces de

viscosité qui dissipent leur énergie. La dissipation visqueuse limite l'énergie de la turbulence aux échelles les plus petites et joue un rôle crucial dans la régulation de la turbulence.(32)

**4. Effets de la turbulence sur elle-même :** La turbulence est capable de modifier son propre environnement. Les tourbillons turbulents génèrent des gradients de vitesse, de pression et de densité qui influencent les autres tourbillons à proximité. Cette interaction à grande échelle et à petite échelle contribue à entretenir la turbulence et à maintenir son caractère chaotique.

**5. Effets de paroi :** Les parois solides, telles que les parois de conduites ou les surfaces des objets, ont un impact significatif sur la turbulence. La présence d'une paroi introduit des contraintes sur l'écoulement, générant des effets de frottement et de cisaillement. Cela peut modifier la structure et les caractéristiques de l'écoulement turbulent, générant des tourbillons spécifiques près de la paroi, tels que les tourbillons de von Kármán.

Ces mécanismes interagissent de manière complexe et peuvent varier en fonction des caractéristiques spécifiques de l'écoulement, telles que la vitesse, la viscosité du fluide, la géométrie du système, etc. Comprendre et modéliser ces mécanismes est un défi majeur dans l'étude de la turbulence, et de nombreuses approches théoriques, numériques et expérimentales sont utilisées pour approfondir notre compréhension de ce phénomène complexe.(33)

### III-3\ Modélisation de la turbulence :

La modélisation de la turbulence est une discipline fondamentale de la mécanique des fluides qui vise à comprendre et à prédire le comportement des écoulements turbulents. La turbulence est un phénomène complexe et chaotique caractérisé par des fluctuations aléatoires des vitesses et des pressions à différentes échelles spatiales et temporelles.(34)

La modélisation de la turbulence repose sur différentes approches, telles que les modèles de turbulence RANS, LES et DNS. Les modèles RANS utilisent des équations moyennées en temps pour représenter la turbulence à partir d'hypothèses statistiques, tandis que les modèles LES résolvent les grandes échelles de turbulence et modélisent les échelles sous-maille. Enfin, les simulations DNS résolvent directement toutes les échelles de turbulence sans utiliser de modèle.

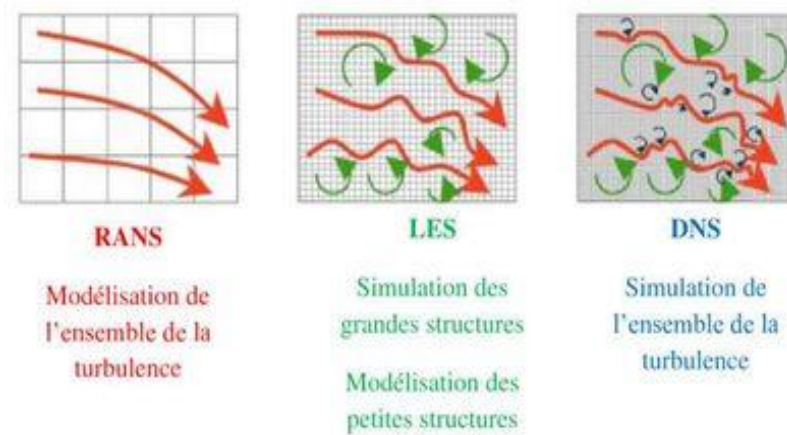
La modélisation de la turbulence est essentielle dans de nombreux domaines d'ingénierie et de recherche. Elle permet de prédire les forces et les écoulements complexes dans des applications telles que l'aérodynamique des avions, la conception de turbomachines, la combustion dans les moteurs, la dispersion de polluants atmosphériques, les écoulements dans les canaux et les rivières, et bien d'autres.(35)

Cependant, la modélisation de la turbulence présente des défis importants. La turbulence est un phénomène non linéaire et chaotique, ce qui rend difficile la représentation précise de ses caractéristiques. De plus, les écoulements réels peuvent être influencés par des conditions complexes et des géométries variées, ce qui nécessite des modèles de turbulence adaptés à chaque cas d'étude spécifique.

Les chercheurs et les ingénieurs continuent à développer de nouveaux modèles et techniques de modélisation de la turbulence pour améliorer la précision des prédictions et la compréhension de la turbulence. Les avancées dans la modélisation de la turbulence ont un impact significatif sur la conception



de systèmes, la réduction des pertes énergétiques, l'amélioration de la sécurité et la compréhension des phénomènes naturels complexes.



**Figure II.5 : Les modèles de turbulence**

### III-3.1\ Modélisation des grandes échelles (LES) :

La modélisation des grandes échelles (LES, pour Large-Eddy Simulation) est une méthode utilisée en mécanique des fluides numérique pour simuler les écoulements turbulents. Contrairement à la simulation directe des turbulences (DNS, pour Direct Numerical Simulation) qui résout toutes les échelles de turbulence, la LES vise à résoudre uniquement les grandes échelles du mouvement turbulent, tandis que les petites échelles sont modélisées.(36)

La LES est généralement utilisée lorsque la résolution directe de toutes les échelles turbulentes est trop coûteuse en termes de puissance de calcul. Elle est particulièrement adaptée pour étudier les écoulements turbulents dans des situations complexes, telles que les écoulements autour de structures ou dans des géométries complexes.

Le principe de base de la LES est de résoudre les équations de Navier-Stokes pour les échelles de turbulence supérieures à une certaine taille, appelée échelle de coupure. Pour les échelles plus petites, la turbulence est modélisée à l'aide de modèles de sous-maillages (subgrid models) qui fournissent une estimation des effets turbulents non résolus. Ces modèles sont généralement basés sur des hypothèses physiques ou empiriques et varient en complexité selon les applications.(37)

La LES présente plusieurs avantages par rapport aux approches plus simplifiées, telles que les modèles de turbulence à grande échelle (LES), qui ne résolvent pas du tout les équations de Navier-Stokes. En résolvant partiellement les petites échelles, la LES permet de capturer les interactions dynamiques entre les grandes et les petites échelles, ce qui peut être crucial pour de nombreuses applications. Cependant, la LES reste une méthode numériquement intensive et nécessite des ressources de calcul significatives pour obtenir des résultats précis.

En résumé, la modélisation des grandes échelles (LES) est une méthode de simulation numérique des écoulements turbulents qui résout partiellement les équations de Navier-Stokes pour les échelles de turbulence supérieures à une certaine taille, tout en modélisant les effets turbulents non résolus à l'aide de modèles de sous-maillages. Cela permet d'obtenir une meilleure compréhension et prédiction des écoulements turbulents dans des situations complexes.

### III-3.2\ Modélisation à petite échelle (RANS) :

La modélisation de la turbulence à petite échelle est communément réalisée à l'aide de la méthode de la simulation des écoulements turbulents moyennés en régime permanent (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS en anglais). Contrairement à la modélisation des grandes échelles (LES), qui vise à résoudre les équations de Navier-Stokes pour les échelles les plus grandes de la turbulence, la méthode RANS considère que la turbulence est statistiquement stationnaire et cherche à fournir une solution moyennée dans le temps.

Dans une simulation RANS, les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles sont résolues, mais la turbulence est modélisée par une approche de moyenne temporelle. Les variables d'écoulement (vitesse, pression, etc.) sont décomposées en une composante moyenne et une fluctuation turbulente. La résolution numérique des équations de Navier-Stokes se concentre alors sur la composante moyenne, tandis que les termes de fluctuation turbulente sont modélisés à l'aide de relations empiriques ou de modèles de turbulence.

Les modèles de turbulence les plus couramment utilisés en RANS sont basés sur l'hypothèse de viscosité turbulente, où un coefficient de viscosité turbulente est introduit dans les équations de Navier-Stokes pour représenter les effets de la turbulence non résolue. Les modèles les plus connus incluent le modèle de turbulence de longueur de mélange ( $k-\epsilon$ ), le modèle de turbulence des tourbillons de rotation ( $k-\omega$ ), et le modèle de turbulence à deux équations ( $k-\omega$  SST). Ces modèles estiment la viscosité turbulente en fonction des gradients de vitesse et de variables de turbulence supplémentaires.

La modélisation RANS est couramment utilisée en ingénierie pour simuler les écoulements turbulents dans une large gamme d'applications, telles que l'aérodynamique des véhicules, la dynamique des fluides industriels, la combustion, l'hydraulique, etc. Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment une utilisation efficace des ressources de calcul, des temps de calcul relativement courts et une modélisation appropriée pour les écoulements turbulents stationnaires.(38)

Cependant, la modélisation RANS présente également des limitations. Elle ne capture pas les caractéristiques transitoires et les structures tourbillonnaires de petite échelle de la turbulence de manière précise. De plus, les performances des modèles de turbulence peuvent varier en fonction de l'application spécifique, et la modélisation RANS peut être moins précise dans les régions d'écoulement complexe ou en présence de forts gradients. Dans de tels cas, la LES ou d'autres méthodes plus avancées peuvent être préférables pour obtenir des résultats plus précis.

### III-3.3\ Approches hybrides (LES-RANS) :

Les approches hybrides, également connues sous le nom d'approches LES-RANS (Large-Eddy Simulation - Reynolds-Averaged Navier-Stokes), sont des méthodes de simulation numérique qui combinent les avantages des modélisations LES et RANS pour étudier les écoulements turbulents.

Dans une approche hybride, la simulation est divisée en deux régions : une région où les équations de Navier-Stokes sont résolues en utilisant la méthode LES pour capturer les grandes échelles de turbulence, et une région où les équations de Navier-Stokes sont résolues en utilisant la méthode RANS pour modéliser les effets de turbulence à petite échelle.

La frontière entre les régions LES et RANS peut être fixe ou mobile, selon la complexité de l'écoulement étudié. Dans la région LES, les équations de Navier-Stokes sont résolues en utilisant des maillages fins pour capturer les structures turbulentes de grande échelle. Les échelles sous-maille plus petites sont modélisées à l'aide de modèles de sous-maille appropriés, tels que le modèle de Smagorinsky.

Dans la région RANS, les équations de Navier-Stokes sont résolues en utilisant des maillages plus grossiers et des modèles de turbulence RANS pour représenter les effets de turbulence à petite échelle. Les modèles de turbulence RANS sont utilisés pour estimer la viscosité turbulente et calculer les quantités moyennées en temps, comme dans une simulation RANS traditionnelle.

L'approche hybride permet de bénéficier des avantages de la résolution fine des échelles de turbulence de grande échelle dans la région LES, tout en réduisant les coûts de calcul en utilisant des maillages plus grossiers et des modèles RANS dans la région RANS. Cela permet de mieux représenter les caractéristiques turbulentes à petite échelle tout en conservant une efficacité de calcul raisonnable.

Les approches hybrides sont utilisées dans de nombreux domaines de recherche et d'ingénierie, notamment en aérodynamique, en combustion, en hydrodynamique environnementale, en génie civil, etc. Elles sont particulièrement utiles pour les problèmes complexes où des écoulements tourbillonnaires de différentes échelles se produisent simultanément.

Cependant, il convient de noter que les approches hybrides peuvent être plus complexes à mettre en œuvre et à calibrer que les méthodes LES ou RANS individuelles. La définition appropriée de la frontière entre les régions LES et RANS, ainsi que la sélection des modèles de sous-maille et de turbulence RANS, sont des aspects importants pour obtenir des résultats précis.

### III-4\ Équations de la turbulence :

Les équations de transport de la turbulence sont des équations supplémentaires utilisées dans les modèles de turbulence pour représenter l'évolution des quantités turbulentes, telles que la vitesse turbulente ( $k$ ), la dissipation turbulente ( $\epsilon$ ) et les éventuelles variables supplémentaires associées.

Les équations de transport de la turbulence les plus couramment utilisées sont les équations de transport de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Ces équations sont dérivées à partir des équations de Navier-Stokes moyennées en temps pour représenter l'évolution statistique des quantités turbulentes dans un écoulement turbulent stationnaire.

Voici les équations de transport de turbulence RANS pour les quantités turbulentes  $k$  et  $\epsilon$  :

- **Équation de transport de  $k$  :**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \epsilon + S_k$$

- **Équation de transport de  $\varepsilon$  :**

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu t) \left( \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j\varepsilon}{\partial x_i} \right) \right] + C_{1\varepsilon} \left( \frac{S_k}{\varepsilon} \right) - C_{2\varepsilon} \varepsilon \left( \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \right) + S_\varepsilon$$

Dans ces équations,  $\rho$  représente la masse volumique du fluide,  $t$  est le temps,  $\mathbf{u}$  est la vitesse moyenne en  $\mathbf{x}$ -direction,  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $\mu t$  est la viscosité turbulente,  $S_k$  et  $S_\varepsilon$  sont les termes sources pour  $k$  et  $\varepsilon$  respectivement,  $C_{1\varepsilon}$  et  $C_{2\varepsilon}$  sont des coefficients empiriques, et les indices  $i$  et  $j$  indiquent les directions spatiales.

Ces équations de transport de turbulence RANS modélisent les transferts d'énergie turbulente (représentée par  $k$ ) et de dissipation turbulente (représentée par  $\varepsilon$ ) à travers le fluide. Les termes de production, de dissipation et de transport visqueux sont représentés dans ces équations. Les termes sources,  $S_k$  et  $S_\varepsilon$ , représentent généralement les contributions des conditions aux limites et des forces extérieures.

Les équations de transport de turbulence RANS sont souvent couplées aux équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie pour résoudre les écoulements turbulents dans les simulations numériques.

Il est important de noter que les équations de transport de turbulence RANS sont basées sur des hypothèses simplificatrices et des modèles empiriques pour représenter les effets de turbulence. Différents modèles de turbulence RANS, tels que les modèles  $k$ - $\varepsilon$ ,  $k$ - $\omega$ , ou Reynolds Stress Models (RSM), utilisent des formulations spécifiques pour estimer la viscosité turbulente et les termes sources en fonction des gradients de vitesse et de variables supplémentaires.<sup>(39)</sup>

### III-4.1\ Équation de transport de la turbulence de Reynolds :

Les équations de transport de la turbulence de Reynolds, également connues sous le nom d'équations de transport de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), sont une formulation des équations de conservation moyennées en temps pour les quantités turbulentes dans les écoulements turbulents stationnaires.

Les équations de transport de la turbulence de Reynolds sont dérivées en effectuant une moyenne temporelle des équations de Navier-Stokes complètes, afin de séparer les composantes moyennes des quantités fluides des fluctuations turbulentes.

Voici les équations de transport de la turbulence de Reynolds pour les quantités turbulentes  $k$  (vitesse turbulente) et  $\varepsilon$  (dissipation turbulente) :

- **Équation de transport de  $k$  :**

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu t) \left( \frac{\partial u k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \varepsilon + \tau_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

- **Équation de transport de  $\varepsilon$  :**

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j\varepsilon}{\partial x_i} \right)] + C_{1\varepsilon} \left( \frac{Sk}{\varepsilon} \right) - C_{2\varepsilon} \left( \frac{\rho\varepsilon^2}{k} \right) + \tau_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Dans ces équations,  $\rho$  représente la masse volumique du fluide,  $t$  est le temps,  $\mathbf{u}$  est la vitesse moyenne en  $\mathbf{x}$ -direction,  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $\mu_t$  est la viscosité turbulente,  $\tau_{ij}$  est le tenseur des contraintes de Reynolds, et les indices  $i$  et  $j$  indiquent les directions spatiales.

Les termes de transport, de production et de dissipation sont présents dans ces équations. Les termes sources, tels que  $S_k$  (production turbulente) et  $S_\varepsilon$  (dissipation turbulente), représentent les contributions des conditions aux limites et des forces extérieures. Les termes de contrainte de Reynolds  $\tau_{ij}$ , sont déterminés en utilisant des modèles de turbulence spécifiques.

Les équations de transport de la turbulence de Reynolds sont résolues numériquement en utilisant des maillages spatiaux et des méthodes de discrétisation appropriés, ainsi que des modèles de turbulence pour représenter la viscosité turbulente et les termes sources.

Il est important de noter que les équations de transport de la turbulence de Reynolds sont basées sur des approximations et des modèles empiriques pour représenter les effets de la turbulence. Différents modèles de turbulence RANS, tels que les modèles  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , ou Reynolds Stress Models (RSM), utilisent des formulations spécifiques pour estimer la viscosité turbulente et les termes sources en fonction des gradients de vitesse et de variables supplémentaires.

### III-4.2\ Équation de transport de la turbulence de la moyenne conditionnelle (CMT) :

Les équations de transport de la turbulence de la moyenne conditionnelle (CMT, Conditional Moment Closure en anglais) sont utilisées pour modéliser l'évolution de la turbulence dans les écoulements turbulents. La CMT est basée sur l'hypothèse que la turbulence peut être décomposée en une moyenne conditionnelle, qui représente la turbulence moyenne, et en fluctuations turbulentes, qui représentent les variations autour de cette moyenne.

Les équations de transport de la CMT sont généralement dérivées à partir des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, en utilisant des hypothèses supplémentaires sur la turbulence. Les équations de base de la CMT sont les suivantes :

- **Équation de conservation de la masse conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho \bar{c})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{c} \cdot \mathbf{V}) = 0$$

Où  $\rho \bar{c}$  est la densité moyenne conditionnelle,  $t$  est le temps,  $\mathbf{V}$  est la vitesse moyenne conditionnelle et  $\nabla$  représente l'opérateur de divergence.

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho\bar{c}.V)}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{c}.V.V) = -\nabla.P + \nabla.\tau + \rho\bar{c}.g$$

Où  $\mathbf{P}$  est la pression,  $\boldsymbol{\tau}$  est le tenseur de contrainte de Reynolds,  $\mathbf{g}$  est l'accélération gravitationnelle et les autres symboles ont la même signification que précédemment.

- **Équation de conservation de l'énergie conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho\bar{c}.e)}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{c}.V.e) = -\nabla(p.V) + \nabla(\kappa.\nabla.T) + Q$$

Où  $\mathbf{e}$  est l'énergie totale moyenne conditionnelle,  $\mathbf{p}$  est la pression totale,  $\kappa$  est la diffusivité thermique,  $\mathbf{T}$  est la température moyenne conditionnelle et  $\mathbf{Q}$  représente les termes sources.

Voici les équations de transport générales:

- **Équation de conservation de la masse pour la moyenne conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho CMT)}{\partial t} + \nabla(\rho CMT.u) = 0$$

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement pour la moyenne conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho CMT.u)}{\partial t} + \nabla(\rho CMT.u.u) = -\nabla p + \nabla(\mu CMT.\nabla.u) + \rho CMT.g + \nabla.\tau$$

- **Équation de conservation de l'énergie pour la moyenne conditionnelle :**

$$\frac{\partial(\rho CMT.e)}{\partial t} + \nabla(\rho CMT.u.e) = -\nabla(k CMT.\nabla.T) + \mu CMT.\nabla u:\nabla u + \tau:\nabla u + \rho CMT.gu$$

Dans ces équations :

- $\rho CMT$  est la densité de la moyenne conditionnelle de turbulence,
- $t$  est le temps,
- $\mathbf{u}$  est le champ de vitesse moyen de l'écoulement,
- $\mathbf{p}$  est la pression,

- $\mu_{\text{CMT}}$  est la viscosité turbulente conditionnelle,
- $\mathbf{g}$  est l'accélération due à la gravité,
- $\boldsymbol{\tau}$  est le tenseur des contraintes turbulentes,
- $\mathbf{e}$  est l'énergie spécifique turbulente,
- $\mathbf{k}_{\text{CMT}}$  est la diffusivité thermique turbulente conditionnelle,
- $\mathbf{T}$  est la température,
- $\nabla$  est l'opérateur gradient.

Il est important de noter que les modèles de turbulence de la moyenne conditionnelle peuvent varier en fonction des hypothèses et des formulations spécifiques utilisées. Les termes sources et les modèles de fermeture pour les grandeurs turbulentes, tels que  $\mu_{\text{CMT}}$  et  $\mathbf{k}_{\text{CMT}}$ , dépendront du modèle choisi.

## IV- La modélisation des turbulences :

### IV-1\ Introduction :

La modélisation des turbulences est un domaine de la mécanique des fluides qui vise à prédire le comportement des écoulements turbulents, qui se caractérisent par des fluctuations aléatoires de la vitesse, de la pression et d'autres propriétés du fluide. Ces écoulements sont omniprésents dans la nature et dans de nombreuses applications technologiques, tels que les écoulements aériens autour des ailes d'avion, les écoulements sanguins dans les artères, les écoulements dans les moteurs de voitures ou dans les turbines à gaz. La modélisation des turbulences est complexe car elle implique la résolution de l'équation de Navier-Stokes, qui décrit le mouvement des fluides, avec des termes supplémentaires qui représentent les effets de la turbulence. Ces termes sont souvent difficiles à calculer directement, car ils dépendent des échelles de longueur et de temps de la turbulence qui sont bien plus petites que celles du domaine global. En conséquence, des modèles mathématiques sont développés pour représenter les effets de la turbulence sur des échelles plus grandes, appelées échelles de résolution.

Les modèles de turbulence peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles de type "Reynolds-averaged Navier-Stokes" (RANS) qui visent à calculer les moyennes des quantités turbulentes sur l'ensemble des échelles de résolution, et les modèles de type "Large Eddy Simulation" (LES) qui résolvent explicitement les grandes échelles de turbulence et modélisent les effets des petites échelles.

Le choix du modèle de turbulence approprié dépend des caractéristiques de l'écoulement considéré et des objectifs de la simulation. Une modélisation précise des turbulences peut permettre de mieux comprendre les phénomènes physiques et d'optimiser la conception de dispositifs et de machines utilisant des écoulements turbulents.

- La turbulence se produit lorsque les forces agissant sur un fluide sont suffisamment fortes pour perturber sa structure ordonnée et créent des tourbillons qui se propagent dans le fluide. Les tourbillons peuvent être de tailles différentes, allant des tourbillons les plus grands, appelés structures cohérentes, jusqu'aux plus petits tourbillons qui sont dissipés par la viscosité du fluide.

- Les écoulements turbulents sont souvent caractérisés par des quantités statistiques telles que la moyenne, l'écart type et la corrélation temporelle des fluctuations de la vitesse. Ces quantités peuvent être mesurées expérimentalement ou calculées numériquement pour caractériser les écoulements turbulents.
- Les écoulements turbulents peuvent être classés en fonction du nombre de Reynolds, qui est un paramètre adimensionnel décrivant la relation entre les forces d'inertie et les forces de viscosité dans un écoulement. Les écoulements à faible nombre de Reynolds, tels que les écoulements dans les conduites, sont généralement stables et laminaires, tandis que les écoulements à haut nombre de Reynolds, tels que les écoulements dans les rivières ou l'écoulement de l'air autour d'un avion, sont turbulents.

La turbulence a de nombreuses applications pratiques, notamment dans les énergies renouvelables, la mécanique des fluides, l'aéronautique, l'ingénierie chimique, la météorologie et l'océanographie. La modélisation et la simulation des écoulements turbulents sont essentielles pour comprendre et optimiser ces applications. Les turbulences sont encore un domaine de recherche actif, avec de nombreux défis à relever, tels que la modélisation des écoulements à haute vitesse, la prise en compte des interactions fluide-structure, la modélisation des écoulements instables ou la prise en compte des effets de la rotation. Les avancées récentes en matière de calcul haute performance ont permis des simulations de turbulence plus précises et plus rapides, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans ce domaine.(40)(41)

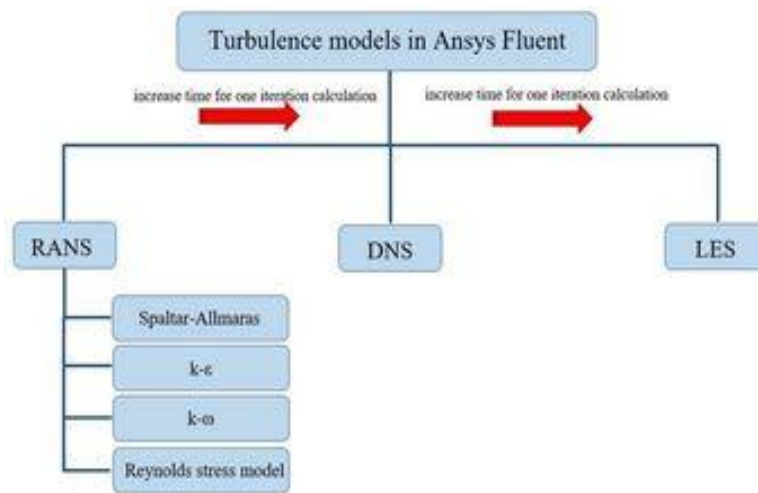


Figure II.6 : Classification des modèles de turbulence

## IV-2\ Modèle de turbulence RANS :

### IV-2.1\ Description du modèle k-ε :

Le modèle k-ε est l'un des modèles de turbulence les plus largement utilisés dans les simulations numériques, notamment dans les simulations RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Il s'agit d'un



modèle à deux équations qui vise à prédire la turbulence dans un écoulement en calculant les variables de turbulence moyennées dans l'espace et dans le temps.

Le modèle k- $\epsilon$  est basé sur l'idée de séparer la turbulence en deux grandeurs principales : la turbulence cinétique (k) et la dissipation de la turbulence ( $\epsilon$ ). La turbulence cinétique représente l'énergie turbulente contenue dans l'écoulement, tandis que la dissipation de la turbulence mesure la perte d'énergie turbulente due aux mécanismes dissipatifs. L'équation de transport de la turbulence cinétique (k) dans le modèle k- $\epsilon$  s'écrit généralement comme suit :

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot k \cdot U) = \nabla(\mu + \mu \cdot t \cdot \nabla \cdot k) - \rho \cdot \epsilon + S$$

où  $\rho$  est la densité du fluide,  $t$  est le temps,  $U$  est la vitesse moyenne du fluide,  $\nabla$  est l'opérateur gradient,  $\mu$  est la viscosité cinématique du fluide,  $\mu t$  est la viscosité turbulente,  $\epsilon$  est la dissipation de la turbulence, et  $S$  représente les termes sources. Le terme  $\partial(\rho k)/\partial t$  représente la variation de la turbulence cinétique dans le temps. Le terme  $\nabla(\rho k U)$  représente le transport convectif de la turbulence cinétique par le flux de quantité de mouvement. Le terme  $\nabla(\mu + \mu t \nabla k)$  est le terme de diffusion, qui représente la dissipation de la turbulence cinétique par la viscosité cinématique et la viscosité turbulente. Le terme  $-\rho \epsilon$  est le terme de dissipation, qui représente la perte d'énergie turbulente due aux mécanismes dissipatifs. Le terme  $S$  représente les termes sources, qui peuvent inclure des termes de production ou de génération de turbulence spécifiques à l'application.

L'équation de transport de la dissipation de la turbulence ( $\epsilon$ ) dans le modèle k- $\epsilon$  est également résolue pour obtenir sa valeur dans l'écoulement. Elle est donnée par :

$$\frac{\partial(\rho \cdot \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \epsilon \cdot U) = C_{1\epsilon} \left( \frac{\epsilon}{k} \right) \nabla(\mu + \mu \cdot t \cdot \nabla \cdot k) - C_{2\epsilon} \left( \frac{\rho \epsilon^2}{k} \right) + C_{3\epsilon} \cdot \rho \cdot S$$

où  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  et  $C_{3\epsilon}$  sont des constantes empiriques, et les termes restants ont une signification similaire à ceux de l'équation de transport de la turbulence cinétique.

Le modèle k- $\epsilon$  nécessite également des équations supplémentaires pour déterminer les valeurs des viscosités cinématique ( $\mu$ ) et turbulente ( $\mu t$ ). Par exemple, la viscosité turbulente peut être calculée à l'aide de la relation de Boussinesq :

$$\mu t = \frac{\rho \cdot C_{\mu} \cdot k^2}{\epsilon}$$

où  $C_{\mu}$  est une constante empirique.

En résolvant numériquement les équations du modèle k- $\epsilon$ , il est possible d'obtenir les valeurs.

Le modèle k-ε a été initialement proposé par Jones and Launder en 1972 et depuis lors, il a été largement utilisé dans de nombreuses applications de mécanique des fluides. Voici quelques points clés supplémentaires sur le modèle k-ε :

- **Équations de transport** : Le modèle k-ε résout deux équations de transport : une pour la turbulence cinétique (k) et une pour la dissipation de la turbulence (ε). Ces deux équations sont obtenues en appliquant des hypothèses de fermeture appropriées aux équations de conservation moyennées.
- **Production et dissipation** : Le modèle k-ε tient compte de la production et de la dissipation de turbulence dans un écoulement. La production de turbulence (P) est due aux gradients de vitesse et est calculée à l'aide de la relation  $P = \rho \cdot \epsilon$ , où ε est la dissipation de la turbulence. La dissipation de turbulence est représentée par le terme  $-\rho \cdot C_1 \epsilon \left(\frac{\epsilon}{k}\right) \nabla(\mu + \mu_t \cdot \nabla \cdot k)$  dans l'équation de transport de ε.
- **Modèles de fermeture** : Le modèle k-ε nécessite des modèles de fermeture pour déterminer les constantes empiriques utilisées dans les équations. Par exemple, les constantes  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  et  $C_{3\epsilon}$  dans l'équation de transport de ε doivent être spécifiées en fonction de l'application et des conditions d'écoulement. Ces modèles de fermeture sont généralement validés par des données expérimentales et des simulations de référence.
- **Prévisibilité** : Le modèle k-ε est connu pour sa bonne prévisibilité dans les écoulements turbulents de parois, tels que les écoulements autour d'un profil aérodynamique ou dans des conduites. Il est également souvent utilisé comme modèle de base pour d'autres modèles de turbulence plus avancés, tels que les modèles Reynolds stress transport (RST) ou les Large Eddy Simulation (LES).

Il est important de noter que le choix du modèle de turbulence dépend de l'application spécifique et des objectifs de la simulation. Il est recommandé de faire des études de validation et de sensibilité pour choisir le modèle de turbulence le plus adapté à chaque situation.

#### IV-2.1.a) Équation du modèle k-ε :

Le modèle k-ε est basé sur deux équations de transport : une pour la turbulence cinétique (k) et une pour la dissipation de la turbulence (ε). Voici les équations du modèle k-ε :

- **Équation de transport de la turbulence cinétique (k) :**

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot k \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma k \cdot \nabla k) - \rho \epsilon + Pk - (\beta^*) \rho k \cdot \epsilon$$

Où  $\rho$  est la densité du fluide,  $t$  est le temps,  $U$  est la vitesse moyenne du fluide,  $\nabla$  est l'opérateur gradient,  $\mu$  est la viscosité cinématique du fluide,  $\sigma k$  est le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique,  $\varepsilon$  est la dissipation de la turbulence,  $Pk$  est le terme de production de turbulence,  $\beta^*$  est une constante empirique.

Le terme  $\partial(\rho k)/\partial t$  représente la variation de la turbulence cinétique dans le temps. Le terme  $\nabla(\rho k U)$  représente le transport convectif de la turbulence cinétique par le flux de quantité de mouvement. Le terme  $\nabla(\mu + \sigma k \nabla k)$  est le terme de diffusion, qui représente la dissipation de la turbulence cinétique par la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique. Le terme  $-\rho \varepsilon$  est le terme de dissipation, qui représente la perte d'énergie turbulente due aux mécanismes dissipatifs. Le terme  $Pk$  est le terme de production, qui représente l'apport d'énergie turbulente par les gradients de vitesse. Le terme  $\beta^* \rho k \varepsilon$  est un terme de dissipation turbulente spécifique au modèle k- $\varepsilon$ , où  $\beta^*$  est une constante empirique.

- **Équation de transport de la dissipation de la turbulence ( $\varepsilon$ ) :**

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \varepsilon \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma \varepsilon \cdot \nabla \varepsilon) + C_1 \varepsilon P - C_2 \varepsilon \left( \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \right)$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes empiriques,  $\sigma \varepsilon$  est le coefficient de diffusion de la dissipation de la turbulence. Le terme  $\partial(\rho \varepsilon)/\partial t$  représente la variation de la dissipation de la turbulence dans le temps. Le terme  $\nabla \cdot (\rho \varepsilon U)$  représente le transport convectif de la dissipation de la turbulence par le flux de quantité de mouvement. Le terme  $\nabla \cdot (\mu + \sigma \varepsilon \nabla \varepsilon)$  est le terme de diffusion, qui représente la dissipation de la dissipation de la turbulence par la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion de la dissipation de la turbulence. Le terme  $C_1 \varepsilon P$  est le terme de production de dissipation, qui dépend de la production de turbulence. Le terme  $C_2 \varepsilon \rho \varepsilon^2/k$  est le terme de dissipation, qui représente la perte d'énergie turbulente de la dissipation de la turbulence.

Ces équations sont résolues numériquement pour obtenir les profils de turbulence cinétique ( $k$ ) et de dissipation de la turbulence ( $\varepsilon$ ) dans l'écoulement. Les valeurs des constantes empiriques ( $\sigma k$ ,  $\sigma \varepsilon$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\beta^*$ ) doivent être spécifiées en fonction de l'application et des conditions d'écoulement.

#### IV-2.1.b) Limitations du modèle k- $\varepsilon$ :

Bien que le modèle k- $\varepsilon$  soit largement utilisé et possède des avantages significatifs, il présente également certaines limitations.

Voici quelques-unes des principales limitations du modèle k- $\varepsilon$  :

- **Anisotropie de la turbulence :** Le modèle k- $\varepsilon$  est basé sur l'hypothèse selon laquelle la turbulence est isotrope, ce qui signifie que les propriétés de turbulence sont les mêmes dans toutes les directions. Cependant, dans de nombreux écoulements réels, la turbulence peut être fortement anisotrope, avec des structures tourbillonnaires allongées ou des effets de cisaillement importants. Le modèle k- $\varepsilon$  peut donc sous-estimer ou ne pas capturer correctement les caractéristiques de turbulence anisotrope.

- **Écoulements complexes** : Le modèle k-ε est moins adapté pour les écoulements complexes tels que les écoulements tourbillonnaires, les écoulements à forte séparation, les écoulements à forte interaction fluide-structure, ou les écoulements avec des gradients de pression élevés. Dans ces cas, le modèle k-ε peut donner des résultats moins précis et manquer de prédictibilité.
- **Problèmes de parois** : Le modèle k-ε peut rencontrer des difficultés dans la modélisation de la couche limite près des parois, où la turbulence est très influencée par les effets visqueux. Des modèles spécifiques de paroi, tels que les lois de paroi et les fonctions de correction, doivent être utilisés en combinaison avec le modèle k-ε pour améliorer sa performance près des parois.
- **Défauts de production et dissipation** : Le modèle k-ε a été développé avec l'hypothèse que la production de turbulence est directement proportionnelle à la dissipation de la turbulence. Cependant, cette hypothèse peut ne pas être valide dans tous les types d'écoulements, ce qui peut entraîner des résultats moins précis.
- **Sensibilité aux conditions aux limites** : Le modèle k-ε peut être sensible aux conditions aux limites spécifiées, telles que les conditions de paroi et les conditions initiales. Des conditions inappropriées peuvent conduire à des résultats non physiques ou à des instabilités numériques.

Il est important de noter que malgré ces limitations, le modèle k-ε reste largement utilisé en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de sa facilité d'implémentation. Cependant, pour des écoulements plus complexes ou nécessitant une précision accrue, d'autres modèles de turbulence plus avancés, tels que les modèles Reynolds stress transport (RST) ou les simulations LES, peuvent être plus appropriés.

#### IV-2.2\ Description du modèle k-ω :

Le modèle k-ω est un autre modèle de turbulence largement utilisé dans les simulations numériques, notamment dans les simulations RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Il s'agit d'un modèle à deux équations qui vise à prédire la turbulence dans un écoulement en calculant les variables de turbulence moyennées dans l'espace et dans le temps.

Le modèle k-ω est basé sur deux grandeurs principales : la turbulence cinétique spécifique (k) et la vorticité turbulente spécifique (ω). La turbulence cinétique spécifique mesure l'énergie turbulente contenue dans l'écoulement, tandis que la vorticité turbulente spécifique mesure la rotation turbulente dans l'écoulement.

L'équation de transport de la turbulence cinétique spécifique (k) dans le modèle k-ω s'écrit généralement comme suit :

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot k \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma k \cdot \nabla k) + Pk - (\beta^*)\rho \cdot k\omega$$

Où  $\rho$  est la densité du fluide,  $t$  est le temps,  $U$  est la vitesse moyenne du fluide,  $\nabla$  est l'opérateur gradient,  $\mu$  est la viscosité cinématique du fluide,  $\sigma k$  est le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique spécifique,  $Pk$  est le terme de production de turbulence,  $\beta^*$  est une constante empirique.

Les termes de l'équation sont similaires à ceux du modèle **k-ε**, où le terme  $\partial(\rho k)/\partial t$  représente la variation de la turbulence cinétique spécifique dans le temps, le terme  $\nabla \cdot (\rho k U)$  représente le transport convectif de la turbulence cinétique spécifique par le flux de quantité de mouvement, et le terme  $\nabla \cdot (\mu + \sigma k \nabla k)$  est le terme de diffusion qui représente la dissipation de la turbulence cinétique spécifique par la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique spécifique. Le terme **Pk** est le terme de production de turbulence, qui représente l'apport d'énergie turbulente par les gradients de vitesse, et le terme **β\*ρkω** est un terme de dissipation turbulente spécifique au modèle **k-ω**.

L'équation de transport de la vorticité turbulente spécifique (**ω**) dans le modèle **k-ω** est également résolue pour obtenir sa valeur dans l'écoulement. Elle est donnée par :

$$\frac{\partial(\rho \cdot \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \omega \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma \omega \cdot \nabla \omega) + (\alpha *) \rho \varepsilon - (\beta *) \rho \cdot k \omega + D$$

Où **σω** est le coefficient de diffusion de la vorticité turbulente spécifique, **α\*** et **β\*** sont des constantes empiriques, et **D** est un terme source.

Le modèle **k-ω** a été développé pour surmonter certaines des limitations du modèle **k-ε**, notamment pour mieux capturer les écoulements tourbillonnaires et les écoulements à forte séparation. Il est généralement considéré comme plus précis que le modèle **k-ε** dans de nombreux scénarios, bien qu'il puisse également avoir ses propres limites dans certains types d'écoulements complexes.

Le modèle **k-ω** présente plusieurs caractéristiques et améliorations par rapport au modèle **k-ε**. Voici quelques détails supplémentaires sur le modèle **k-ω** :

- Equation de transport de la turbulence cinétique spécifique (**k**) : L'équation de transport de **k** est similaire à celle du modèle **k-ε**, avec des termes de production, de diffusion et de dissipation. Cependant, le modèle **k-ω** utilise le terme **β\*ρkω** pour représenter la dissipation turbulente plutôt que le terme  $\rho \varepsilon$  utilisé dans le modèle **k-ε**. Cette modification permet de mieux tenir compte des écoulements tourbillonnaires et des régions de fort cisaillement.
- Equation de transport de la vorticité turbulente spécifique (**ω**) : Le modèle **k-ω** résout également l'équation de transport de la vorticité turbulente spécifique, ce qui le distingue du modèle **k-ε**. La vorticité turbulente spécifique représente la rotation turbulente de l'écoulement. Son transport est influencé par des termes de diffusion, de production, de dissipation et un terme source.
- Amélioration de la prédiction des couches limites : Le modèle **k-ω** a été développé pour améliorer la prédiction des écoulements dans les couches limites, notamment près des parois solides. Il est capable de mieux capturer les caractéristiques de turbulence anisotrope et de prévoir correctement les gradients de vitesse près des parois.
- Adaptabilité aux écoulements complexes : Le modèle **k-ω** a montré de bonnes performances dans la prédiction des écoulements complexes, tels que les écoulements avec forte séparation, les écoulements transitoires et les écoulements à forte interaction fluide-structure. Il peut mieux capturer les phénomènes tourbillonnaires et les zones de recirculation.

- Moins de constantes empiriques : Comparé au modèle k- $\epsilon$ , le modèle k- $\omega$  nécessite moins de constantes empiriques, ce qui simplifie son utilisation et le rend plus robuste.

Malgré ses améliorations, le modèle k- $\omega$  peut également présenter des limitations dans certains cas, notamment pour les écoulements fortement turbulents ou les écoulements avec des gradients de pression élevés. Dans ces situations, des modèles de turbulence plus avancés, tels que les simulations LES (Large Eddy Simulation) ou les modèles RANS plus sophistiqués, peuvent être plus appropriés. Le choix du modèle de turbulence dépendra des objectifs de la simulation, des caractéristiques de l'écoulement et des ressources disponibles.

#### IV-2.2.a) Équation du modèle k- $\omega$ :

L'équation du modèle k- $\omega$  est un système d'équations qui comprend l'équation de transport de la turbulence cinétique spécifique (k) et l'équation de transport de la vorticité turbulente spécifique ( $\omega$ ). Voici les équations du modèle k- $\omega$  :

- **Équation de transport de la turbulence cinétique spécifique (k) :**

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot k \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma k \cdot \nabla k) + Pk - \beta \rho \cdot k \omega + S$$

où  $\rho$  est la densité du fluide,  $t$  est le temps,  $U$  est la vitesse moyenne du fluide,  $\nabla$  est l'opérateur gradient,  $\mu$  est la viscosité cinématique du fluide,  $\sigma k$  est le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique spécifique,  $Pk$  est le terme de production de turbulence,  $\beta$  est une constante empirique et  $S$  est un terme source. L'équation décrit l'évolution de la turbulence cinétique spécifique  $k$  dans le temps et dans l'espace. Le terme  $\partial(\rho k)/\partial t$  représente la variation de  $k$  dans le temps, le terme  $\nabla \cdot (\rho k U)$  représente le transport convectif de  $k$  par le flux de quantité de mouvement, le terme  $\nabla \cdot (\mu + \sigma k \nabla k)$  est le terme de diffusion, qui représente la dissipation de  $k$  par la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion de la turbulence cinétique spécifique. Le terme  $Pk$  est le terme de production, qui représente l'apport d'énergie turbulente par les gradients de vitesse, le terme  $-\beta \rho k \omega$  est le terme de dissipation turbulente, qui représente la perte d'énergie turbulente due à la turbulence en cascade, et le terme  $S$  est un terme source qui peut être utilisé pour modéliser des conditions spécifiques ou des effets externes.

- **Équation de transport de la vorticité turbulente spécifique ( $\omega$ ) :**

$$\frac{\partial(\rho \cdot \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \omega \cdot U) = \nabla(\mu + \sigma \omega \cdot \nabla \omega) + \alpha \rho \epsilon - \beta \rho k \omega + D$$

Où  $\omega$  est la vorticité turbulente spécifique,  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes empiriques,  $\sigma\omega$  est le coefficient de diffusion de la vorticité turbulente spécifique,  $\varepsilon$  est la dissipation de la turbulence, et  $\mathbf{D}$  est un terme source.

L'équation décrit l'évolution de la vorticité turbulente spécifique  $\omega$  dans le temps et dans l'espace. Elle comprend des termes de transport convectif, de diffusion, de production et de dissipation. Le terme  $\partial(\rho\omega)/\partial t$  représente la variation de  $\omega$  dans le temps, le terme  $\nabla \cdot (\rho\omega\mathbf{U})$  représente le transport convectif de  $\omega$  par le flux de quantité de mouvement, le terme  $\nabla \cdot (\mu + \sigma\omega\nabla\omega)$  est le terme de diffusion, qui représente la dissipation de  $\omega$  par la viscosité cinématique et le coefficient de diffusion de la vorticité turbulente spécifique. Le terme  $\alpha\rho\varepsilon$  est le terme de production de vorticité, qui dépend de la dissipation de la turbulence, le terme  $-\beta\rho k\omega$  est le terme de dissipation de vorticité.(42)

#### IV-2.2.b) Limitations du modèle k- $\omega$ :

Bien que le modèle k- $\omega$  présente des améliorations par rapport au modèle k- $\varepsilon$ , il présente également certaines limitations. Voici quelques-unes des limitations du modèle k- $\omega$  :

- Sensibilité aux conditions aux limites : Le modèle k- $\omega$  peut être sensible aux conditions aux limites spécifiées, telles que les conditions de paroi et les conditions initiales. Des conditions inappropriées peuvent conduire à des résultats non physiques ou à des instabilités numériques.
- Difficultés pour les écoulements à séparation : Le modèle k- $\omega$  peut rencontrer des difficultés dans la prédiction des écoulements avec forte séparation, tels que les écoulements autour des corps profilés. Ces écoulements peuvent nécessiter une modélisation plus avancée, comme les simulations LES, pour capturer correctement les structures tourbillonnaires.
- Incapacité à prédire les effets cohérents : Le modèle k- $\omega$  est basé sur une approche moyenn e dans le temps et ne peut donc pas prédire les effets cohérents, tels que les tourbillons longitudinaux ou les structures turbulentes cohérentes dans l'écoulement.
- Limitations pour les écoulements compressibles : Le modèle k- $\omega$  a été principalement développé pour les écoulements incompressibles et peut ne pas être adapté aux écoulements compressibles où des phénomènes spécifiques tels que les ondes de choc ou les gradients de pression élevés sont présents.
- Sensibilité aux écoulements anisotropes : Bien que le modèle k- $\omega$  soit conçu pour mieux capturer les écoulements anisotropes que le modèle k- $\varepsilon$ , il peut toujours sous-estimer ou ne pas capturer correctement les caractéristiques de turbulence anisotrope dans certains écoulements complexes.

Il est important de noter que chaque modèle de turbulence, y compris le modèle k- $\omega$ , a ses propres limites et domaines d'application. Dans certaines situations, des modèles de turbulence plus avancés ou des approches différentes, comme les simulations LES ou les simulations DNS (Direct Numerical Simulation), peuvent être plus appropriés pour obtenir des résultats plus précis. Le choix du modèle de turbulence dépendra des caractéristiques de l'écoulement, des objectifs de la simulation et des ressources disponibles.

### ➤ Conclusion :

En conclusion, la modélisation de la turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est une approche essentielle pour comprendre et optimiser ce processus. Lorsque de l'air frais est injecté le long des aubes de turbine, il forme un film mince qui agit comme une barrière thermique, réduisant la température de surface et protégeant les aubes des dommages causés par la chaleur.

La modélisation de la turbulence vise à simuler le mouvement du fluide dans le film de refroidissement et à prédire les caractéristiques de la couche limite turbulente, telles que la vitesse, la pression et la distribution de la température. Cela permet de mieux comprendre les mécanismes de transfert de chaleur et de masse impliqués, ainsi que les phénomènes de mélange et de dispersion qui affectent l'efficacité du refroidissement.

Les modèles de turbulence utilisés pour la modélisation de la turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz comprennent des approches basées sur les équations de Reynolds moyennées (RANS) et les simulations des grandes échelles (LES). Ces modèles fournissent des informations précieuses sur les caractéristiques de la turbulence, telles que les tourbillons, les écoulements tourbillonnaires et les échanges de quantité de mouvement.

En utilisant des outils de modélisation de turbulence avancés, les concepteurs et les ingénieurs peuvent évaluer et améliorer l'efficacité du refroidissement par film des aubes de turbine à gaz. Cela leur permet de concevoir des systèmes de refroidissement plus efficaces, d'optimiser la conception des aubes de turbine et de maximiser les performances globales de la turbine à gaz.

En résumé, la modélisation de turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz est une approche cruciale pour comprendre et améliorer ce processus. Elle permet d'optimiser la conception et les performances des turbines à gaz, contribuant ainsi à une plus grande efficacité et durabilité de ces systèmes.





***Chapitre III***  
***Simulation Numérique***

## I-1\ Introduction :

L'objectif de la simulation numérique en mécanique des fluides est de calculer les caractéristiques (telles que les vitesses, les températures, les pressions, les flux de chaleur, la dissipation, etc.) de l'écoulement d'un fluide dans différentes configurations, selon les domaines d'application tels que l'aérodynamique, les turbomachines, l'hydrodynamique, la combustion, etc.

Cette discipline, qui a connu des progrès continus au cours des cinquante dernières années, a atteint un niveau de développement suffisamment avancé pour que les ingénieurs la considèrent avec confiance comme un moyen d'appréhender la réalité physique, au même titre que les mesures obtenues lors d'essais expérimentaux.

## I-2\ Description des produits :

Les logiciels utilisant les méthodes de volumes finis pour simuler les écoulements numériques peuvent désormais être considérés comme de véritables "expériences numériques" lorsqu'ils sont réalisés avec soin. L'avantage de ces "expériences numériques" réside dans la disponibilité immédiate de toutes les quantités physiques associées à l'écoulement, telles que le champ de vitesse, le champ de pression et les contraintes. En pratique, il est souvent impossible ou très difficile d'obtenir ces quantités dans leur intégralité lors d'une expérience réelle. En revanche, la simulation numérique directe des équations de Navier-Stokes reste limitée aux nombres de Reynolds modérés.

Dans le cadre d'une simulation numérique, la première étape consiste à définir un maillage adapté à l'écoulement. Il est particulièrement important d'avoir un maillage fin dans les zones où l'on s'attend à trouver de fortes variations de vitesse. Dans cette optique, une connaissance préalable du champ de vitesse, obtenue à partir d'expériences sur des écoulements similaires, s'avère utile pour établir le maillage.

Il est possible d'affiner le maillage en se basant sur les résultats obtenus afin d'identifier les zones de l'écoulement où la convergence du calcul n'est pas parfaitement atteinte, par exemple les éléments où la condition d'incompressibilité n'est pas complètement satisfaite.

Deux logiciels commerciaux largement utilisés dans l'industrie, Gambit pour la création du maillage et Fluent pour le calcul, seront employés dans cette simulation numérique.

Dans une simulation numérique, il est préférable de travailler avec des nombres adimensionnels plutôt que des grandeurs physiques dimensionnelles. Bien que cela puisse sembler contraignant, cela facilite la transposition des résultats de calcul. Cependant, dans Fluent et Gambit, les données sont spécifiées en unités physiques plutôt qu'en nombres adimensionnels. Les équations de Navier-Stokes et de conservation de la masse sont discrétisées ici à l'aide d'éléments quadrangulaires ou triangulaires, réguliers ou non en fonction de la complexité de la géométrie. Cela conduit à un système d'équations non linéaires couplées, qui est résolu de manière itérative. Les critères de convergence du calcul consistent à vérifier que, d'une part, l'équation de conservation de la masse n'apporte qu'une modification relative de la solution inférieure à une valeur seuil que l'on peut ajuster.

En général, il n'est pas possible d'obtenir directement une solution correcte à un nombre de Reynolds élevé. Il est donc recommandé de commencer par trouver des solutions pour des nombres de Reynolds modérés, de vérifier leur plausibilité, puis d'augmenter progressivement le nombre de Reynolds.

### **I-2.1\ Limites et avantages de la simulation :**

De nos jours, les ordinateurs sont capables de simuler des phénomènes complexes tels qu'un avion complet, mais leur puissance demeure insuffisante pour représenter intégralement les phénomènes météorologiques. La simulation de l'évolution du temps reste donc très difficile au-delà de quelques heures.

La simulation permet de mener des recherches sur un système isolé en variant un paramètre à la fois et en répétant les expériences dans les mêmes conditions initiales. En revanche, lorsqu'il s'agit de phénomènes complexes, l'expérimentation ne permet pas toujours d'isoler le système d'étude de son environnement. De plus, la maîtrise des conditions initiales peut être complexe, et une expérience peut altérer ou détruire le système étudié au point de rendre impossible toute reprise.

Comparativement, la simulation est souvent moins coûteuse que l'expérimentation et présente moins de risques lorsque l'humain est intégré au système étudié. Les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus rapidement. Toutefois, la simulation, en particulier la simulation numérique, repose sur une connaissance des phénomènes qui ne peut être acquise que par l'expérimentation. Ainsi, une simulation ne peut être réalisée que si l'on dispose d'un corpus de connaissances suffisant obtenu grâce à des expériences sur des phénomènes antérieurs et analogues. Quelle que soit la qualité de la simulation, elle ne remplace pas totalement l'expérimentation.

Certaines simulations peuvent être très coûteuses, bien que leur coût reste inférieur à celui de l'expérimentation. Cela explique pourquoi les principaux utilisateurs de la simulation, en particulier lorsqu'elle nécessite des ressources de calcul exceptionnelles, sont les industries à forte valeur ajoutée (comme l'aéronautique et l'espace, le nucléaire) ou celles présentant des risques élevés (comme le secteur militaire).

### **I-2.2\ Présentation du code de calcul :**

Grâce à l'augmentation rapide de la puissance des calculateurs, des codes commerciaux ont été développés pour résoudre les problèmes de transport dans les fluides. Plusieurs codes industriels tridimensionnels sont disponibles, parmi lesquels les plus performants sont FLUENT, CFX, PHOENICS, STAR-CD, TRIO, FEMLAB, etc. Ces codes utilisent des méthodes telles que les volumes finis, les différences finies ou les éléments finis pour résoudre les équations gouvernant les écoulements (équations de Navier-Stokes). Dans notre étude, nous utilisons le code de calcul Fluent, commercialisé par le groupe FLUENT, qui est l'un des principaux acteurs dans le domaine de la mécanique des fluides numérique. Le groupe FLUENT développe et propose une solution complète de logiciels de CFD (Dynamique des Fluides Numérique) qui permettent de simuler une large gamme d'écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, avec des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques et les écoulements multiphasiques, pour diverses industries.

Les produits et services offerts par le groupe ANSYS aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire les risques. Le logiciel ANSYS est largement utilisé dans l'industrie aéronautique et automobile, offrant une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Il utilise la méthode des volumes finis pour modéliser une grande variété d'écoulements dans des configurations plus ou moins complexes.

Le logiciel ANSYS est composé de trois éléments clés, comme tout logiciel de CFD : le pré-processeur, le solveur et le post-processeur. Ces trois éléments sont détaillés ci-dessous.

### **I-2.2.a) Pré-processeur GAMBIT :**

Le pré-processeur GAMBIT offre à l'utilisateur la possibilité de construire la géométrie du domaine de calcul et de le subdiviser en petits volumes de contrôle appelés cellules de calcul. L'ensemble de ces cellules forme le maillage. De plus, il permet de définir les conditions aux limites appropriées pour les cellules situées sur ou en contact avec la frontière du domaine de calcul. Le pré-processeur permet également de créer différents types de maillage en fonction de la géométrie et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide) utilisé dans le domaine de calcul.

### **I-2.2.b) Solveur FLUENT 16.0 :**

Le pré-processeur du logiciel Fluent permet de définir numériquement les conditions opératoires telles que la gravité et la pression dans lesquelles la simulation est effectuée, ainsi que de spécifier les conditions aux limites. Il permet également de choisir le processus itératif en proposant différents schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, ainsi que pour le couplage de la vitesse et de la pression.

Les équations discrétisées sont résolues en utilisant la formulation suivante : convection - diffusion = sources - pertes.

Pour les fluides incompressibles, les calculs sont effectués en utilisant la pression relative.

La méthode des volumes finis est utilisée, ce qui présente l'avantage d'être conservatrice, c'est-à-dire que tout le flux sortant d'un volume de contrôle entre dans les volumes voisins. Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle. Le théorème d'Ostrogradski est utilisé pour transformer certaines intégrales de volume en intégrales de surface.

- Discrétisation spatiale et temporelle (pour les écoulements non permanents) des équations : remplacement des dérivées partielles par des approximations en différences finies, ce qui transforme le système d'équations en un système algébrique.

- Résolution du système algébrique à l'aide d'un processus itératif : utilisation d'un algorithme pour ajuster la pression et les composantes de la vitesse afin de garantir la conservation de la masse.

### I-2.2.c\ Post-processeur :

Le logiciel de post-traitement CFX permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine de calcul, ainsi que d'afficher les résultats obtenus à partir de la simulation. Il offre la possibilité de visualiser les champs tels que la pression, la vitesse, la température, ainsi que toutes les autres grandeurs calculées. De plus, il permet de tracer et de visualiser les lignes de courant pour mieux comprendre les écoulements. CFX est largement utilisé dans l'industrie en raison de son interface sophistiquée qui facilite son utilisation. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser le logiciel Fluent, qui fait partie du groupe FLUENT, en raison de ses fonctionnalités avancées et de son interface conviviale.

### I-3\ La Simulation numérique :

Les simulations effectuées dans cette étude ont été réalisées en utilisant le logiciel Fluent 16.0 d'ANSYS, Inc. Le solveur de ce logiciel utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation des équations de Navier-Stokes en régime stationnaire (RANS), ainsi que pour les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie.

D'après les travaux de Zhang et Hassan et Khajeh Hasani et Jubran, le modèle de turbulence k- $\epsilon$  Réalisable a été choisi pour capturer la séparation du jet et pour prédire l'efficacité de refroidissement par film. Ces études ont montré que ce modèle donne des résultats plus proches des données expérimentales par rapport à d'autres modèles. De plus, l'utilisation de la fonction murale standard (Standard Wall Function) pour la modélisation près de la paroi s'est avérée plus performante que le traitement Scalable and Enhanced Wall.

En se basant sur les données de ces études, les calculs effectués dans cette étude ont utilisé le modèle de turbulence k- $\epsilon$  Réalisable en couplant avec la fonction murale standard. La méthode d'Up Wind d'ordre deux a été utilisée pour résoudre les équations de mouvement, d'énergie et de turbulence. L'algorithme SIMPLEC a été employé pour résoudre le couplage pression-vitesse.

L'écoulement a été considéré comme un gaz parfait incompressible et lors de la convergence, les résidus normalisés étaient toujours inférieurs à  $10^{-6}$  pour les équations de continuité et de quantité de mouvement,  $10^{-5}$  pour les équations de turbulence et  $10^{-8}$  pour l'équation d'énergie.

#### I-3.1\ la géométrie du flux, grilles et conditions aux limites :

Cette étude se concentre sur une seule configuration de refroidissement par film, qui est basée sur une géométrie triangulaire. Cette géométrie a été inspirée par les travaux expérimentaux de Sinha et al.

Cependant, des modifications ont été apportées à cette configuration en ajoutant une rampe en amont qui s'étend jusqu'à l'entrée du flux chaud, contrairement à celle décrite par Na et Shih, qui a une distance de 2D seulement. Ces modifications ont été apportées pour améliorer les performances de refroidissement par film et explorer de nouvelles possibilités.

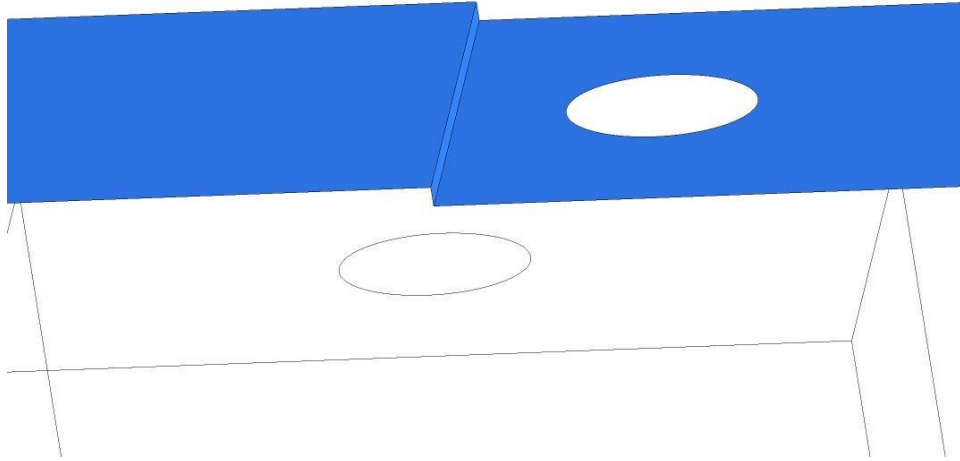
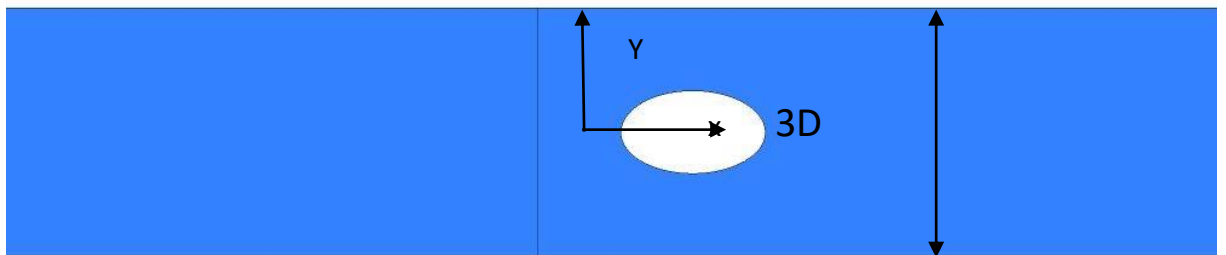


Figure III.1 : Configurations géométriques de la rampe



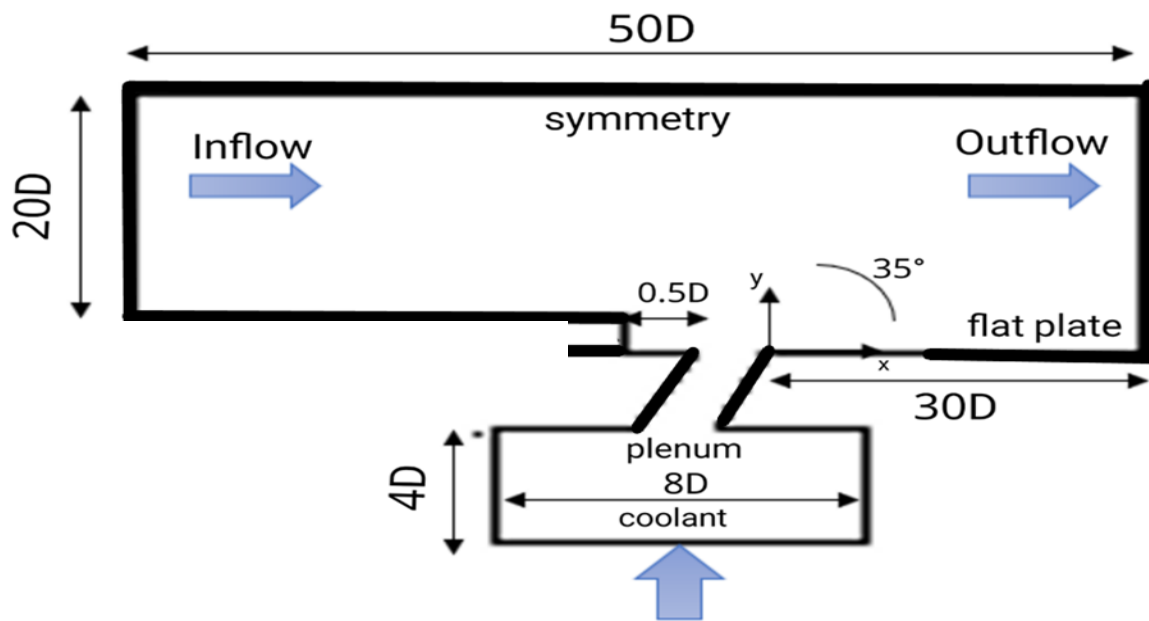


Figure III.2 : Domaine de calcul et conditions aux limites

### I-3.2) Domaine de calcul et conditions aux limites :

Dans cette étude, une seule rangée de trous cylindriques inclinés à un angle de  $35^\circ$  par rapport à la direction de l'écoulement est considérée. Les trous sont espacés latéralement de  $3D$ , où  $D$  représente le diamètre du trou (12,7 mm). Un seul rapport longueur-diamètre des trous de 1,75 est pris en compte.

Le domaine de calcul s'étend depuis le plan d'entrée jusqu'à une distance de  $50D$  dans la direction de l'écoulement, et du fond de la plaque plane jusqu'à une distance de  $20D$  dans la direction verticale. Dans la direction de l'envergure, le domaine s'étend entre le milieu d'un trou d'injection et des conditions de symétrie sont imposées sur ces plans.

Pour améliorer l'application du profil de vitesse du flux injecté à l'entrée du trou, une partie du plénum est incluse dans le domaine de calcul, tandis que la couche limite est entièrement développée. La vitesse du courant principal est fixée à  $U = 20$  m/s, conformément à l'expérience de Sinha et al. Les distributions uniformes sont spécifiées pour  $k$  et  $\epsilon$ , correspondant à une intensité de turbulence du flux libre de  $Tu = 2\%$  et une viscosité turbulente adimensionnelle de  $\mu t / \mu_\infty = 50$ .

Sur la surface de la paroi de la plaque plane, des conditions aux limites sans glissement sont utilisées pour la vitesse, une valeur de zéro est spécifiée pour l'énergie cinétique turbulente, et l'état adiabatique est imposé pour la température. Des conditions similaires sont appliquées aux parois internes du plénum. Étant donné que la surface supérieure du domaine est située relativement loin de la plaque plane, des conditions de symétrie sont utilisées à cet endroit.

Les rapports de densité entre le flux d'injection et le flux principal restent les mêmes que dans la configuration expérimentale, avec  $\rho_{jet}/\rho_{\infty} = 1,2$ . Le flux de travail est réglé à une température de 300°C pour l'écoulement principal et de 250°C pour l'écoulement du jet secondaire. Trois taux d'injection de 0,5, 1,0 et 1,5 sont considérés dans l'étude.

➤ **La rampe en amont**

La nouvelle rampe, basée sur les mêmes paramètres géométriques de la rampe de shih, est construite de telle façon à ce que la rampe s'étend jusqu'à l'entrée du flux chaud (INFLOW), en théorie cette géométrie pourra donner plus de temps et d'espace pour le flux chaud de se stabiliser et laisser le film d'air froid de bien refroidir la plaque en aval du trou d'injection.

➤ **L'efficacité adiabatique Latérale moyenne de refroidissement par film**

Dans la première section, la discussion sera basée sur ce qu'on appelle l'efficacité adiabatique Latérale moyenne de refroidissement par film  $\langle \eta \rangle$ , qui est défini par :

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{L} \int_L^1 \eta dz$$

Où  $L$  représente la dimension d'envergure de la plaque et  $\eta$ is l'efficacité adiabatiques de refroidissement par film, défini par :

$$\eta = \frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_c}$$

Dans cette étude, l'efficacité adiabatique de refroidissement par film est définie comme la différence de température entre le flux principal ( $T_{\infty}$ ) et la température du jet ( $T_c$ ), divisée par la différence de température entre le flux principal et la température ambiante ( $T_{\infty} - T_c$ ). Cela permet de quantifier l'efficacité du refroidissement par le film d'air. Où  $T_{\infty}$  représente la température du flux principal,  $T_c$  représente la température du jet, et  $T$  représente la température à un point spécifique sur la surface de l'aube.

L'efficacité adiabatique latérale moyenne de refroidissement par film ( $\langle \eta \rangle$ ) est obtenue en intégrant l'efficacité adiabatique sur toute la longueur de l'aube ( $L$ ) Ici,  $L$  représente la dimension d'envergure de la plaque. Le taux d'injection ( $M$ ) est défini comme le rapport entre le débit massique du jet ( $\rho_f U_f$ ) et le débit massique du flux principal ( $\rho_{\infty} U_{\infty}$ ) :

$$M = \frac{\rho_f U_f}{\rho_{\infty} U_{\infty}}$$

Où  $\rho_f$  et  $\rho_{\infty}$  représentent les densités du jet et du flux principal respectivement, et  $U_f$  et  $U_{\infty}$  représentent les vitesses perpendiculaires du jet et du flux principal respectivement.



<b>Les cas étudiés</b>		<b>L/D=1.75</b>
<b>M=0.5</b>	Cas Base line	B_M05_L175
	Géométrie modifié	
<b>M=1.0</b>	Cas Base line	B_M10_L175
	Géométrie modifié	

**Tableau III.1 : Les cas étudiés**

### ➤ Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes configurations géométriques étudiées dans cette thèse, à savoir les trois cas avec des taux d'injection  $M$  égaux à 0.5, 1.0 et 1.5. L'objectif des simulations numériques était d'analyser l'impact de la géométrie du trou d'injection sur l'efficacité adiabatique du refroidissement par film.

Pour chaque configuration, les simulations ont été réalisées en testant les trois taux d'injection mentionnés. Chaque taux d'injection est défini comme le rapport de l'efficacité adiabatique, qui est représentée sous forme de graphes et de contours de température et de pression. Les résultats obtenus dans cette étude seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

En résumé, ce chapitre introduit les cas de simulation avec différentes géométries de trou d'injection et différents taux d'injection. Les résultats de ces simulations, exprimés en termes d'efficacité adiabatique, seront examinés en détail dans le prochain chapitre.



## ***Chapitre IV***

# ***Résultats et discussions***

## I-1\ Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus pour les différentes simulations. Nous commencerons par illustrer les résultats de chaque configuration géométrique séparément, puis nous procéderons à une comparaison entre les trois configurations : <M05> et <M01>

L'efficacité du refroidissement est le paramètre le plus important dans l'étude du refroidissement par film, et il sera au cœur de la plupart des résultats présentés dans ce chapitre. Nous analyserons en détail cette variable pour chaque configuration.

Ensuite, nous aborderons les résultats des cas comportant des imperfections géométriques. Ces résultats seront présentés sous forme de contours et de graphiques, accompagnés d'une discussion approfondie pour chaque résultat.

En résumé, ce chapitre fournira une vue d'ensemble des résultats obtenus pour chaque configuration géométrique, ainsi qu'une comparaison entre elles. Nous mettrons l'accent sur l'efficacité du refroidissement en tant que variable clé et examinerons les effets des imperfections géométriques. Les résultats seront illustrés de manière graphique et accompagnés d'une analyse détaillée.

## I-2\ Résultats et discussions :

**I-2.1\ Résultats :** concernant Efficacité adiabatique latérale moyenne «  $\eta$  » de refroidissement avec les deux cas configurations «  $M=0.5$  », «  $M=1.0$  » par rapport «  $X/D$  » et «  $Y/D$  » à savoir  $D=12.7$  mm.

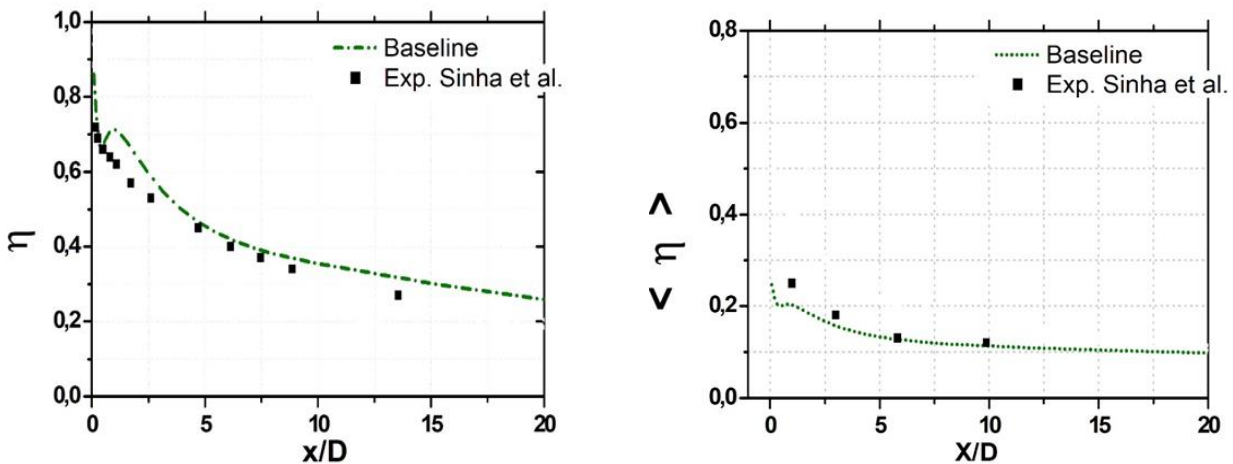


Figure IV.1: L'efficacité latérale de refroidissement par film Cas  $M=0.5$

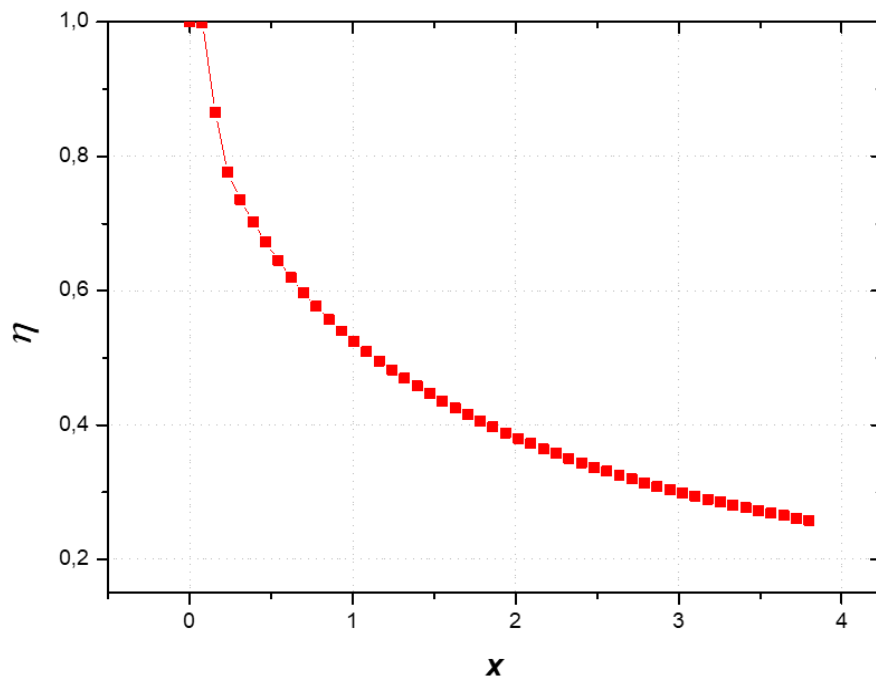
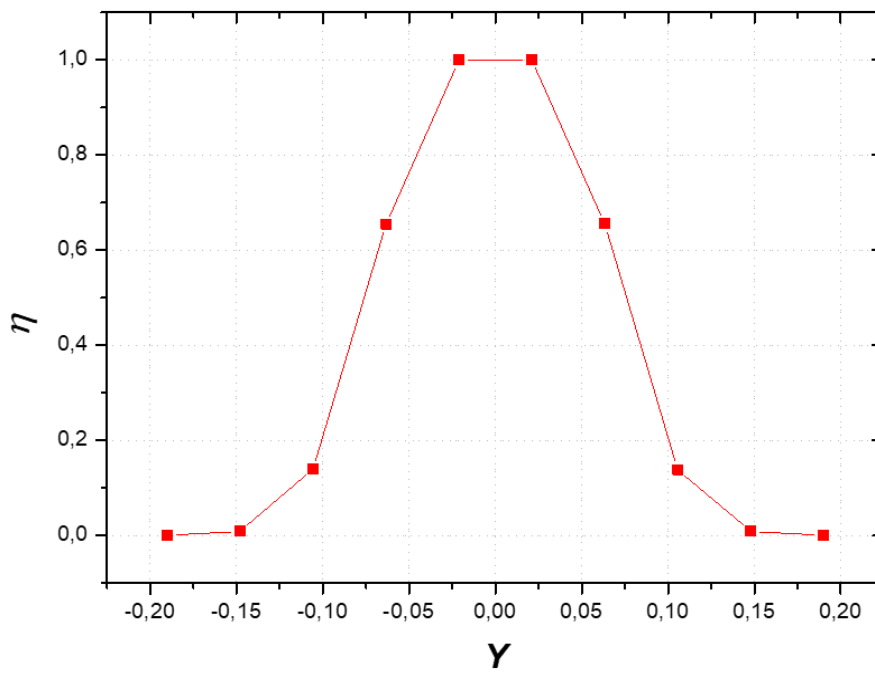
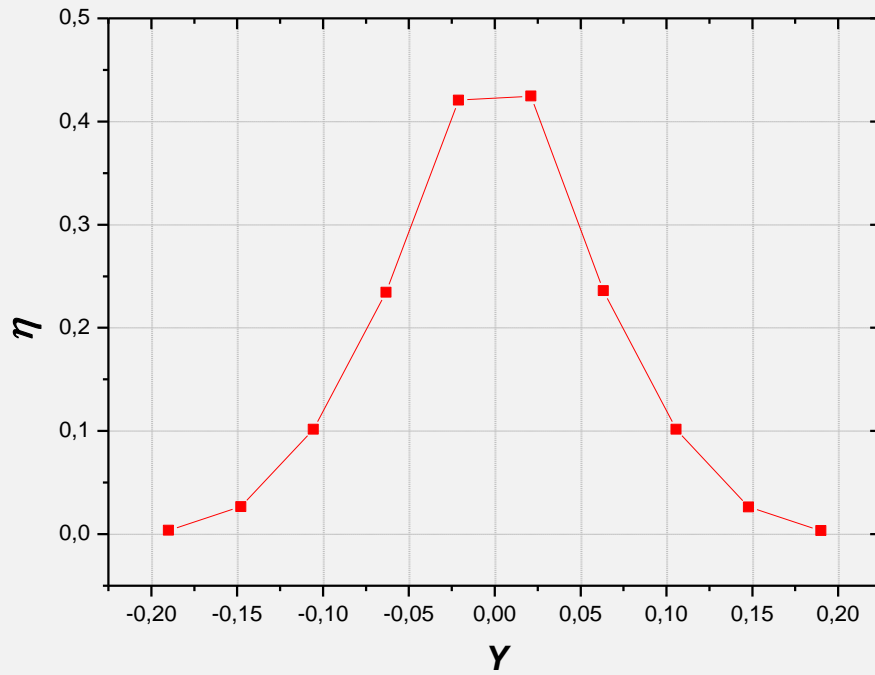


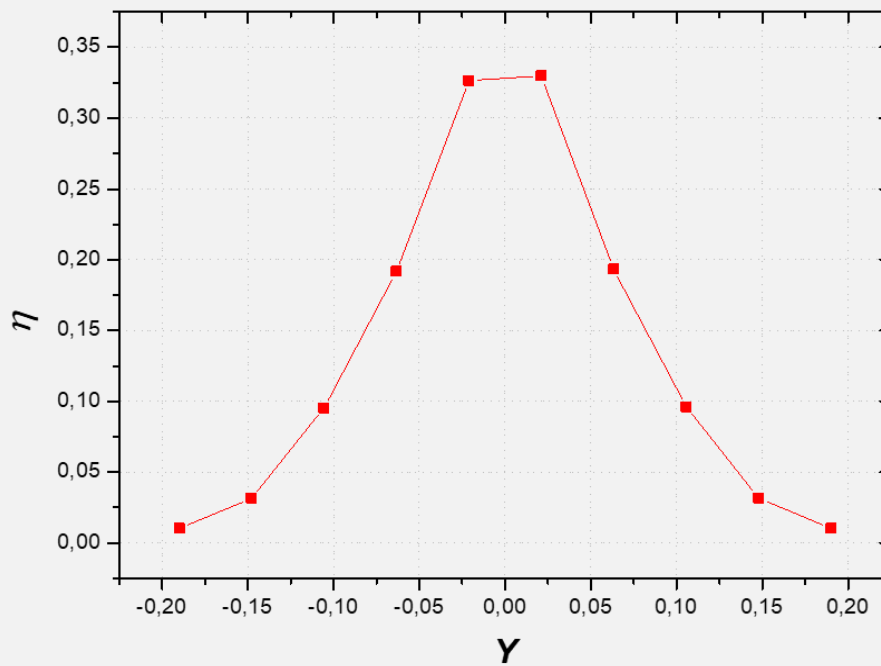
Figure IV.2 : Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=0.5$  par rapport à  $X$



Ligne 1  $M=0,5$



Ligne 2 M=0,5



Ligne 3 M=0,5

Figure IV.3 : Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas M=0.5 par rapport à Y

Lorsque l'on examine l'efficacité de la ligne centrale  $\eta$ , on voit que, les présents calculs sont, plus ou moins, en bon accord avec les données expérimentales de Sinha et données numériques de Shih.

En général, lorsque l'efficacité de refroidissement par film de la ligne centrale est plus élevée, ce qui correspond à une diffusion latérale trop faible. Donc une efficacité de refroidissement par film de la ligne centrale supérieur correspond à une faible  $\langle \eta \rangle$ .

- **Figure IV.1 Figure IV.2 Figure IV.3 :** montre l'efficacité adiabatique latérale de refroidissement par film pour  $M=0.5$  « modified geometry » comparativement aux données disponibles à partir de l'expérience de Sinha « Baseline », les valeurs calculées sont en dessus de la courbe des données expérimentales, alors que les tendances sont bien capturées pour ce cas.

Les résultats sont presque les mêmes et identiques et sont plus prononcés pour ce cas.

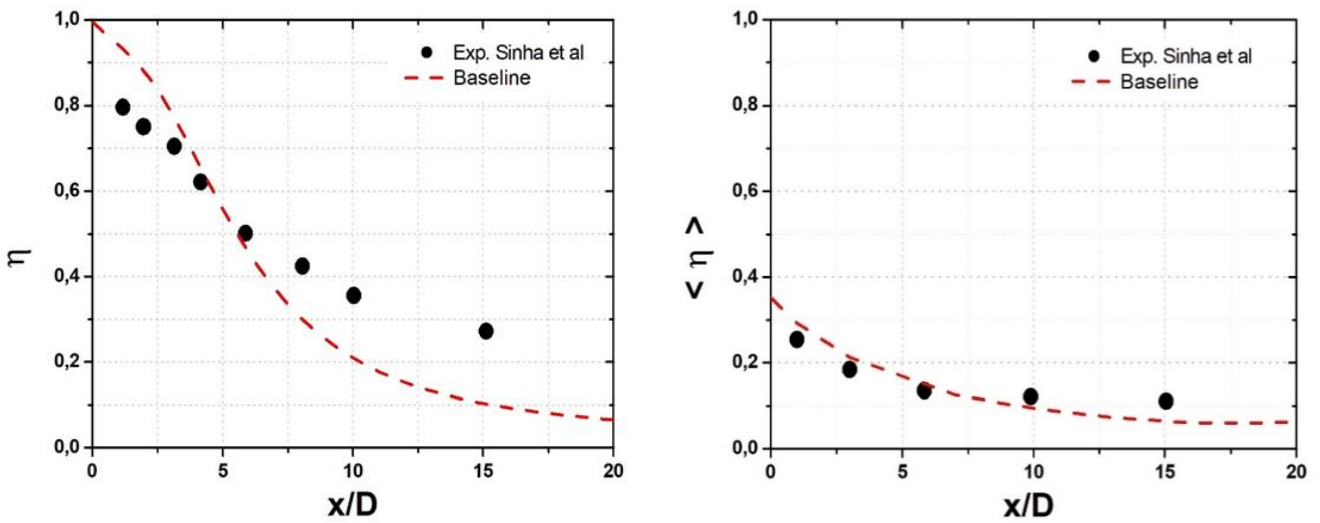


Figure IV.4: L'efficacité latérale de refroidissement par film Cas  $M=1.0$

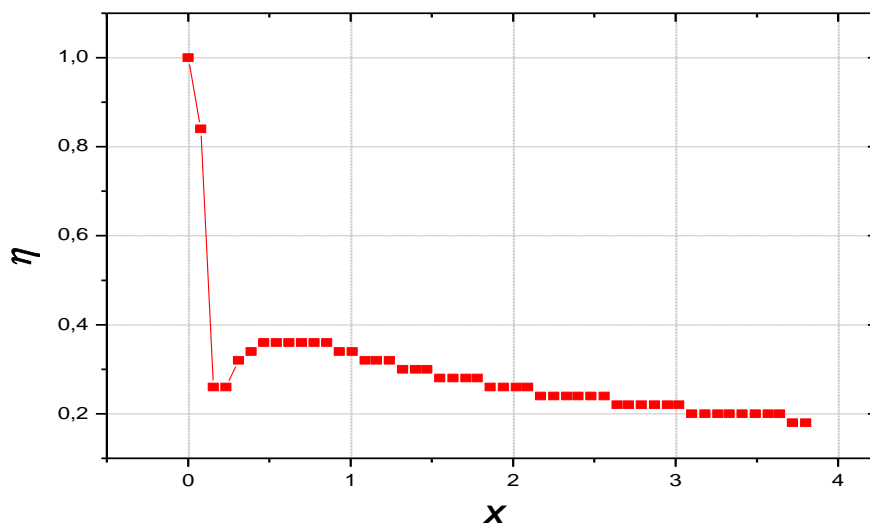
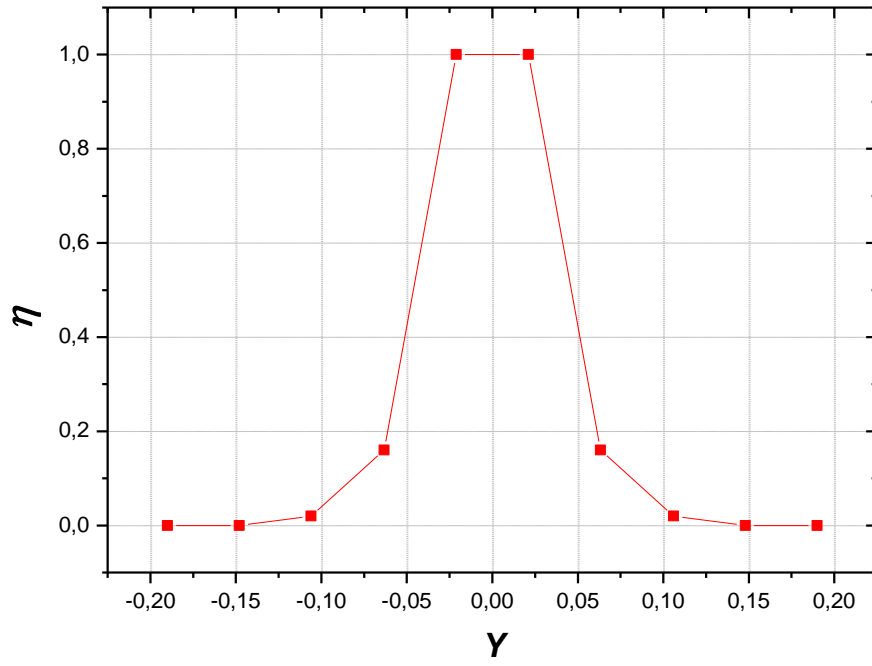
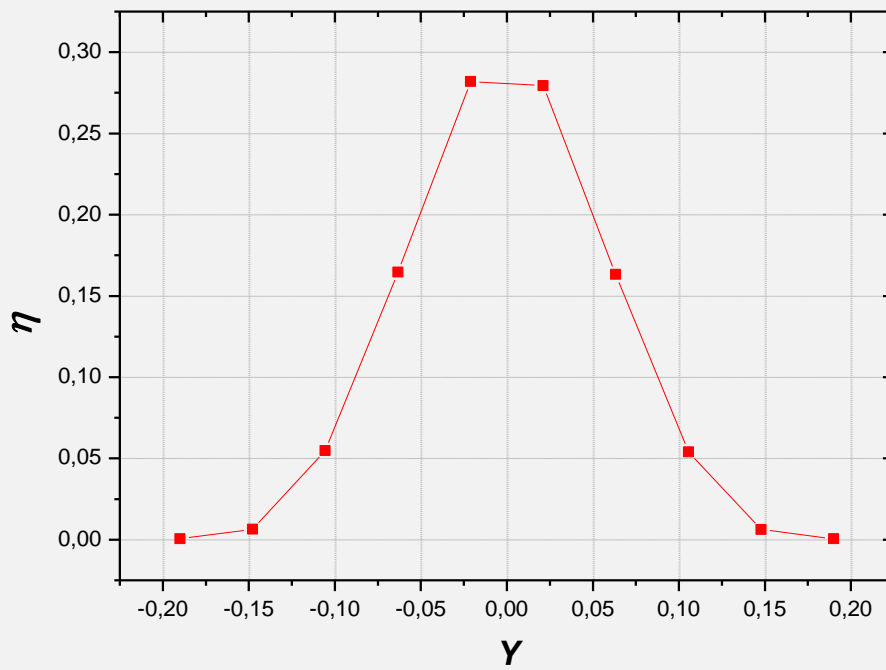


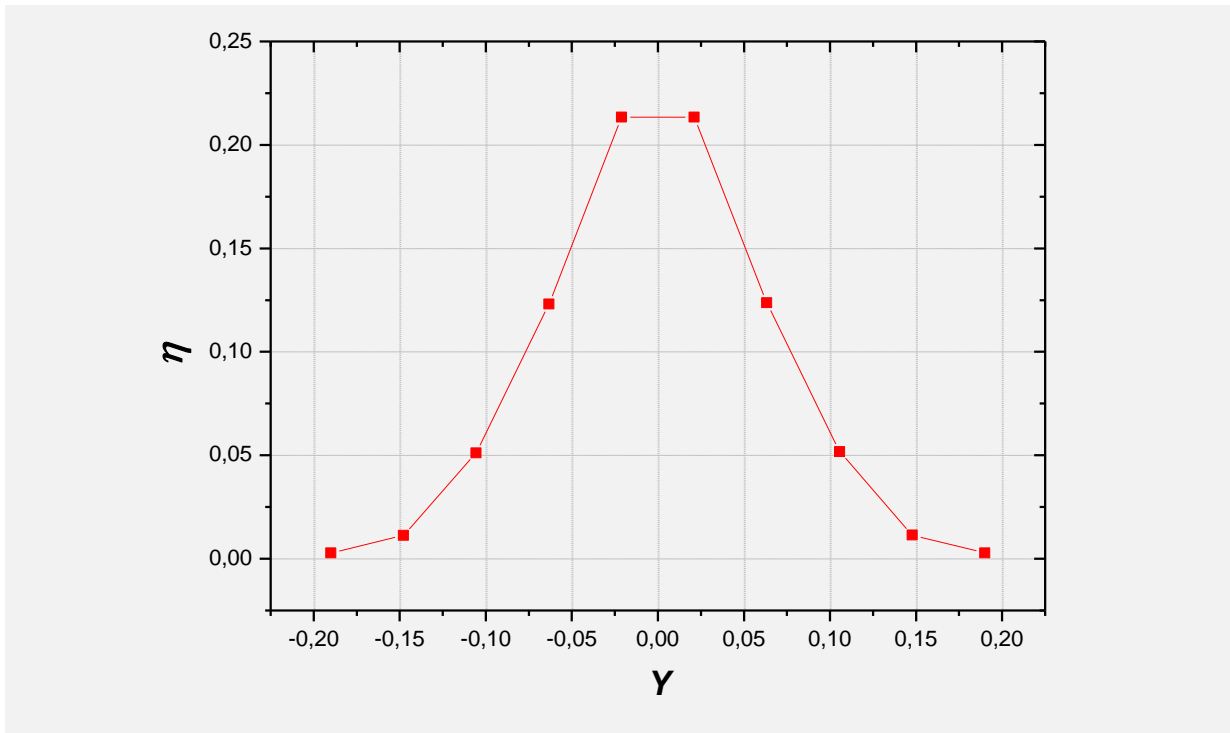
Figure IV.5: Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas  $M=1.0$  par rapport à X



Ligne 1 M=1.0



Ligne 2 M=1.0



Ligne 3 M=1.0

Figure IV.6 : Efficacité adiabatique de refroidissement par film Cas M=1.0 Par rapport à X

- **Figure IV.4****Figure IV.5****Figure IV.6** : montre l'efficacité adiabatique latérale de refroidissement par film pour M=1.0 « modified geometry » comparativement aux données disponibles à partir de l'expérience de Sinha « Baseline ».

Dans ce cas on remarque deux parties différentes :

La première partie que les valeurs calculées « modified geometry » sont en dessous de la courbe des données expérimentales « Baseline » et dans la deuxième partie on voit que les valeurs calculées deviennent au-dessus de la courbe des données expérimentales « cas Baseline »

Dans ce cas un taux d'injection élevé, La figure montre que les tendances sont bien capturées et à partir de ces valeurs calculées on note un accord et une convergence avec les résultats de l'expérience Sinha et al donc les valeurs sont mêmes et identiques



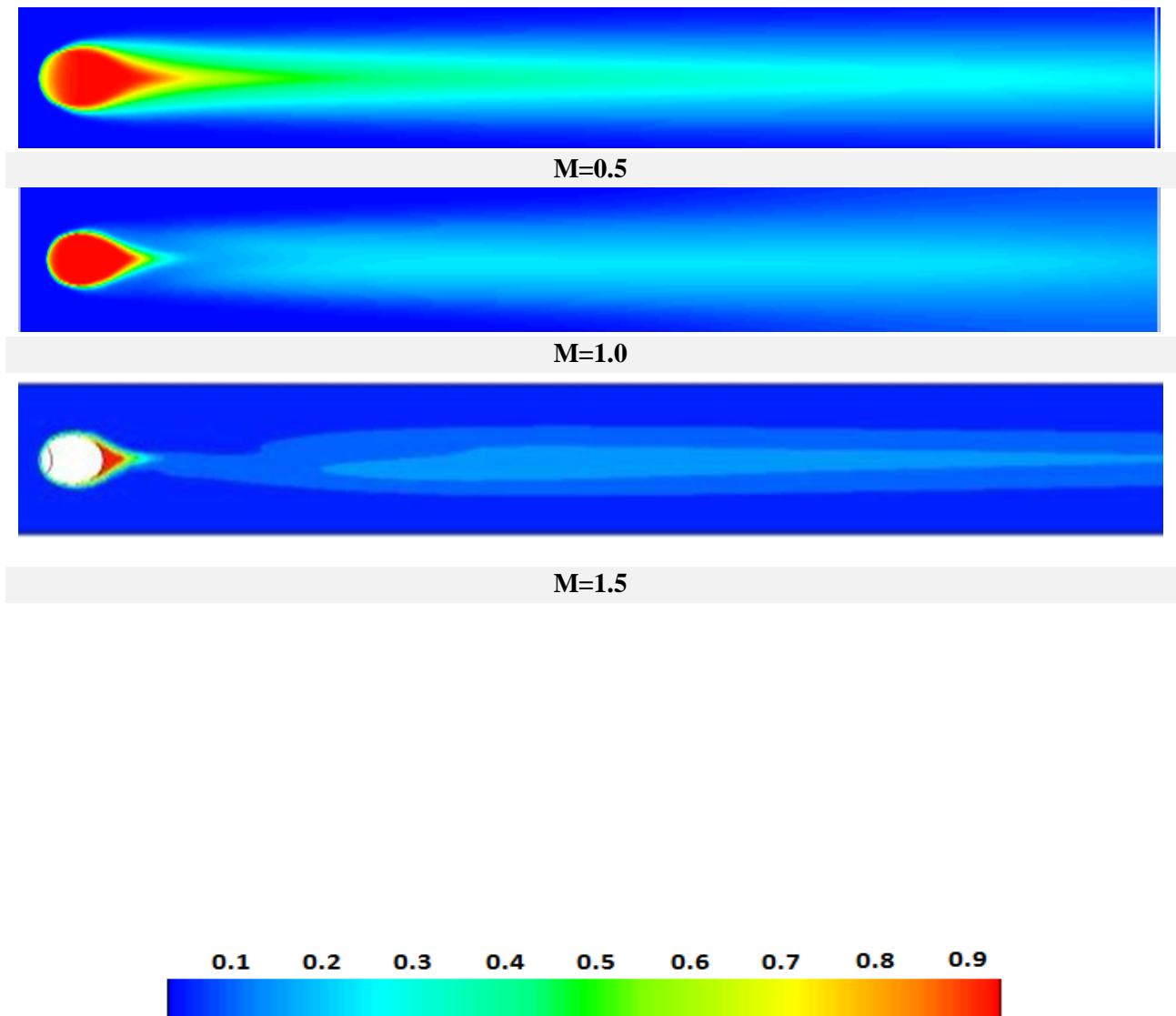


Figure IV.7 : L'efficacité de refroidissement par film sur la plaque " cas Baseline"

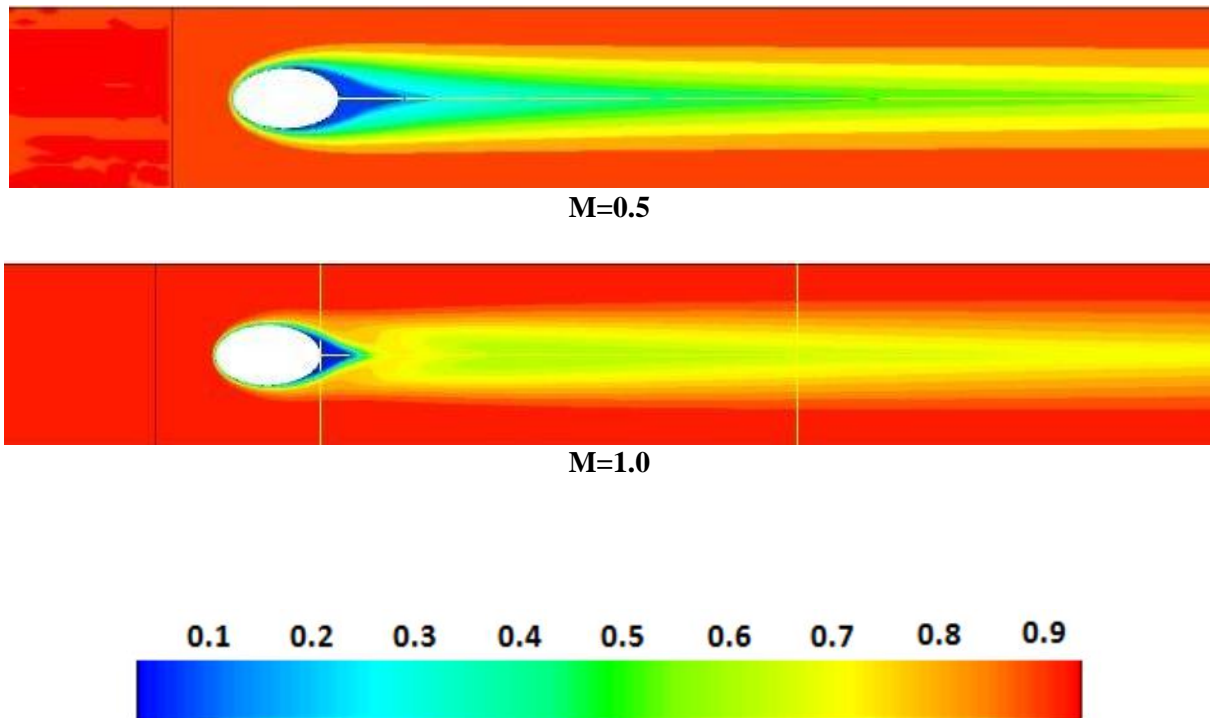


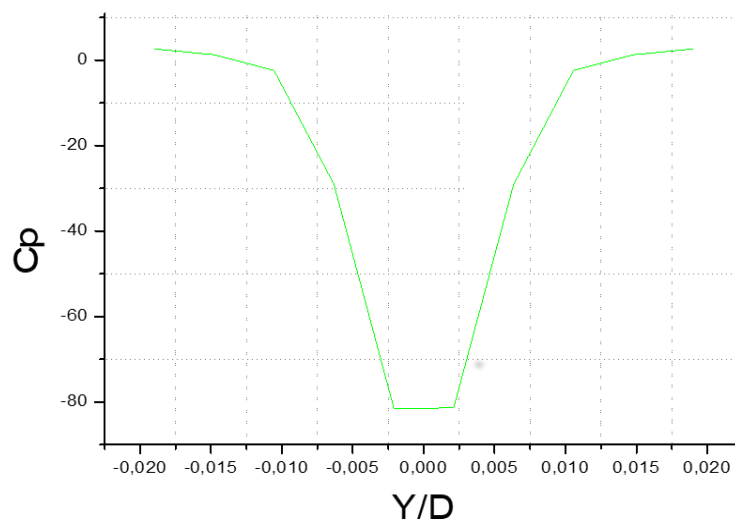
Figure IV.8 : L'efficacité de refroidissement par film sur la plaque pour les trois cas

- **Figure IV.8:** montre les contours de l'efficacité adiabatique de refroidissement par film de la ligne centrale de  $\eta$  pour les trois cas étudiés. La première figure correspond au cas de  $M=0.5$  et montre que le jet reste attaché au trou, ce qui est caractéristique pour le faible taux d'injection.

La deuxième figure montre la distribution de l'efficacité le long de la surface pour le cas de  $M=1.0$ . Comme prévu, la diffusion latérale est meilleure pour ce cas alors que dans la région centrale.

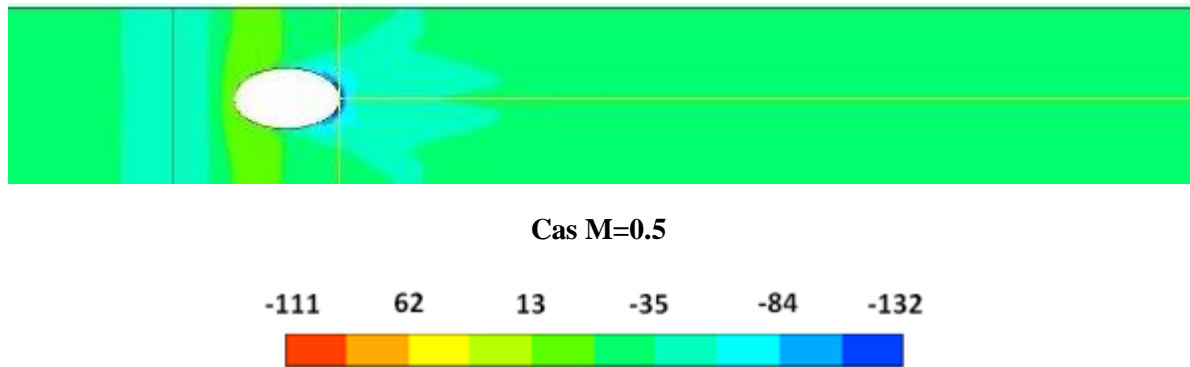
Les résultats calculés pour les trois cas étudiés sont tracés avec les données expérimentales disponibles qui sont en bonne concordance.

notre étude a montré que la nouvelle géométrie proposée pour l'amélioration du refroidissement adiabatique par film cooling est plutôt efficace par rapport au cas du baseline et cela pour les faible vitesse d'injection de l'air froid



**Figure IV.9 : Le coefficient de pression Cas M=0.5**

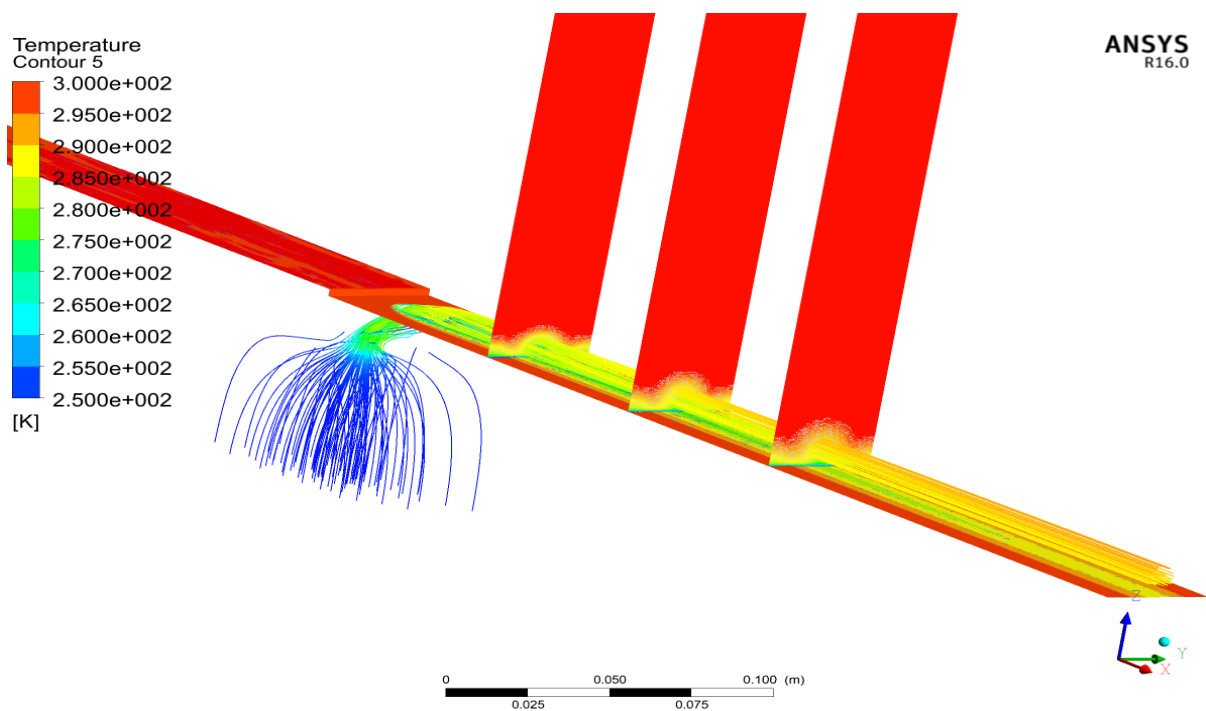
**Figure IV.9 :** cette figure montre la variation du coefficient de pression suivant la direction de l'écoulement « par rapport  $y/D$  » pour le cas «  $M=0.5$  ».



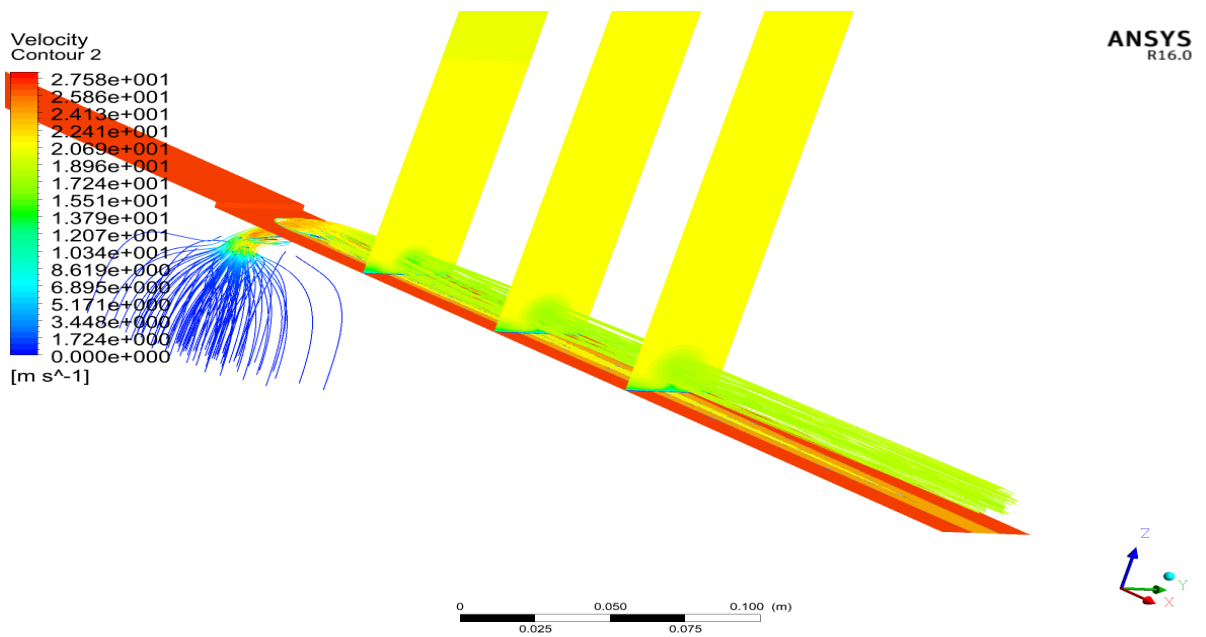
**Figure IV.10: Gradient de pression**

- **Figure IV.10** : montre les contours de pression sont tracés pour le cas M=0.5, Lorsque l'on regarde on peut voir la valeur de pression la plus élevée dans le cas M=0.5 Et pour les autres cas les valeurs de pression sont plus faibles.

I-2.3) Résultats : concernant les contours de vitesses pour le cas M=0.5 et M=1.0.



M=0.5

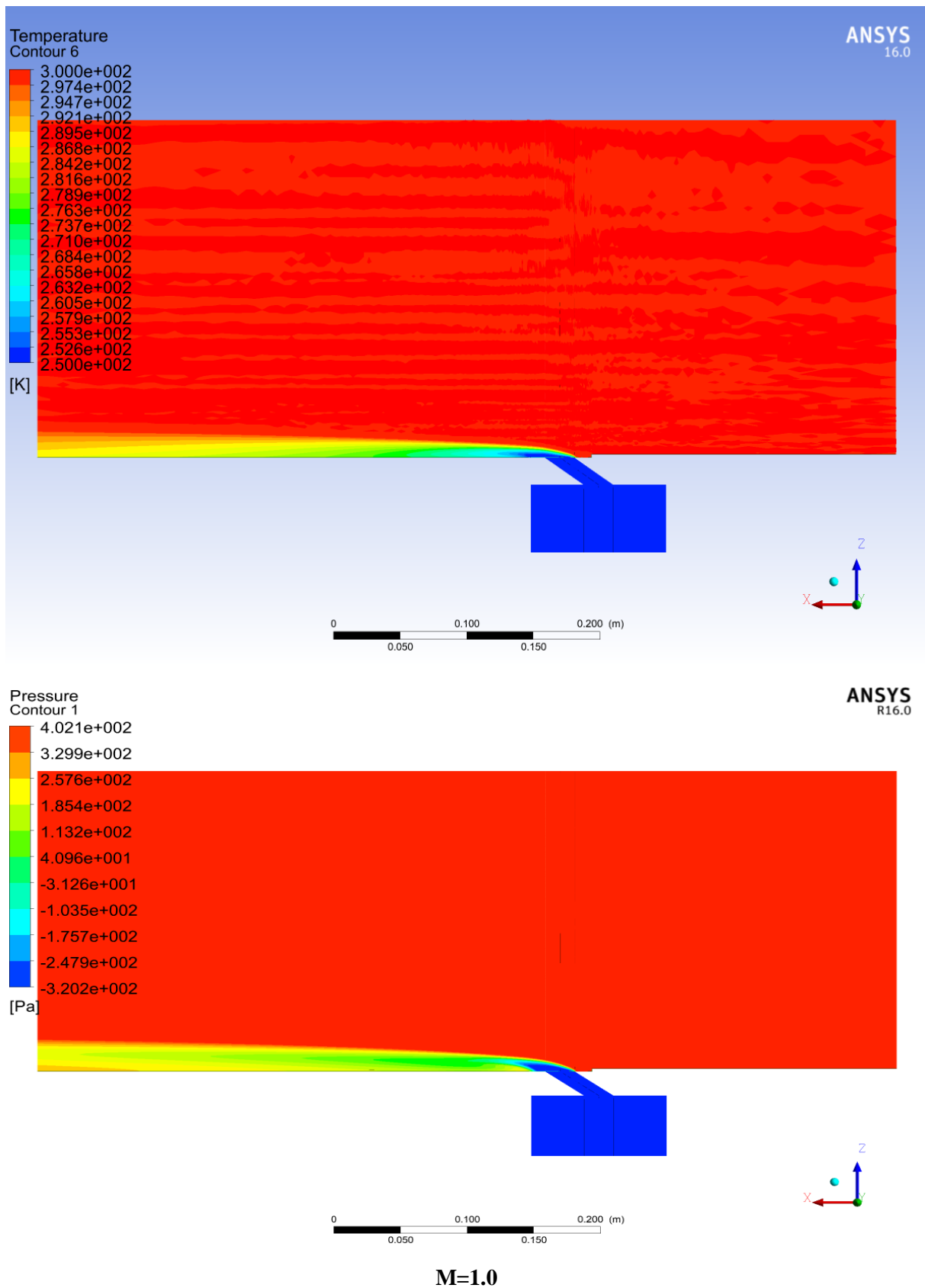


M=1.0

Figure IV.11 : Contour de vitesse pour le cas M=0.5 et M=1.0

- **Figure IV.11** : montre des vecteurs de vitesse, il est à noter que pour les deux cas étudiés :

Pour le cas de  $M=0.5$  on remarque une naissance de tourbillon aux extrémités latérales et pour cas de  $M=1.0$  la formation des tourbillons en aval du trou d'injection et on remarque qu'une formation des vortex en aval du trou d'injection (Kidney) due aux tourbillons naissants qu'on peut bien visualiser sur la figure illustrant les lignes de courant à la sortie du trou d'injection.



**M=1.0**

**Figure IV.12: Contour de température pour le cas M=0.5 et M=1.0**

**➤ Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats obtenus par simulation numérique du refroidissement par film à travers trois configurations différentes. « deux taux d'injection de 0.5, 1.0 sont considérées » sans changement la géométrie avec un seul rapport longueur-diamètre des trous (1.75) est pris en compte dans la présente étude, Les résultats obtenus concordent assez bien avec les mesures expérimentales de Sinha.

Le but de cette étude défini comme un rapport de l'efficacité adiabatique sous forme des graphes et des contours du température et de pression et de vitesse.



## ➤ Conclusion générale :

En conclusion générale, la turbine à gaz et la modélisation de turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances, de l'efficacité et de la durabilité des turbines à gaz.

La turbine à gaz est une technologie polyvalente utilisée dans diverses applications industrielles, notamment la production d'électricité, la propulsion aéronautique et les processus industriels. Elle fonctionne en comprimant l'air ambiant, en le chauffant et en l'expulsant à travers une turbine, ce qui génère de l'énergie mécanique. Cependant, les températures élevées atteintes à l'intérieur de la turbine peuvent causer des dommages aux aubes, ce qui réduit leur efficacité et leur durée de vie.

Le refroidissement par film des aubes de turbine est une méthode efficace pour protéger les aubes de la chaleur excessive. Il consiste à créer une fine couche d'air frais le long de la surface des aubes, formant une barrière thermique qui réduit la température de surface et prévient les dommages. Pour optimiser cette méthode, il est essentiel de comprendre et de modéliser la turbulence qui se produit dans le film de refroidissement.

La modélisation de turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine permet de simuler et de prédire les caractéristiques de l'écoulement d'air, de la distribution de température et des transferts de chaleur associés. Elle repose sur des modèles mathématiques avancés et des techniques de simulation numérique pour résoudre les équations de la dynamique des fluides et de la chaleur. Ces modèles aident les ingénieurs à évaluer l'efficacité du refroidissement, à optimiser la géométrie des aubes et à améliorer les performances globales de la turbine à gaz.

En combinant la turbine à gaz avec la modélisation de turbulence dans le refroidissement par film, il est possible d'optimiser la conception des aubes, d'améliorer l'efficacité du refroidissement, de réduire les dommages thermiques et d'augmenter la durée de vie de la turbine. Cela se traduit par une meilleure efficacité énergétique, des coûts de maintenance réduits et une réduction des émissions polluantes.

En résumé, la turbine à gaz et la modélisation de turbulence dans le refroidissement par film des aubes de turbine à gaz sont des domaines de recherche et de développement cruciaux pour l'industrie des turbines à gaz. Leur combinaison permet d'optimiser les performances des turbines, de maximiser l'utilisation de l'énergie et de contribuer à la transition vers des sources d'énergie plus propres et durables.

## ■ Référence bibliographiques :

- (1) Pritchard, D. W. (2014). Thermal Power Plant: Design and Operation. Woodhead Publishing.
- (2) Gupta, R. C. (2017). Thermal Power Plant: Design and Operation. Cambridge University Press.
- (3) Dincer, I. &. (2012). Dincer, I., & RosThermal Power Plants: Modeling, Control, and Efficiency Improvement.
- (4) Twidell, J. &. (2015). Renewable Energy Resources (3rd Edition). Routledge.
- (5) Duffie, J. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes (4th Edition). Wiley.
- (6) Cengel, Y. A. (2019). Thermodynamics: An Engineering Approach (9th Edition). McGraw-Hill Education.
- (7) Jenkins, N. A. (2014). Renewable Energy Systems: The Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions. Academic Press.
- (8) Letcher, T. M. (2018). Future Energy (2nd Edition): Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet. Elsevier.
- (9) Pilidis, P. &. (2012). Advanced Thermodynamics Engineering (2nd Edition). CRC Press.
- (10) Stultz, S. C. (2012). Steam: Its Generation and Use (41st Edition). Babcock & Wilcox Company.
- (11) Yaws, C. L. (2015). Chemical Process Equipment: Selection and Design (3rd Edition). Gulf Professional Publishing.
- (12) Moran, M. J. (2017). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th Edition). Wiley.
- (13) Çengel, Y. A. (2014). Thermodynamics: An Engineering Approach (8th Edition). McGraw-Hill Education.
- (14) Cohen, H. R. (2014). Gas Turbine Theory (7th Edition). Pearson.
- (15) Mattingly, J. D. (2017). Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets (2nd Edition).
- (16) Saravanamuttoo, H. R. (2017). Gas Turbine Theory (7th ed.). Pearson.
- (17) Boyce, M. P. (2019). Gas Turbine Engineering Handbook. Elsevier.
- (18) Yilmaz, T. &. (2018). Gas turbine cooling: technology advancements and research challenges. Heat Transfer Engineering.
- (19) Wigley., J. P. (2017). "Gas Turbine Engineering Handbook." Butterworth-Heinemann.
- (20) Boyce, M. P. (2019). Gas Turbine Engineering Handbook (4th Edition). Butterworth-Heinemann.
  
- (21) Toro, E. F. (2009). Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction (3rd Edition). Springer.
- (22) Moukalled, F. M. (2015). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab. Springer.
- (23) Versteeg, H. K. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition). Pearson Education.
- (24) Peric, M. &. (2016). Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Butterworth-Heinemann.
- (25) Li, Q. &. (2019). Fluid-Structure Interaction of Film Cooling Flow Over Cylindrical Leading Edge. Journal of Thermal Science and Engineering Applications.
- (26) Yao, L. B. (2020). Yao, L.S., Bumpus, S., Recent Advances and Future Directions in Film Cooling Research. Heat Transfer Engineering.

- **(27)** Lomtev, E. M. (2018). Lomtev, Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations with Two-Equation Turbulence Models. In Turbulent Flows.
- **(28)** Jones, S. (2010). The Life and Works of Marie Curie. Cambridge University Press.
- **(29)** Isaacson, W. (2007). Einstein: His Life and Universe. Simon & Schuster.
- **(30)** Chernow, R. (. (2017). Grant. Penguin Press.
- **(31)** Goodall, J. (1999). Reason for Hope: A Spiritual Journey. Warner Books.
- **(32)** Lesieur, M. (2008). Turbulence in Fluids. Springer.
- **(33)** Davidson, P. (2015). Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers. Oxford University Press.
- **(34)** Wilcox, D. (2006). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries.
- **(35)** Durbin, P. (2011). Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers. Oxford University Press.
- **(36)** Sagaut, P. (2006). Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. Springer.
- **(37)** Geurts, B. (2005). Elements of Direct and Large-Eddy Simulation. Cambridge University Press.
- **(38)** Ferziger, J. &. (2012). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer.
- **(39)** Wilcox, D. (2006). Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries.
- **(40)** Cao, L. &. (2017). Advances in Turbulence Modeling: Challenging Limits. Springer.
- **(41)** Jiménez, J. (2018). Turbulent Flows: Fundamentals, Experiments, and Modeling. Springer.
- **(42)** Davidson, P. (2015). Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers. Oxford University Press.