

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Énergétique

THEME

**Étude et Simulation d'un écoulement turbulent à travers
une aube de type NACA 23012**

Présenté par :

AOUANE Hichem

AZZOUZ Wail Oussama

Promoteur : M. Abdelkrim MERAH

Co-Promoteur : Mlle. Hanan Lamraoui

Encadreur : M. Mourad OTMANE- CHERIF

Promotion 2020- 2021

REMERCIEMENTS

Nous rendons avant tout grâce à Dieu tout puissant qui nous a aidés à surmonter les difficultés que nous avons rencontrées tout au long de notre travail.

Nous tenons à remercier notre Promoteur M. Abdelkrim MERAH le Co-Promoteur Mlle. Hanan Lamraoui la confiance accordée, la bienveillance et leurs explications qui nous ont été accordées pour éclaircir et collaborer avec nous pour ce travail.

Nous tenons à témoigner nos sincères remerciements à M. Mourad OTMANE- CHERIF et tout l'ensemble du personnel de la centrale électrique de Cap Djenat pour leurs patientes, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portés à notre travail et au bon déroulement de notre stage de fin d'étude.

Notre gratitude s'entend à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, particulièrement l'équipe de formation de la spécialité énergétique.

En fin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail de mémoire de fin d'études.

Dédicace

Arrivé au terme de nos études, nous avons l'honneur et le plaisir de dédier ce travail :

A nos parents pour leur bontés, leur sacrifices afin que rien n'entrave le bon déroulement de nos études, leur encouragement perpétuel, leur soutien, que dieu puisse prolonger leur vie dans la joie et le bonheur.

A tous nos amis sans exception pour les moments partagés.

AOUANE Hichem

AZZOUZ Wail Oussama

Table des matières

Introduction générale

CHAPITRE I : Étude Bibliographique.....	14
CHAPITRE II : Description de la centrale électrique de Cap Djenat 2.....	19
I. Introduction	20
II. Présentation de la centrale électrique de Cap Djenat 2.....	20
III. Les différents paramètres de fonctionnement au conditions de référence et a 100% de charge.....	21
IV. Plan de masse	22
V. Plan de situation de la centrale	22
VI. Organigramme de la centrale.....	23
VII. Caractéristiques techniques de la centrale	23
1. Combustibles	23
2. Évacuation de l'énergie	24
3. Eau de réfrigération principale (eau de mer)	24
4. Eau de réfrigération secondaire (deminéralisée)	24
5. Station de dessalement de l'eau de mer.....	24
6. Station de déminéralisation	25
7. Station d'électrochloration	25
8. Salles de commande centralisées.....	25
9. Unité de gaz naturel et les principaux composants.....	25
VIII. Les différents composants d'une tranche de production.....	26
1. Turbine à gaz	26
2. Turbine à vapeur.....	27
3. Chaudière (HRSG)	27
4. Chaudière auxiliaire.....	28
5. Pompe d'alimentation de chaudière	29
6. Cheminée principale	29
7. Système de traitements des eaux	29
8. Système de traitement des eaux usées	30
9. Système de circulation d'eau de refroidissement	31
10. Générateur a simple corps.....	32
11. Condenseur	32
12. Pompe d'extraction du condensat	33
13. Éjecteur a jet de vapeur.....	33
14. La bache alimentaire	34
15. Les réchauffeurs haute pression.....	34
16. Les réchauffeurs basse pression.....	34
17. Alternateur	34

IX. Principe de fonctionnement d'une tranche de production.....	34
CHAPITRE III : Les composants de cycle combiné.....	37
I. Introduction	38
II. Principe de fonctionnement du cycle combiné	38
III. Principaux éléments du cycle combiné	39
1. Turbine à gaz	39
A. Les éléments d'une turbine à gaz	40
B. Combustibles des turbines à gaz.....	41
C. Principe de fonctionnement	41
2. Chaudière de récupération	42
A. Les principaux composants du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)	43
B. Les trois configurations principales de HRSG dans les centrales à cycle combiné ..	44
3. Turbine à vapeur	46
D. Principe d'une turbine à vapeur.....	47
E. Les principaux composants des turbines à vapeur.....	47
F. Fonctionnement de la turbine à vapeur.....	48
G. Le cycle de Rankine	49
4. Aubage et grilles d'aubes	51
A. Grille d'aubes	51
B. Aubage.....	51
C. Profils d'aubes	52
CHAPITRE IV : Formulation mathématique et résolution par fluent.	53
I. Introduction	54
II. Formulation mathématique	54
III. La simulation numérique	55
IV. Modélisation de la turbulence.....	55
V. Résolution par fluent.....	56
VI. Géométrie.....	58
1. Premier cas (angle 0°).....	58
2. Deuxième cas (angle 10°).....	59
3. Troisième cas (angle 20°).....	59
VII. Maillage.....	60
VIII. Choix des types de frontières	64
IX. Les conditions limites	64
I. Choix des schémas de discrétisation.....	65
II. Sous relaxation	65
CHAPITRE V : Résultat et discussion.....	66
I. Validation (Premier cas : angle 0°).....	67
II. Test de maillage (Deuxième cas : angle 10°)	72
1. Premier test de maillage	72

2.	Deuxième test de maillage.....	73
3.	Troisième test de maillage.....	74
III.	Résultat et discussion.....	75
1.	Champ de vitesse.....	75
2.	Champ de pression.....	76
3.	Coefficient de frottement.....	77
4.	Énergie cinétique turbulente :.....	78
IV.	Troisième cas angle 20°.....	79
1.	Comparaison entre le deuxième cas (angle 10°) le troisième cas (angle 20°).....	80
A.	Champ de vitesse.....	80
B.	Champ de pression.....	81
C.	Coefficient de frottement.....	82
D.	Énergie cinétique turbulente.....	84

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE

Nomenclature

U_i	Composante de la vitesse moyenne suivant la direction i (m/s)
x_i	Coordonnées
$C_{1\varepsilon}; C_{2\varepsilon}; C_\mu; C_s$	Constantes
k	Énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)
δ_{ij}	Tenseur de déformation
G_k	Terme de production de l'énergie cinétique turbulente (kg/ms)
U'_i	Vitesse fluctuante
U_j	Composante de la vitesse moyenne suivant la direction j (m/s)

Notations grecques

ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^3)
μ	Viscosité dynamique (kg/ms)
μ_t	Viscosité dynamique turbulente (kg/ms)
$\sigma_k; \sigma_\varepsilon$	Nombres de Prandtl turbulent associés à k et ε respectivement
ρ	Masse volumique (kg/m^3)
ν_t	Viscosité cinématique turbulente (m^2/s)
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)

Indices

i	indice de direction suivant l'axe x
j	indice de direction suivant l'axe y
t	Total

Tableau de figure

Nr. figure	Nom figure	Page
Figure II -1	Plan de masse de la centrale	22
Figure II -2	Vu en 2D montrant la situation de la centrale	22
Figure II -3	Turbine à gaz	26
Figure II -4	L'ensemble turbine à vapeur	27
Figure II -5	Chaudière de récupération de Ras Djenat 2	28
Figure II -6	Constitution générale d'un condenseur.	32
Figure II -7	Le principe de fonctionnement d'un système de pompe à chaleur avec éjecteur	33
Figure III -1	Vue générale turbine à gaz- générateur-turbine à vapeur	39
Figure III -2	Turbine à gaz	40
Figure III -3	Les éléments de la turbine	40
Figure III -4	Coupe longitudinale de turbine à gaz	41
Figure III -5	Chaudière de récupération de Ras Djenat 2	42
Figure III -6	HRSG sans combustion supplémentaire (convection naturelle)	44

Figure III -7	HRSO avec combustion supplémentaire limitée	45
Figure III -8	HRSO avec combustion supplémentaire maximale.	46
Figure III -9	L'ensemble turbine à vapeur	47
Figure III -10	Cycle de Rankine.	49
Figure III -11	Diagramme T-S pour cycle de Rankine	50
Figure III -12	Aubage de turbine à vapeur	51
Figure III -13	Exemples de profils d'aube	52
Figure IV -1	Géométrie d'une aube (angle 0°)	58
Figure IV -2	Géométrie d'une aube (angle 10°)	59
Figure IV -3	Géométrie d'une aube (angle 20°)	59
Figure IV -4	Maillage de Premier cas angle 0°	61
Figure IV -5	Maillage de deuxième cas angle 10°	62
Figure IV -6	Maillage de troisième cas angle 20°	63
Figure V -1	Contours de la grandeur de vitesse (m/s) angle 0°	67
Figure V -2	Vecteurs de la grandeur de vitesse (m/s) angle 0°	68
Figure V -3	Contours de pression (Pa) angle 0°	69
Figure V -4	Profil du coefficient de frottement angle 0°	70
Figure V -5	Contours de l'énergie cinétique turbulente (m ² /s ²) angle 0°	71
Figure V -6	Variation de pression autour d'une aube	72

	(premier test de maillage) Angle 10°	
Figure V -7	Variation de pression autour d'une aube [deuxième test de maillage] Angle 10°	73
Figure V -8	Variation de pression autour d'une aube [troisième test de maillage] Angle 10°	74
Figure V -9	Contours de la grandeur vitesse (m/s) Angle 10°	75
Figure V -10	Contours de pression statique Angle 10°	76
Figure V -11	Coefficient de frottement autour d'aube Angle 10°	77
Figure V -12	Coefficient de frottement autour de paroi Angle 10°	78
Figure V -13	Contours de l'énergie cinétique turbulente (m ² /s ²). Angle 10°	79
Figure V -14	Contours de la grandeur vitesse (m/s) angle 20° et 10°	80
Figure V -15	Contours de pression (pascal) angle 20° et 10°	81
Figure V -16	Coefficient de frottement autour d'aube angle 20° et 10°	82
Figure V -17	Coefficient de frottement autour de paroi angle 20° et 10°	83
Figure V -18	Coefficient de frottement autour de paroi angle 20° et 10°	84

ملخص

يتركز بحثنا على التدفق المضطرب من خلال شفرة محرك توربيني من نوع NACA 23012 في ثلاث حالات مختلفة .

في الفصلين الاولين ركزنا اهتمامنا على محطة توليد الكهرباء في CAP TDJN 2. وتحدثنا ايضا عن

وضع التشغيل و العناصر الاساسية للدورة المركبة لهذه المحطة الذي سمح لنا بتعميق معرفتنا و التركيز على الشفرات . كما قمنا بإجراء محاكاة رقمية على شفرة من نوع NACA 23012 حيث اتخذنا زوايا مختلفة (0° ، 10° ، 20°) .

في الحالة الاولى , قمنا بالتحقق من صحة الزاوية 0° وفي الحالة الثانية قمنا باختبار الشبكة الاقرب الى الحل للزاوية 10° مع مناقشة النتائج (مجال السرعة , مجال الضغط , الطاقة الحركية للاضطراب

وقوة الاحتكاك حول الفصل و الجدار).

في الحالة الثالثة , قمنا بإجراء مقارنة بين الزاوية 10° و الزاوية 20° لمعرفة الاختلافات التي تختبرها شفرتنا في التوربين.

RESUME

Notre travail d'études porte sur l'étude d'un écoulement turbulent à travers une aube de type NACA 23012 en 2D de turbomachine dans trois cas différents.

Dans les deux premiers chapitre, on a porté notre attention sur la centrale électrique de Cap Djenat 2 dans laquelle on a été pris pour un stage de fin d'étude, on a aussi parlé sur le mode de fonctionnement et les éléments essentielle du cycle combiné de cette centrale qui nous a permis d'approfondir nos connaissances et de se focaliser sur les aubes.

On a effectué une simulation numérique sur une aube du modèle NACA 23012 ou on a pris différent angle (0°, 10°, 20°)

Dans le premier cas, une validation pour l'angle 0° et dans le deuxième cas, un test de maillage dans lequel on a choisi le maillage le plus proche de la solution pour l'angle 10° avec une discussion des résultats (champ de vitesse, champ de pression, l'énergie cinétique de turbulence et la force de frottement autour de l'aube et la paroi).

Dans le troisième cas, une comparaison entre l'angle 10° et l'angle 20° pour voir les différences que subit notre aube dans la turbine.

On notera l'importance de simulation et de conception en l'étude des turbomachines et la compréhension de leur fonctionnement optimal.

Mots clés : Aube , turbulence , turbo machine, angle .

Abstract

Our work of studies relates to the study of a turbulent flow through a blade of type NACA 23012 in 2D of turbo machine in three different cases.

In the first two chapters, we focused our attention on the power plant of Cap Djenat 2 in which we were taken for an internship at the end of study, we also talked about the mode of operation and the essential elements of the combined cycle of this plant which allowed us to deepen our knowledge and focus on the blades.

A numerical simulation was carried out on a blade of the NACA 23012 model where different angles were taken (0° , 10° , 20°)

In the first case, a validation for the 0° angle and in the second case, a mesh test in which we chose the mesh closest to the solution for the 10° angle with a discussion of the results (velocity field, pressure field, kinetic energy of turbulence and the friction force around the blade and the wall)

In the third case, a comparison between the 10° angle and the 20° angle to see the differences that our blade undergoes in the turbine.

We note the importance of simulation and design in the study of turbo machinery and understanding their optimal operation.

Introduction Générale

Tout processus énergétique consiste à organiser des transferts de travail et de chaleur et à les réaliser dans des appareils appropriés. Dans les machines volumétriques, qui sont l'objet de différents articles de ce traité, cet échange d'énergie a lieu par déformations de capacités à l'intérieur desquelles le fluide est provisoirement prisonnier.

Les turbomachines présentent de nos jours une diversité et une richesse de conception notables, et peuvent être suivies selon leurs modes de fonctionnement, géométrie, mode de transformation d'énergie et fluide de circulation, les turbomachines à fluide compressibles (Ventilateurs, soufflantes et compresseur à fluides compressibles, ainsi que les turbines et les moteurs) et les turbomachines à fluide incompressibles (Les pompes, les turbines à fluide incompressible) qui manipulent des débits de fluide plus grands que les machines volumétriques, jouent dans ces conversions d'énergie un rôle important d'échangeur de travail entre le fluide et un organe mécanique dont la partie en mouvement est constituée d'un rotor muni d'ailettes.

Toutes ces machines impliquent l'utilisation de fluides pour générer de l'énergie. Il y a un point commun entre eux : les éléments rotoriques appelés "aubes" sont placés dans le carter du stator, ce qui crée des obstacles au passage du fluide dans le volume bien défini des sections d'entrée et de sortie.

La configuration de ces machines implique des géométries complexes, des interactions fluide-composant, des vibrations, de l'usure, de la fatigue et des instabilités d'écoulement. De nombreux paramètres doivent être pris en compte lors de la conception de ces machines. Il est plus évident de porter une attention particulière aux aubes de turbine, aux contraintes qu'elles supportent et à leur conception, qui sont les facteurs qui affectent les performances de ces machines.

Le présent travail est réparti en cinq (05) chapitres :

- Chapitre I : Étude bibliographique.
- Chapitre II : Description de la centrale électrique de cap Djanet 2.
- Chapitre III: Les composants du cycle combiné.
- Chapitre IV : Formulation mathématique et résolution par Fluent.
- Chapitre V : Résultats et Discussions.

CHAPITRE I : Étude Bibliographique

Étude bibliographique

Introduction

La recherche est directement liée au développement de la technologie; c'est la force motrice. Les chercheurs ont fait des progrès dans des cas très complexes et localisés, qui peuvent être utilisés des outils informatiques très puissants et les méthodes expérimentales les plus avancées. Et le plus efficace.

- **Steve Deutsch and William C. Zierke (1995) [9]** : Ont étudié numériquement l'écoulement bidimensionnel à température constante Cascade autour des aubes du compresseur avec des angles d'incidence variables ($5,0^\circ$; $1,5^\circ$ et $-8,5^\circ$). Ils ont constaté que l'angle d'incidence détermine la position du point d'incidence La stagnation de la pale (rotation interne ou externe) et le gradient de pression en surface. Elle est initialement favorable, conduisant à la zone de couche limite laminaire Longitudinal ; un peu plus en aval, le gradient de pression longitudinal est défavorable, Provoque la séparation ou le déclenchement de la couche limite laminaire Transition vers un régime turbulent. Ils ont également constaté que sur la surface opposée Le gradient de pression est défavorable et important, donc une petite zone est créée Recirculation sous forme de "bulles", conduisant à Turbulence.
- **H. G. Lee, J. Y. Yoo (1997) [11]** : Simulation numérique en trois dimensions Flux incompressible turbulent à travers une cascade linéaire Des pales de rotor de turbine avec des angles de braquage élevés ont été Exécuté à l'aide du modèle k- ϵ généralisé, qui est un Forme du nombre de Reynolds et dérivée par la méthode RNG (groupe de renormalisation) pour expliquer les changements de taux Souche. Le terme de convection est similaire à l'utilisation Schéma amont de second ordre pour supprimer les valeurs numériques la diffusion
- **José Ercolino [31]** : Il a effectué une Modélisation des modèles nominaux et partiels du flux méridien Dans les turbines centrifuges axiales et hélicoïdales.
- **Karima HEGUEHOUG ep BENKARA-MOSTEFA, Zoubir NEMOUCHI, Farid GACI [32]** : Ont étudié l'écoulement turbulent, statique, tridimensionnel, incompressible et sans transfert de chaleur autour d'un contour 3D isolé, et une roue fixe semblable à une turbine est formée d'une série de 60 aubes. Le

code de calcul FLUENT est utilisé pour simuler l'aérodynamique des deux configurations. Dans le cas de l'isolement du profil 3D, compte tenu de la finalité de la vérification du code, un tube de Pitot statique a été utilisé pour réaliser une étude expérimentale sur le champ de vitesse et de pression. On constate que l'accord entre la valeur numérique et le résultat expérimental est satisfaisant. Pour la roue, les recherches portent sur l'écoulement autour d'une seule aube dans des conditions périodiques données, et l'influence de l'intensité de la turbulence à l'entrée sur les paramètres de turbulence dans le champ. Explorer le champ de vitesse, le champ de pression et le champ d'énergie cinétique turbulente dans le domaine, ainsi que l'évolution du coefficient de frottement le long de la paroi.

- **L. Hilgenfeld, P. Stadtmuller, L. Fottner (2002) [33]** : Ont contribué à l'étude de l'effet du sillage et le développement de la couche limite au passage de l'écoulement à travers une cascade d'aubes par une expérience réalisée sur une turbine.
- **BEDJEGHIT EL-HOUAS [34]** : Ont étudié numériquement les phénomènes de l'écoulement laminaire stationnaire et instationnaire bidimensionnel, turbulent stationnaire et tridimensionnel du fluide incompressible et sans transfert de chaleur autour d'un obstacle. Dans le cas bidimensionnel, une simulation numérique a été faite à l'aide du code de calcul FLUENT. Pour comparer les différents champs de vitesse, et de pression ainsi le phénomène de van-karman entre l'écoulement autour d'obstacles carrée et cylindrique.
- **Dorney, D. J.; Davis, R. L. 1992 [35]**: Ils ont fait une analyse Navier-Stokes tridimensionnelle du transfert de chaleur et des performances aérodynamiques des cascades de turbines linéaires à basse vitesse. Les techniques utilisées dans cette analyse incluent la technique de fonctionnement en temps alterné implicite et la décomposition approximative de l'un des objectifs de cette recherche. La recherche consiste à établir la densité de grille de calcul nécessaire pour prédire avec précision le transfert de chaleur entre la surface de la pale et la pointe de la pale. La perte de pression aérodynamique totale et la distribution de l'angle d'écoulement sur la surface de la pale et la surface de la paroi d'extrémité, ainsi que le plan de sortie total. De plus, une étude a été menée pour déterminer l'importance de la conversion de la modélisation et des stratégies de mise en œuvre réalisables pour les modèles 3D.

Turbulence 3D modèles dans les canaux d'aubes de turbine Stratégie de mise en œuvre réalisable.

- **Hah, C. 1984 [37]** : Il a fait Un schéma numérique supportant l'équation compressible de Navier-Stokes a été développé pour les écoulements turbulents tridimensionnels à l'intérieur des rangées d'aubes de turbine. Le schéma numérique est basé sur une formulation de volume de contrôle totalement conservative et résout les équations gouvernantes sous une forme entièrement elliptique. Des discrétisations d'ordre supérieur sont utilisées pour le terme de convection afin de réduire la diffusion numérique. Un modèle algébrique de contrainte de Reynolds modifié pour les conséquences de la courbure de la ligne de courant et donc de la rotation est employé pour la fermeture des équations gouvernantes. Des transformations de coordonnées générales sont utilisées pour représenter avec précision la géométrie complexe des pales, et une technique de génération de grille supportant les équations différentielles partielles elliptiques est utilisée. Les comparaisons avec les données expérimentales montrent que divers phénomènes d'écoulement visqueux tridimensionnels complexes (séparation tridimensionnelle de l'écoulement près du bord d'attaque, formation du tourbillon en fer à cheval, etc.) sont bien prédits par la présente méthode.
- **TOUIL Amel et BENLAZAR Fatima [38]** : On fait l'étude numérique d'un écoulement autour d'une aube de la turbine à gaz et voir le comportement dynamique et thermique sur la variation de l'angle d'incidence. Cette étude a été réalisée avec le solveur ANSYS-Fluent qui résout les Stocks des équations de Navier par la méthode des volumes finis Les simulations numériques 2D stationnaires qui nous intéressaient principalement la fin de la pression et la température aussi la vitesse au tour de l'aube dans le mur sous différents angles, la simulation nous a également permis de mettre en évidence le phénomène de décollement de la couche limite, la prédiction de l'angle de décrochage critique.
- **DJOUIMAA Sihem (2007) [39]**: Son étude est de simuler l'écoulement du fluide transsonique compressible entre deux aubes similaires à ceux d'une turbine à gaz. elle s'est principalement intéressée à la détermination de la répartition des pressions autour de l'aube et à l'étude de la couche limite, L'architecture particulière de l'aube complexifie les simulations du fait de la variété des phénomènes induits par cet écoulement.

- **SAMI BOUTERRA (2016/2017) [40]** : On tentait par la simulation d'une étude statique de deux modèles d'aubes de turbine à vapeur, haute pression et basse pression dessinés au préalable sous le logiciel SolidWorks en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) de déterminer les zones de concentration de contraintes et les déformations que subissent les aubes sous la charge de la force centrifuge appliquée.
- **Mansouri M. Belghar N [41]** : Ils ont utilisé le logiciel Fluent pour simuler les effets aérodynamiques et thermiques sur aubes d'une turbine a gaz. Ils se sont d'abord intéresser à la recherche théorique de cette technologie de refroidissement par couche mince pour les plaques planes, puis nous effectuons des simulations numériques via Fluent, en utilisant le modèle de turbulence k-ε standard pour simuler la turbulence, et nous sommes plus intéressés à essayer d'explorer l'influence de température à l'aube , L'aspect thermique de ce flux.
- **LAZHAR BOUCHAOUR [6]** : on fait l'étude d'un écoulement incompressible autour d'un profil tournant.

**CHAPITRE II : Description
de la centrale électrique de
Cap Djenat 2**

I. Introduction

La centrale électrique à cycle combiné de RAS-DJENAT est située au bord de la mer à proximité à Ras Djenat, Wilaya de Boumerdès, Algérie (3km au sud-ouest) de la commune de Cap Djenat et 77km à l'Est d'Alger, sa superficie est de près de 18 hectares du centre-ville de Boumerdès.

Cette centrale a été réalisée entre le Octobre 2012 – Février 2016 a été confiée au groupe sud-coréen DAEWOO pour un montant 73,4 milliards de DA (près d'un milliard de dollars a-t-on appris auprès de la Société algérienne de production d'électricité (SPE), filiale de Sonelgaz; ils sont ainsi chargé, dans un délai de 40 mois, la responsabilités de la conception, l'ingénierie, la fabrication des matériels, l'acquisition des équipements et matériaux, la supervision des travaux de génie civil, les travaux de montage, l'installation, les essais, la mise en service des groupes, les garanties et la formation du personnel du client.

Le projet de cette centrale s'inscrit, en effet, dans le cadre du programme approuvé récemment par les pouvoirs publics et visant à produire 12.000 MW supplémentaires d'électricité à l'horizon 2016. Qui permettra, une fois achevé, de doubler la production nationale d'électricité pour répondre à une demande qui ne cesse de croître d'année en année et qui a atteint 14,5% en 2012 contre 14% l'année précédente. [1]

II. Présentation de la centrale électrique de Cap Djenat 2

La centrale de RAS DJENAT se compose principalement de trois (3) modules de centrale électrique à cycle combiné à arbre-simple (30% vapeur et 70% gaz), ainsi que les systèmes qui supportent l'équilibre de la centrale. Chaque module a une turbine à gaz (modèle : SIEMENS SGT5-4000F), d'une chaudière de récupération associé, d'une turbine à vapeur (Modèle : SIEMENS SST5-3000 H-IL) et d'un générateur commun refroidi par hydrogène (Modèle : SIEMENS SGEN 5-2000 H) situé sur le même arbre entre la turbine à gaz (GT) et la turbine à vapeur (ST).

L'infrastructure est, par ailleurs, équipée de nombreux systèmes "amis de l'environnement", dont particulièrement celui du dessalement de l'eau de mer exploitée dans la production de la vapeur, et la production d'hydrogène exploité dans le refroidissement des générateurs électriques.

La première turbine est entrée en production en mai 2018, la 2^{ème} au mois d'octobre 2018 et la 3^{ème} mi 2019.

La puissance nette délivrée au réseau national est de 1131.1 MW.

III. Les différents paramètres de fonctionnement aux conditions de référence et a 100% de charge

Description	Unités	Avec allumage au gaz naturel	Avec allumage à l 'huile
Puissance de sortie nette de chaque bloc	mW	377	311,3
Taux de chaleur net de la centrale	KJ/Kwh	6165	6599
Puissance de sortie de la turbine à gaz	mW	249,2	210,5
Puissance de sortie de la turbine à vapeur	mW	127,8	100,8
Consommation de combustible	kg/s	14,3	13,24
Température du gaz d'échappement	°C	607,6	557,4
Débit du gaz d'échappement	kg/s	616,2	610,9
Pression de sortie du surchauffeur HP	Bar (a)	120,81	101,81
Température de sortie du surchauffeur HP	°C	566,50	530,10
Pression d'entrée de la turbine à vapeur HP	Bar (a)	117,92	99,39
Température d'entrée de la turbine à vapeur HP	°C	565,02	528,27
Débit de la vapeur HP	kg/s	71,99	61,66
Pression de sortie du réchauffeur	Bar (a)	29,91	25,91
Température de sortie du réchauffeur	°C	565,70	526,20
Pression d'entrée de la turbine à vapeur PI	Bar (a)	29,10	25,20
Température de sortie de la turbine à vapeur PI	°C	564,94	524,99
Débit de la vapeur PI	kg/s	71,99	76,02
Pression de sortie du surchauffeur PI	Bar (a)	31,31	27,11
Température de sortie du surchauffeur PI	°C	337,50	324,30
Pression de sortie du surchauffeur BP	Bar (a)	4,51	4,21
Température de sortie du surchauffeur BP	°C	232,60	237,70
Flux de vapeur de sortie de surchauffeur BP	kg/s	10,14	2,58
Flux d'échappement de turbine BP	kg/s	98,25	80,31
Température d'échappement de turbine BP	°C	33,35	31,56
Débit de la vapeur HP	kg/s	71,99	61,66
Pression de sortie du réchauffeur	Bar (a)	29,91	25,91
Température de sortie du réchauffeur	°C	565,70	526,20
Pression d'entrée de la turbine à vapeur PI	Bar (a)	29,10	25,20
Température de sortie de la turbine à vapeur PI	°C	564,94	524,99
Débit de la vapeur PI	kg/s	71,99	76,02
Pression de sortie du surchauffeur PI	Bar (a)	31,31	27,11
Température de sortie du surchauffeur PI	°C	337,50	324,30
Pression de sortie du surchauffeur BP	Bar (a)	4,51	4,21
Température de sortie du surchauffeur BP	°C	232,60	237,70
Flux de vapeur de sortie de surchauffeur BP	kg/s	10,14	2,58
Flux d'échappement de turbine BP	kg/s	98,25	80,31
Température d'échappement de turbine BP	°C	33,35	31,56

[1]

IV. Plan de masse

Il est présenté dans la figure ci-après :



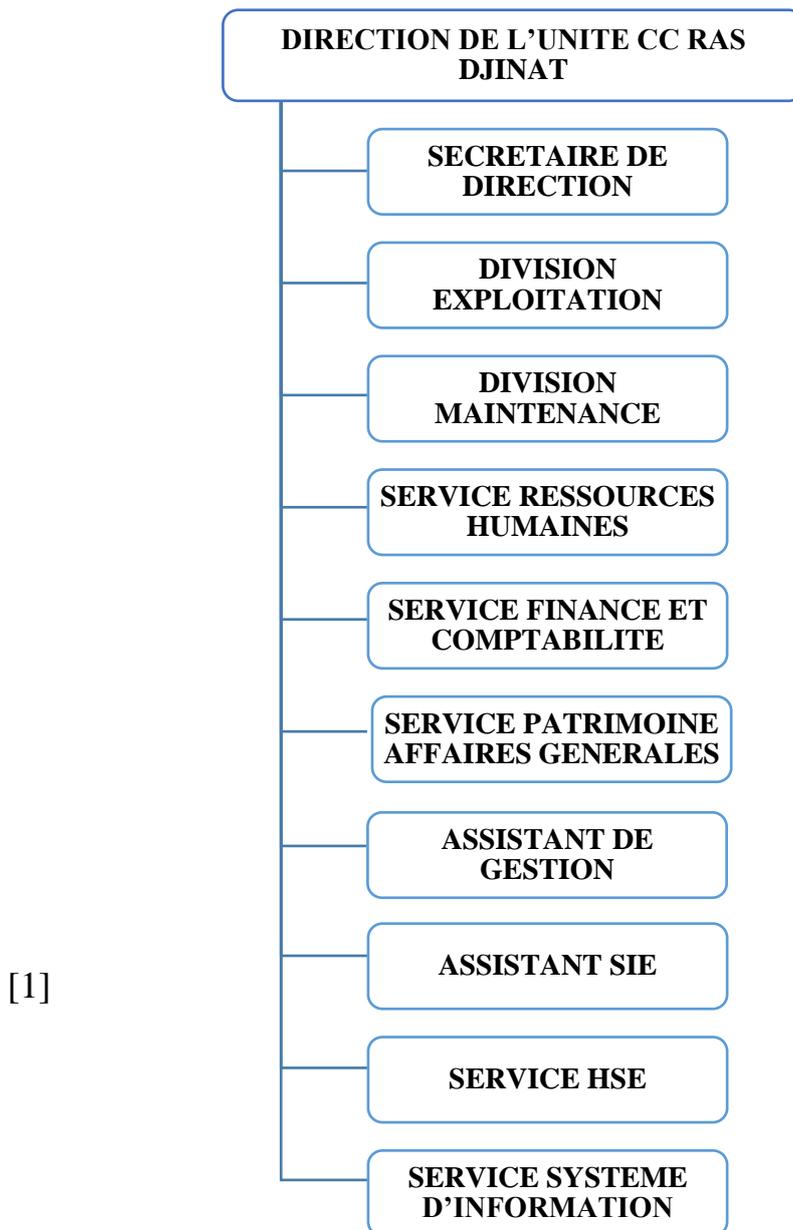
Figure II -1 : Plan de masse de la centrale [1]

V. Plan de situation de la centrale



Figure II -2 : Vu en 2D montrant la situation de la centrale [1]

VI. Organigramme de la centrale



VII. Caractéristiques techniques de la centrale

1. Combustibles

La centrale utilise deux combustibles :

- Le gaz naturel comme combustible principale, acheminé par gazoduc de Hassi R'mel Avec un débit de 160 000 Nm³/h pour assurer la pleine charge des 3 groupes.
- Le fuel léger, utilisé en cas de secours L'approvisionnement est assuré par la société NAFTAL est stocké dans deux réservoirs de 10000m³ [24]

2. Évacuation de l'énergie

L'énergie électrique produite par chaque tranche est évacuée par l'intermédiaire de lignes 225 KV sur le poste haute tension Boudouaou. [24]

3. Eau de réfrigération principale (eau de mer)

Pour condenser la vapeur, il faut la refroidir et abaisser sa pression. Ces deux opérations s'effectuent dans le condenseur. Le refroidissement est assuré par l'eau froide (eau de mer) circulant dans un circuit indépendant du circuit eau-vapeur.

La prise d'eau de réfrigération se situe en mer à 900m de la station de pompage et de filtration. L'eau arrive par trois (03) conduites d'amenée d'eau de mer, en béton de diamètre intérieure / extérieure (2,70m / 3,00m). [24]

Constitution de la station de pompage

- Une grille à grappin, pour éliminer les gros déchets.
- Un tambour filtrant, à mailles fines, pour éliminer les petits déchets.
- Deux (02) pompes de circulation d'eau de mer de 12 000 m³/h chacune, qui refoulent l'eau de mer jusqu'au condenseur. Après la traversée du condenseur, l'eau de réfrigération est rejetée vers le canal de rejet qui aboutit à la mer. [24]

4. Eau de réfrigération secondaire (deminéralisée)

C'est l'eau déminéralisée stockée dans une bache de 5m³ circulant en circuit fermé.

Elle sert au refroidissement de certains organes tel que (huile de graissage pompe alimentaire, huile de graissage turbine, huile de graissage compresseur d'air, huile de graissage réchauffeur rotatif, etc.... [24]

5. Station de dessalement de l'eau de mer

La centrale a quatre unités de dessalement produisant 500m³/j chacune, assurent la production en eau dessalée, stockée dans deux (02) baches (2 x 2700 m³).

Trois produits chimiques sont injectés pour le traitement de l'eau qui sont les suivants :

- Le belgard EVN : Inhibiteur d'incrustation utilisé pour éviter l'entartrage.

- La belite (M33) : Produit anti-mousse utilisé pour éviter la formation de la mousse au niveau des évaporateurs.
- Le bissulfite de sodium (Na_2SO_3), produit permettant l'élimination du chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

Pour une production de 20m d'eau dessalée, on consomme 240m d'eau de mer. [24]

6. Station de déminéralisation

Deux chaînes de déminéralisation de 40 m /h chacune, para chevent le traitement de l'eau de mer avant son utilisation dans le cycle eau-vapeur. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500m chacun. [24]

7. Station d'électrochloration

La chloration de l'eau de mer permet de préserver les équipements traversés par l'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé

Par les micro-organismes marins. Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium.

L'installation est prévue pour produire 2x150kg/h de chlore avec deux unités. En condition de chloration continue, 104000m /h d'eau de circulation sont continuellement chlorés. [24]

8. Salles de commande centralisées

Elle assure le contrôle et la commande de trois tranches présentes sur le site.

9. Unité de gaz naturel et les principaux composants

Le gaz naturel est reçu des conduites de gaz de Hassi Rmel par la société SONATRACH

Le système d'alimentation et de conditionnement de gaz combustible (gaz naturel) fournit du gaz naturel à un certain niveau de propreté, de pression et de température pour répondre aux critères de fonctionnement et de conception du principal utilisateur de gaz naturel (Turbine à gaz). Ce processus est nécessaire pour s'assurer que les aérosols, la condensation d'eau libre et les particules solides ne seront pas présents dans les systèmes de transmission ou de distribution de gaz aux principaux utilisateurs.

Les composants de l'unité :

- Vanne d'arrêt d'urgence (00EKG10AA061)
- Skid de comptage gaz combustible (00EKG40CF501)
- Filtres d'entrée gaz combustible (00EKG21 / 22AT001)
- Compresseurs gaz combustible (00EKH11 / 12 / 13AN001)
- Chauffage gaz point de rosée (00EKC11 / 12AC001)
- Station de réduction de pression (00EKD11/12/13/14AA001)
- Chauffage gaz combustible (50EKC10AC001 / 002)
- Filtre sortie (50EKE21AT001) [1]

VIII. Les différents composants d'une tranche de production

1. Turbine à gaz

Les Turbine à gaz font partie des turbomachines définies par Râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent. Une Turbine à gaz appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fioul, gaz...) [2]

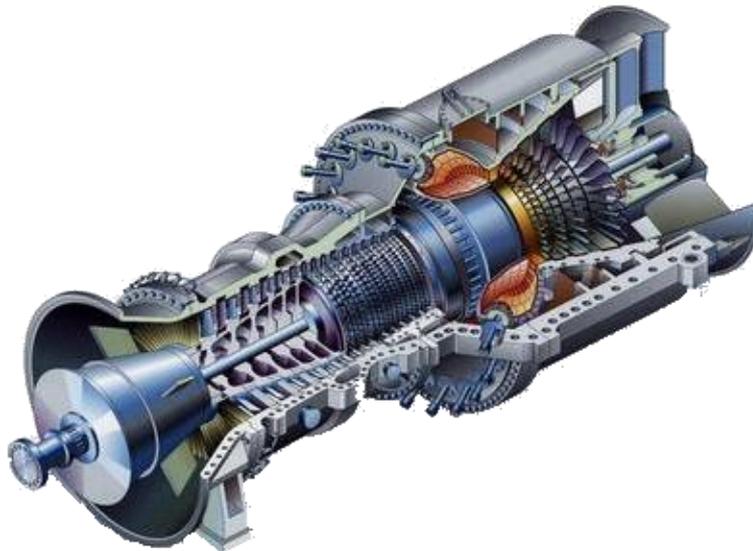


Figure II -3 : Turbine à gaz. [3]

2. Turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers la chaudière,
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée,
- La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique,
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel [4]



Figure II -4: L'ensemble turbine à vapeur [12]

3. Chaudière (HRSG)

La chaudière de récupération ou HRSG (Heath Recovery Steam Generator) est le lien entre la turbine à gaz et le processus de turbine à vapeur. La fonction de HRSG est de convertir l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement de turbine à gaz en vapeur.

La chaudière de récupération peut être construite suivant deux configurations de base, basées sur la direction (horizontale ou verticale) des gaz d'échappement de la turbine à gaz à travers la chaudière. Dans une chaudière de récupération du type tour ou horizontale le transfert de chaleur se fait dans un ensemble d'échangeurs.[1]



Figure II -5 : Chaudière de récupération de Ras Djenat 2

7.1.1. Les chaudières dans un cycle combiné

Dans un cycle combiné, les chaudières de récupérations doivent être conçues de manière à satisfaire à plusieurs objectifs :

- Réduire les irréversibilités de transfert de chaleur,
- Accroître l'efficacité du transfert de chaleur,
- minimiser la perte par enthalpie restante des fumées rejetées à la cheminée,
- Permettre le réglage de la température de sortie de la vapeur surchauffée à l'entrée de la turbine à vapeur,
- Pouvoir être rapidement démarrée pour ne pas perturber le cycle combiné,
- Présenter une perte de charge limitée côté fumée pour limiter la contre-pression à l'échappement de la turbine à gaz, ce qui en réduirait le rendement. Afin de rencontrer ces objectifs, certaines méthodes sont systématiquement utilisées :
- Déterminer les niveaux de pression et organiser la circulation générale de façon à minimiser la différence de température entre les fumées et l'eau/vapeur à réchauffer, Adopter pour chaque échangeur la circulation à contre-courant, Utiliser un réchauffeur d'air lorsque le cycle le permet (pas de TG). [1]

4. Chaudière auxiliaire

La fonction de la chaudière auxiliaire est de fournir le besoin en vapeur auxiliaire pendant la mise en marche de l'installation. En outre les chaudières doivent également fournir de la

vapeur à l'usine de dessalement. Il y a deux (2) type 2 tambours, à circulation naturelle, à fond de tube à eau supporté et à chaudière auxiliaire au fioul / gaz naturel sont envisagés.

La capacité de vapeur de chaque chaudière est de 8 tonnes / heure à 20,5 bar (g). [1]

5. Pompe d'alimentation de chaudière

L'eau d'alimentation est prise de la bêche alimentaire par des pompes d'alimentation, et refoulée vers la chaudière en passant par des réchauffeurs HP.

Ces pompes sont composées de deux types :

- Pompes nourricières : Ce sont des pompes auxiliaires de type centrifuge à un étage, elles servent à augmenter la pression de l'eau d'alimentation de 4.9 bars à 11 bars avec un débit de 261.6 t/h.
- Pompes principales : Ce sont des pompes centrifuges radiales à 6 étages. Elles sont placées en aval des pompes nourricières, elles augmentent la pression de l'eau de 11 bars jusqu'à 177 bars. Il y a trois pompes nourricières et trois pompes principales dans chaque groupe. Chaque groupe de pompes d'eau d'alimentation est commandé par un moteur commun d'une tension de 6.3KV et une puissance de 300KW.[6]

6. Cheminée principale

La chaudière génère des fumées qui nécessitent d'être évacuées. Ces fumées peuvent être évacuées via la cheminée principale [7]

7. Système de traitements des eaux

7.1.2. Système d'eau de dessalement

Les unités de dessalement de RAS DJINET sont conçues pour un rendement de distillat net de 1100 m³/jour chacune à l'exception du débit de retour du condensat de vapeur, contenant 10 ppm de TDS, avec une température d'eau de mer variant de 16 °C à 24 °C. Chaque unité est adaptée à l'exploitation à une température d'eau de mer max. de 28 °C, mais avec une capacité de distillat réduite (880 m³/jour). [1]

7.1.3. Système d'eau de déminéralisation

Le système de déminéralisation déminéralise l'eau à partir de l'eau dessalée, produite à l'usine de dessalement. Le système se compose principalement du système d'échangeur à lit mixte (MBE) et le système de stockage et d'injection de produits chimiques. L'eau dessalée contenant la petite quantité de minéraux dissous entre dans le MBE dans lequel les impuretés (comme les minéraux dissous) réagissent continuellement après la réaction

de soufflage des résines cationique et anionique du MBE, l'eau minérale produite est de très haute qualité. [1]

8. Système de traitement des eaux usées

Le système de traitement des eaux usées est une installation permettant de traiter les eaux usées provenant de diverses zones de la centrale électrique de RAS-DJINET. Cette installation est composée d'un traitement des eaux usées huileuses, d'un traitement (chimique) des eaux usées normales, d'un traitement des eaux usées anormales et d'un traitement biologique (traitement des eaux d'égout) et d'une installation de traitement des boues.

Le Centrale se compose des éléments suivants. Une brève description est communiquée dans les diapositives suivantes.

- Système de traitement des usées normales : Tous les drains des eaux usées anormales provenant du lavage de chaque étage du bâtiment, l'épurateur de fumée et eau de régénération à lit mélangé, du laboratoire, de la zone de dosage des produits chimiques, du réservoir de vidange propre, de l'eau de refroidissement à circuit fermé, du rejet de la pompe de refoulement de l'eau traitée, de l'épaississeur de boues, du puisard de la salle de pompage des eaux usées, de l'eau huileuse traitée et des drains provenant du réservoir de régulation de pH, du réservoir de réaction, du réservoir de coagulation et d'autres drains de réservoirs de dosage seront collectés dans le bassin des eaux usées anormales du système de traitement des eaux usées.
- Système de traitement des usées anormales : Les eaux usées de nettoyage chimique provenant du GVRC doivent être collectées et transférées vers le bassin d'eaux usées anormales du système de traitement des eaux usées. Les eaux usées anormales stockées dans le bassin d'eaux usées anormales seront transférées dans un bassin d'eaux usées normales par des pompes de transfert des eaux usées anormales et traitées avec des eaux usées normales.
Les eaux usées d'origine acide/alcaline parmi les eaux usées de nettoyage chimique de GVRC doivent être transférées et traitées par d'autres.
- Système de traitement des usées huileuses : L'eau contaminée par l'huile sera acheminée vers le bassin de rétention des eaux usées huileuses (Bâtiment des turbines à gaz et à vapeur, zone de stockage du gaz naturel, zone du bâtiment de l'atelier, zone du bâtiment de DG d'urgence et de démarrage à froid, zone des pompes d'eau d'alimentation). Les eaux usées huileuses doivent être transférées au

séparateur d'huile CPI à partir du bassin de rétention des eaux usées huileuses par les pompes de transfert des eaux usées huileuses. L'huile et les boues d'huile doivent être retirées dans le séparateur d'huile CPI.

- Système de traitement des eaux d'égout : Le système de traitement des eaux d'égout doit être conçu pour traiter les effluents provenant des zones de la centrale électrique. Système de traitement des eaux d'égout avec écran (s), clarification biologique avec traitement des boues activées, y compris le réservoir secondaire de nitrification et de dénitrification, la désinfection des effluents pour la récupération des effluents à rejeter dans la mer. [1]

9. Système de circulation d'eau de refroidissement

- **système d'eau en circulation**

Le système d'eau en circulation fournit de l'eau froide au condensateur de surface de vapeur pour absorber la chaleur du cycle et ensuite rejeter l'eau chaude dans la Mer à travers le système d'eau de refroidissement. Ce système fournit également de l'eau de mer froide aux échangeurs de chaleur de l'eau de refroidissement à circuit fermé via le système de canalisation d'eau de refroidissement auxiliaire pour absorber la chaleur des refroidisseurs auxiliaires, À l'usine de dessalement, À la centrale de chloration électrique et aux pompes de lave-glace du système d'admission de l'eau de mer. [1]

- **Système d'eau de refroidissement à circuit fermé**

Le système d'eau de refroidissement fermé fournit de l'eau DM froide, passivée (inhibée) à divers refroidisseurs d'équipement. L'eau froide DM circule à travers les refroidisseurs auxiliaires et l'eau chaude de retour est pompée à travers un échangeur de chaleur à eau de refroidissement fermé à plaques. L'eau de mer froide extraite du système de circulation d'eau est utilisée pour refroidir l'eau chaude DM dans l'échangeur de chaleur. Dans le circuit primaire, la pompe DXW 2X100% doit fournir de l'eau de refroidissement à travers des échangeurs de chaleur à plaques. [1]

- **Système d'eau de refroidissement auxiliaire**

Le système auxiliaire d'eau de refroidissement est prévu pour évacuer la chaleur du côté primaire des échangeurs de chaleur à plaques en fournissant de l'eau de mer froide prélevée du système de circulation d'eau aux échangeurs de chaleur du type à plaques. Un autre système auxiliaire d'eau de refroidissement fournit également de l'eau de mer pour le HRSG et la trempe de la chaudière auxiliaire (IBD). Le robinet est prélevé en aval du

filtre à débris individuel pour fournir PHE avec de l'eau sans débris. La sortie de PHE est connectée à la tuyauterie de décharge du condenseur. Deux (2) (2x100 %) échangeurs de chaleur à plaques (2x100%) sont fournis pour chaque module CCPP. [1]

10. Générateur a simple corps

Le générateur est l'un des éléments essentiels du circuit thermique car il assure le changement de phase de l'eau d'alimentation de l'état liquide à l'état vapeur surchauffée à haute pression en vue d'alimenter la turbine. [8]

11. Condenseur

Le condenseur utilisé dans l'installation est un échangeur à échange par surface. Il est placé sous la turbine à basse pression(LP). La vapeur se condense au contact des parois des tubes, dans les quelles passe l'eau de mer (source froide) qui évacue la chaleur résulte du changement d'état, les fonctions principales du condenseur sont :

- D'assurer la condensation de la vapeur évacuée par la turbine à basse pression (corps BP) et réintroduire le condensât dans le circuit eau-vapeur (post d'eau)
- D'augmenter la chute d'enthalpie dans la turbine en établissant une dépression afin d'obtenir un rendement aussi élevé que possible.
- De dégazer le condensât et d'évacuer les incondensables. Le condenseur est constitué de deux demi-condenseurs.

Dans le condenseur circule l'eau de mer. Cette conception permet de faire fonctionner un demi-condenseur et éventuellement entretenir le deuxième [24]

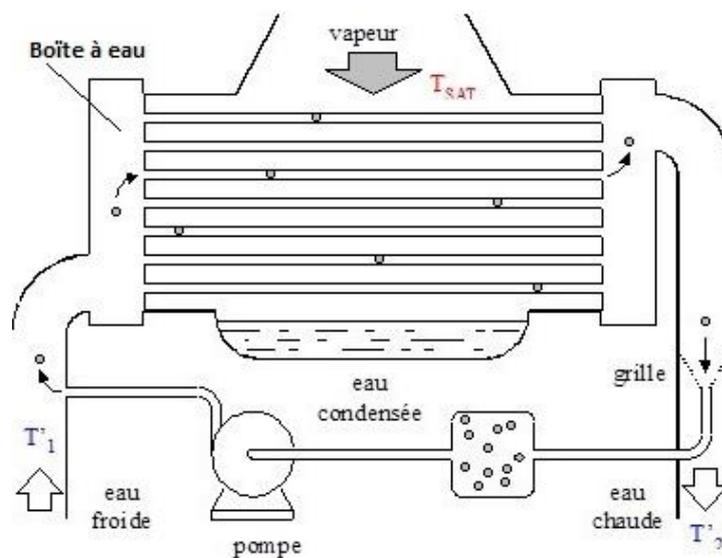


Figure II -6 : Les éléments d'un condenseur. [29]

12. Pompe d'extraction du condensat

Ce sont des pompes centrifuges à 4 étages, leurs rôles est d'assurer le transfert d'eau du puits du condensateur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les trois réchauffeurs BP avec un débit nominale de 415m³/h.

On trouve 2 pompes par groupe (l'une des pompes est réservée en cas de panne) avec une tension de 6.3KV et une puissance de 300KW. [1]

13.Éjecteur a jet de vapeur

Les éjecteurs sont des compresseurs statiques activés thermiquement qui comprennent une tuyère convergente divergente, laquelle est intégrée à un corps principal généralement cylindrique. L'effet de compression résulte de l'interaction entre les deux flux de fluide. Le flux moteur est à haute pression et est produit dans un générateur utilisant une source de chaleur. Cette source peut provenir d'une chaleur de basse énergie.

Les éjecteurs ont l'avantage de pouvoir être commandés par de la chaleur perdue et de servir de pompe à chaleur en effectuant les cycles appropriés pour produire des effets de valorisation de la chaleur (augmentation de température), de refroidissement ou de réfrigération, pourvu qu'une source thermique soit disponible. [1]

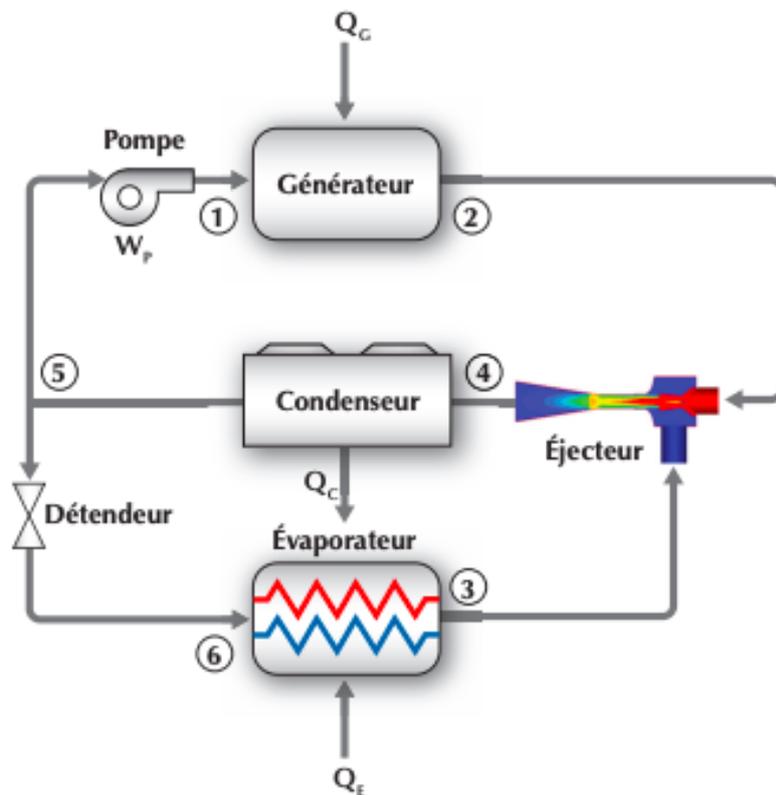


Figure II -7 : Le principe de fonctionnement d'un système de pompe à chaleur avec éjecteur. [30]

14. La bêche alimentaire

C'est un réservoir cylindrique qui reçoit de l'eau en provenance de la pompe d'extraction. Il reçoit également de la vapeur en provenance du soutirage S4 du corps MP de la turbine. Il joue donc simultanément le rôle d'un réchauffeur et conditionne la pression à l'aspiration de la pompe alimentaire. [24]

15. Les réchauffeurs haute pression

Ce sont deux échangeurs de chaleur, leur rôle est d'augmenter la température de l'eau lors de son transfert vers la chaudière, ils sont alimentés par les soutirages S5 du corps MP et S6 du corps HP de la turbine. [24]

16. Les réchauffeurs basse pression

Ce sont trois échangeurs de chaleur par surface. Leur rôle est de réchauffer le condensat lors de son transfert dans la bêche alimentaire, ils sont alimentés par les soutirages S1, S2, S3 du corps BP de la turbine. [24]

17. Alternateur

Il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Il est refroidi par l'hydrogène sous pression de 03 bars en circuit fermé. L'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction. [24]

IX. Principe de fonctionnement d'une tranche de production

La production d'électricité n'est qu'une résultante de différentes transformations successives de l'énergie chimique contenue dans le gaz naturel provenant des puits de Hassi R'mel. Cette énergie sera transformée en énergie thermique après la combustion. La chaleur engendrée par cette combustion va être cédée à l'eau qui circule dans les tubes vaporisateurs (écrans). Cette chaleur (énergie calorifique) sera véhiculée par l'eau et la vapeur jusqu'à la turbine où elle se transformera en énergie mécanique.

Le rotor de l'alternateur va donc être entraîné par ce mouvement de rotation engendré par la turbine cela produira une énergie électrique à la sortie des trois phases de l'alternateur. La

tension de sortie aux bornes de l'alternateur est de 15,5 KV et l'ampérage peut atteindre 8000A par phase.

La vapeur ayant traversée la turbine corps HP, MP, BP se retrouve en fin de parcours dans le condenseur situé en dessous du corps BP; cette vapeur va se répandre sur 14850 tubes en titane disposés transversalement dans le condenseur à l'intérieur desquels circule l'eau de mer qui va servir de source froide pour la condensation de la vapeur (voir figure 1). L'eau de refroidissement est refoulée vers le canal de rejet pour retourner à nouveau vers la mer.

Le condensat ainsi formé est récupéré dans le puits du condenseur d'où aspirent les deux pompes d'extraction. La pompe en service va refouler ce condensat dans le circuit basse pression et acheminera l'eau jusqu'à la bache alimentaire où elle subira un dégazage physique. Lors de son passage dans le circuit d'eau d'extraction, l'eau va être graduellement réchauffée en passant à travers le réfrigérant alternateur, le condenseur des buées, les éjecteurs de vapeur ainsi que le poste de réchauffage basse pression composé des réchauffeurs BP1, BP2, BP3. Cette eau atteindra alors une température d'environ 110 °C. Ensuite elle sera admise à la bache alimentaire à travers le dégazeur pour y subir un dans la bache alimentaire va être reprise par les pompes alimentaires pour alimenter la chaudière en passant à travers les réchauffeurs HP5, HP6 qui élèveront sa température à 240 °C avant son admission dans la chaudière.

L'eau d'alimentation passera à travers la soupape alimentaire (vanne de réglage niveau ballon chaudière) pour entrer dans la chaudière au niveau de l'économiseur qui va encore l'élever en température à environ 300 C avant son entrée dans le ballon chaudière. L'eau d'alimentation parvenue au ballon va occuper la partie inférieure et son niveau sera réglé à 50%. Cette eau va ensuite descendre par les colonnes d'alimentation pour rejoindre le collecteur inférieur qui alimentera les tubes vaporisateurs qui sont directement exposés aux flammes des 8 brûleurs. La vapeur produite dans ces tubes va s'élever vers le collecteur supérieur par différence de densité entre l'eau et la vapeur. Cette chaudière est dite chaudière à circulation naturelle. La vapeur saturée sortira du collecteur supérieur des tubes écrans- vaporisateurs pour être acheminé vers la partie supérieure du ballon chaudière. Ce dernier servira donc de réserve d'eau et de vapeur saturé pour l'alimentation des turbines en vapeur surchauffée HP. La pression de la vapeur réglée dans le ballon sera de 160 bars. Cette vapeur humide (contenant des gouttelettes d'eau) devra être sécher avant son admission dans la turbine corps HP. Elle

sortira donc du ballon et passera à travers les surchauffeurs pour être séchée et deviendra alors vapeur sèche. Cette vapeur sortira de la chaudière avec une pression 160 bars et une température de 540 °C. Elle se dirigera alors vers la turbine corps HP où elle subira une détente pour en ressortir sous forme de vapeur moyenne pression et de température avoisinant celle de la vapeur saturée. Pour cette raison elle sera réintroduite dans la chaudière pour passer à travers les resurchauffeurs. La vapeur resurchauffée ressortira de la chaudière avec une pression moyenne variant entre 20 et 30 bars et une température de 540°C . Cette vapeur resurchauffée se dirigera alors vers le corps MP de la turbine où elle subira une autre détente pour en ressortir avec une basse pression et une basse température et aller directement vers le corps BP de la turbine où elle sera soumise à sa dernière détente avant de se retrouver dans le condenseur du groupe. [24]

CHAPITRE III :
**Les composants de cycle
combiné**

I. Introduction

Actuellement, plus de la moitié des besoins mondiaux en énergie électrique sont couverts par des centrales thermiques à combustion fossile. Ces dernières doivent répondre à des enjeux économiques et environnementaux de plus en plus élevés et s'adapter aux nouveaux modes de fonctionnement des systèmes de production d'énergies.

Toutes ces conditions sont remplies par les installations à cycle combiné. Elles utilisent une technologie qui permet d'obtenir un rendement nettement supérieur à celui des centrales classiques à combustion fossile, et d'assurer ainsi une diminution considérable des émissions polluantes (CO₂ et les émissions primaires telles que les SO₂, NO_x et CO).

Leur développement a été accéléré par des facteurs conjoncturels (relatif à la situation du moment), comme la libéralisation du marché de l'énergie et le développement du combustible gaz naturel, associés aux qualités des centrales à cycle combiné : investissement et coûts d'exploitation réduits, haut rendement, bonne disponibilité, grande souplesse de fonctionnement, délais de réalisation courts et impact réduit sur l'environnement.

Ces centrales sont aujourd'hui appelées à jouer un rôle majeur dans la constitution du parc mondial des centrales de production d'énergie. [24]

II. Principe de fonctionnement du cycle combiné

Comme son nom l'indique, l'installation à cycle combiné réalise la combinaison de deux cycles thermodynamiques, elle associe le fonctionnement d'une turbine à combustion (cycle de Joule ou Brayton pour les anglo-saxons) à celui d'une chaudière de récupération et d'une turbine à vapeur (cycle de Hirn ou Rankine). Leur principe consiste à utiliser l'énergie contenue dans les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz comme source calorifique à la chaudière de récupération située en aval agissant comme un générateur de vapeur pour la turbine à vapeur, ce qui permet d'améliorer le rendement dans le cycle thermodynamique par rapport aux turbines à gaz en circuit ouvert ou aux centrales thermiques à vapeur conventionnelles comme illustré dans la figure suivante :

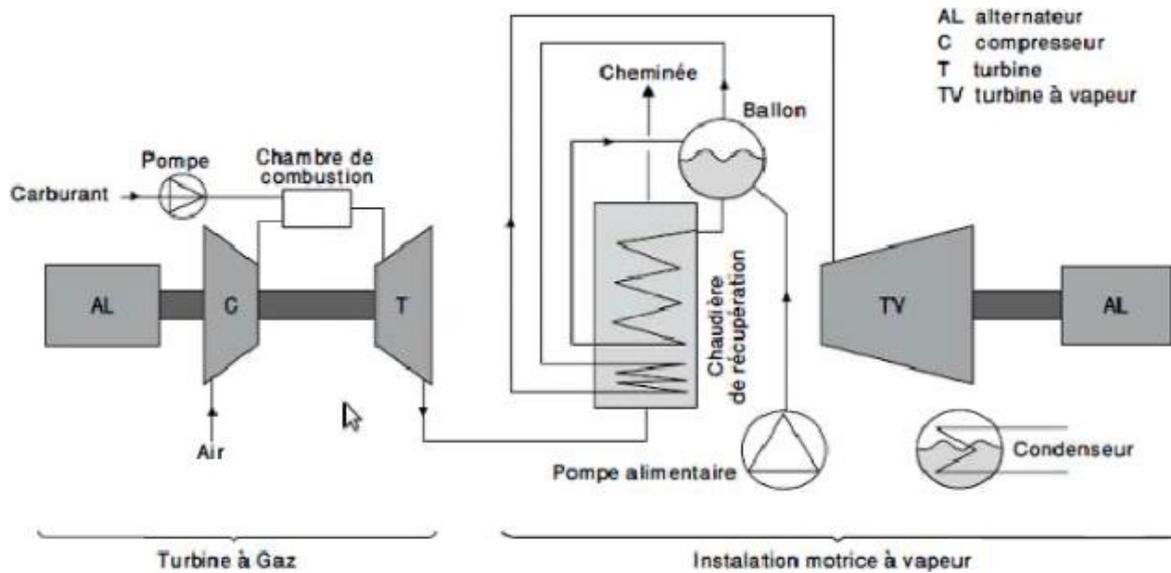


Figure III -1: Schéma général d'un cycle combiné [24]

III. Principaux éléments du cycle combiné

Les centrales à cycles combinés présentent une large gamme d'options design et de configuration en ce qui concerne le nombre d'unités, le type de chaudière, le type de turbine à vapeur, etc... La structure de base d'une centrale électrique à cycle combiné contient les composants principaux suivants [24] :

1. Turbine à gaz

Les Turbine à gaz font partie des turbomachines définies par Râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent. Une Turbine à gaz appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fioul, gaz...). [2]

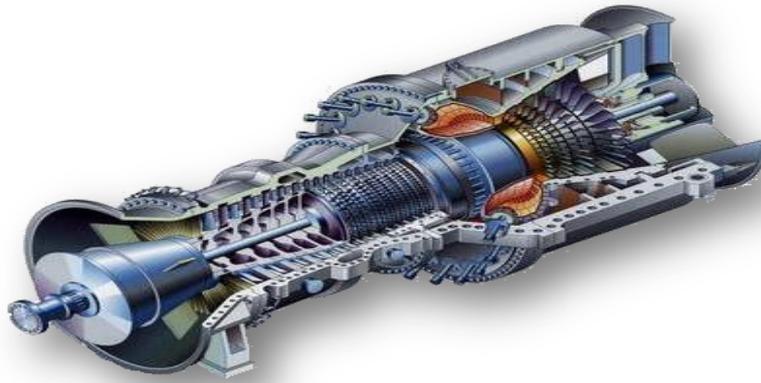


Figure III -2 : Turbine à gaz [12]

A. Les éléments d'une turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments :

- 1.1.1. **Un compresseur** elle généralement centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bar environ. [27]
- 1.1.2. **Une chambre de combustion** c'est dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement. [27]
- 1.1.3. **Une turbine** généralement qui est axial, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion. [27]

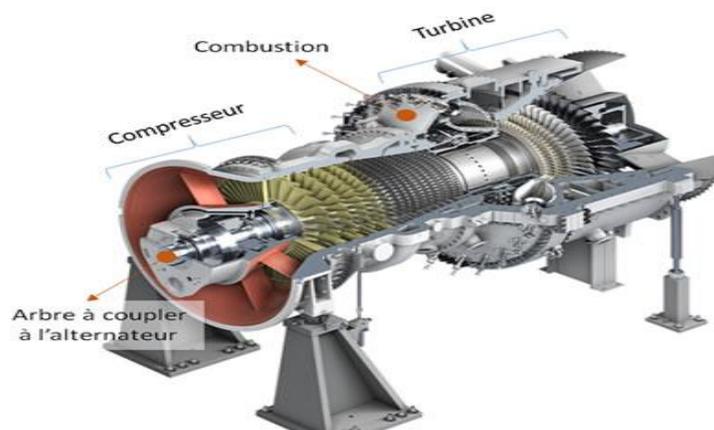


Figure III -3 : Les éléments de la turbine. [28]

B. Combustibles des turbines à gaz

Plus de trois quarts de turbines à gaz installées utilisent du gaz naturel et du combustible léger distillé tandis que l'essence est le plus souvent employée seulement comme carburant de secours. Ces combustibles propres permettent d'obtenir la performance optimale avec les turbines à gaz de pointe, permettant la combustion sans résidus avec des très bas niveaux d'émissions. Ils sont disponibles, faciles à traiter et compatibles avec les chambres de combustion standards et le matériel auxiliaire. En plus ils fournissent le mode de fonctionnement le plus simple et n'exigent pas beaucoup d'efforts de maintenance des matériels. Le quart restant des turbines à gaz, utilisent des combustibles peu usuels, tels que les carburants spéciaux comme le gaz naturel de faible BTU, les gaz d'échappements des procédés de fabrication de fer, gaz de synthèse (syngaz) dérivés de divers carburants d'origine, mais aussi des essences lourds et d'huile résiduel, de pétrole brut, de naphta et ainsi de suite. La combustion de ces combustibles dans les turbines à gaz exige des efforts spéciaux pour la conception des brûleurs, pour la conception de compresseur et turbine, pour les systèmes de stockage et d'alimentation, pour le traitement du carburant et ou le conditionnement, pour des raisons de sécurité et pour le contrôle des émissions. [25]

C. Principe de fonctionnement

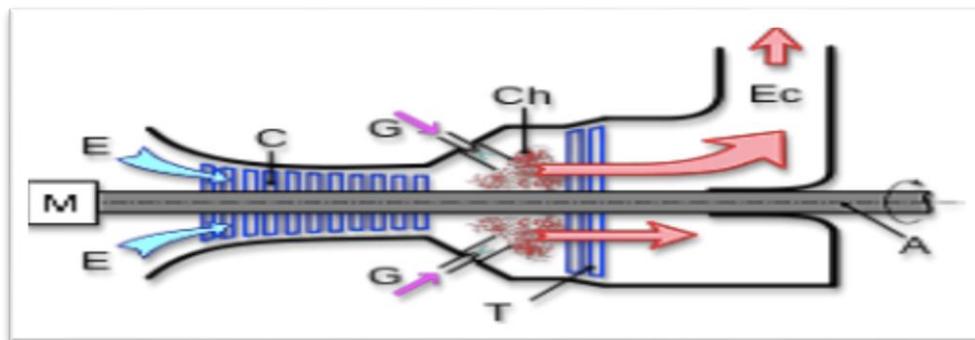


Figure III -4 : Coupe longitudinale de turbine à gaz [26]

Le compresseur (repère C), constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur (repère. E), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles.

Du gaz (repère. G), ou un combustible liquide pulvérisé, est injecté dans la (les) chambre(s) de combustion (repère. Ch) où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (repère. T), où l'énergie thermique des gaz chauds est

transformée en énergie mécanique. La turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes précédées d'aubages fixes (directrices). Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée (repère. Ec) à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre A qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur (ice)(pompe, alternateur ...) accouplé à son extrémité droite. Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement (rep. M) qui joue le rôle de démarreur. Le réglage de la puissance et de la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant. [26]

2. Chaudière de récupération

La chaudière de récupération ou HRSG (Heat Recovery Steam Generator) est le lien entre la turbine à gaz et le processus de turbine à vapeur. La fonction de HRSG est de convertir l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement de turbine à gaz en vapeur.

La chaudière de récupération peut être construite suivant deux configurations de base, basées sur la direction (horizontale ou verticale) des gaz d'échappement de la turbine à gaz à travers la chaudière. Dans une chaudière de récupération du type tour ou horizontale le transfert de chaleur se fait dans un ensemble d'échangeurs. [25]



Figure III -5 : Chaudière de récupération de Ras Djenat 2. [1]

A. Les principaux composants du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)

1. Ballon vapeur haute pression (HP)

Le Ballon vapeur HP est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur HP et pour absorber les à-coups de l'évaporateur pendant les transitoires de démarrage et de fonctionnement.

- Pression nominale: 139.6 Bar (g)
- Température nominale: 341°C [1]

2. Ballon vapeur pression intermédiaire (IP)

Il est conçu pour séparer le mélangeur de vapeur et d'eau et pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur IP.

- Pression nominale : 35 Bar (g)
- Température nominale: 249°C [1]

3. Ballon vapeur basse pression (LP)

Le Ballon vapeur LP est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau et pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur.

- Pression nominale: 8 Bar (g)
- Température de nominale: 180°C [1]

4. Sections économiseur est le dernier échangeur sur le trajet des fumées. Son but est de réchauffer l'eau d'alimentation jusqu'à une température (température d'approche) proche de la température de saturation. [25]

5. Sections évaporateur ou vaporisateur est le seul échangeur du dispositif qui n'élève pas la température du fluide. [25]

6. Sections surchauffeur est le premier échangeur traversé par la fumée. Il porte la vapeur à des conditions d'utilisation. L'installation porte un ballon de chaudière dans lequel règne un équilibre eau vapeur. Il assure un certain relais entre les différents échangeurs et son état (pression, température, niveau etc.) est étroitement surveillé, car il est le garant du bon fonctionnement de la chaudière de récupération. [25]

7. Section réchauffeur (pour la section IP) La fonction principale de la section réchauffeur est de chauffer la vapeur de réchauffage à froid jusqu'à la température de vapeur de réchauffage à chaud. [1]

8. Dégazeur Intégral Ballon LP Le dégazeur a pour fonction d'éliminer les gaz non condensables comme le O₂ et le CO₂ des condensats lors du remplissage initial de la chaudière et du démarrage de l'installation. Il fait partie intégrante du Ballon basse pression (LP). Le Ballon LP agit comme un réservoir de stockage pour le dégazeur. [1]

9. Cheminée HSRG avec Silencieux la chaudière génère des fumées qui nécessitent d'être évacuées. Ces fumées peuvent être évacuées via la cheminée principale, La cheminée du HSRG et son silencieux sont fournis pour acheminer les gaz d'échappement de la turbine à gaz depuis la sortie du HSRG vers l'atmosphère. Des ports d'échantillonnage sont fournis dans la cheminée pour les contrôles d'émission. Les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz font du bruit. De ce fait, un silencieux est fourni afin de réduire le bruit en sortie de cheminée. [1]

B. Les trois configurations principales de HSRG dans les centrales à cycle combiné

2.1. HSRG sans combustion supplémentaire

C'est pratiquement un échangeur de chaleur à échange par convection naturelle ou forcée. Le HSRG sans combustion supplémentaire est le modèle le plus utilisée dans la majorité des centrales à cycle combiné. [25]

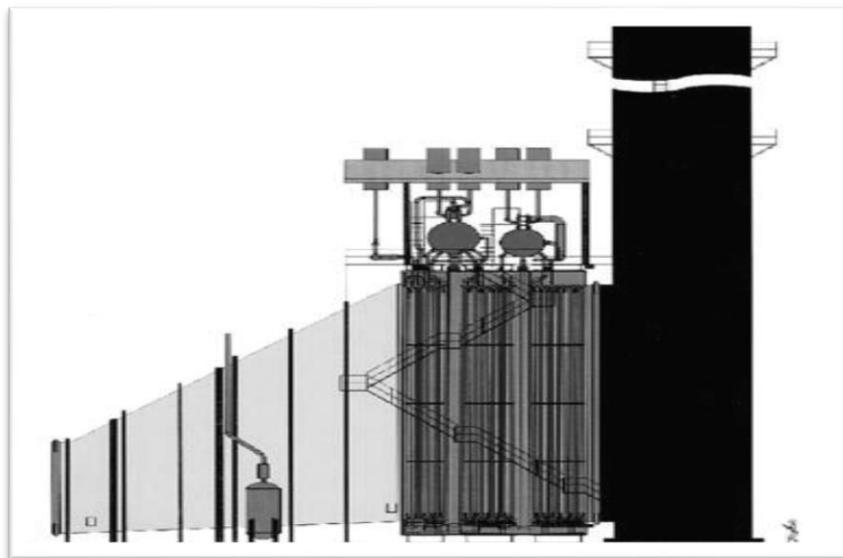


Figure III -6 : HSRG sans combustion supplémentaire (convection naturelle). [25]

2.2. HRSG avec combustion supplémentaire limitée

Les principes de fonctionnement du HRSG avec combustion supplémentaire limitée : sont identiques à ceux pour le HRSG sans combustion supplémentaire. Il y a diverses conceptions disponibles pour le système de combustion lui-même. Les unités qui ne dépassent pas une température de gaz approximativement de 780°C, en aval de la combustion supplémentaire, peuvent être construites avec des simples brûleurs. Cette limite peut être prolongée en exigeant des modifications dans la chaudière de récupération. La combustion supplémentaire est le plus souvent appliquée aux centrales à cycle combiné de cogénération où les quantités de vapeur de processus doivent être variées indépendamment de l'électrique générée. Dans ce cas, la combustion supplémentaire est utilisée pour réguler la quantité de vapeur de processus produite. [25]

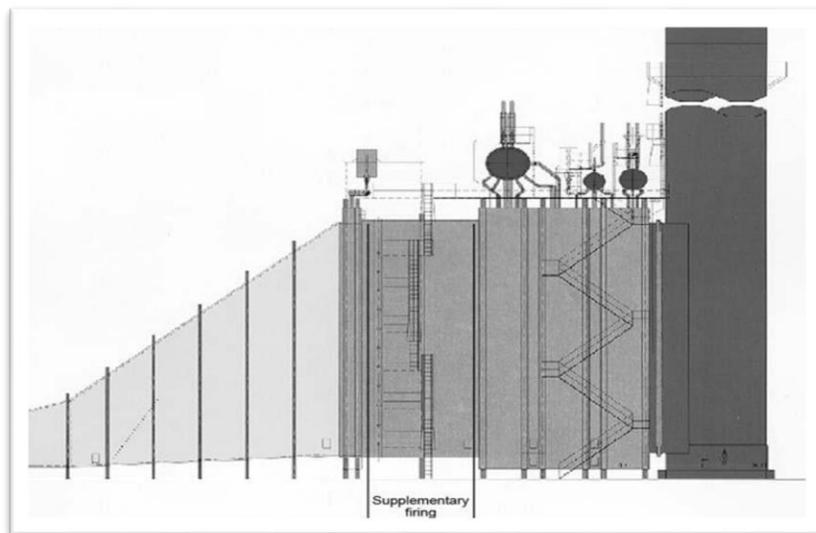


Figure III -7 : HRSG avec combustion supplémentaire limitée. [25]

2.3. HRSG avec combustion supplémentaire maximale

La combustion maximale est déterminée par la teneur en oxygène des gaz d'échappements de la turbine à gaz. La chaleur contenue dans ces gaz d'échappements est moindre par rapport à la chaleur générée par la combustion de sorte qu'il n'est plus correct de parler de chaudière de récupération. La conception d'une chaudière de récupération de ce type est pratiquement identique à celle d'une chaudière conventionnelle avec le four, sauf qu'il n'y a aucun préchauffeur d'air. Les gaz d'échappement de la turbine à gaz ont une température de 450 à

650°C, rendant un réchauffeur régénératif inutile. Pour refroidir les gaz à une température suffisamment basse en aval de la chaudière, un économiseur additionnel est utilisé, qui assure une partie du préchauffage d'eau d'alimentation provenant de préchauffage régénératif de la turbine à vapeur. Si le combustible est le gaz, un économiseur additionnel à basse pression améliore le rendement du HRSG. Le carburant brûlé lors cette combustion supplémentaire peut être du pétrole, du gaz ou de charbon pulvérisé. Ce type de HRSG est utilisé pour augmenter le rendement d'une centrale conventionnelle de turbine à vapeur utilisant une turbine à gaz et l'énergie thermique des gaz d'échappement. [25]

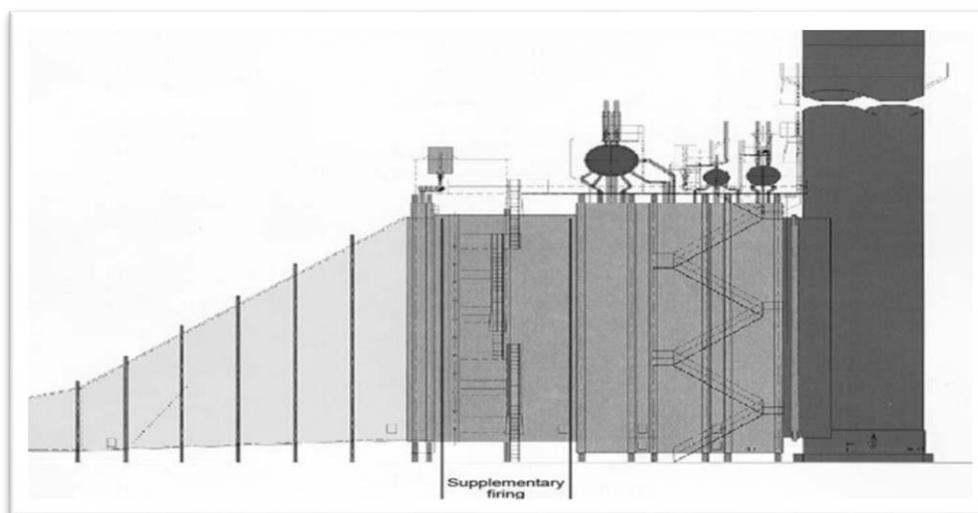


Figure III -8 : HRSG avec combustion supplémentaire maximale. [25]

3. Turbine à vapeur

Les turbines à vapeur, comme toutes les turbomachines (et contrairement aux machines volumétriques), sont des appareils à écoulement continu, ce qui veut dire que, pour un régime de fonctionnement donné, l'état du fluide est invariable en tout point. Cette propriété leur permet de fonctionner avec des débits très importants et rend donc possible la réalisation de machines de grande puissance (pouvant dépasser un million de kilowatts), et cela avec un rendement élevé et avec toute la souplesse de réglage exigée par le fonctionnement des centrales électriques modernes. De plus, les turbines à vapeur se prêtent, dans des conditions économiques, à la production simultanée d'énergie électrique et de chaleur. Pour toutes ces raisons, ces machines jouent un rôle de tout premier plan dans la production d'énergie électrique aux dépens de la chaleur fournie par les combustibles, qu'ils soient classiques ou nucléaires.[15]



Figure III -9: L'ensemble turbine à vapeur. [23]

D. Principe d'une turbine à vapeur

Le cycle thermodynamique de la turbine à vapeur comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers la chaudière
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée dans la chaudière.
- La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel. [16]

E. Les principaux composants des turbines à vapeur

○ Transformateurs

- **Transformateur principal (TP)** L'évacuation de l'énergie produite par l'alternateur est évacuée sur le réseau haute tension à travers un transformateur principal élévateur : 13800V/63000V, un disjoncteur 63 KV (disjoncteur 52), trois câbles souterrains à pression d'huile et une ligne triphasée aérienne. [17]
- **Transformateur de soutirage (TS)** Les auxiliaires du groupe sont alimentés à travers un transformateur de soutirage (TS) abaisseur : 13800V/6300V en service normal et un transformateur de démarrage (TD) abaisseur : 63000V/ 6300V en secours. [17]

○ Chaudière

Le générateur de vapeur c'est un échangeur de chaleur qui utilise l'énergie du circuit primaire pour transformer l'eau du circuit secondaire en vapeur qui alimentera la turbine. Il constitue la

source chaude du cycle thermodynamique [18]. Cette vapeur sera utilisée par la turbine pour fournir de l'énergie mécanique.[17]

○ **Condenseur**

Le système de condenseur de vapeur principal (MC) est conçu pour condenser et désaérer la vapeur d'échappement de la turbine principale et constituer un puits de chaleur pour le système de dérivation de la turbine. La vapeur évacuée des turbines BP est condensée en passant par des tubes contenant de l'eau du système de refroidissement.[19]

○ **Pompe alimentaire**

La pompe KSB à très haute pression est une pompe à centrifuge multicellulaire. Elle comprend un corps d'aspiration, un corps de refoulement et un certain nombre d'étages ou de cellules assemblées par des tirants.

L'eau, provenant de la bache alimentaire à la pompe, possède une énergie de pression et une énergie cinétique qui seront augmentées dans les turbines en mouvement pour alimenter le générateur de vapeur (chaudière) en quantité nécessaires d'eau pour maintenir le niveau normal. [17]

F. Fonctionnement de la turbine à vapeur

L'énergie thermique contenue dans la vapeur est convertie en énergie mécanique par expansion à travers la turbine. L'expansion se fait par une série de pales fixes (buses), qui orientent le flux de vapeur dans des jets à grande vitesse. Ces jets contiennent une énergie cinétique importante, qui est convertie en rotation d'arbre par les pales du rotor en forme de godet, lorsque le jet de vapeur change de direction. Le jet de vapeur, en se déplaçant sur la surface courbe de l'aube, exerce une pression sur l'aube du fait de sa force centrifuge. Chaque rangée de buses fixes et de lames mobiles est appelé un étage. Les pales tournent sur le rotor de la turbine et les pales fixes sont disposées concentriquement dans le carter circulaire de la turbine. Dans toutes les turbines, la vitesse de rotation de l'aube est proportionnelle à la vitesse de la vapeur qui passe sur l'aube. Si la vapeur ne se détend qu'en une seule étape de la pression de la chaudière à la pression d'échappement, sa vitesse doit être extrêmement élevée. [20]

G. Le cycle de Rankine

Le cycle de Rankine est le cycle de puissance à vapeur qui forme la base thermodynamique pour la plupart des centrales électriques à vapeur. Ces centrales peuvent utiliser du charbon, de l'huile, du gaz ou de l'énergie nucléaire comme carburant pour une source à haute température, mais l'exploitation thermodynamique de base reste équitablement la même.

- **Pour la chaudière à vapeur**, il serait question d'un processus d'ajout de chaleur réversible à pression constante à l'eau pour former de la vapeur.
- **Pour la turbine**, le processus idéal serait une dilatation adiabatique réversible de la vapeur.
- **Pour le condensateur**, il serait question d'un rejet de chaleur réversible à pression constante alors que la vapeur se condense jusqu'à ce qu'elle devienne un liquide saturé.
- **Pour la pompe**, le processus idéal serait une compression adiabatique réversible de ce liquide se terminant à la pression initiale.

Quand tous les quatre processus susmentionnés sont idéaux, le cycle est un cycle idéal, appelé cycle de Rankine idéal. Il s'agit d'un cycle réversible.

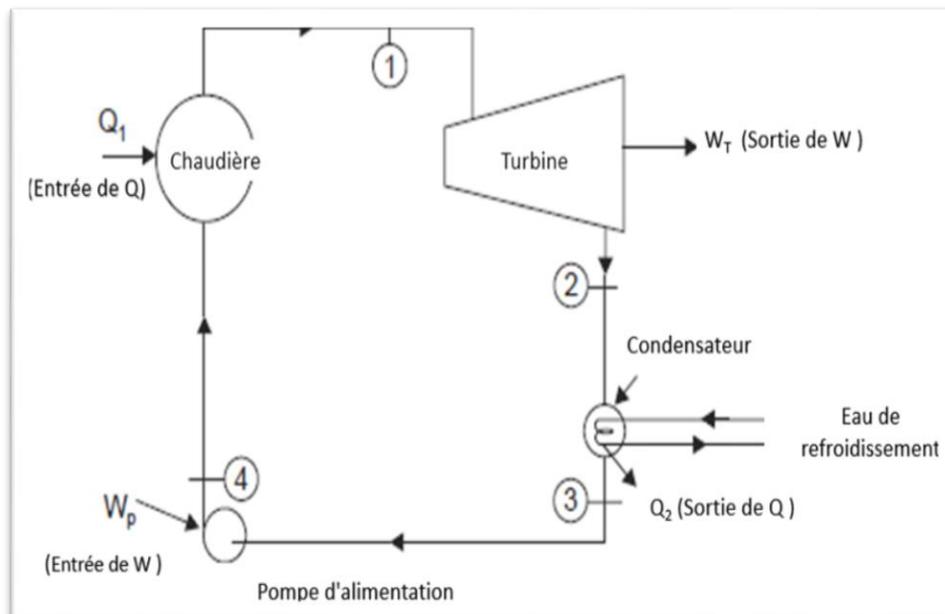


Figure III -10: Cycle de Rankine.[1]

Il y a quatre processus dans le cycle de Rankine. Ces états sont identifiés par des numéros dans le diagramme T-S () présenté ci-dessous :

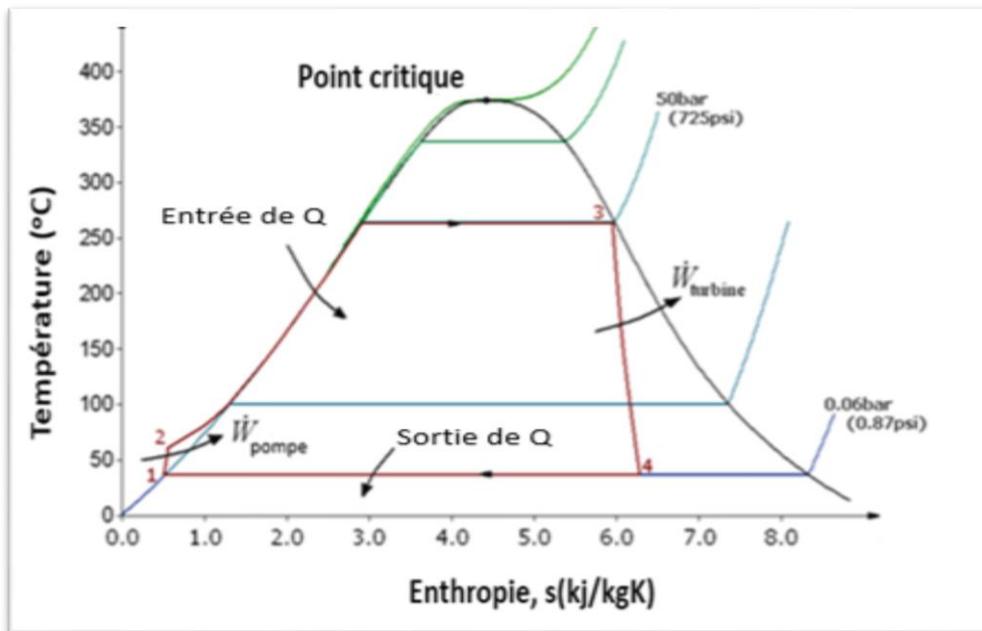


Figure III -11 : Diagramme T-S pour cycle de Rankine.[1]

- **Processus 1-2** : Le fluide de fonctionnement est pompé d'une basse pression à la haute pression. Alors que le fluide est un liquide à ce stade, la pompe exige peu d'énergie d'entrée.
- **Processus 2-3** : Le liquide sous haute pression entre dans une chaudière où il est chauffé à une pression constante par une source thermique externe pour devenir une vapeur saturée déshydratée. L'énergie d'entrée nécessaire peut être facilement calculée graphiquement, en utilisant un diagramme d'enthalpie-entropie (c'est à dire diagramme de Molliere), où numériquement en utilisant des tableaux de vapeur.
- **Processus 3-4** : La vapeur saturée déshydratée se dilate à travers une turbine, générant une puissance. Cela diminue la température et la pression de la vapeur, et une condensation peut avoir lieu. Le rendement dans ce processus peut être facilement calculé en utilisant le diagramme ou des tableaux notés ci-dessus..
- **Processus 4-1** : La vapeur hydratée entre dans un condenseur où elle est condensée à une pression constante pour devenir un liquide saturé.
- L'efficacité du cycle de Rankine : $\eta_{Rankine} = \text{Travail net} / \text{Chaleur fournie}$

$$\text{Ou : } \eta_{\text{Rankine}} = W_{\text{net}}/Q_1 = (W_T - W_P)/Q_1$$

Où, W_T = Travail de turbine, W_P = Travail de pompe & Q_1 = Chaleur fournie. [1]

4. Aubage et grilles d'aubes

A. Grille d'aubes

On appelle grille d'aubes à un ensemble d'obstacles extraterrestres fixes ou mobiles, ces obstacles sont dérivés de l'un d'entre eux L'autre est guidé par un déplacement géométrique, conçu d'une manière très particulière L'écoulement du fluide et l'échange de force mécanique avec lui. La vitesse du fluide est Chaque grille d'aubes fixes ou mobiles d'une turbine axiale est définie par trois vecteurs Différents V, W, U représentent respectivement la vitesse de la vapeur, la vitesse absolue et la vitesse relative Et la vitesse de l'aube. Le débit de vapeur provient du distributeur Vitesse absolue V, la lame suit la vitesse tangentielle (conduite) combinée U Déduire la vitesse relative de ces deux vitesses W. [21]

B. Aubage

La pale est définie comme un obstacle de forme anormale immergé dans un flux formant Le canal par lequel le fluide circule entre eux. Spécialement conçu pour assurer Le débit peut fournir un travail mécanique. Lames des deux côtés : l'intrados et l'extrados, la vapeur est déviée dans le canal du rotor, ce qui crée une différence de pression Sur l'intrados et l'extrados. Dans le fonctionnement des turbines industrielles, Importance économique, il faut donc attirer différentes disciplines comme l'aérodynamique, Résistance des matériaux, caractéristiques physiques des vibrations pour obtenir la meilleure lame Plan de profit global. [22]



Figure III -12: Aubage de turbine à vapeur. [22]

C. Profils d'aubes

Le profil de la lame est caractérisé par un profil dont la courbure change d'une certaine manière. Résistance mécanique continue et élevée. Atteindre toujours son profil d'aube, Les fabricants de turbines sont particulièrement intéressés, et cela se reflète dans Les variantes que nous rencontrons, lors de l'étude d'un profil d'aube, doivent non seulement se rencontrer. Il appartient aux conditions de M.D.F, mais comprend également des conditions liées à la résistance et à la fabrication. C'est Surtout depuis les années 1960, les gens ont fait de gros efforts pour calculer La qualité aérodynamique du profil. C'est maintenant dans une gamme de différentes possibilités Condition ; déterminer la quantité appropriée pour caractériser la qualité aérodynamique et La résistance à la flexion du profilé permet un choix judicieux entre différents matériaux Variantes. [21]

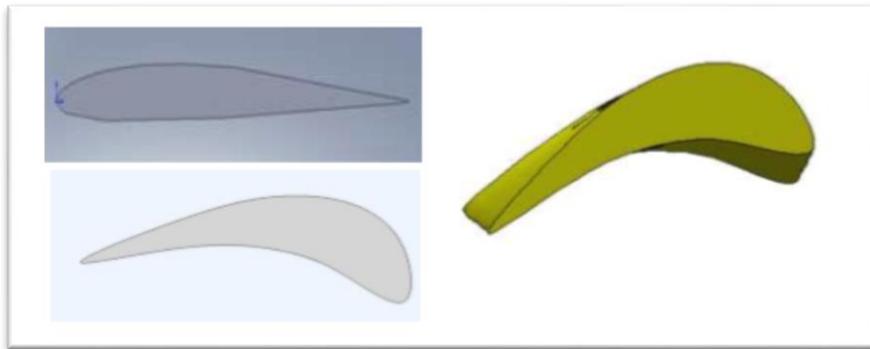


Figure III -13: Exemples de profils d'aube. [21]

CHAPITRE IV :
Formulation mathématique
et résolution par Fluent

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons introduire une simulation numérique de l'écoulement autour d'une aube de turbine à vapeur. La méthode RANS Navier-Stokes moyenne de Reynolds avec modèle de turbulence k-ε est introduite. Une présentation du modèle NACA 23012 dont la simulation est réalisée. Cette approche de simulation en 2D.

Nous proposons d'abord la formule de l'équation générale de transport de la mécanique des fluides. On rappelle l'équation (RANS) régissant la turbulence. Enfin, nous avons introduit le logiciel ANSYS, un code informatique commercial qui simule l'écoulement des fluides.

II. Formulation mathématique

Les équations de NAVIER STOKES pour un fluide incompressible :

- **Équation de continuité:**

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- **Équation de transport de quantité de mouvement suivant X:**

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho U'_j U'_i) \quad (2)$$

- **terme convectif :**

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_j U_i) \quad (3)$$

- **Effet de la pression :**

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

- **contraintes visqueuses :**

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} \quad (5)$$

- **contraintes de Reynolds :**

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho U'_j U'_i) \quad (6)$$

III. La simulation numérique

La simulation numérique est devenue un moyen important de concevoir et de vérifier des systèmes complexes confrontés à des phénomènes réels. La croissance explosive de la puissance de calcul des ordinateurs au cours de la dernière décennie a permis de développer des logiciels de calcul plus complexes basés sur des modèles théoriques interdisciplinaires. Ainsi, une nouvelle discipline est née, à savoir la CFD "Computational Fluid Dynamics". Cette discipline fournit une approximation numérique des équations qui contrôlent le mouvement des fluides. En fournissant des données pertinentes pendant la phase de conception, il réduit considérablement le temps et les coûts. Le code CFD contient trois éléments principaux:

- Un préprocesseur qui prend en entrée une grille définie en fonction de la géométrie étudiée, des paramètres d'écoulement et des conditions aux limites.
- Solveur, utilisé pour résoudre les équations qui contrôlent le fluide dans les conditions attendues.
- Post-processeur capable de manipuler les données et d'afficher les résultats sous forme graphique

IV. Modélisation de la turbulence

○ Modèle (k-ε)

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence. En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds). Dans notre cas, nous avons utilisé le modèle standard k-ε, qui est un demi Sur la base de l'expérience du concept de BOUSSINESQ, reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen :

$$-\rho U'_i U'_j = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (7)$$

δ_{ij} : Est le tenseur de déformation.

$$\delta_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

K : représente l'énergie cinétique turbulente:

$$k = \frac{U_i'^2}{2} \quad (9)$$

La viscosité de l'écoulement laminaire à mouvement analogue, qui se caractérise par la vitesse (des molécules) et une distance (le libre parcours moyen), viscosité turbulente, caractérisée par une vitesse \sqrt{k} et une distance $(l=\frac{K^{3/2}}{\varepsilon})$, est donnée par:

$$v_t = c_\mu \sqrt{k} \frac{K^{3/2}}{\varepsilon} = c_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

Avec :

$c_\mu=0.09$ (est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement).

ε : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K.

K et **ε** sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous:

○ Équation modélisée de K

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulente s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (11)$$

○ Équation modélisée de ε

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

σ_ε et σ_k , sont respectivement les nombres de Prandtl turbulents relatifs aux taux de dissipation et à l'énergie cinétique turbulente, et l'ensemble des autres coefficients est déterminé de façon empirique.

$$G_k = -\rho U'_i U'_j \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = \rho v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (13)$$

$C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$.

Ces valeurs sont prises par défaut par Fluent.

V. Résolution par fluent

"Fluent" est un code informatique qui peut simuler l'écoulement d'un fluide avec et sans transfert de chaleur dans des géométries complexes. Il peut résoudre relativement facilement le problème d'écoulement des maillages structurés et non structurés générés par des

géométries complexes. Les maillages supportés en 2D sont de type triangle ou quadrilatère, qui sont tétraèdre/hexaèdre/pyramide en 3D, ou des maillages hybrides (hybrides). Le code "Fluent" est écrit en langage C, tirant pleinement parti de la flexibilité et des fonctions puissantes (allocation dynamique de mémoire) fournies par le langage. De plus, l'architecture qu'il utilise lui permet de s'exécuter en plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur différents postes de travail pour améliorer l'efficacité de l'exécution.

"Fluent" est utilisé via une interface graphique très simple. Les utilisateurs avancés peuvent ajuster ou étendre l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu selon les besoins pour réaliser l'automatisation de certains programmes. Par conséquent, il a la capacité de modéliser :

- Les écoulements 2D ou 3D.
- États permanents ou transitoires.
- Écoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes (subsoniques, transsoniques, supersoniques et hypersoniques).
- Écoulements non visqueux, visqueux, laminaires ou turbulents.
- Les écoulements dans les milieux poreux.

Ce code de calcul utilise la méthode des volumes finis. La discrétisation des équations intégrales qui contrôlent le flux, telles que les équations de continuité, les équations de quantité de mouvement et les équations d'énergie liées à d'autres quantités scalaires qui dépendent des propriétés du flux, est basée sur la technologie du volume de contrôle, qui comprend :

- La division du domaine en des volumes de contrôle discrets en utilisant un maillage de calcul
- Intégrer des équations de contrôle sur un volume de contrôle unique pour construire des équations algébriques pour des variables dépendantes discrètes (inconnues), telles que des scalaires de vitesse, de pression, de température et de conservation.
- Intégrer des équations de contrôle sur un volume de contrôle unique pour construire des équations algébriques pour des variables dépendantes discrètes (inconnues), telles que des scalaires de vitesse, de pression, de température et de conservation.

VI. Géométrie

Le comité NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), prédécesseur de la NASA, a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi celles-ci, on peut distinguer la famille des profils à quatre chiffres, celle à cinq chiffres et les profils laminaires portant la désignation NLF. Dans notre étude, on s'intéressera principalement aux profils à cinq chiffres, Dans cette famille, cinq chiffres caractérisent les profils. Le premier représente la courbure relative maximale, les deux suivants indiquent le double de sa position relative du bord d'attaque et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximale.

1. Premier cas (angle 0°)

L'écoulement autour d'un profil isolé 2D, le NACA 23012, a été simulé à l'aide du code Fluent. Le domaine de calcul est une surface de dimensions 100mmx200mm avec une entrée, une sortie et deux cotés latéraux

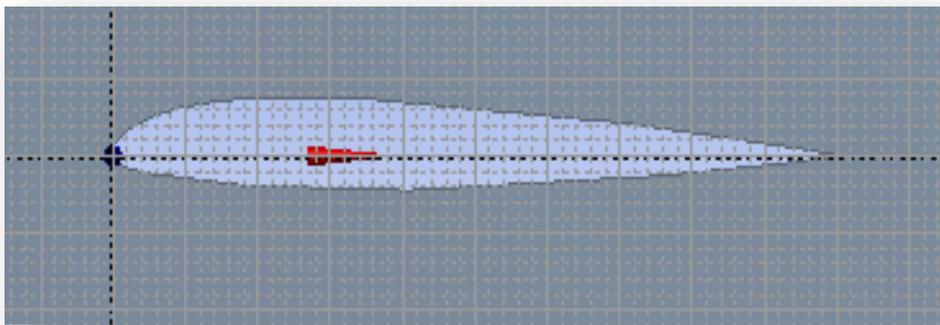


Figure IV -1 : Géométrie d'une aube (angle 0°)

désignation	Caractéristique
Profil de pale	NACA 23012
Corde [mm]	100 mm
Épaisseur	100%
Origine	0%
angle	0

2. Deuxième cas (angle 10°)

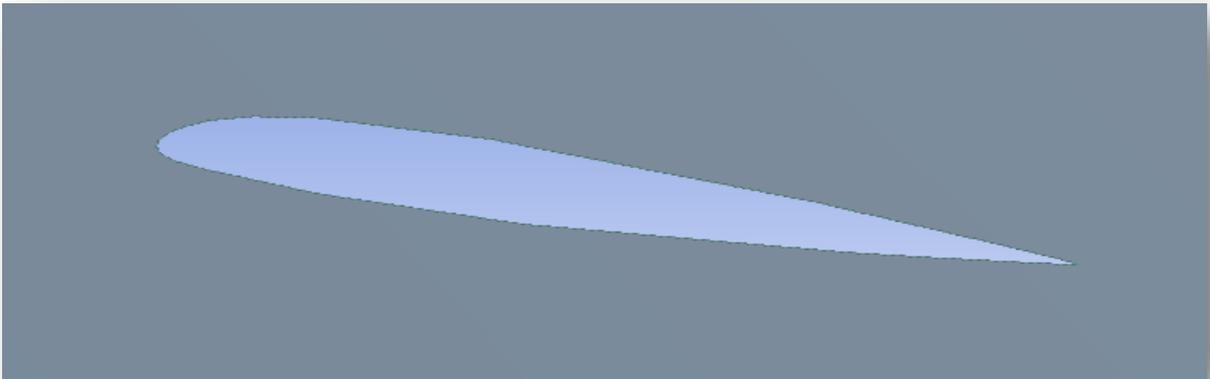


Figure IV -2 : Géométrie d'une aube (angle 10°)

désignation	Caractéristique
Profil de pale	NACA 23012
Corde [mm]	100 mm
Épaisseur	100%
Origine	0%
angle	10

3. Troisième cas (angle 20°)

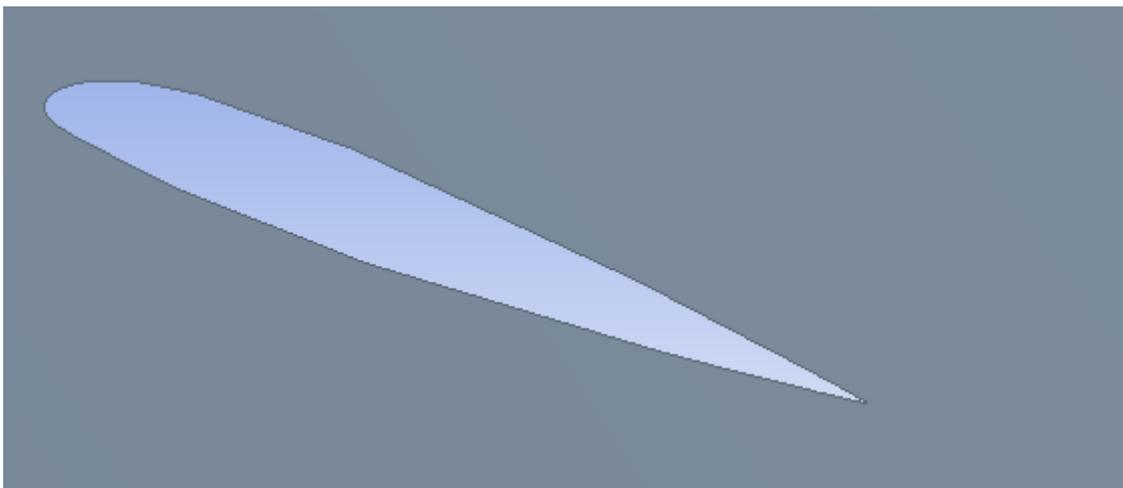


Figure IV -3 : Géométrie d'une aube (angle 20°)

désignation	Caractéristique
Profil de pale	NACA 23012
Corde [mm]	100 mm
Épaisseur	100%
Origine	0%
angle	20

VII. Maillage

on a fait un maillage quadrilatéral dans les trois cas de profil 2D (angle 0°, angle 10°, angle 20°)

	Angle 0°	Angle 10°	Angle 20
Nombres des nœuds	32735	21962	32666

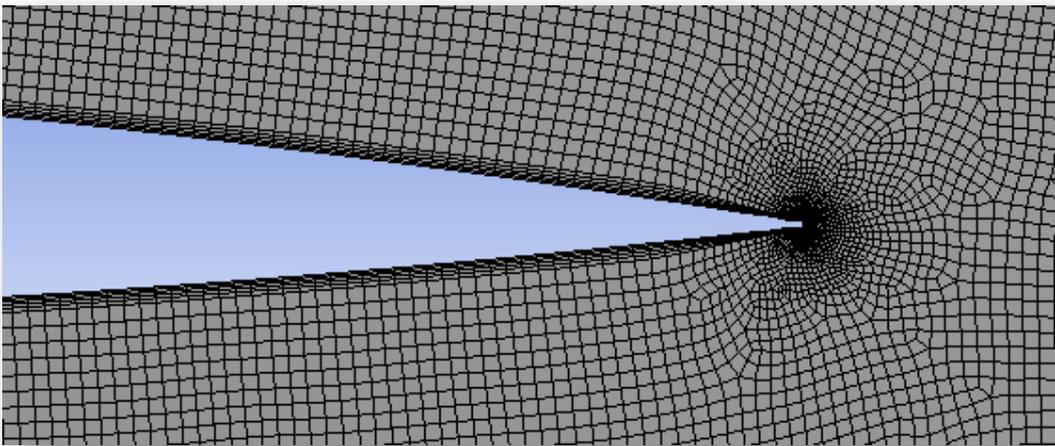
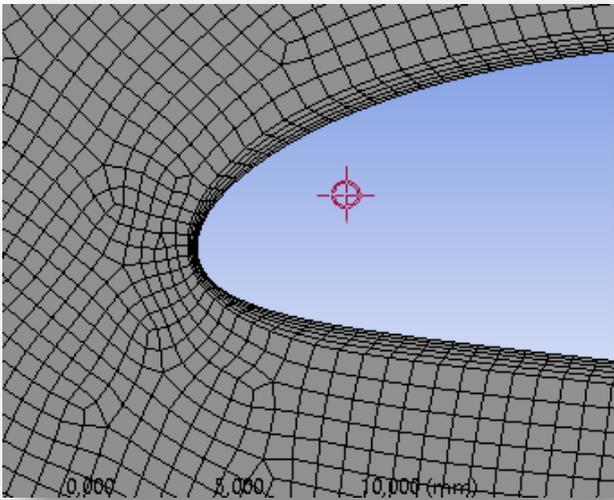
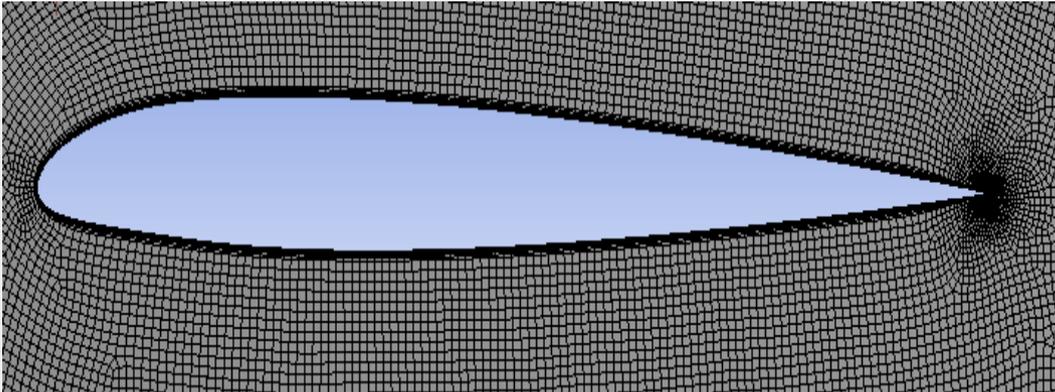


Figure IV -4 : Maillage de Premier cas angle 0°

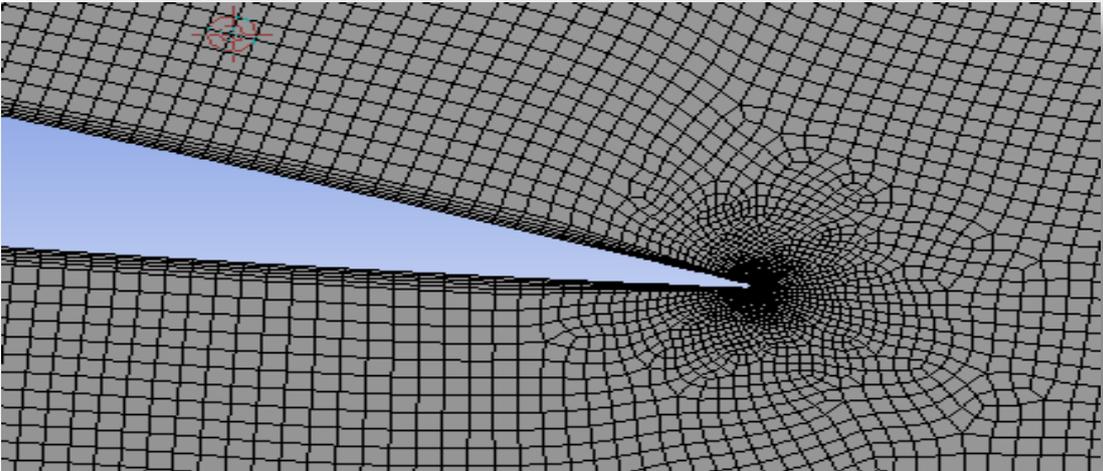
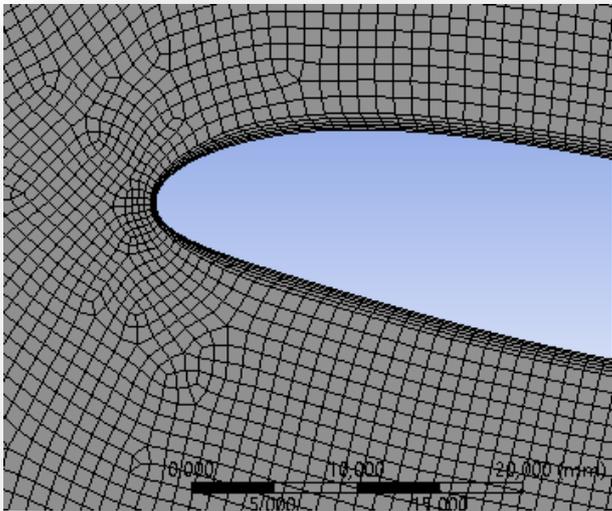
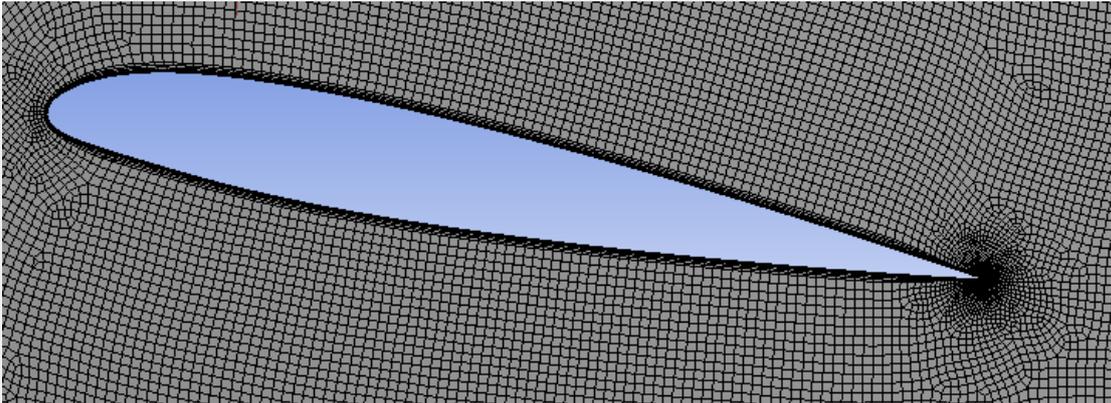


Figure IV -5: Maillage de Premier cas angle 10°

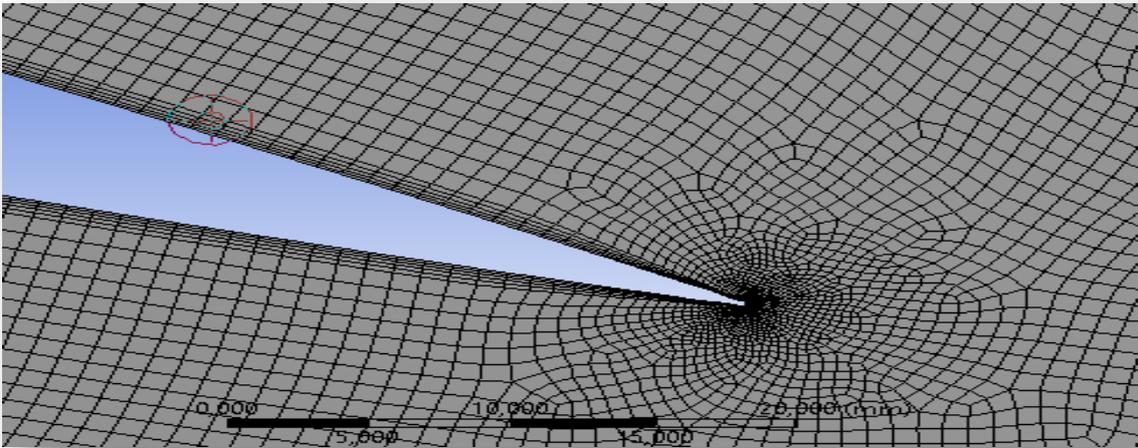
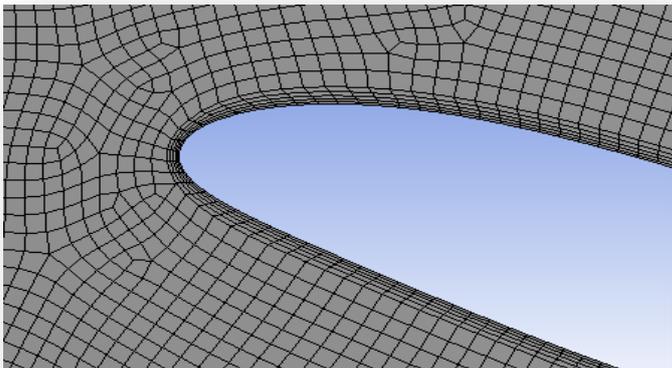
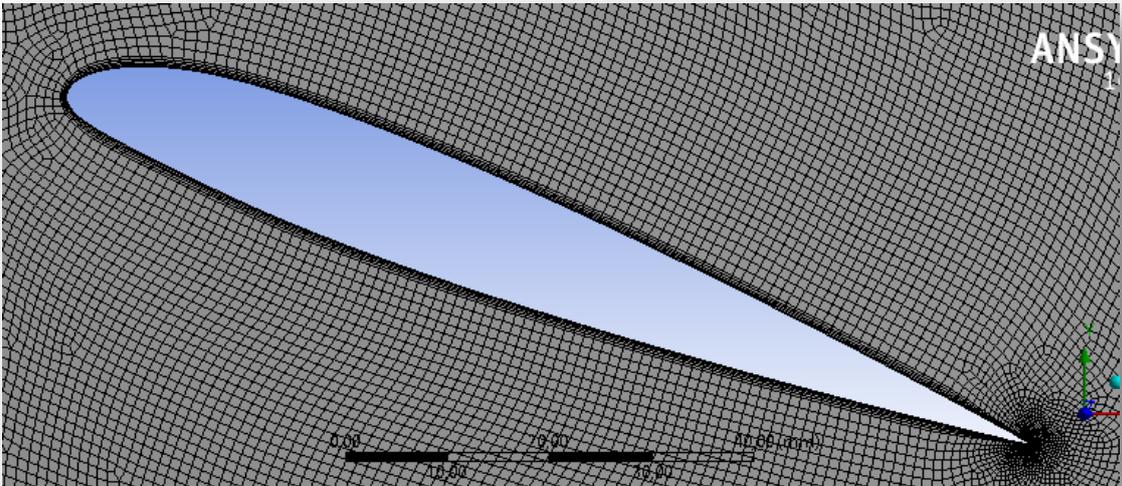


Figure IV -6 : Maillage de Premier cas angle 20°

VIII. Choix des types de frontières

Géométries Région	Angle 0°	Angle 10°	Angle 20°
Entrée	Velocity inlet	Velocity in let	Velocity in let
Sortie	Out flow	Out flow	Out flow
Paroi	Wall	Wall	Wall

IX. Les conditions aux limites

	Angle 0°	Angle 10°	Angle 20°
Nombre de mach	0.1	0.1	0.1
Nombre de Reynolds	$2,4 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$
Vitesse [m/s]	35,327	35,327	35,327
Intensité de turbulence %	5	5	5
Traitement près de la paroi	No slip	No slip	No slip

I. Choix des schémas de discrétisation

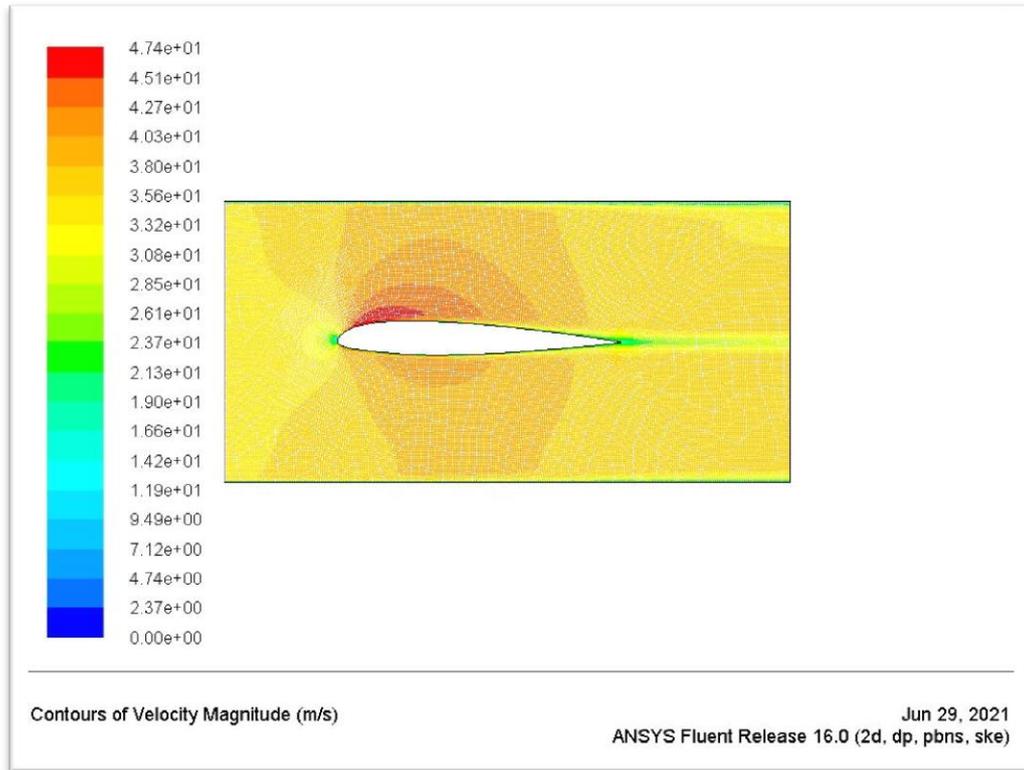
pression	Standard
Quantité de mouvement	Second ordre up Wind
Couplage vitesse-pression	Simple
Énergie cinétique turbulente	Second ordre up Wind
Taux de dissipation	Second ordre up Wind

II. Sous relaxation

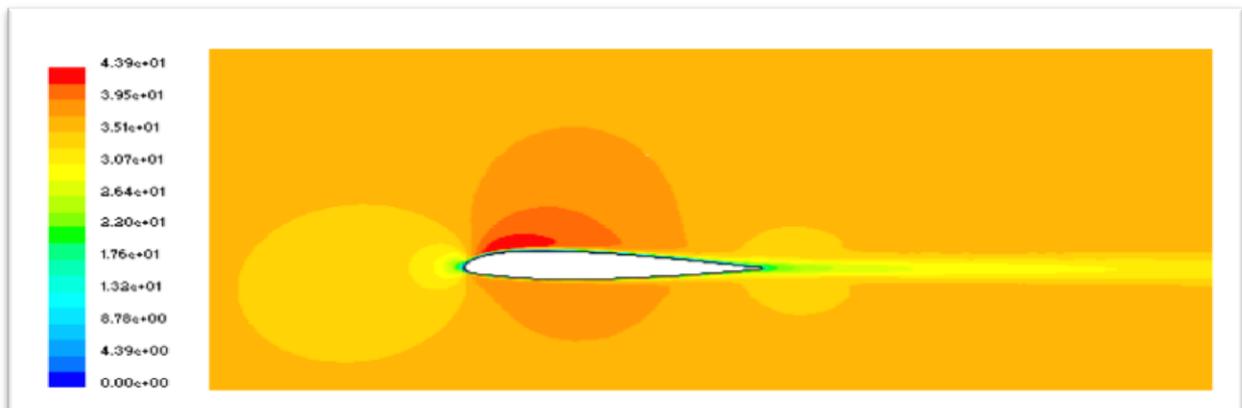
Pression	0.3
Quantité de mouvement	0.7
Énergie cinétique turbulente k	0.8
Taux de dissipation	0.8

CHAPITRE V : Résultat et discussion

I. Validation (premier cas : angle 0°)

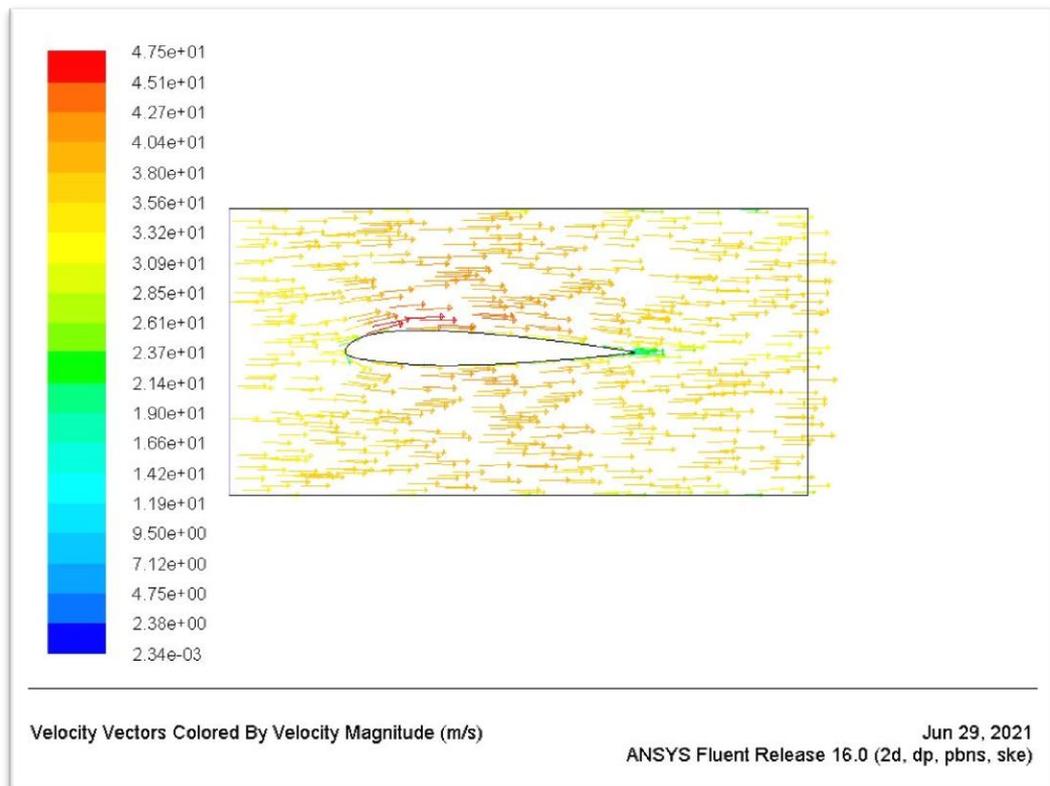


(a): Résultat de la simulation effectuée.

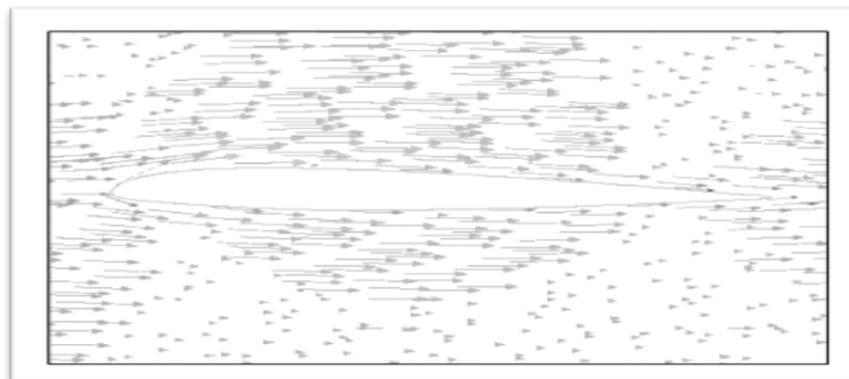


(b) : Résultat du mémoire de Benkara-Mostefa-Heguehoug Karima. [43]

Figure V -1 : contours de la grandeur de vitesse (m/s)

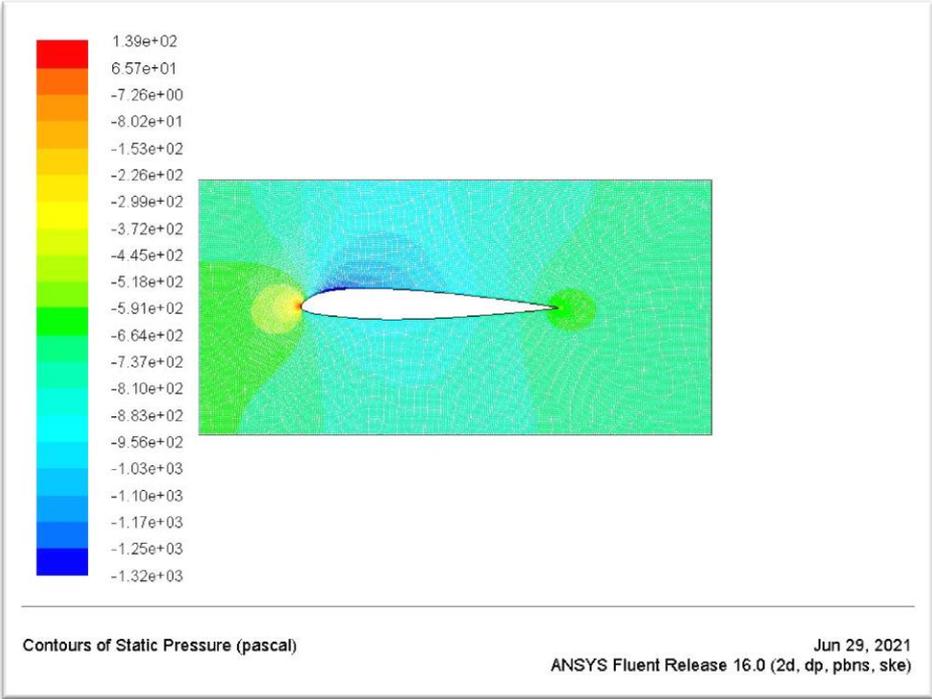


(A) : Résultat de la simulation effectuée.

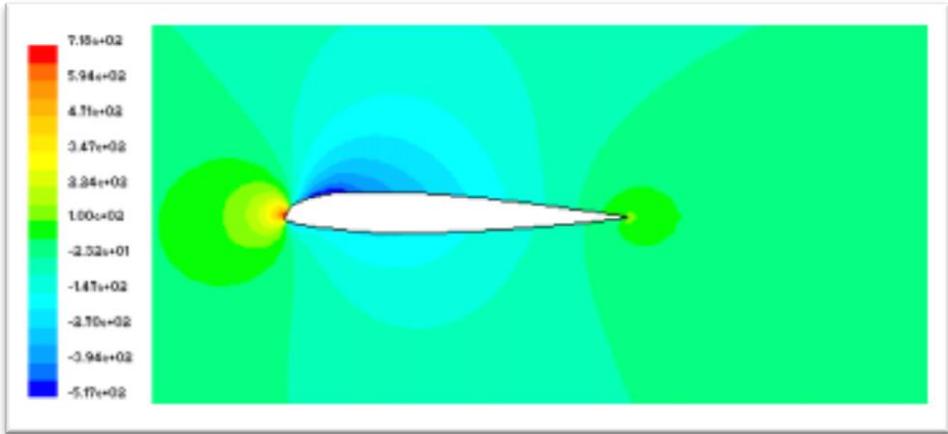


(B) : Résultat du mémoire de Benkara-Mostefa-Heguehoug Karima. [43]

Figure V -2 : Vecteurs de la grandeur de vitesse (m/s).

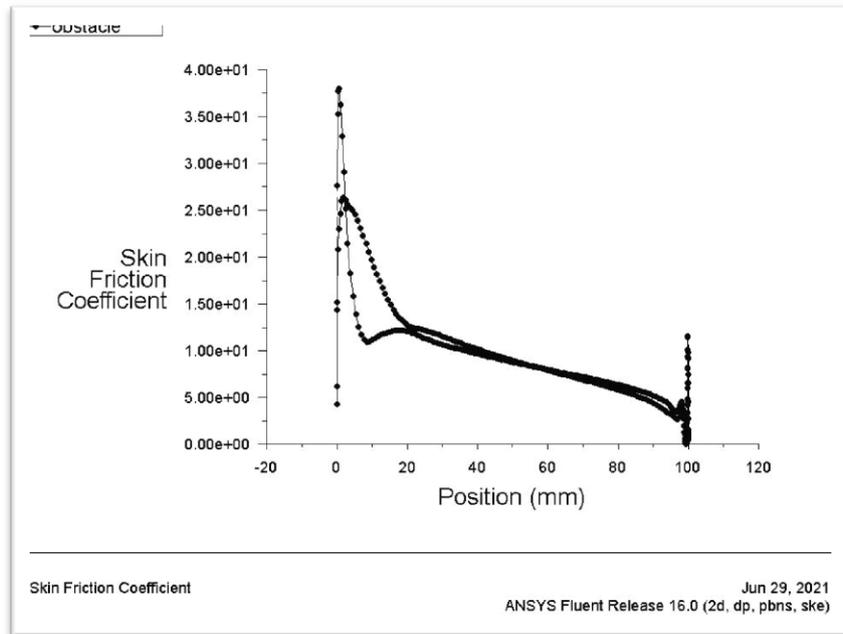


(A) : Résultat de la simulation effectuée.

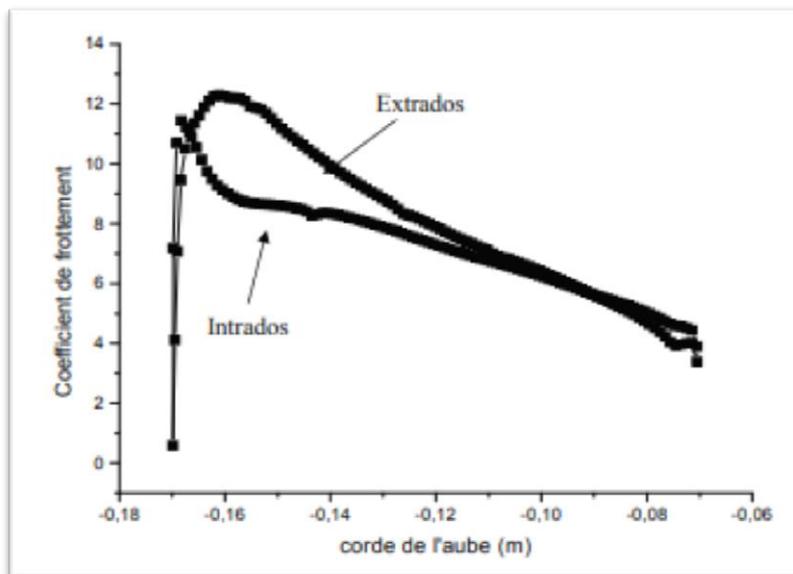


(B): Résultat du mémoire de Benkara-Mostefa-Heguehoug Karima. [43]

Figure V -3 : Contours de pression (Pascal)

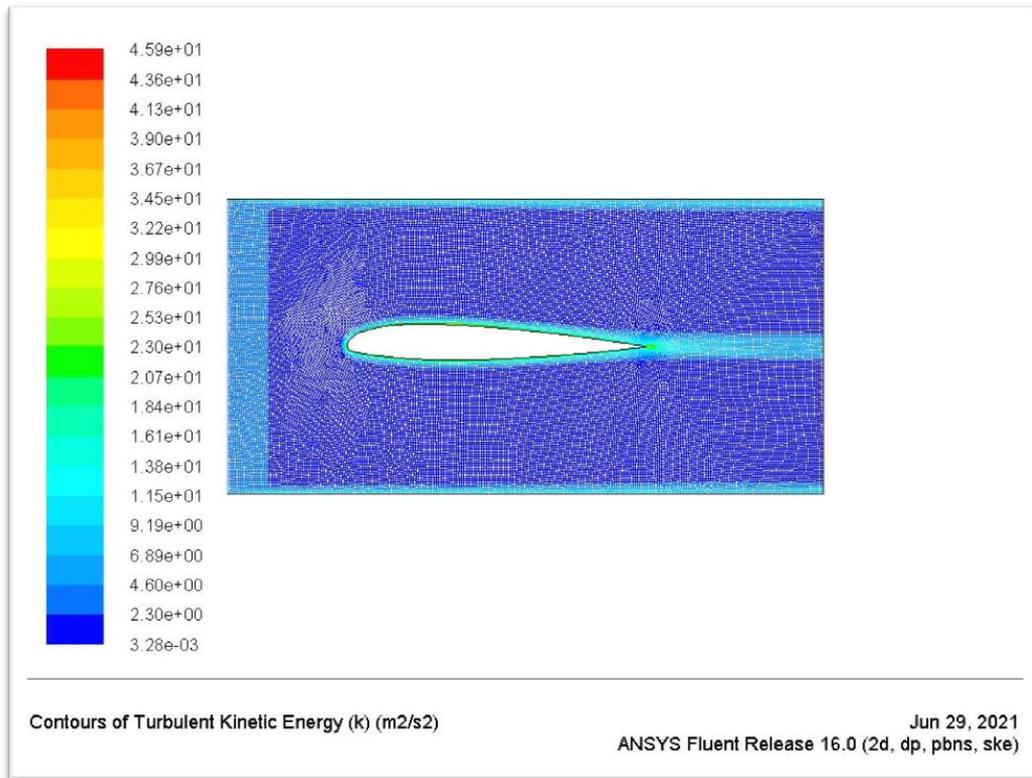


(A) : Résultat de la simulation effectuée.

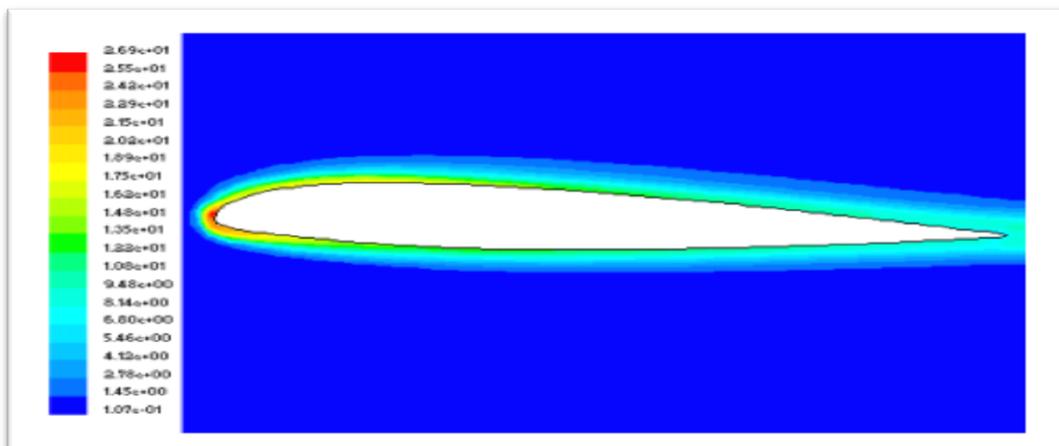


(B): Résultat du mémoire de Benkara-Mostefa-Heguehoug Karima. [43]

Figure V -4 : Profil du coefficient de frottement.



(A) : Résultat de la simulation effectuée.



(B) : Résultat du mémoire de Benkara-Mostefa-Heguehoug Karima. [43]

Figure V -5 : Contours de l'énergie cinétique turbulente (m^2 / s^2).

II. Test de maillage (Deuxième : cas angle 10°)

Dans ce cas, l'étude a porté sur l'écoulement turbulent sur Le même profil précédent, le NACA 23012 mais avec un angle 10°.

Les trois graphes ci-dessous montrent respectivement la variation de pression autour d'un aube 2D. Les trois graphes ont été obtenue avec des maillages constitués de 21974, 21491, 20871 Nœuds quadrilatérales. On remarque que n'a pas une déférence importante entre Les trios graphes. Dans ce travail l'étude a été accomplie pour un maillage composé de 21974 Nœuds.

1. Premier test de maillage

Centre de pertinence	lissage	centre d'angle de course	nœuds
Fin	élevé	Fin	21962

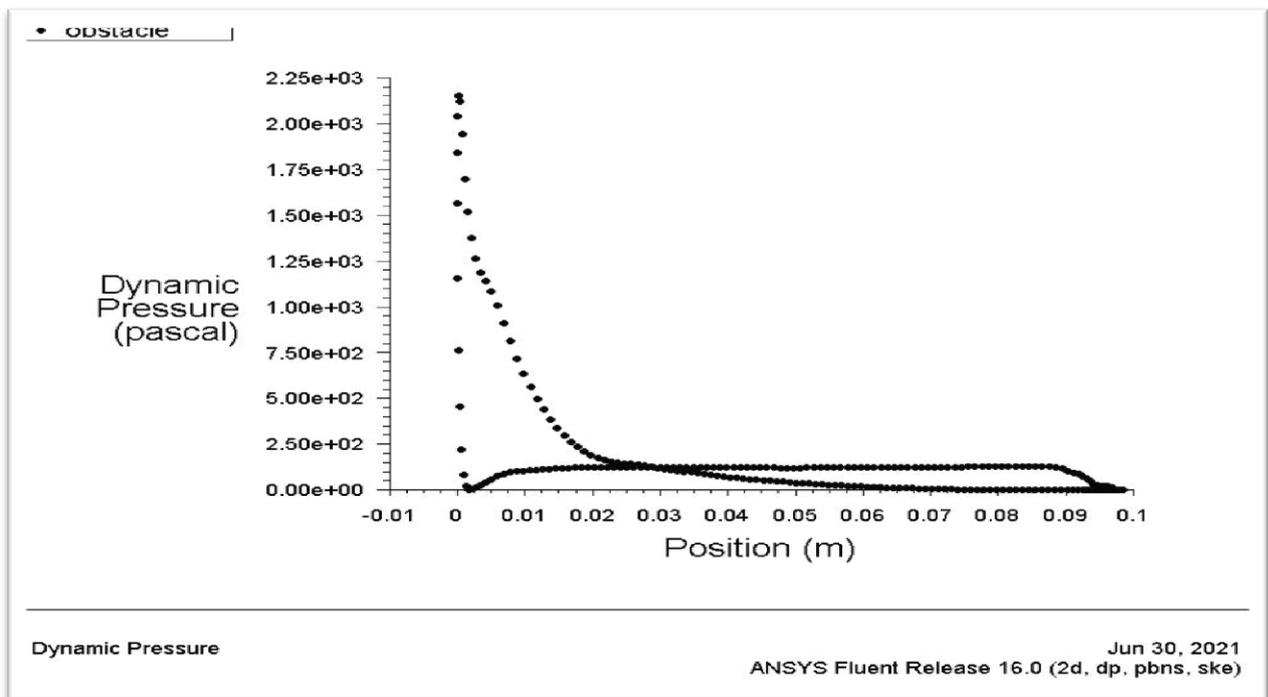


Figure V -6 : Variation de pression autour d'une aube.

2. Deuxième test de maillage

Centre de pertinence	Lissage	centre d'angle de course	nœuds
Moyenne	Moyenne	Moyenne	21491

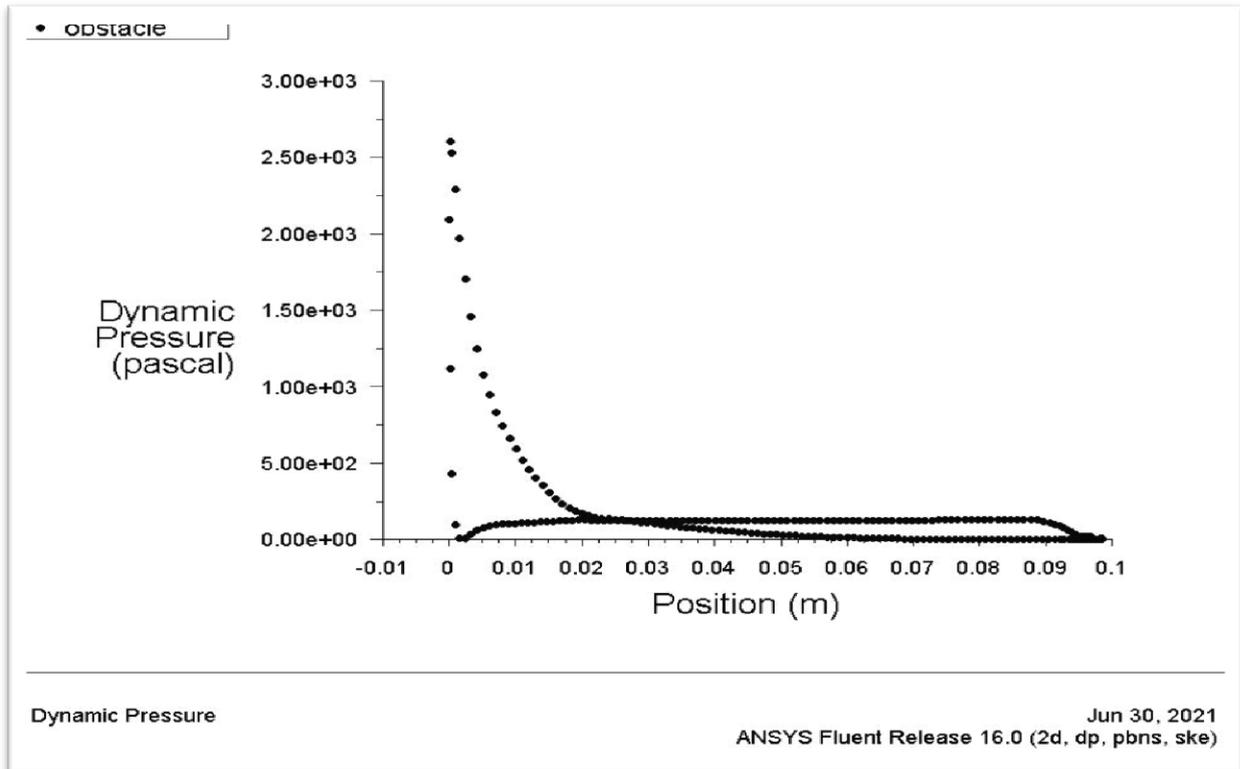


Figure V -7 : Variation de pression autour d'une aube

3. Troisième test de maillage

Centre de pertinence	lissage	centre d'angle de course	nœuds
grossier	faible	grossier	20905

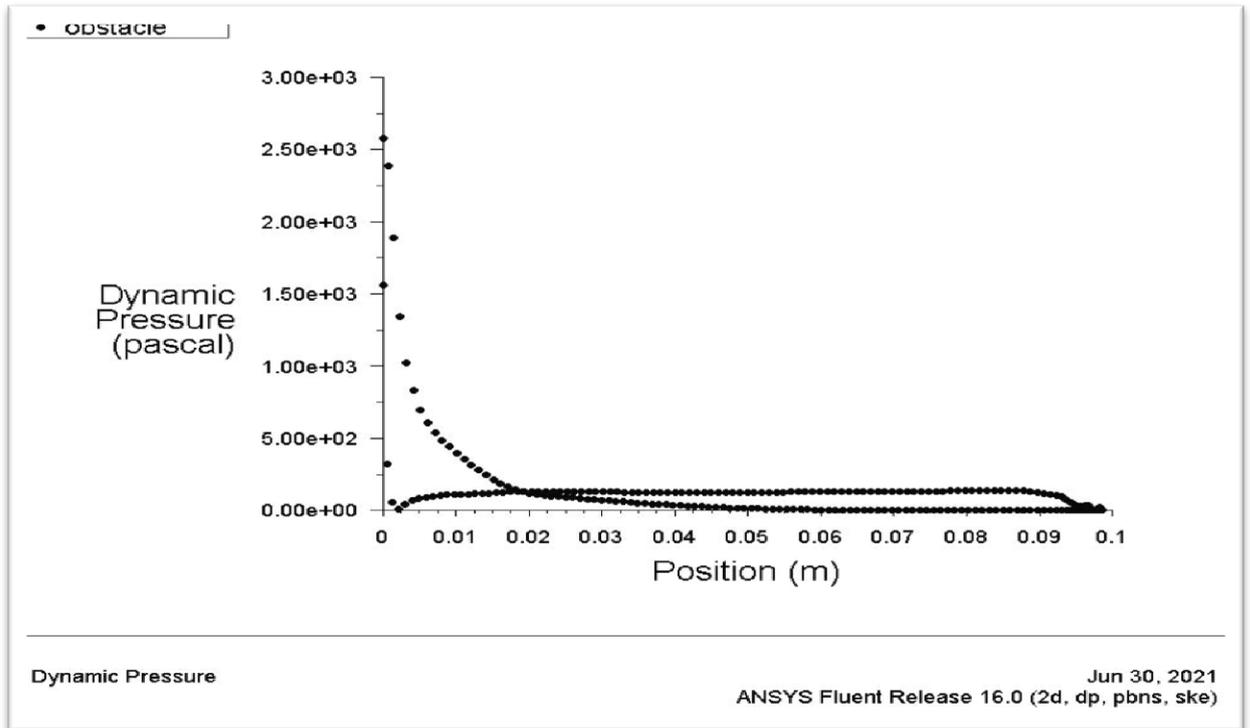


Figure V -8 : Variation de pression autour d'une aube

III. Résultat et discussion

1. Champ de vitesse

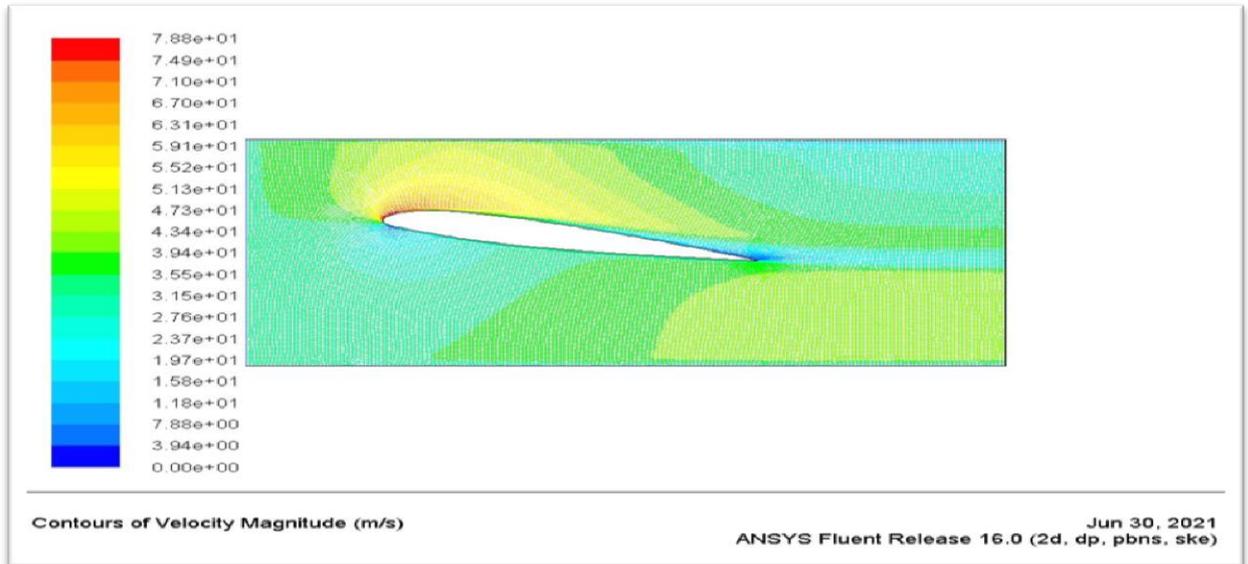


Figure V -9 : Contours de la grandeur vitesse (m/s).

La figure V-9 montre les contours ainsi que le champ de la grandeur vitesse (m/s) autour du NACA 23012 pour un angle de 10 degrés.

On a imposé à l'entrée une vitesse de 35.327 (m/s) comme condition limite, on remarque qu'il y'a des couches fines à l'entrée qui s'épaississent en approchant de notre obstacle (l'aube) et qui reprennent leur forme initiale à la sortie, la vitesse augmente entre l'entrée et l'obstacle en glissement jusqu'à ce qu'elle s'approche du bord d'attaque de l'aube pour atteindre une vitesse de 0 m/s .

- **Extrados:** dans la première partie de l'extrados, on remarque que la vitesse de fluide augmente environ de 74.88 m/s et il commence à diminuer à l'approche du bord de fuite pour atteindre une vitesse de 0 m/s.
- **Intrados:** dans la première partie de l'intrados, on remarque que la vitesse de fluide diminue environ (23.64 m/s) à cause de l'inclinaison d'obstacle (l'aube), on note également qu'il y a une légère augmentation de la vitesse entre la première partie de l'intrados et le bord de fuite environ (27.58 m/s) et il commence à diminuer en se rapprochant du bord de fuite pour atteindre une vitesse de 0 m/s.

2. Champ de pression

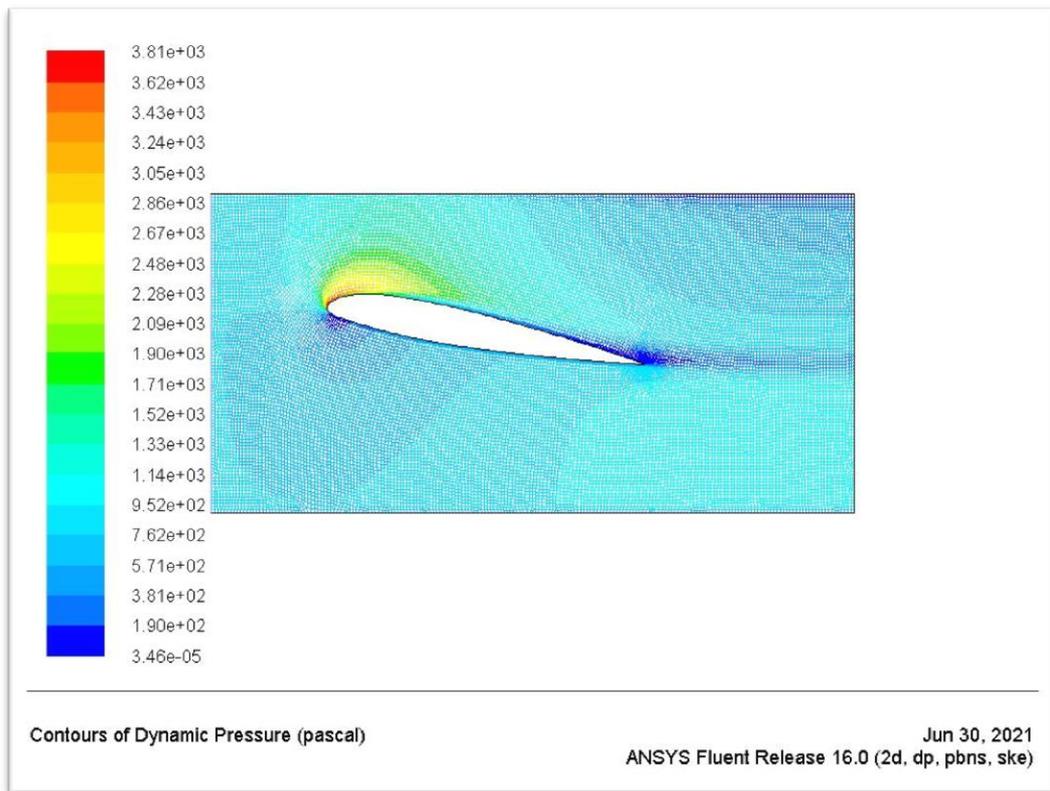


Figure V -10 : Contours de pression statique.

La figure IV-10 montre les contours de pression statique autour du NACA 23012 pour un angle de 10° .

On remarque que la pression à l'entrée subit une légère dépression dans le champ de travail jusqu'à l'approche du bord d'attaque environ 1903 Pascale

- **Extrados:** au glissement sur l'extrados de l'aube, on remarque une forte augmentation de pression environ 3615.7 (Pascal) à cause du glissement du fluide et il commence à diminuer au voisinage du bord de fuite.
- **Intrados:** tout le contraire de l'intrados et du bord de fuite de l'aube on constate que la pression diminue pour ensuite augmenter à la sortie à cause de l'inclinaison de l'aube qui est de 10 degrés.

3. Coefficient de frottement

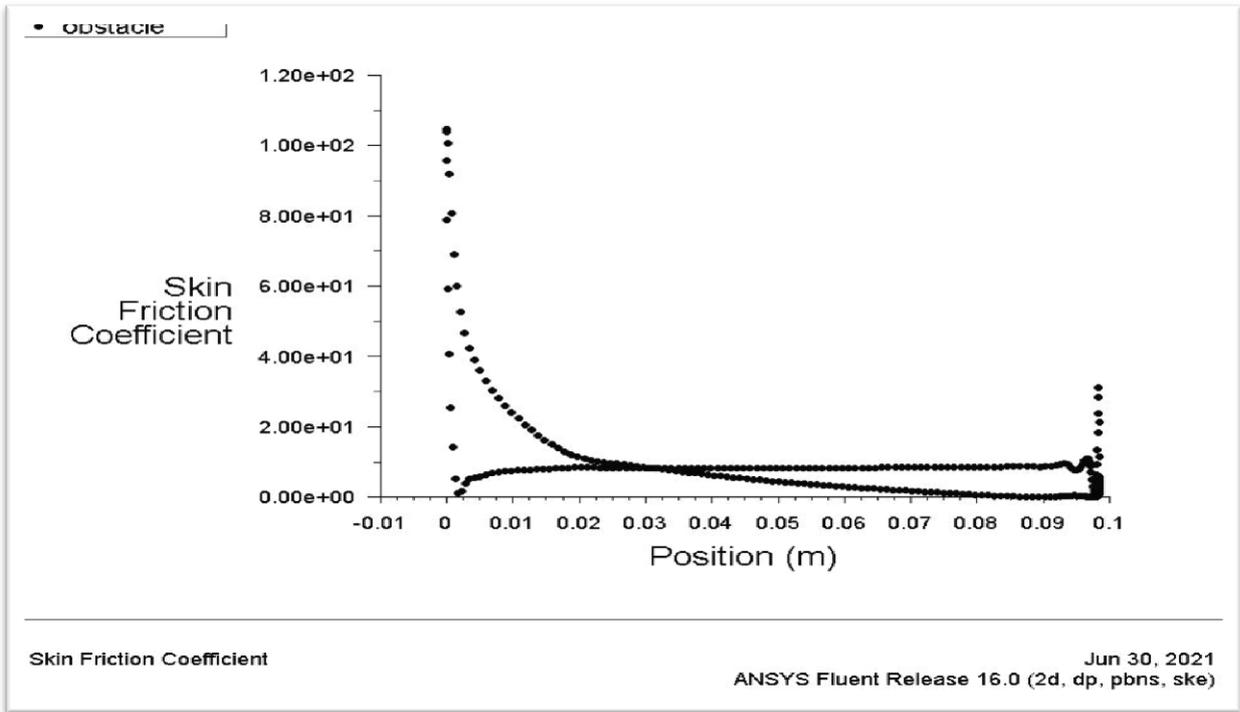


Figure V -11 Coefficient de frottement Autour de l'aube.

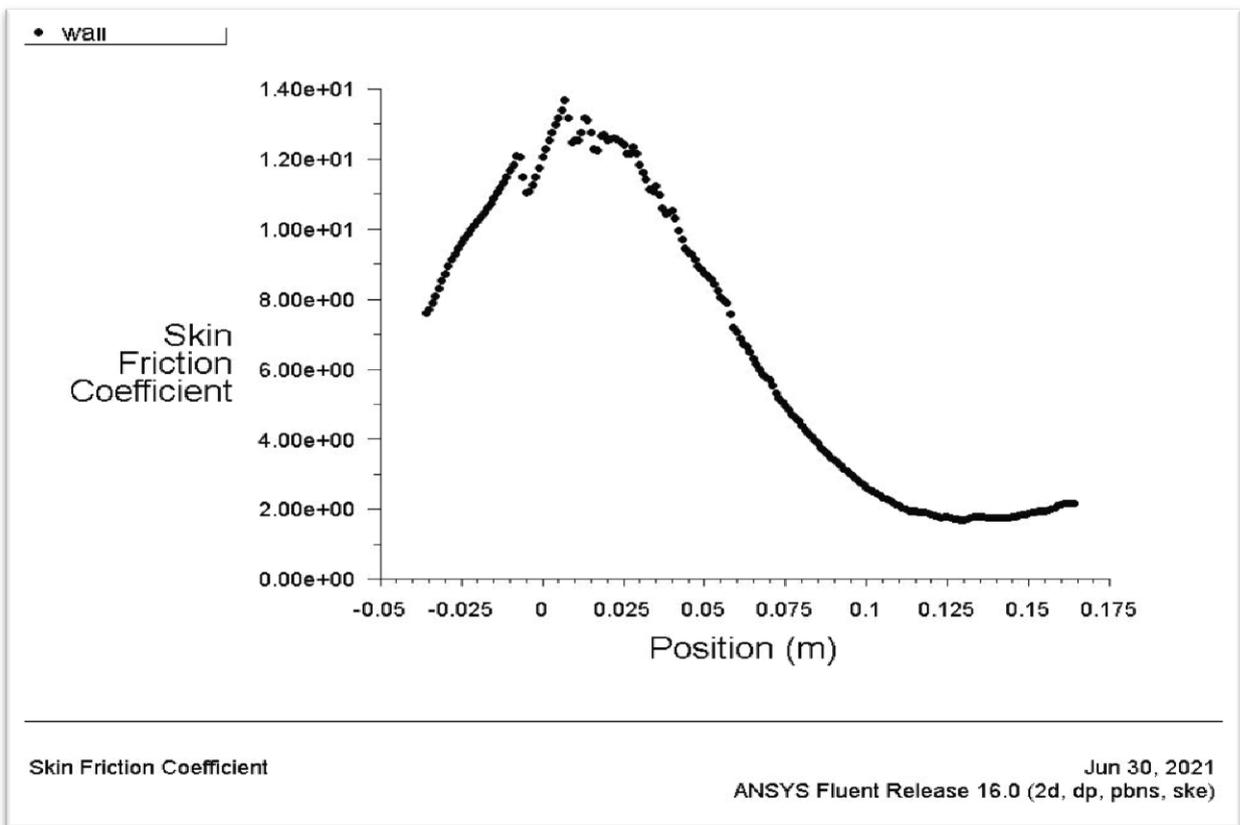


Figure V -12 Coefficient de frottement Au niveau des parois.

Les deux graphes ci-dessus représentent le coefficient de frottement autour d'aube et le coefficient de frottement autour de paroi.

- **Le coefficient de frottement autour d'aube:** on remarque que le coefficient de frottement est minimum dans deux points : lors de la rencontre de l'aube et à la fin de l'écoulement.
On constate aussi dans l'intervalle [0-0.03], les frottements sur l'extrados sont supérieurs à ceux de l'intrados, puis à la position 0.03 m. Les frottements sur l'extrados et l'intrados sont égaux au-delà, c'est-à-dire dans l'intervalle [0.03-0.1], les frottements sur l'extrados sont supérieurs à l'intrados mais moins importants.
- **Le coefficient de frottement autour de paroi :** on constate que les frottements au début de la paroi augmentent jusqu'à atteindre le sommet puis subi une forte baisse jusqu'à la sortie sans pour autant atteindre la valeur zéro.

4. Énergie cinétique turbulente :

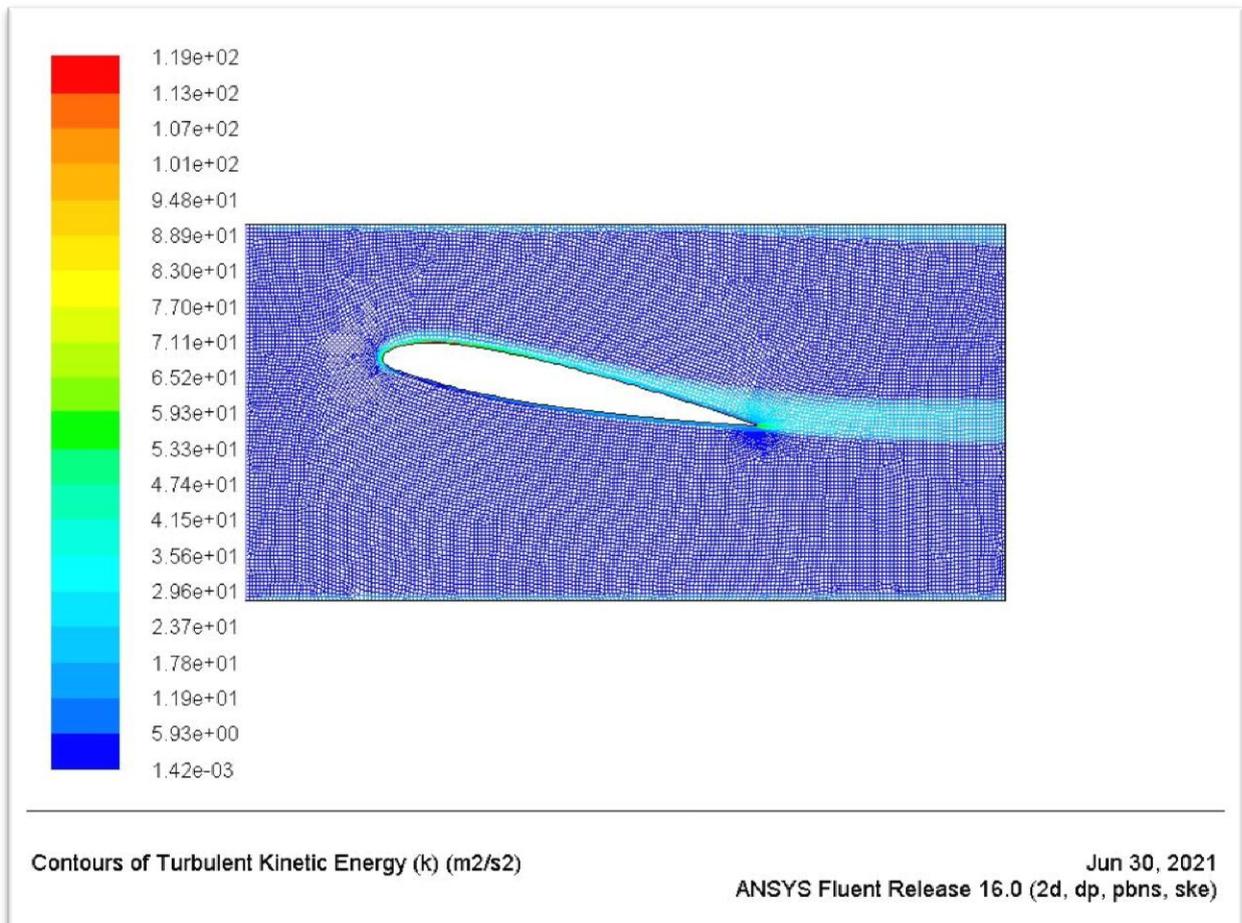


Figure V -13 : Contours de l'énergie cinétique turbulente (m² /s²).

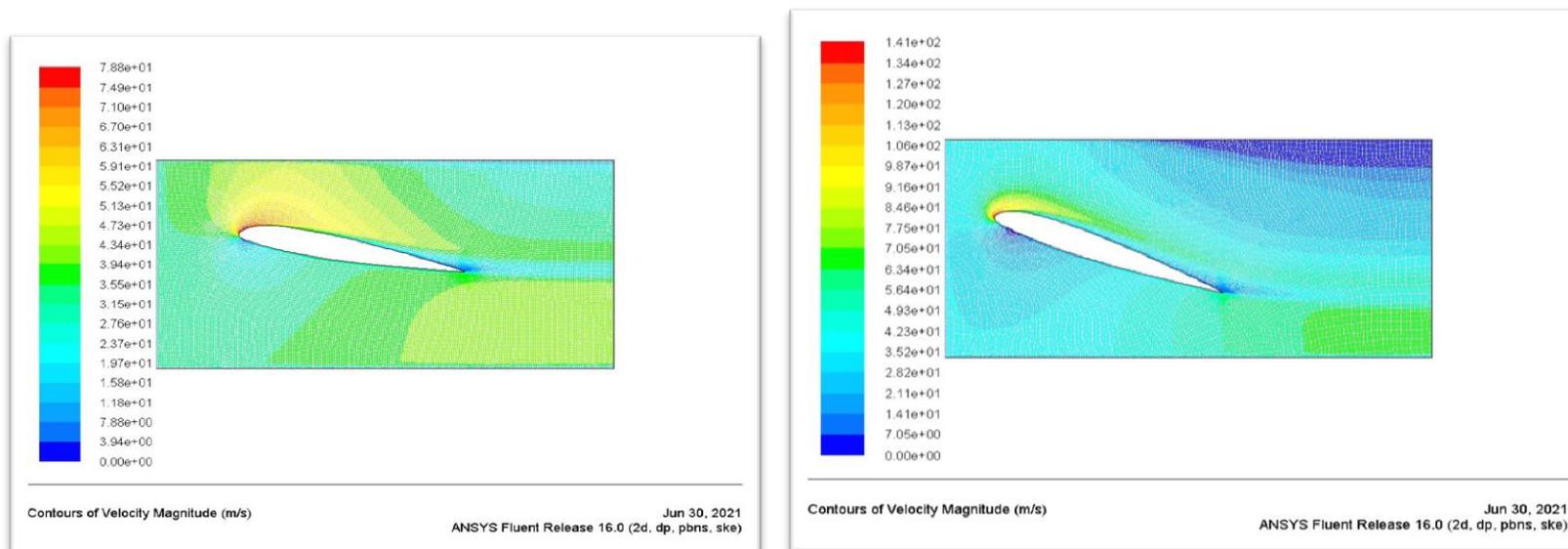
La figure IV-13 montre les contours de l'énergie cinétique turbulente, on constate que la turbulence au niveau du domaine d'application est inférieure à celle de la paroi et celui qui frôle notre obstacle (la turbulence au niveau de l'extrados est plus importante que celle de l'intrados à cause de l'inclinaison de ce dernier).

IV. troisième cas angle 20°

Dans ce cas, l'étude a porté sur l'écoulement turbulent sur Le même profil précédent, le NACA 23012 mais avec un angle 20° pour effectuer une comparaison entre l'angle 10° et l'angle 20°.

1. Comparaison entre le deuxième cas (angle 10°) le troisième cas (angle 20°)

A. Champ de vitesse



Angle 10°

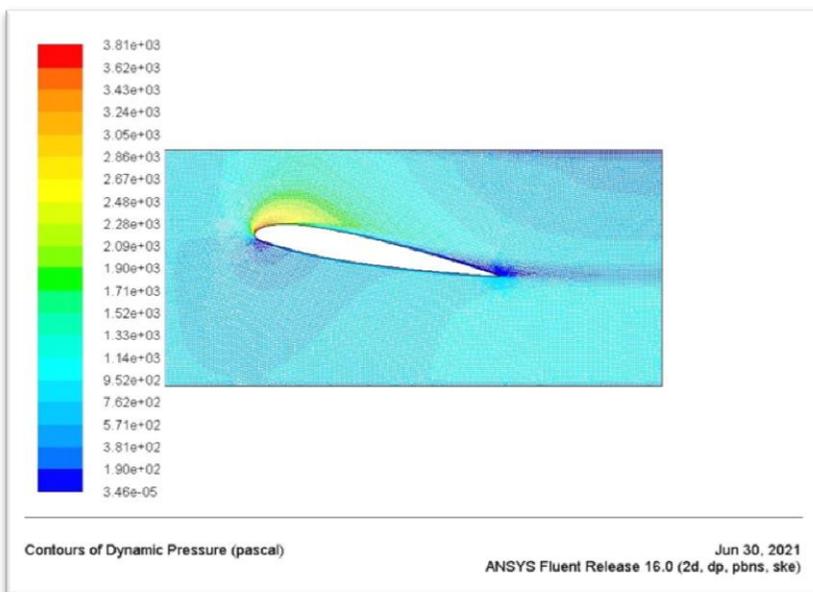
Angle 20°

Figure V -14 : Contours de la grandeur vitesse pour l'angle 10 et 20 (m/s).

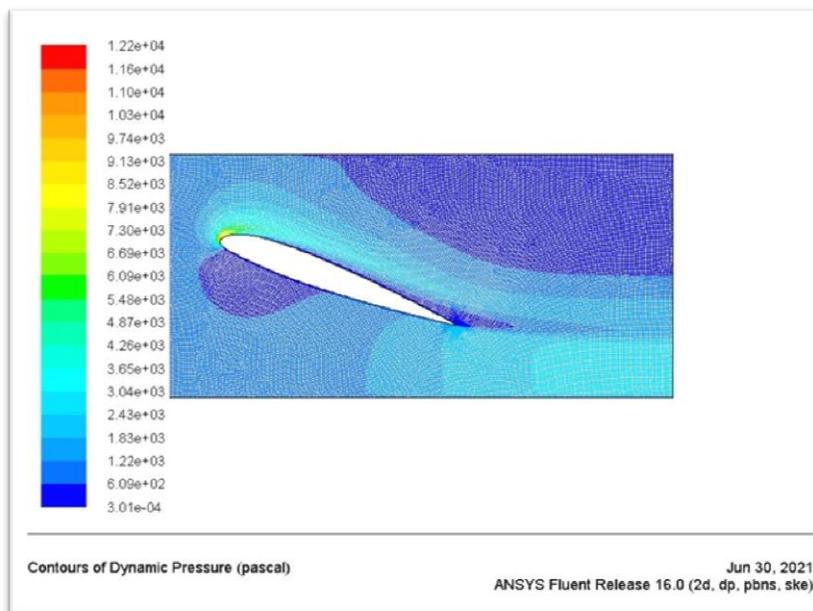
La figure IV-14 représente le champ de vitesse autour du NACA 23012, pour un angle de 10° et de 20°, on remarque qu'on a une différence relativement remarquable dans le domaine de calcul entre les parois et l'obstacle et on retrouve une vitesse plus importante dans cas de l'angle 10° comparé avec l'angle 20°.

Pour le bord d'attaque, on a un champ de vitesse dans le cas de l'angle 10° est plus important que dans le cas de l'angle 20°, puis pour le bord de fuite le champ de vitesses reste pratiquement le même dans les deux angles.

B. Champ de pression



Angle 10°



Angle 20°

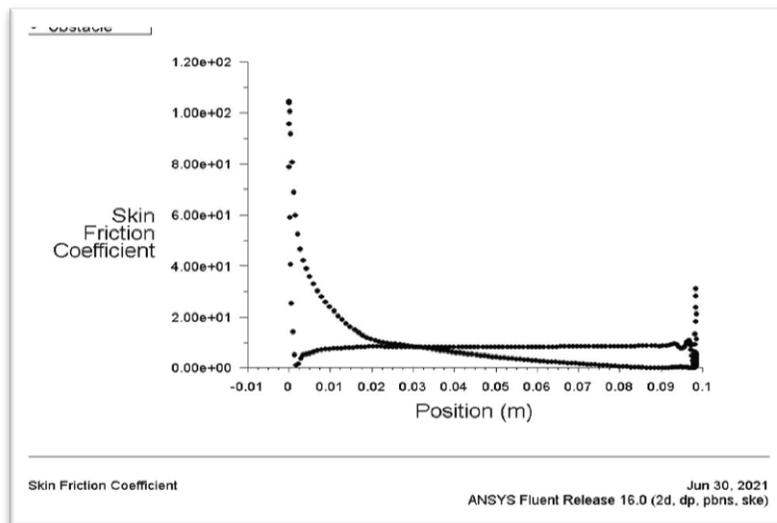
Figure V -15 : Contours de pression pour l'angle 10° et 20° (Pascal).

La figure ci-dessus représente les contours de pression autour du NACA 23012 pour un angle de 10° et de 20°, le champ de pression dans le cas de l'angle 10° est plus important que dans le cas de l'angle 20° entre la paroi et l'obstacle, pour le bord d'attaque la pression est sensiblement plus élevée.

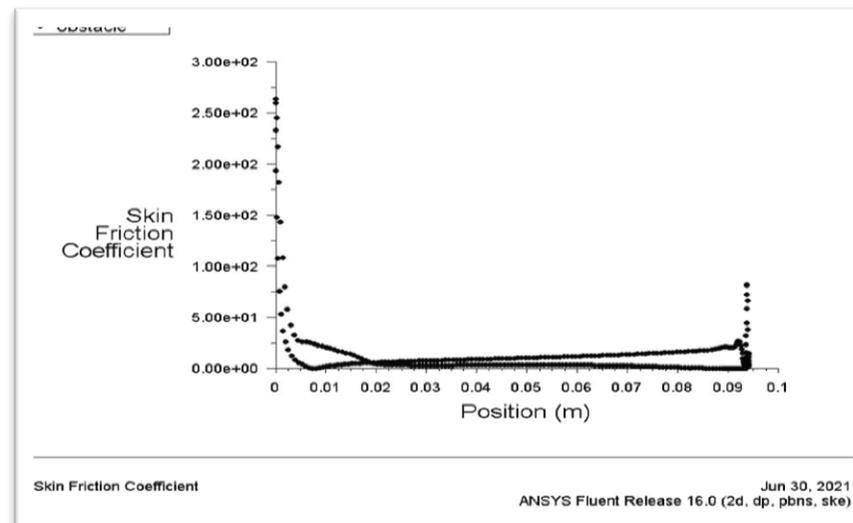
Au niveau de l'extrados, on a presque le même comportement de l'écoulement avec du champ de pression uniforme, toutefois, une différence remarquable au niveau du bord d'attaque (le champ de pression de l'angle 10° est supérieur à celui de l'angle 20°)

C. Coefficient de frottement

A. Autour de l'aube



Angle 10°

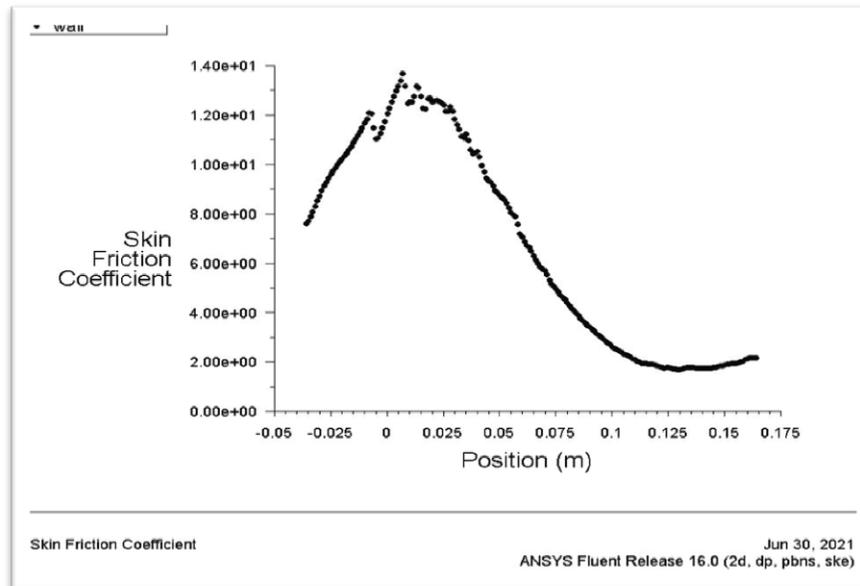


Angle 20°

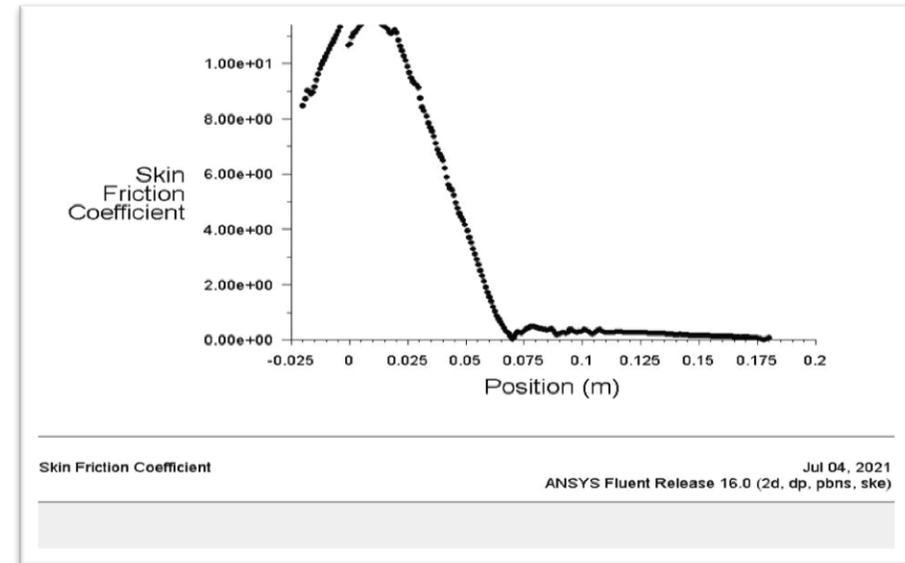
Figure V -16 : Coefficient de frottement autour d'aube.

On a deux schémas qui représentent le coefficient de frottement en fonction de la position autour de l'aube, on remarque au bord d'attaque les deux angles ont presque le même allure puis une variation brusque pour l'intrados et l'extrados dans l'intervalle (0-0.02), puis le graphe de l'angle 10° a un coefficient de frottement supérieur à celui de l'angle 20° à cause de l'inclinaison de l'aube.

B. Au niveau des parois



Angle 10°

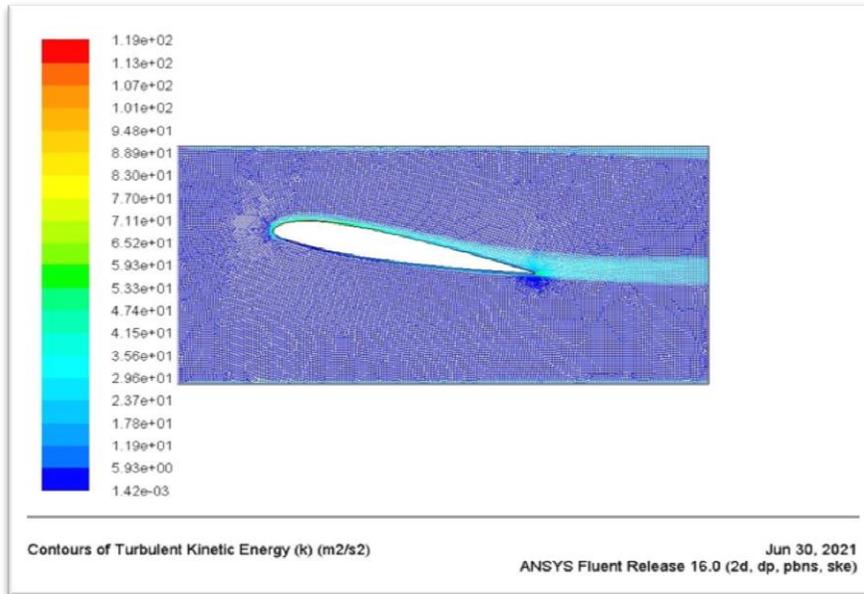


Angle 20°

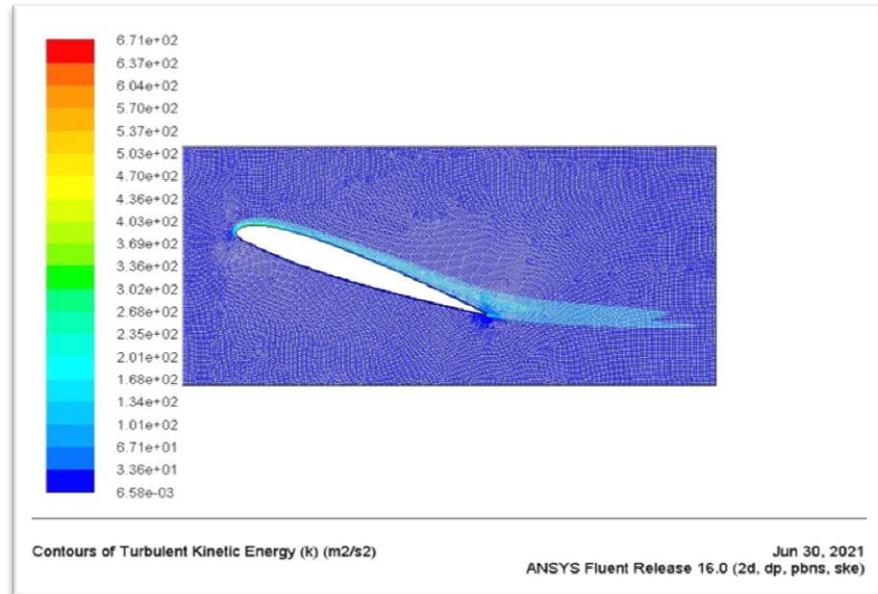
Figure V -17 : Coefficient de frottement autour de paroi.

On a deux schémas représentant le coefficient de frottement en fonction de la position au niveau des parois du domaine. Les résultats sont nettement différents, on observe donc des valeurs très élevées à l'entrée du canal dans les deux angles, puis on a une diminution qui est incontestable pour le cas d'un l'angle 10° sans pour autant atteindre la valeur du frottement nulle, contrairement pour l'angle 20° où on remarque une diminution jusqu'à ne plus avoir de frottement à la position environ 0.175m subissant des perturbations jusqu'à la sortie du canal.

D. Énergie cinétique turbulente



Angle 10°



Angle 20°

Figure V -18 : Contours de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^2).

La Figure IV-18 montre les contours de l'énergie cinétique turbulente autour du NACA 23012 pour un angle de 10° et de 20°, nous remarquons que l'énergie cinétique turbulente est importante sur l'extrados pour les deux cas et qu'il y a une différence au niveau de sillage à cause d'inclinaison d'angle 20°.

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail, on a fait une étude sur l'écoulement turbulent à travers une aube 2D de turbomachine dans trois cas, en utilisant le modèle k- ϵ standard. L'utilisation de l'approche numérique nous a permis non seulement de créer les différentes géométries: angle 0° , angle 10° , angle 20° mais aussi de comprendre les phénomènes aérodynamiques correspondants aux différentes formes géométriques étudiées. La simulation numérique nous a aidé à appréhender le comportement de fluide au mouvement impactant sur l'aube dans lequel on a investi beaucoup d'efforts dans le maillage afin de fournir des résultats de qualité.

La cohérence de l'ensemble de nos résultats pour l'angle 0° est en bonne concordance avec les résultats de la littérature [43] pris comme référence pour la validation.

Une comparaison entre les différents angles (10° , 20°) a été effectuée pour l'obtention des résultats où on a remarqué qu'il y a une différence dans le champ de vitesse et le champ de pression et une différence relativement plus importante en matière de frottements autour de l'aube et sur la paroi. Donc, les résultats trouvés sont satisfaisants pour le champ de vitesse et le champ de pression ainsi qu'au frottement autour de l'aube et sur les parois. L'inclinaison de l'obstacle affecte considérablement le fonctionnement de l'aube.

En fin, il a été montré que la simulation numérique a la capacité de prédire la phénoménologie de fluide en mouvement autour des géométries courbées bien que son apprentissage demande beaucoup de temps.

REFERENCES

- [1] : DOCUMENT DU CITE
- [2] : 951@@.PDF
- [3] : <http://www.rvb15.fr/ressources/moteurs/turbineCombInt.html>
- [4] : <http://www.rvb15.fr/ressources/moteurs/turbineCombInt.html>
- [5] : <https://www.techno-science.net/definition/258.html>
- [6]: LAZHAR BOUCHAOUR. Mémoire de magister en physique 2011
- [7] : <https://www.proxiserive.fr/monchauffagisteprive/conseils-astuces/chaudiere-gaz/entretien-chaudiere/composants-chaudiere/>
- [8] :https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/6562/KrimBelkacem_OuadhiYounes.pdf?sequence=1
- [9] : Steve Deutsch and William C. Zierke (1995) the Measurement of Boundary Layer on a Compressor Blade in Cascade at High Positive Incidence Angle. NASA Contractor Report 179492
- [10]: Nie Hui Rotor/Stator interaction. Computational Fluid Dynamics at the Institute for Jet Propulsion and Turbomachinery. Aachen. 2006.
- [11]: H. G. Lee, J. Y. Yoo Numerical simulation of turbulent cascade flows involving high turning angles. Computational Mechanics 20 (1997) 247±260 Ó Springer-Verlag 1997
- [12]: <http://www.rvb15.fr/ressources/moteurs/turbineCombInt.html>
- [13]:<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/07/TOUCHAL-Larbi.pdf>
- [14]: <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2094/451.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/turbines-a-vapeur/>
- [16] : Mémoire MOUHOUN NOUREDDINE et ZEBDA NOURELISLAM
- [17]: http://vrpg.univskikda.dz/recherchePG/theses_memoires/fac_sciences/infor/memoire_KIai_Sihem.pdf
- [18]: <https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Generateurs-de-vapeur-des-centrales-nucleaires>
- [19]:<https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quun-condenseur-principal-condenseur-de-vapeur-definition/>

- [20]:<https://www.thermal-engineering.org/fr/comment-fonctionne-une-turbine-a-vapeur-definition/>
- [21]:https://www.researchgate.net/publication/306033687_Etude_numerique_du_vrillage_des_aubes_d'une_turbine_a_vapeur_axiale
- [22] : https://www.researchgate.net/publication/305454376_MASTER_II
- [23]:<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2017/12/BOUKHEZNA-MERIEM.pdf>
- [24] : <https://dl.ummo.dz/handle/ummo/4763>
- [25] : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/15137/1/Ms.Gm.Zodi%2BLaouali.pdf>
- [26] : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Turbine-a-gaz.html>
- [27] : <https://dicens.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/turbines-gaz.html>
- [28] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/turbine/>
- [29] : <https://www.3epartner.com/single-post/2015/09/25/cap-sur-le-condenseur-partie-1>
- [30] : <https://docplayer.fr/1770537-Ejecteurs-canmetenergie-juillet-2009.html>
- [31] : JOSÉ ERCOLINO. Modélisation en régime nominal et partiel de l'écoulement méridien dans les turbomachines axiales et helicocentrifuges . Thèse doctorat Le 12 Janvier 2001.
- [32] : Karima HEGUEHOUG ep BENKARA-MOSTEFA, Zoubir NEMOUCHI, Farid GACI CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT TRIDIMENSIONNEL TURBULENT AUTOUR D'UN PROFIL ET À TRAVERS UNE SÉRIE D'AUBES FIXES. Laboratoire d'énergétique appliquée et de pollution département de génie mécanique université Mentouri Constantine Algérie
- [33]: L. Hilgenfeld, P. Stadtmuller, L. Fottner. Experimental investigation of turbulence influence of wake passing on the boundary layer development of highly loaded turbine cascade blades. Unsteady flow in turbomachinery. V 69, 3-4. Pp 229-247. 2002.
- [34] : BEDJEGHIT EL-HOUAS. ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE D'UN ÉCOULEMENT AUTOUR D'OBSTACLES CARRE ET CYLINDRIQUE. Mémoire de MAGISTER En Génie Mécanique Option: ENERGETIQUE APPLIQUEE EN ENGINEERING 2009/2010.
- [35]: Dorney, D. J.; Davis, R. L. Navier-Stokes Analysis of Turbine Blade Heat Transfer and Performance. Theoretical & Computational Fluid Dynamics Group, United Technologies Research Center, East Hartford, CT 06108
- [36] : C. Hah . A Navier-Stokes Analysis of Three-Dimensional Turbulent Flows Inside Turbine Blade Rows at Design and Off-Design Conditions Fluid Mechanics Engineer, Fluid
-

Mechanics and Combustion Branch, Corporate Research and Development, General Electric Company, Schenectady, N.Y. 12301

[37] L. S. Langston. Crossflows in a Turbine Cascade Passage. Associate Professor, Mechanical Engineering Department, University of Connecticut, Storrs, Conn. Mem ASME.

[38] :https://www.theses-algerie.com/1168409126449545/memoire-de-master/universite-abou-bekr-belkaid-tlemcen/simulation-numerique-dun-ecoulement-autour-dune-aube-de-la-turbine-a-gaz?size=n_10_n

[39]: <http://eprints.univ-batna2.dz/254/1/DJOUMIAA%20Sihem.pdf>

[40] :<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/02/SAMI-BOUTERRA.pdf>

[41] : <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/4525>

[42] : LAZHAR BOUCHAOUR . mémoire de magister en physique 2011

[43] : https://fdocuments.fr/document/par-benkara-mostefa-heguehoug-karima-numrique-de-lcoulement-travers-une-cascade.html?fbclid=IwAR2qwTSIOGQjpa_NrRwHY1KYr7pOvck7aay22RvIPokoBXXqL0-k1ucrbs