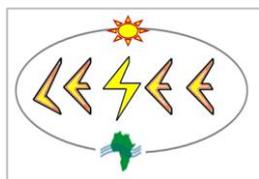




Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering



# MODELISATION ET CARACTERISATION D'UNE TURBINE DE TESLA

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE  
L'ENVIRONNEMENT  
INGENIEUR 2iE - OPTION : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS

Présenté et soutenu publiquement le 14 Juin 2011

Par : **David Blaise TSUANYO**

**Travaux supervisés par :**

**Dr Yao AZOUMAH**

Responsable du LESEE/2iE

&

**M. Bruno BOUTEILLE**

Directeur Général de SIREA- France

**JURY D'ÉVALUATION :**

- **Pr. Didier LECOMTE**
- **Dr. Mariam PABYAM**
- **Dr. Yao AZOUMAH**
- **M. Bruno BOUTEILLE**

**Promotion 2010/2011**

**DEDICACE**

---

*A mon très chère Papa*

*M. David Tsuanyo*

Tu as toujours été ma motivation la plus profonde,  
retrouve ici l'expression de tes efforts.

## **REMERCIEMENTS**

---

Je tiens à commencer ces remerciements en témoignant de ma profonde reconnaissance envers le Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France du Cameroun pour le financement accordé à ma formation.

Je remercie de tout cœur M. Bruno BOUTEILLE pour son parrainage, la direction de ce mémoire et pour m'avoir donné l'occasion de travailler dans le partenariat SIREA/2iE.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. Yao AZOUMAH pour tout le soutien, la confiance, la supervision, l'orientation opportune et la codirection de ce mémoire. Ses conseils et sa bienveillance ont été d'un apport incommensurable tout au long de ma formation.

Je remercie également le Doctorant Daniel YAMEGUEU, les Ingénieurs Henri KOTTIN, Madieumbe GAYE, Innocent COMPAORE et Baptiste LAVIGNE pour les conseils, l'assistance, les soutiens inconditionnels qu'ils m'ont accordés.

J'ai énormément apprécié la disponibilité et les corrections apportées par Alain FOSSI, Eric NOUMI, Magloire NANA, Lassana SANA et Alexandrine EKOUBE: je leur dis sincèrement merci.

Je remercie tous mes collègues de stage pour la bonne ambiance que nous avons partagé. L'entraide et la joie lors des bons et mauvais moments resteront toujours dans mon esprit.

Un grand merci aux familles TSUANYO, NDETEKENG, TCHANGNE, TIMENE, TCHOTSOUA, SAAH et GOUADO pour leur amour et leurs présences incessantes.

Je pense particulièrement au personnel de la Fondation 2iE, à mes camarades de promotion, aux communautés camerounaise et burkinabè, et à tous ceux là qui n'ont cessé de m'encourager et de me motiver : sincères remerciements.

## **RESUME/ABSTRACT**

---

### **RESUME**

Ce mémoire présente les résultats d'une simulation numérique de l'écoulement dans la turbine de Tesla. Cette turbine, classée non conventionnelle car utilisant des disques lisses au lieu des aubes, est décrite principalement par l'écoulement du fluide sur un disque par rapport à une vitesse, une pression ou un débit d'entrée. Elle est spéciale par sa capacité à contourner les principaux inconvénients des turbines conventionnelles. Afin de décrire son comportement, la vitesse de rotation est maintenue constante dans le but de simuler la trajectoire et les contours de vitesses et de pressions du fluide. Certains auteurs caractérisent le régime de son écoulement de transitoire (laminaire et turbulent) ; nous présentons la méthodologie et l'analyse de la version laminaire de ce type de flux en utilisant l'outil CFD « fluent » à partir d'un modèle numérique de l'écoulement entre deux disques en co-rotation en 3D. Une simulation d'un modèle complet d'une turbine de Tesla est limitée par le temps et les ressources informatiques.

**Mots clés** : simulation numérique, aubages, viscosité, couche limite, écoulement.

### **ABSTRACT**

This master thesis presents the results of a numerical simulation of flow in the Tesla turbine. This turbine, rated as unconventional because using smooth disks instead of blades, is described mainly by the flow of fluid onto a disc relatively to a speed, pressure or inlet flow. It is special by its ability to overcome the major drawbacks of conventional turbines. To describe his behavior, the rotational speed is kept constant in order to simulate the trajectory and the contours of velocities and fluid pressures. Some authors characterize his flow regime as transient (laminar and turbulent). We present the methodology and analysis of the laminar version of this type of flow using CFD "fluent" from a numerical model of flow between two co-rotating disks in 3D. A simulation of a complete model of Tesla turbine is limited by time and informatics resources.

**Keywords**: Numerical simulation, blades, viscosity, boundary layer, flow.

## **ABREVIATIONS ET DEFINITIONS**

---

### **ABREVIATIONS :**

**2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

**LESEE** : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

**CFD** : Computational Fluid Dynamics

**CAO** : Conception Assistée par Ordinateur

**CSP** : Centrale Solaire à Concentration

**RAM** : Random Access Memory

**GES** : Gaz à Effet de Serre

**Re** : nombre de Reynolds

### **DEFINITIONS IMPORTANTES :**

**Viscosité** (ou viscosité dynamique) : rapport de la contrainte de cisaillement au taux de déformation associé au cisaillement.

**Viscosité cinématique**: rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique.

**Fluide newtonien** : un fluide est en écoulement newtonien lorsque la relation contrainte-taux de déformation est linéaire et isotrope.

## SOMMAIRE

<b>DEDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUME/ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABREVIATIONS ET DEFINITIONS</b> .....	<b>iv</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
1- Contexte .....	5
2- Problématique : .....	6
3- Objectif et démarche .....	6
4- Présentation du lieu de stage .....	7
<b>Partie 1 : Etude Bibliographique</b> .....	<b>9</b>
<b>I- Les turbines conventionnelles</b> .....	<b>9</b>
1- Généralités .....	9
2- Descriptifs de différents types de turbines conventionnelles.....	10
3- Synthèse Bibliographique. ....	15
<b>II- La turbine de TESLA</b> .....	<b>16</b>
1- Historique.....	16
2- Principe de fonctionnement de la Turbine de TESLA .....	16
3- Etude comparative de la turbine de TESLA avec les turbines conventionnelles.....	19
4- Les limites à l'essor technologique de la Turbine de TESLA .....	20
<b>Partie 2 : Méthodologie de l'étude numérique pour la turbine de Tesla</b> .....	<b>23</b>
<b>I- Le modèle numérique</b> .....	<b>23</b>
1- Les simplifications apportées.....	23
2- Présentation du modèle géométrique .....	24

<b>II- Les équations gouvernant l'écoulement du fluide dans la turbine de Tesla.</b> .....	25
1- Conservation de la masse.....	25
2- Conservation de la quantité de mouvement .....	26
3- Conservation de l'énergie .....	26
4- Les hypothèses simplificatrices .....	27
<b>III- Les paramètres à analyser</b> .....	28
1- Les paramètres d'entrée.....	28
2- Les paramètres de sortie .....	29
<b>IV- La méthode de discrétisation</b> .....	30
1- Briefing des différentes méthodes de discrétisation courantes.....	30
2- Aperçu du code « Fluent ».....	31
3- Aperçu de Gambit .....	31
<b>V- La résolution sous « Fluent »</b> .....	32
1- L'organigramme de résolution adopté.....	32
2- Détails des étapes de résolution .....	33
<b>Partie 3 : Présentation des résultats</b> .....	<b>34</b>
<b>I- Présentation du maillage et calculs.</b> .....	34
1- Maillage .....	34
2- Préparation des calculs et conditions aux limites.....	35
<b>II- Présentation des résultats</b> .....	36
1- Résultats pour utilisation de l'air comprimé comme fluide.....	36
2- Résultats pour l'utilisation de la vapeur d'eau comme fluide.....	40
3- Comparaison avec le modèle 3D de 'Andrés Ladino' [19] .....	43
4- Discussion Générale .....	46
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>48</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>50</b>

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Principe de turbine à action.....	9
Figure 2: Principe de turbine à réaction.....	9
Figure 3: Turbine à vapeur.....	10
Figure 4: principe d'une turbine à Gaz .....	11
Figure 5: principe turbine hydraulique [11].....	13
Figure 6: Une éolienne .....	14
Figure 7: principe de fonctionnement [14] .....	17
Figure 8: 1ère turbine de Tesla [14] .....	17
Figure 9: prototype conçu sous Solidworks.....	18
Figure 10: vue éclatée de la turbine conçue.....	18
Figure 11: modèle simplifié de la turbine de Tesla .....	24
Figure 12: mailles hexa/tétra.....	32
Figure 13: les différentes vues du modèle (sous Gambit) .....	34
Figure 14: zoom et vérification du maillage .....	35
Figure 15: grille de maillage (Gambit) .....	35
Figure 16: courbe de convergence air comprimé .....	36
Figure 17: contour plein d'évolution de la pression .....	37
Figure 18: contour des lignes de pression totale .....	37
Figure 19: contour de la vitesse de l'écoulement .....	38
Figure 20: profil de décroissance de la vitesse.....	38
Figure 21: profil de vitesse radiale .....	39
Figure 22: profil de vitesse tangentielle.....	39
Figure 23: contours de pression vapeur d'eau .....	40
Figure 24: contours plein de la pression vapeur d'eau.....	40
Figure 25: contours de la vitesse (vapeur d'eau) .....	41
Figure 26: contours de vitesse vapeur d'eau .....	41
Figure 27: composante tangentielle de la vitesse .....	42
Figure 28: contours de pression à 40.000tr/min .....	42
Figure 29: grille du modèle à 2 injecteurs .....	43
Figure 30: grille de Andrés [19].....	43
Figure 31: contour de pression.....	44

Figure 32: contour de pression "Andrés"[19] .....44  
Figure 33: vitesse tangentielle à 600m/s.....45  
Figure 34: contours de pression à 600m/s .....45

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

Tableau 1: Centrales électriques suivant le type de fluide.....10  
Tableau 2: avantages et inconvénients des turbines à vapeur .....11  
Tableau 3: avantages et inconvénients des turbines à Gaz .....12  
Tableau 4: avantages et inconvénients des turbines hydrauliques .....13  
Tableau 5: avantages et inconvénients de l'éolienne .....14  
Tableau 6: caractéristiques des fluides utilisés .....28

## INTRODUCTION

---

### 1- Contexte

Facile à transporter et à convertir, l'électricité est de loin la forme d'énergie la plus indispensable au développement économique, et ce dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne [1]. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse [2]. Et pourtant le taux d'accès à l'électricité reste de nos jours qu'à 25% pour les Africains [3].

Le développement des infrastructures d'alimentation électrique constitue donc un élément clé de la réduction de la pauvreté et contribue de manière significative à l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Les réformes engagées en Afrique ces dernières années dans la production d'électricité sont certes prometteuses, mais sont confrontées à une difficulté majeure : la faiblesse, voire le manque de financement de grands projets nationaux et régionaux liés à la mobilisation des fonds privés souvent difficiles malgré l'aide des partenaires au développement [1], [2]. Un récapitulatif des coûts des projets de construction des centrales thermiques actuellement en cours en Afrique montre un ratio de 0.4 à 1.3 milliards de francs CFA par mégawatt (voir annexe1). Ce ratio coût /puissance paraît encore plus élevé lorsque la puissance à produire décroît. Devant les multiples inconvénients liés au transport d'électricité, et vu la répartition géographique fortement décentralisée des populations africaines, l'approche de production d'électricité par proximité (100-1000kW) reste un axe à explorer.

Cependant, la méthode la plus courante pour produire des quantités d'électricité allant de plusieurs kilowatts à plusieurs mégawatts est d'utiliser un générateur, convertissant une énergie mécanique en une tension alternative. Cette énergie mécanique est obtenue via des turbines. Mais, dans les projets de construction des centrales électriques, des études réalisées montrent que, hormis les turbines hydrauliques, les turbines à elles seules absorbent près de 10 à 15% du coût du projet (voir annexe1), d'où la nécessité de réfléchir à une nouvelle approche et/ou conception d'autres types de turbines supportables en termes de coût, de durée de vie, de performance, et adapté à la production autonome d'électricité.

## **2- Problématique :**

Suivant le type et la taille de la centrale électrique à construire, plusieurs variantes de turbines sont conçues et développées dans l'unique but de faciliter la production en électricité. La turbine sans aubages, inventée à l'aube du 20ème Siècle par Nikola TESLA apparaît comme une solution plus économique [4]; sa fabrication serait plus simple (donc moins coûteuse) que celle des turbines actuelles. Son essor a été pour le moment freiné par des facteurs techniques et historiques que nous décrirons en détail dans la suite. A ce jour, cette turbine n'est pas produite industriellement. Nous nous posons les questions suivantes :

- 1. Quelles différences de fonctionnement cette turbine a-t-elle comparativement aux turbines conventionnelles ?**
- 2. Quels sont les principes physiques (phénomènes, paramètres et équations) qui régissent le fonctionnement de cette turbine ?**
- 3. Comment peut-on modéliser cette turbine afin de maîtriser l'influence de chaque paramètre physique sur le rendement ?**

## **3- Objectif et démarche**

En répondant aux questions posées dans la problématique, l'objectif de cette étude qui est de mettre en évidence les caractéristiques et les avantages de la turbine de Tesla à partir des paramètres et des principes physiques influençant son fonctionnement sera atteint. Il est donc question de simuler le fonctionnement de la turbine à base d'un modèle mathématique et d'en ressortir les caractéristiques de fonctionnement.

Pour cela, le travail est subdivisé en plusieurs étapes successives:

**1<sup>ère</sup> étape** : Analyse critique des différentes turbines conventionnelles existantes par énumération de leurs avantages et inconvénients suivi d'une présentation des généralités sur la turbine de Tesla.

**2<sup>ème</sup> étape** : Enumération des paramètres d'influence et des principes physiques de la turbine de Tesla ; et présentation de la méthodologie de l'étude numérique.

**3<sup>e</sup> étape** : Etude numérique de l'écoulement du fluide dans la turbine via un code de CFD approprié (Fluent) et analyse des modèles de fonctionnement obtenus.

#### **4- Présentation du lieu de stage**

Effectué en cinq mois au Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE), notre d'étude entre dans le cadre d'un partenariat entre le groupe SIREA-France et la Fondation 2iE à travers le LESEE.

##### **a- Le LESEE**

Créé en novembre 2008 et géré depuis lors par le Docteur Yao AZOUMAH, le LESEE fait partie des six laboratoires de recherche de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Fondation 2iE). Il dépend de l'unité thématique d'enseignement et de recherche Génie Energétique et Industrielle. L'objectif scientifique du LESEE est de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergie électrique et thermique en Afrique. Les activités du LESEE se regroupent en quatre axes de recherche :

- Evaluation précise et continue de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique
- Etude des centrales solaires à concentration
- Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaires PV/thermique (basse température)
- Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques

L'équipe actuelle de recherche au LESEE est composé de 03 enseignants chercheurs, 04 doctorants, 06 ingénieurs chercheurs et une douzaine de stagiaires.

##### **b- Le groupe SIREA**

Créé en 1994 par Bruno BOUTEILLE à Castres/France, avec un bureau d'études en électronique et automatisme associé avec une entreprise d'électricité industrielle (Belot) reprise en 1995, le groupe SIREA a depuis lors développé une gamme de produits et de services dans les domaines de l'électricité, de l'automatisme et de l'informatique avec intégration en 2008 des solutions métiers dans la santé, l'énergie, l'eau, l'environnement, et les carrières.

- **Services:** SIREA propose des études spécifiques, des conduites de chantier, des projets d'étude, des formations, des réalisations et mises en œuvre d'installations électriques et automatisées, une assistance technique, des supervisions et conduites de systèmes, des mises en service sur site, des services d'optimisation d'installation et de mise en conformité, une expertise dans les services de l'ingénierie électrique et des solutions techniques novatrices alliant qualité et performances.

- **Produits:** SIREA assure le développement et la réalisation de systèmes destinés aux intégrateurs, constructeurs et utilisateurs d'équipements d'automatismes. Ce savoir-faire, issu de longues années d'expérience dans le milieu des automatismes industriels, allié à une parfaite maîtrise de l'électronique et de l'informatique, permet à SIREA de proposer des produits dont les caractéristiques de robustesse, d'intégration, de facilité de mise en œuvre et d'évolutivité constituent des critères fondamentaux tels des convertisseurs de mesures électriques, des contrôleurs de mesures électriques, des contrôleurs d'automatismes programmables, des passerelles de communications internet, des serveurs de supervision par internet, des capteurs RFID...

## Partie 1 : Etude Bibliographique

Afin de mieux appréhender les performances technico-économiques de la turbine de Tesla, un état des avantages et des inconvénients des différentes turbines existantes a été exploré. Une présentation succincte des différents types de turbines, leur système de fonctionnement et une synthèse des avantages et inconvénients selon la littérature fait l'objet de cette partie.

### I- Les turbines conventionnelles

#### 1- Généralités

Hormis les centrales photovoltaïques, la génération d'électricité, la plupart du temps, est assurée par un alternateur entraîné en rotation par une turbine ou dans quelques cas rares par un moteur Diesel stationnaire. Une **turbine** est un dispositif rotatif (turbomachine) destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre. L'énergie du fluide, caractérisée par son débit et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur (ou tout autre récepteur mécanique rotatif). La conception des turbines conventionnelles est fondée sur deux technologies (voir figure 1&2) : on distingue les turbines à action qui exploitent l'énergie cinétique du fluide moteur et les turbines à réaction qui exploitent l'énergie potentielle due à la pression ou au poids du fluide.

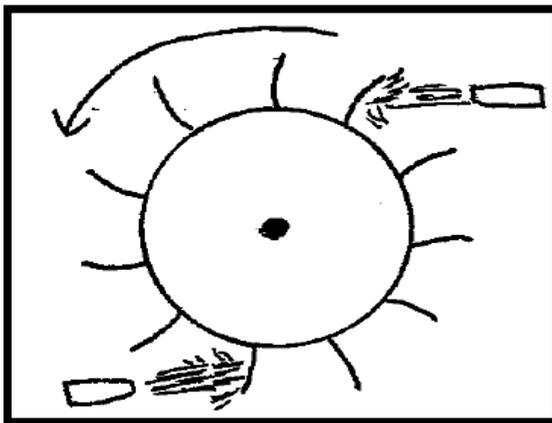


Figure 1: Principe de turbine à action

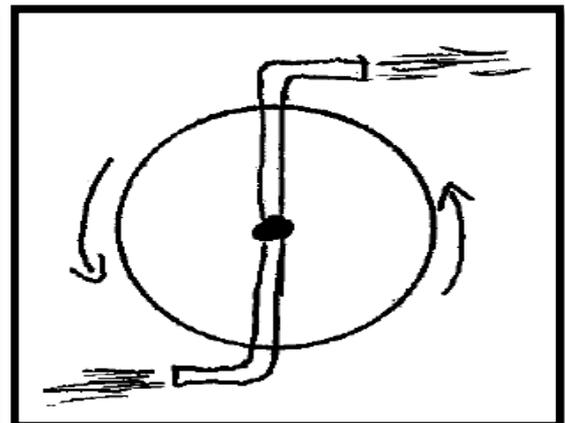


Figure 2: Principe de turbine à réaction

Une turbine est constituée de deux organes essentiels : un distributeur fixe (stator) dont le rôle principal est de donner une orientation convenable aux filets fluides qui pénètrent dans le rotor ; une roue mobile (rotor) munie d'ailettes ou d'augets et dont le rôle est de transformer l'énergie du fluide en énergie mécanique. Certaines turbines sont équipées d'un

troisième organe appelé diffuseur, destiné à récupérer, sous forme d'énergie de pression, l'énergie cinétique résiduelle du fluide à la sortie de la roue.

Selon le fluide utilisé [5], on distingue plusieurs types de turbines, et le type de turbine définit alors le type de centrale électrique. Le tableau 1 suivant les récapitule :

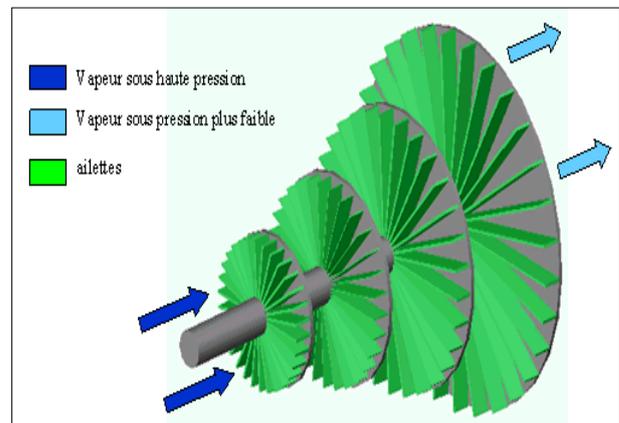
**Tableau 1:** Centrales électriques suivant le type de fluide.

Fluide	Type de turbine	Type de centrale	Cycle thermodynamique
Vapeur	Turbine à vapeur	Centrale thermique (à combustion fossile, nucléaire, solaire à concentration, géothermique)	RANKINE Hirn /Hirn avec surchauffe
Eau	Turbine Hydraulique	Centrale Hydroélectrique Centrale marémotrice...	Pas de cycle
Gaz	Turbine à Gaz	Centrale à Gaz	Joule- Brayton
Air	Eolienne	Centrale éolienne	Pas de cycle

## 2- Descriptifs de différents types de turbines conventionnelles

### 2.1- Turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine [6]. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. En fait, la vapeur d'eau surchauffée se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique avant d'être détendue et condensée au contact



**Figure 3:** Turbine à vapeur

de la source froide sous vide partiel. Dans la turbine à vapeur, la vapeur peut agir par son énergie cinétique (turbine à action) ou par détente dans les aubes du rotor (turbine à réaction). Parmi les turbines à vapeur à action, on distingue la turbine de Laval, dans laquelle la vapeur se détend avant de venir en contact avec les aubes, la turbine Curtis, à plusieurs étages de pression et à détentes multiples, et la turbine Rateau, multicellulaire, dont les aubes sont fixées à la périphérie des disques calés sur l'arbre. La turbine Parsons est une turbine à

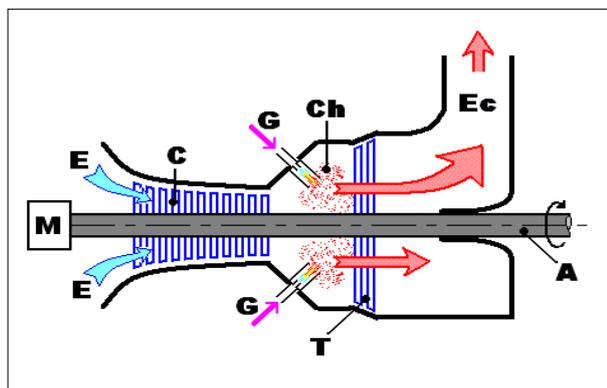
réaction comportant plusieurs étages de pression; elle comprend une succession de couronnes fixes munies d'aubages directeurs alternant avec des couronnes mobiles à aubes.

**Tableau 2:** avantages et inconvénients des turbines à vapeur

TURBINE A VAPEUR		
Variétés	Avantages	Inconvénients [6]
Turbine de Laval	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moteur à combustion externe (libre alimentation en vapeur)</li> <li>Mieux adapté en dessous de 10MW [7]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usinage très complexe des aubes</li> <li>Réalisation contraignantes (acier fortement allié Cr-Ni-Va, aubes de longueur limitée, contraintes chimiques, mécaniques et thermiques)</li> <li>Coût très élevé malgré les économies d'échelles</li> <li>Complexité des installations</li> <li>Important débit d'eau de refroidissement</li> <li>Possibilité de consommation des énergies fossiles</li> </ul>
Turbine de Curtis		
Turbine Râteau		
Turbine Parsons		

### 2.2- Turbine à gaz

La turbine à gaz (ou turbine à gaz de combustion) est un moteur thermique réalisant



**Figure 4:** principe d'une turbine à Gaz

les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu [8].

Le compresseur (C), constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur (E), simplement filtré. Le gaz (G), ou un combustible liquide pulvérisé, est injecté dans la chambre de combustion (Ch) où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant les pales de la turbine (T), où l'énergie thermique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée (Ec) à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre (A) qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'une machine réceptrice (pompe, alternateur) accouplée à son extrémité droite. Pour la mise en route, on

utilise un moteur de lancement (**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.

Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de Joule-Brayton [9], comprenant successivement et schématiquement:

- Une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique;
- un chauffage isobare pareil à celui d'un moteur Diesel;
- une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique ;
- un refroidissement isobare.

Le rendement est le rapport du travail utile (travail de détente – travail de compression) à la chaleur fournie par la source chaude. Le rendement théorique croît avec le taux de compression et la température de combustion.

**Tableau 3: avantages et inconvénients des turbines à Gaz**

TURBINE A GAZ		
Variétés [10]	Avantages [10]	Inconvénients [6]
<p>De nos jours, les turbines à gaz sont généralement transformées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☐ soit en un cycle combiné : récupération de la chaleur d'échappement pour monter un cycle de Rankine</li> <li>☐ soit en cogénération : récupération de la chaleur des gaz d'échappement pour approvisionner en eau chaude.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Aptitude à la récupération de chaleur</li> <li>☐ Démarrage rapide</li> <li>☐ Aptitude aux démarrages/arrêts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ le compresseur est consommateur d'énergie mécanique produite</li> <li>☐ la tenue des matériaux (résistance mécanique des aubages)</li> <li>☐ Emissions des GES polluants (NOx, SO2, CO...)</li> <li>☐ Coût d'usinage élevé</li> <li>☐ Maintenance et sécurité accrue</li> </ul>

### 2.3- Les turbines hydrauliques

L'eau agit par son poids et sa vitesse sur toute la surface du rotor. Dans les turbines hydrauliques à action, les pressions d'entrée et de sortie sont les mêmes ; dans les turbines à réaction, la pression de sortie est inférieure à la pression d'entrée. On distingue plusieurs variétés de turbines hydrauliques [11] : La turbine Pelton qui est une turbine à action employée pour les hautes chutes et les faibles débits. Les augets de la roue mobile sont en forme de  $\omega$  et le système de

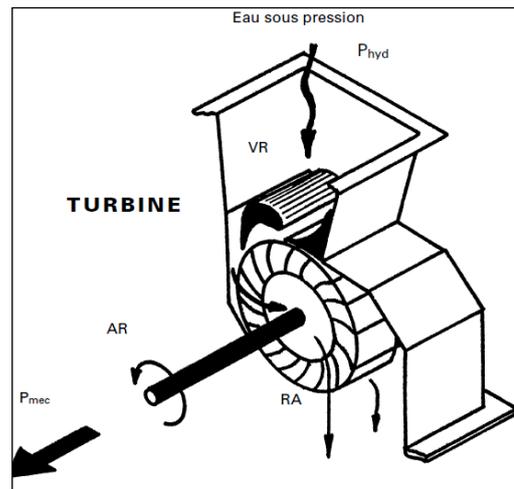


Figure 5: principe turbine hydraulique [11]

distribution est actionné par des servomoteurs. La turbine Francis, à réaction est utilisée pour les moyennes et les basses chutes. Le distributeur est formé de deux flasques plans et parallèles entre lesquels se trouvent les aubes directrices mobiles permettant d'ajuster le débit. La turbine hélice et la turbine Kaplan sont employées pour les basses chutes (5 à 15 m) et sont dotées d'une roue en forme d'hélice dans laquelle l'eau s'écoule parallèlement à l'axe. Dans la turbine Kaplan, les pales de l'hélice sont orientables.

**Tableau 4: avantages et inconvénients des turbines hydrauliques**

TURBINE HYDRAULIQUE [11]		
Variétés	Avantages	Inconvénients
Turbine Pelton	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Non consommateur d'énergie fossile</li> <li>☐ Rendement élevé (80-95%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Technologie de calculs et de fabrication des pales très complexes.</li> <li>☐ Risques de corrosion.</li> </ul>
Turbine Turgo		
Turbine Banki		
Turbine Francis		
Turbine Kaplan		
Turbine Ossberger	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Construites sur mesure (Hauteur chute et débit)</li> <li>☐ Rendement (80-86%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☐ Complexité du mécanisme</li> <li>☐ Coût élevé de fabrication</li> </ul>

2.4- Les éoliennes (turbines à vent)

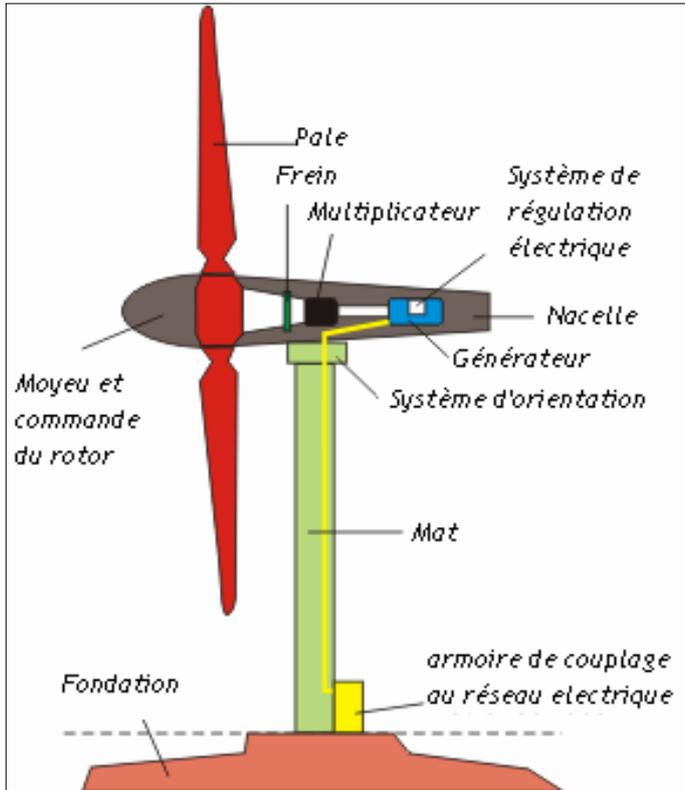


Figure 6: Une éolienne [6]

Il s'agit d'une turbine à pales transformant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique. Une technologie encore en pleine expansion. Les critères de choix d'une implantation éolienne dépendent de la taille, de la puissance et du nombre d'unités. [6] Ils nécessitent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés...), terrain approprié, etc.

Tableau 5: avantages et inconvénients de l'éolienne

EOLIENNE [12]		
Variétés	Avantages	Inconvénients
Plusieurs variétés : <input type="checkbox"/> Classiques à pales <input type="checkbox"/> Savonius <input type="checkbox"/> Darrius <input type="checkbox"/> Windside <input type="checkbox"/> A voileure ...	<ul style="list-style-type: none"> <li>☑ aucune consommation d'énergie fossile, donc aucune émission de GES</li> <li>☑ produit de déchets en grande partie recyclable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☑ Nuisances sonores accrues (généralement plus de 55 dB)</li> <li>☑ Perturbation des radars et télévisions</li> <li>☑ Dangers pour les animaux /oiseaux</li> <li>☑ Très coûteux</li> <li>☑ Très influents sur la santé et le climat.</li> </ul>

### **3- Synthèse Bibliographique.**

Malgré les grands avantages tels la combustion externe des turbines à vapeur, la non-consommation des énergies fossiles par les turbines hydrauliques et éoliennes, un regard sur l'ensemble des turbines conventionnelles nous permet de synthétiser les inconvénients importants et presque communs à toutes. Ces inconvénients sont rangés suivant les difficultés de fabrication et les difficultés de fonctionnement.

#### **❖ les difficultés de fabrication**

La réalisation des turbines conventionnelles nécessite le recours à des aciers fortement alliés (Cr-Ni-Va) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion). Ces contraintes limitent le diamètre lors de la conception et donc le débit du fluide. Ainsi des aubes de plus d'un mètre de longueur posent déjà de sérieux problèmes de réalisation. De plus, l'hétérogénéité radiale des vitesses impose une incidence variable de l'aube qui présente alors des formes ambiguës dont l'usinage est complexe.

#### **❖ Les difficultés de fonctionnements**

Dans le fonctionnement des dispositifs habituels (Laval, Parsons, Curtis, Pelton, Kaplan...), le fluide abandonne son énergie aux ailettes motrices par choc, par pression ou par réaction. De toute façon, cette transformation s'accompagne d'un changement brusque dans la vitesse ou la direction du fluide, il en résulte des chocs et des vibrations dans la turbine, en même temps que des remous dans le fluide, tous des phénomènes inutilement destructeurs de l'énergie mécanique. A tous ces défauts s'ajoutent les coûts élevés de production et d'entretien des machines, les difficultés d'accès à l'énergie fossile et à la gestion des GES pour les turbines à gaz.

### **Conclusion partielle**

Au vu de toutes ces difficultés, Nikola TESLA ingénieur électricien et mécanicien américain d'origine croate, né le 10 Juillet 1856 a mis au point en 1910, une turbine dénommée : **la turbine sans aubages de TESLA**. La partie suivante présente cette turbine en partant de son historique, son principe de fonctionnement, les facteurs ayant limités son envol technologique depuis lors jusqu'aux enjeux actuels cette turbine spéciale.

## **II- La turbine de TESLA**

### **1- Historique**

Nikola Tesla a déposé au cours de sa vie une trentaine de brevets. La plupart de ses travaux concernaient les moteurs électriques, les alternateurs et la transmission de la puissance électrique. Cependant, au début du vingtième siècle, plus précisément en 1910, il a déposé deux brevets sur les turbomachines: le premier concernait le compresseur d'air à disque et le second une turbine sans aubages. Il proposait ainsi une alternative aux turbines conventionnelles (à vapeur, au gaz...) qui étaient à cette époque encore en cours de développement [13]. Il ne faut pas oublier en effet que les turbines à gaz ont été mises au point principalement après la seconde guerre mondiale pour les besoins de l'aviation militaire. Les turbines à vapeur ont été développées au début du vingtième siècle. Nikola TESLA espérait pouvoir contourner toutes les difficultés liées à ces turbines [4].

### **2- Principe de fonctionnement de la Turbine de TESLA**

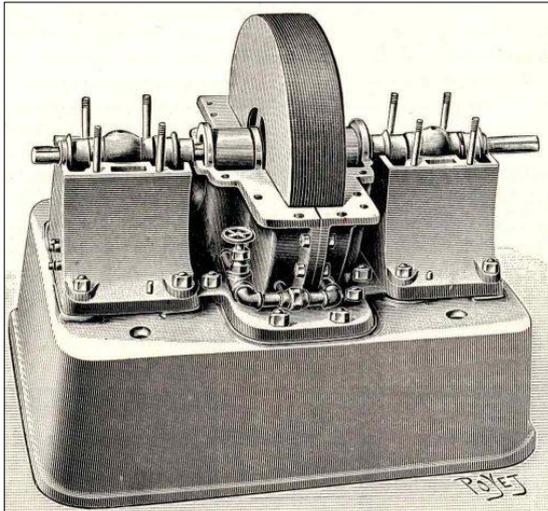
#### **2.1- Ecoulement du fluide**

Tesla, pour contrecarrer les perturbations mécaniques des turbines conventionnelles, cherche à rendre aussi graduels que possible les changements de vitesse et de direction du fluide [4]: il fait appel aux propriétés d'adhésivité (effet Coandă) et de viscosité du fluide; il utilise l'attraction qu'exerce un fluide en mouvement sur les parois de disques très minces et très rapprochés les uns des autres: effet de couche limite. Le fluide circulant entre ces disques les entraîne avec elle et les fait participer à son mouvement.

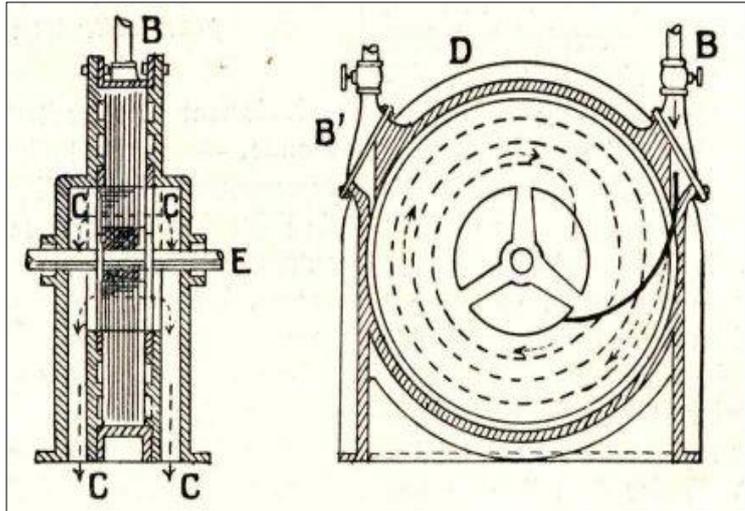
Cette turbine peut être utilisée sous différents types de fluide moteur : de la vapeur, de l'air, des gaz de combustion, de l'eau, ou encore des fluides plus visqueux. Pour une turbine de Tesla à air comprimé, l'ordre de grandeur de l'espacement entre les disques utilisé par Nikola Tesla est du millimètre. La dimension de l'espace entre les disques résulte d'un compromis. Avec un espacement trop faible, il ya un risque de ne pas injecter suffisamment de fluide pour entraîner le rotor. Avec un espacement trop large, une partie du fluide injecté risque de passer entre les disques sans communiquer son énergie.

## 2.2- La turbine construite par TESLA

La turbine sans aubages construite par Tesla se compose donc d'un rotor fait de 25 disques épais, chacun, de 0.8 mm environ, en acier dur, bien trempé [14]. (Voir figures 8 & 7) Le rotor tout entier a 450 mm de diamètre et 80 mm d'épaisseur. Il est monté dans un carter pourvu à sa périphérie de deux ajutages B et B' par où peut se faire l'admission de la vapeur : l'un pour la marche avant, l'autre pour la marche arrière. La sortie du fluide se fait en C, au centre du carter.



**Figure 8:** 1ère turbine de Tesla [14]



**Figure 7:** principe de fonctionnement [14]

Le fluide pénètre par B, ajutage qui peut être divergent, droit, ou convergent. Lorsque la machine est au repos, la vapeur, circulant entre les disques se dirige tout d'abord vers la sortie, par le plus court chemin, elle prend le trajet marqué en trait noir sur la figure ci dessus. Mais quand les disques commencent à tourner ; la vapeur décrit des spirales dont le pas va en s'allongeant à mesure que la vitesse du rotor augmente. Bref, au bout de quelques instants, les particules de vapeur décrivent un certain nombre de tours complets avant d'atteindre l'orifice de sortie. Dans ce mouvement, elles perdent leur vitesse progressivement, sans heurt, abandonnant ainsi au rotor leur énergie cinétique. Sa puissance est de 200 chevaux ; cependant c'est un minuscule appareil, il mesure 60cm de haut, sur 90cm X 60cm de large et pèse environ 100 kg [14].

## 2.3- La géométrie d'une turbine de Tesla

Telle qu'imaginée dans son brevet, nous avons réalisé un prototype de la turbine de Tesla de 8 disques sous le Logiciel SOLIDWORK. Nous présentons ici en figure 10 les différentes pièces réalisées dans une vue éclatée et la géométrie globale du prototype figure 9. Nous n'avons pas représenté le support du prototype.

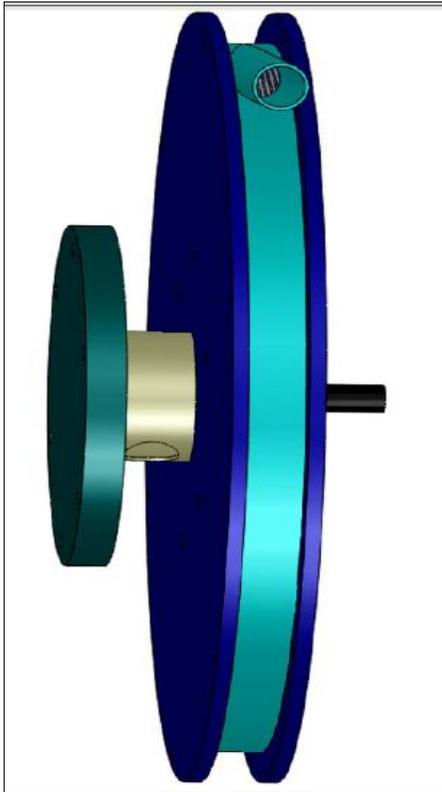


Figure 9: prototype conçu sous Solidworks

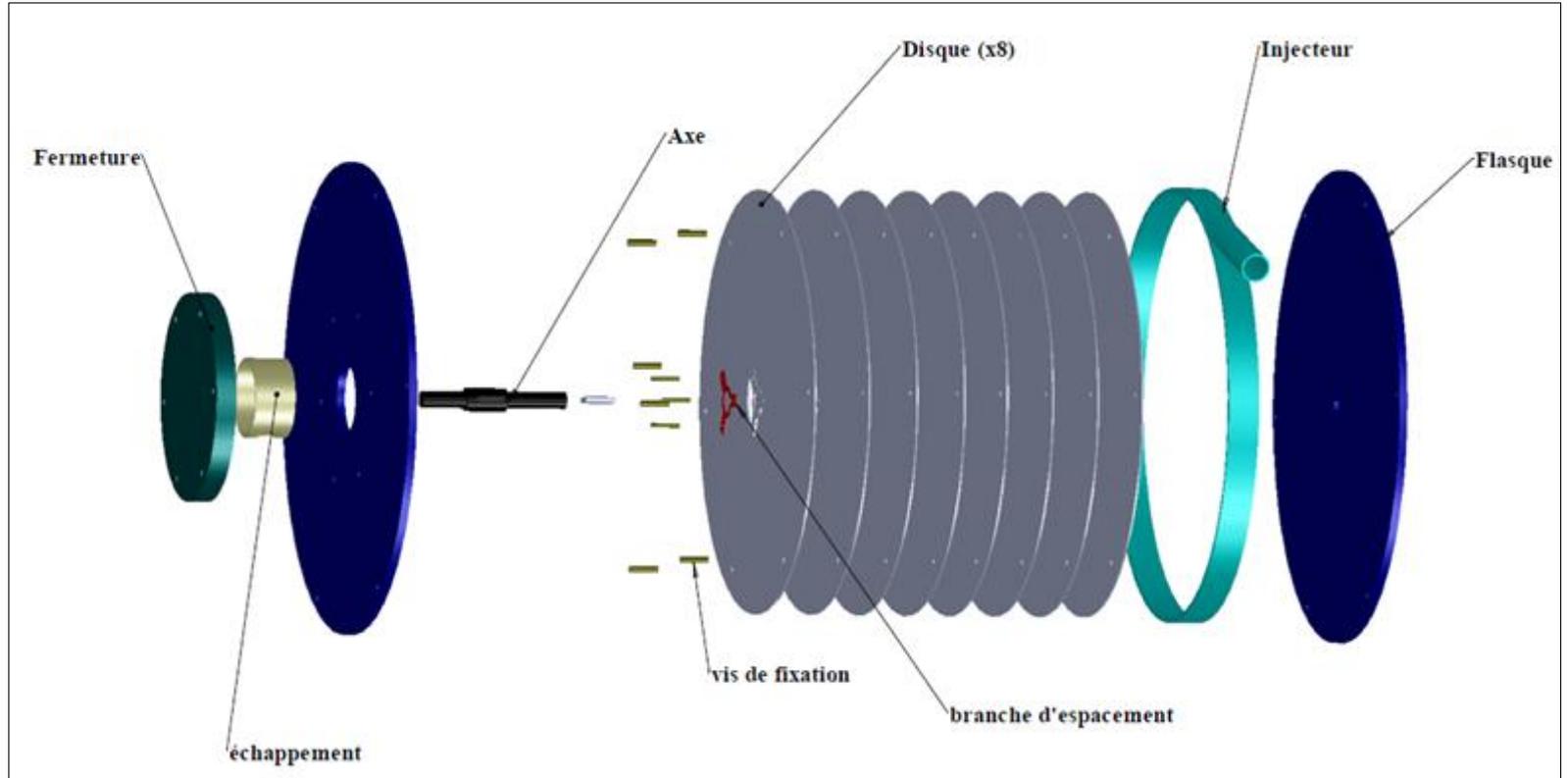


Figure 10: vue éclatée de la turbine conçue

### **3- Etude comparative de la turbine de TESLA avec les turbines conventionnelles**

Le but de cette partie est de présenter les avantages de la turbine de Tesla comparativement aux turbines conventionnelles existantes. Bien que les inconvénients des turbines conventionnelles aient déjà été explicités plus haut, nous entendons ici exposer les lacunes qui ont été /ou peuvent être comblées via la Turbine de Tesla. Nous nous sommes beaucoup plus inspirés de [4], [13], [15], et [16]

- ❑ **La simplicité** : la turbine à vapeur est de part son principe assez simple, mais la turbine de Tesla l'est davantage ; en effet, dans toutes les turbines actuelles, le mouvement se produit par suite de l'action de la vapeur sur des ailettes dont la forme est calculée mathématiquement ; la construction de ces ailettes, leur implantation sur le rotor offrent de très sérieuses difficultés mécaniques, la turbine de Tesla n'a pas ce souci.
- ❑ **La réversibilité de l'écoulement** : contrairement aux autres turbines, le mouvement du rotor dans la turbine de Tesla peut se faire dans l'un ou l'autre sens. Les disques sont tous semblables entre eux ; aucune difficulté de fabrication ni de montage.
- ❑ **Le fluide moteur** : les turbines conventionnelles sont conçus pour un fluide bien précis alors que le turbine de Tesla, telle qu'indiquée dans son brevet est capable de fonctionner avec différents fluides (eau, air, vapeur...) sans modification de sa structure.
- ❑ **Son utilisation** : la turbine de Tesla peut aussi être utilisée comme une pompe. Il est aussi possible qu'elle soit modifiée pour être utilisée comme appareil de propulsion ou de compression des fluides [22].
- ❑ **Economique** : en dehors des disques qui nécessitent une technologie métallurgique de pointe, la turbine de Tesla est relativement facile à concevoir et à fabriquer et devrait naturellement avoir un coût très moindre.
- ❑ **Sa robustesse** : le ratio dimensions/puissance est très petit par rapport aux turbines conventionnelles, la première turbine de Tesla pesait 100kg avec une puissance de 200 chevaux, un volume d'encombrement de 0.325m<sup>2</sup> contrairement à une turbine à vapeur conventionnelle qui produit 1ch avec un volume d'encombrement de 1,3m<sup>2</sup>.
- ❑ **Les nuisances sonores** : à cause de l'écoulement graduel du fluide, la turbine de Tesla fonctionne de manière très silencieuse contrairement aux bruits dus aux chocs et vibrations dans les turbines conventionnelles.
- ❑ **Son efficacité** : Tel qu'à la conception initiale, Le rendement d'une turbine de Tesla fonctionnant avec un gaz avait été estimé supérieur à 60%, avec un maximum à 95% (selon les affirmations de Nikola Tesla) [17]. Les turbines qui équipent aujourd'hui les centrales thermiques ou les turboréacteurs ont un rendement compris entre 80 et 95%.

Mais seulement, à l'époque de Tesla, il tournait autour de 30-35% [17]. Une simulation des paramètres de la turbine de Tesla nous en dira plus.

- **Son lien avec le développement durable :** le fait que la turbine de Tesla puisse fonctionner non seulement avec de la vapeur, mais beaucoup d'autres fluides, montre qu'au pire des cas, elle peut être considérée comme un moteur à combustion externe du point de vue émissions CO<sub>2</sub> et économie d'énergie, ce qui lui laisse le choix de s'adapter aux CSP ou aux cycles combinés, réduisant considérablement l'impact sur l'environnement. Dans les autres cas, elle n'a aucun effet sur l'environnement.

#### **4- Les limites à l'essor technologique de la Turbine de TESLA**

Mille questions se posent de savoir pourquoi une turbine avec d'aussi grandes potentialités, aussi simple, efficace, et pouvant être aussi économique...n'a pas connu une évolution technologique remarquable depuis plus de 100 ans. Nous avons recensé plusieurs indicatifs dans la littérature:

##### **a- La raison géopolitique [17]**

Juste avant le tournant du siècle (19e-20e), les moteurs à essence et diesel avaient déjà été développés au point où ils pouvaient être utilisés dans les véhicules. En même temps, les turbines à vapeur de Parsons et Curtis avaient déjà été mises au point pour les centrales à vapeur. Au moment où Tesla a commencé le développement de sa turbine, la technologie piston avait déjà pleinement intégrée l'industrie de l'automobile, et les acteurs majeurs dans la production électrique de cette époque – GE et Westinghouse – avaient aussi déjà beaucoup investi dans les turbines Parsons et Curtis. Il se pourrait que lorsque Tesla avait finalement approché les producteurs d'électricité et les constructeurs automobiles, ils auraient simplement déclaré être trop loin dans leurs investissements, et n'avaient pas été intéressés à envisager une nouvelle technologie, même si elle paraissait être la meilleure.

##### **b- La raison technologique**

Afin de limiter les pertes par cisaillement et de limitation de débit dans la turbine de Tesla, les disques doivent être les plus fins et les plus lisses possibles. Or à l'époque de Tesla, la technologie métallurgique n'était pas capable de concevoir des disques comme indiqué par Tesla. En effet, plusieurs prototypes furent construits en cette période, notamment par l'« Allis Chalmers Manufacturing Compagny ». Cette firme américaine a construit trois prototypes de turbines de Tesla fonctionnant à la vapeur. Le rendement maximum de ces machines était de 38% [18] ; la faible valeur du rendement et des problèmes de distorsion des

disques auraient amené, au cours des années 20, la fin de la collaboration entre Nikola Tesla et la compagnie. Bien que Nikola Tesla ait prétendu que les ingénieurs n'avaient pas suivi sa géométrie, cet échec a dû être une source de démotivation à la volonté générale de faire évoluer cette turbine.

### **c- Les raisons actuelles**

Plusieurs difficultés entravent l'essor de cette technologie aujourd'hui :

- L'absence des études expérimentales concrètes pouvant permettre sa production à grande échelle,
- L'absence des documentations précises, détaillées et fiables sur son fonctionnement [18].

### **Conclusion partielle :**

Malgré tous ces freins et au vu de tous les avantages que peut offrir cette turbine tel sa contribution à la lutte contre le changement climatique, certains acteurs de la communauté scientifique d'aujourd'hui pensent qu'elle est bien adaptée aux enjeux énergétiques du 21<sup>e</sup> siècle [17]. Et donc une étude minutieuse de son fonctionnement et de son efficacité est d'une importance capitale non pas seulement pour le progrès technologique, mais aussi une contribution à la lutte contre le changement climatique.

## **5- Les paramètres d'influences**

En général, la réduction de l'efficacité d'une turbine provient soit du comportement de l'écoulement tout au long de la turbine, soit des paramètres physiques constituant la turbine. A partir des caractéristiques géométriques ci-dessus et de la littérature [18], [19], nous avons recensé une liste de paramètres facteurs de pertes dans la turbine de Tesla. Nous avons :

### **a- les paramètres physiques:**

- Espacement entre les disques
- Epaisseur des disques
- Le nombre de disques
- Le fluide moteur utilisé (viscosité, masse volumique)
- Le débit ou la pression d'entrée
- Le récepteur (générateur)
- L'angle d'injection
- Le nombre d'injecteurs

- Les diamètres des disques
- La nature de la couche limite (laminaire ou turbulente).

### **b- le comportement de l'écoulement**

Les pertes dues au comportement de l'écoulement sont liées à la dissipation de l'énergie et peuvent être définies en termes d'augmentation de l'entropie.

Le mécanisme de création d'entropie peut être causé par :

- Le frottement visqueux entre les disques,
- Le transfert de chaleur à travers les différences de température finie,
- Le non-équilibre des processus très rapides.

Le premier mécanisme comprend toutes les pertes dans le rotor, les pertes dues à l'interaction entre le fluide et les composants solides de la turbine et la force de viscosité agissant dans chaque particule de fluide. Le second peut être beaucoup plus pris en considération si le fluide utilisé est de la vapeur. Et le troisième mécanisme se produit dans l'injecteur et à la sortie du rotor, où existent de fortes échanges de zones.

Il est important de mentionner que plusieurs études ont été faites sur quelques unes de ces paramètres [18], et même sur le comportement entropique de l'écoulement. Notre travail consiste à caractériser l'influence de certains de ces paramètres sur l'écoulement à partir d'un modèle numérique.

En effet, les simulations numériques ont pris une importance grandissante tant pour l'étude et l'optimisation des phénomènes physiques que pour le calcul d'écoulements industriels. Moins coûteuses que les expériences sur les bancs d'essai, elles permettent de modifier facilement les paramètres de l'écoulement et de la géométrie. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un outil numérique performant qui s'adapte facilement aux géométries complexes rencontrées dans l'industrie et qui prenne en compte les comportements complexes d'un fluide en situation réelle (compressibilité, instationnaire...). La partie suivante présente toute la méthodologie que nous avons adaptée à la simulation numérique pour une turbine de Tesla.

## **Partie 2 : Méthodologie de l'étude numérique pour la turbine de Tesla.**

---

La résolution numérique des problèmes de la mécanique des fluides se fait en des étapes bien précises : Le problème physique continu est décrit par un modèle mathématique (équations). Ce modèle mathématique est discrétisé puis approximé à l'aide des schémas numériques appropriés ; on passe donc d'un problème continu en un problème discontinu. Ensuite, un algorithme de résolution est établi et codé au travers d'un langage de programmation. Ce code est exécuté sur un ordinateur, et en fonction des paramètres que nous souhaitons étudier; une solution approchée du problème initial est obtenue. Dans ce chapitre, nous établissons les équations régissant le fonctionnement de la turbine de Tesla; ces équations mettent en évidence le comportement du fluide et le transfert d'énergie du fluide aux disques. Ensuite nous décrivons la méthode de discrétisation, le code numérique approprié et l'algorithme de résolution de ces équations. Le choix du code numérique tient compte du modèle géométrique à étudier dont il importe d'en faire une présentation au préalable.

### **I- Le modèle numérique**

Le modèle numérique 3D de la turbine de Tesla est déduit du prototype CAO conçu sous SOLIDWORK et présenté aux figures 9 et 10. Il a été inspiré des travaux de Huybrechts [18] et ne permettra d'étudier qu'un certain nombre de paramètres dans le but de permettre une analyse mathématique du mécanisme de transfert d'énergie entre le fluide et le disque. Il résulte de plusieurs simplifications par rapport au prototype réel tel que présenté au chapitre précédent et symbolise pour nous un «élément géométrique» de la turbine de Tesla.

#### **1- Les simplifications apportées**

Le prototype précédemment conçu subit plusieurs simplifications dans le but de faciliter l'étude numérique. Le modèle numérique n'est donc pas une représentation parfaite du prototype de la turbine; il néglige un certain nombre de phénomènes secondaires :

- Le plus visible est la boulonnerie que nous ne modélisons pas. Les boulons servent à solidariser les disques avec les étoiles d'espacement. Ils permettent également de maintenir constant l'espacement entre les disques. Nous considérons qu'il s'agit d'une

perturbation locale de l'écoulement et nous négligeons les pertes induites par leur présence.

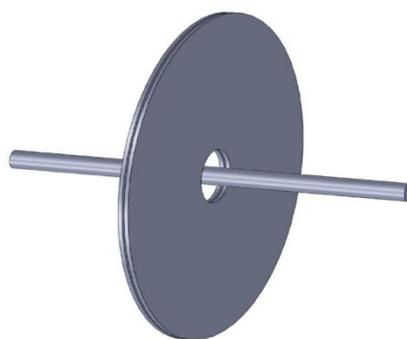
- Pour notre modèle, nous allons imposer directement les conditions d'entrée à la périphérie des disques. Ce qui signifie que nous ne modélisons pas le tube de l'injecteur et le jeu radial entre les disques et le stator est nul.
- Sachant qu'il existe à priori une périodicité selon les différents espacements, nous allons simplifier notre modèle en étudiant notre écoulement uniquement entre deux disques. Les autres espacements pourront être pris en compte en imposant les conditions de symétrie et de périodicité sur la géométrie.

Pour le mécanisme de mise en rotation de la turbine, Dans un prototype réelle, le fluide est injecté entre les disques à haute vitesse. Près de la paroi des disques, le gradient normal des vitesses induit des contraintes pariétales qui créent un couple à l'arbre et met la turbine en rotation. La vitesse de rotation en régime dépend de la charge (couple résistant) que doit entraîner la turbine. Nous supposons que notre turbine est en régime permanent. L'inertie des pièces en rotation et des forces de frottements ne pourront pas être simulé.

Pour le calcul numérique, nous imposons à l'injection une vitesse d'entrée, une pression et/ou un débit suivant la caractérisation recherchée. Nous nous plaçons directement à l'état de fonctionnement normal sans tenir compte des états transitoires. Nous avons un écoulement de fluide en 3D compressible dans un volume fixe.

## **2- Présentation du modèle géométrique**

Les simplifications précédentes nous renvoient au modèle géométrique 3D présenté ci-dessous. Ce modèle représente le volume de contrôle sur lequel nous analysons le flux du fluide. Le schéma ci-dessous représente pour nous l'élément de la turbine sur lequel nous allons faire notre étude (02 disques+l'axe).



**Figure 11: modèle simplifié de la turbine de Tesla**

## **II- Les équations gouvernant l'écoulement du fluide dans la turbine de Tesla.**

L'étude numérique du fonctionnement de la turbine est donc ramenée à l'étude de l'écoulement d'un fluide entre deux disques tournants dans un volume de contrôle  $V$ . L'entrée étant l'injecteur et la sortie l'orifice du diamètre inférieur. En supposant que nos fluides sont newtoniens, les équations de conservation de la quantité de mouvement prennent la forme des équations de Navier Stokes. Considérons le volume de contrôle présenté ci-dessus noté  $V$  et analysons la variation dans le temps de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie contenue dans ce volume. On retrouve les équations de conservation déduites par l'analyse du bilan de l'écoulement dans le volume  $V$  [20] :

### **1- Conservation de la masse**

La masse contenue dans ce volume est :

$$m = \int_V \rho dV \quad (1)$$

Avec  $\rho$  = masse volumique.

La conservation de la masse dans le volume  $V$  s'écrit donc :

$$\frac{d}{dt} m = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (2)$$

En appliquant le théorème de transport au volume  $V$ , nous aurons :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3)$$

Puisque notre volume  $V$  choisi ne contient pas de surface de discontinuité, l'intégrale sur la surface  $S$  peut être remplacée par une intégrale de volume et le théorème de Green-Ostrogradsky permet d'écrire :

$$\int_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} ds = \int_V \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} dV \quad (4)$$

Et on a donc :

$$\int_V \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} \right] dV = 0 \quad (5)$$

D'où l'équation locale exprimant la conservation de la masse encore appelé équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (6)$$

Avec  $\rho = \rho(t)$

Cette équation exprime le fait que dans tout l'écoulement, la masse se conserve.

## 2- Conservation de la quantité de mouvement

En considérant toujours notre volume de contrôle  $V$ , la quantité de mouvement contenu dans ce volume s'écrit :

$$\int_V \rho \vec{v} dV. \quad (7)$$

Le principe fondamental de la dynamique indique que la variation de la quantité de mouvement dans ce système  $V$  est égale à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{v} dV = \sum \vec{F}_{\text{ext}} \quad (8)$$

Dans notre situation, nous aurons deux types de forces agissant sur le fluide contenu dans le volume  $V$  :

- Les forces de volume exprimées sous la forme :

$$\vec{F}_V = \int_V \rho \vec{g} dV \quad (9)$$

- Les forces de surface agissant à la surface du disque :

$$\vec{F}_S = \int_S \vec{\sigma}(\vec{n}) dS \quad (10)$$

Et donc :

$$\int \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_V \rho \vec{g} dV + \int_S \vec{\sigma}(\vec{n}) dS \quad (11)$$

D'où la forme locale :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \vec{\nabla} \rho \vec{v} \cdot \vec{v} = -\nabla P + \nabla \vec{\sigma}(\vec{n}) + \rho \vec{g} \quad (12)$$

Le fluide étant supposé newtonien, les contraintes visqueuses sont sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \quad (13)$$

D'où nous avons la forme vectorielle de **l'équation de Navier Stokes** :

$$\rho \frac{d}{dt} \vec{v} = -\vec{\nabla} P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v} + \frac{\mu}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \quad (14)$$

## 3- Conservation de l'énergie

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à tout instant  $t$  et à toute particule du milieu continu nous dit que la variation au cours du temps de l'énergie totale  $E$  (somme de l'énergie cinétique  $E_c$  et de l'énergie interne  $E_i$ ) est égale à la puissance des forces extérieures volumique et surfacique augmentée de la puissance calorique reçue  $\dot{Q}$ .

En considérant toujours notre volume  $V$ ,

Le taux de variation de l'énergie totale s'écrit :

$$\int_V \rho E dV = \dot{W}_{(F_V+F_S)} + \dot{Q} \quad (15)$$

Notre volume n'a pas de source de chaleur, notons  $q$  le flux de chaleur par conduction. Et donc  $\dot{Q} = - \int_S \vec{q} \cdot \vec{n} dS$ . Les théorèmes de transport et de Green-Ostrogradsky nous permettent donc d'obtenir la forme de l'équation de conservation de l'énergie suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \vec{\nabla} \rho H \cdot \vec{v} = \vec{\nabla} (\mathbf{k} \vec{\nabla} \cdot \vec{T}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} (\vec{\sigma} \cdot \vec{v}) \quad (16)$$

Avec  $H$ : enthalpie et  $T$  la température.

#### **4- Les hypothèses simplificatrices**

La résolution de ces équations est très fastidieuse, alors pour simplifier le travail, nous avons imposé un certain nombre d'hypothèses, nous supposons que :

- L'écoulement est permanent et monophasique,
- Les forces de volume sont négligeables,
- L'écoulement est laminaire, d'après les résultats de Huybrechts [18].

### III- Les paramètres à analyser

#### 1- Les paramètres d'entrée

##### 1.1- La nature appropriée des fluides

L'étude numérique sera faite en considérant deux fluides différents à l'entrée: la vapeur d'eau et l'air comprimé. Nous évaluons les performances du modèle numérique et le profil d'évolution de l'écoulement pour chacun des fluides. Un fluide est caractérisé par sa viscosité, sa température, sa masse volumique, sa chaleur massique, son nombre de Prandtl, sa compressibilité... Le tableau ci après présente les caractéristiques de la vapeur d'eau et de l'air comprimé. Nous avons fixé les températures d'entrée pour chacun de ces fluides.

**Tableau 6: caractéristiques des fluides utilisés**

Fluides		Air comprimé	Vapeur d'eau
Température	$T$ (°C)	30	127
Masse volumique	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	0.5542
Viscosité	$\mu$ (kg. m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1.7894e-05	1.34e-05
Masse molaire	$M$ (Kg/kmol)	28.966	18.01534
Chaleur massique	$Cp$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1006.43	2014
Conductivité thermique	$k$ (J m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.0242	0.0261
Nombre de Prandtl	$Pr = \mu Cp/k$	0.744	1.034

##### 1.2- Le diamètre extérieur des disques

Nous étudions un premier modèle numérique de turbine ayant les mêmes paramètres géométriques que la première turbine construite par tesla, c'est-à-dire ayant pour diamètres intérieur 92 mm et extérieur 247,6 mm et un espacement de 0,794mm. L'écoulement obtenu suivant chaque fluide nous permettra de percevoir la tranche optimale du diamètre extérieur.

##### 1.3- Le nombre d'injecteurs

Nous allons concevoir un modèle numérique avec deux injecteurs respectant les mêmes conditions d'entrée et nous visualiserons l'écoulement de chacun des fluides en comparaison avec le modèle numérique à un injecteur.

#### **1.4- L'espace entre les disques**

L'espace entre les disques agit sur la contrainte pariétale et le couple par l'intermédiaire des gradients de vitesses à la paroi des disques. La contrainte pariétale entre deux disques est donnée par la relation :

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (17)$$

Et le couple exercé par le fluide sur les disques est donné par

$$C = \int_S \tau \cdot r \cdot dS \quad (18)$$

Avec  $z$  étant la coordonnée axiale selon l'espace entre les disques. Ces relations permettent un jugement concret sur l'influence de l'espace entre les disques. A défaut d'utiliser ces relations pour calculer le couple, nous visualiserons les vitesses tangentielles et leur ordre de grandeur nous donnera une idée sur la valeur du couple, comparativement aux vitesses radiales.

#### **1.5- Autres paramètres**

L'injecteur est unique et disposé suivant un angle  $\alpha$  quelconque. L'étude de l'influence de la taille de l'orifice de sortie ne fait pas partie de cette étude, toutefois, il importe de mentionner que la variation de diamètre de sortie n'est autre que la variation de la zone de friction. Les autres paramètres physiques énoncés au chapitre précédent ne pourront être étudiés. La littérature indique multiples chercheurs qui ont expérimenté ces paramètres, bien qu'il y ait des résultats antagonistes [13], [16], [18] et [19].

### **2- Les paramètres de sortie**

Les paramètres de sortie que nous faisons ressortir sont le couple de rotation, la vitesse de rotation ; Nous établissons la caractéristique du couple en fonction de la vitesse de rotation pour une pression totale à l'entrée constante et la caractéristique du couple, l'efficacité en fonction de la pression totale à l'entrée.

#### **IV- La méthode de discrétisation**

La résolution des équations présentées dans le paragraphe précédent traduisant l'écoulement monophasique nécessite une étape de discrétisation qui se résume en la transformation du système d'équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Plusieurs méthodes de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles peuvent être utilisées : la méthode des volumes finis (MVF), des différences finies (MDF) et des éléments finis (MEF). Notons ici que le choix de la méthode de résolution est fonction du type de problème physique que l'on se propose de résoudre (mécanique des fluides, transferts thermiques...).

##### **1- Briefing des différentes méthodes de discrétisation courantes.**

###### **■ La méthode des éléments finis**

Elle consiste en la détermination d'un champ local à attribuer à chaque sous domaine (élément) pour que le champ global obtenu par juxtaposition de ces champs locaux soit proche de la solution du problème (bilan global). C'est une méthode bien connue et relativement simple pour une géométrie simple, mais elle a l'inconvénient de ne pas toujours être conservative.

###### **■ La méthode des différences finies**

Elle est basée sur une approximation des dérivées intervenant dans les équations à l'aide de développement en série de Taylor. Son approche est donc très mathématique et présente des difficultés pour résoudre les termes non linéaires. Elle est très utilisée dans le domaine de Mécanique des Solides et pour des problèmes multi-physiques (Comsol, ex FemLab).

###### **■ La méthode des volumes finis**

Cette dernière est basée sur un bilan local des flux dans un volume de contrôle et donc admet une approche très "physique". Elle a l'avantage de s'adapter à une géométrie quelconque et dont de traiter des géométries complexes, elle présente plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires hyperboliques et est conservative de part sa formulation. En somme, la MVF est très adaptée à la discrétisation spatiale des lois de conservation.

Il apparait donc clairement que la méthode des volumes finis est bien adaptée à notre cas d'étude, et elle représente aussi la base de tous les codes généralistes en Mécanique des Fluides : Fluent et CFX (ANSYS), StarCCM+ et ProStar (CD-Adapco)...Tous ces codes commerciaux ont été écrits pour servir la recherche et l'industrie. Dans le cadre de ce mémoire, nous faisons usage de la version 5.5 du code « **Fluent** ». Cette version est équipée d'un grand nombre de fonctionnalités que nous adaptons au cas d'une turbine de Tesla.

## **2- Aperçu du code « Fluent »**

« Fluent » est un code commercial destiné à la modélisation en mécanique des fluides et utilisant la Méthode des Volumes Finis ; Il est édité par la société ANSYS. Le paramétrage du modèle préalablement maillé se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation est qu'il dispose d'un nombre important de fonctions pour traiter divers aspects de la mécanique des fluides: écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (K- $\epsilon$ , K-w, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, et surtout traitement des maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage (turbomachines). Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Le code « fluent » traite plusieurs types de maillages complexes qui sont en général importés d'autres logiciels de génération de maillage (« GAMBIT », par exemple) dont nous faisons usage dans ce mémoire.

## **3- Aperçu de Gambit**

Gambit est un logiciel industriel édité aussi par ANSYS permettant la construction de maillages structurés ou non en 2D/3D pour tout problème de CFD à travers une interface graphique. Il possède en outre de nombreuses possibilités d'extraction qui permettent l'utilisation de ses maillages. Les étapes principales de maillage dans Gambit sont les suivantes :

- Dessin de la géométrie
- Choix de la version du solveur et des conditions aux limites
- Choix du type de maillage
- Exportation du maillage vers le code fluent (extension.msh)

Les topologies de certaines grilles que génère « Gambit » sont :

- maillage structuré (Quadra/Hexa)
- maillage non structuré (tri/tétra)
- maillage hybride

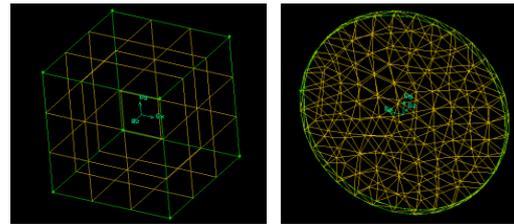
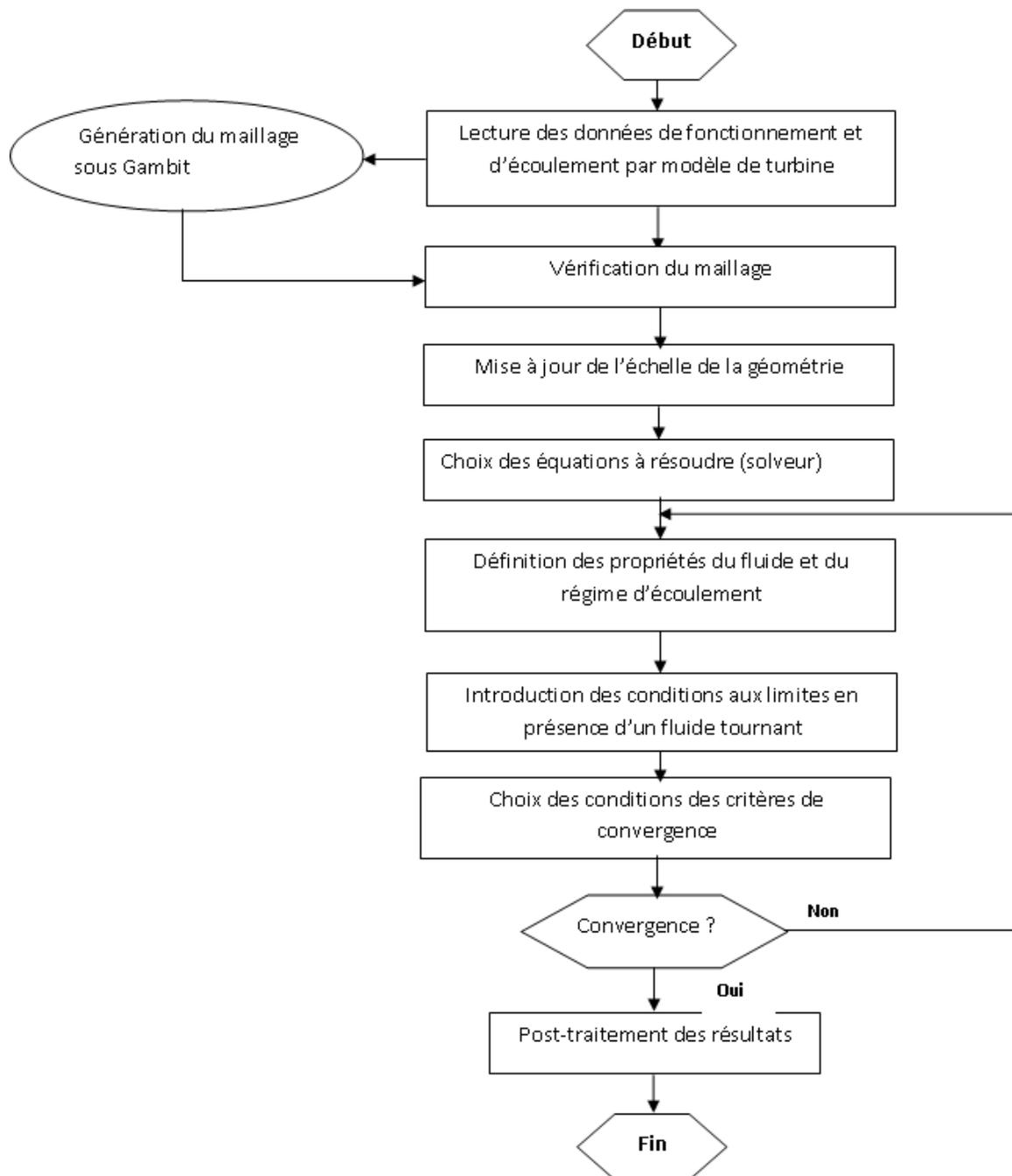


Figure 12: mailles hexa/tétra

## V- La résolution sous « Fluent »

### 1- L'organigramme de résolution adopté



## **2- Détails des étapes de résolution**

A l'issue du maillage, les détails de géométrie sont sauvegardés dans un fichier (extension .msh). Ce dernier est celui qu'importe le code « Fluent » pour démarrer les calculs. Un fichier de données (extension .cas) est créé après lecture des détails de géométrie. Après vérification du maillage on passe au choix du type de solveur. Pour notre cas c'est un solveur découplé avec une formulation implicite pour un cas tridimensionnel (3D) et un écoulement permanent prenant en compte les vitesses absolues. Toutes les opérations sont effectuées dans le menu « Define ». Les autres fonctionnalités du menu « Define » sont le choix du fluide (air et vapeur d'eau), des conditions d'opération (l'effet de la gravité est négligé et la pression de référence est la pression atmosphérique  $P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$ ) et l'introduction des conditions aux limites. Le dernier menu utilisé pour démarrer les calculs est le menu « Solve ». Il nous permet de choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation et les critères de convergence. L'initialisation des calculs est essentiellement liée aux conditions aux limites.

### **Conclusion partielle**

Aux termes de cette partie, hormis les conditions aux limites et les paramètres de relaxation, les détails sur la méthodologie et les étapes de résolution sous « fluent » que nous avons appliquées pour la turbine de Tesla sont explicités, le chapitre suivant est consacré à la présentation des résultats, analyses et caractéristiques de fonctionnement de la turbine en fonction donc des conditions imposées.

### Partie 3 : Présentation des résultats

Il s'agit dans cette partie de présenter la construction du maillage à partir de la géométrie simplifiée, ensuite de donner les informations sur la géométrie et le type de ce maillage et enfin exposer la préparation des calculs et les résultats obtenus.

#### I- Présentation du maillage et calculs.

##### 1- Maillage

Le maillage du modèle numérique 3D présenté à la figure 11 ci-dessus n'est autre qu'un maillage de l'espace (volume) contenu entre deux disques, enfermé par un carter et pourvu d'un injecteur. Les dimensions du diamètre des disques, l'espacement et le nombre d'injecteurs n'entraînent aucun changement sur le type de maillage. La figure 13 ci-dessous présente le dessin du modèle numérique tel que schématisé dans Gambit et sous différentes vues. Nous avons choisi un maillage non structuré (quadri/hexa), car, c'est le type de maillage qui peut être aisément généré quand la géométrie est complexe [19].

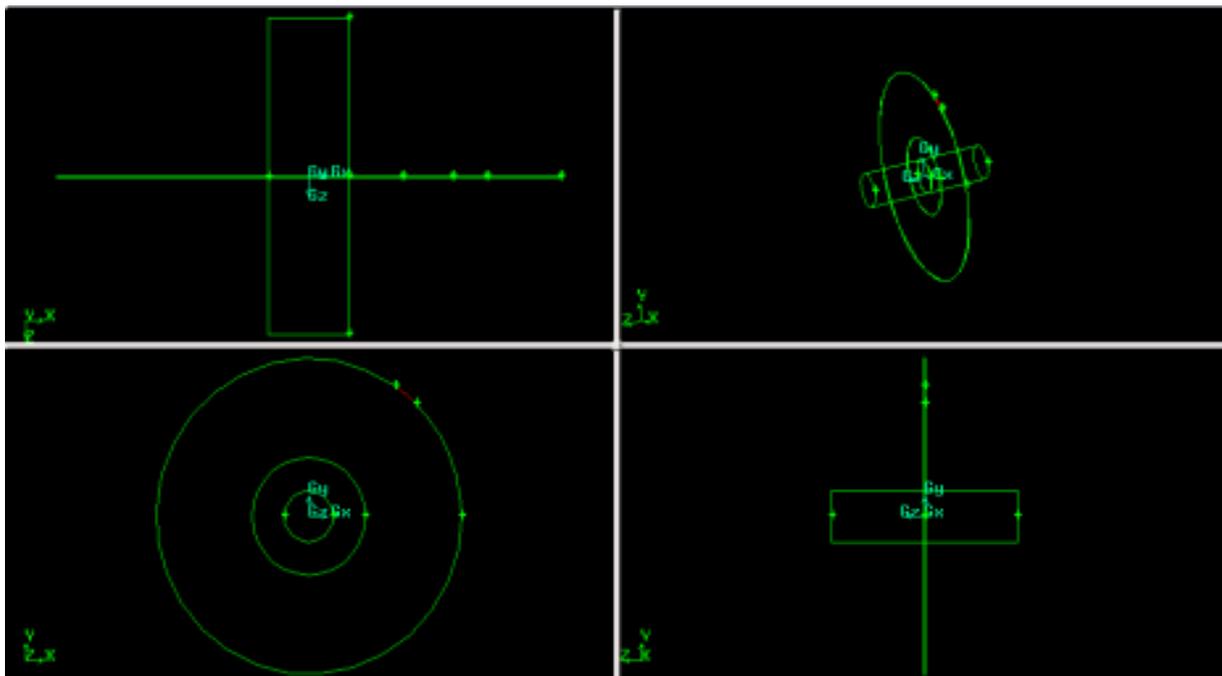


Figure 13: les différentes vues du modèle (sous Gambit)

Dans le but d'avoir plus de précision sur la zone d'écoulement, nous avons divisé le modèle en 02 zones limites: la zone d'écoulement du fluide et la zone d'échappement. Le maillage de la zone d'écoulement donne 216.680 cellules et la zone d'échappement 42.786 cellules et un total de 317.265 nœuds.

Dans le second modèle comportant deux injecteurs, nous avons obtenus pratiquement les mêmes nombres de mailles.

Les figures 14 & 15 ci-dessous présentent respectivement une vue générale du maillage et une image zoomée du maillage lors de la vérification sous Gambit.

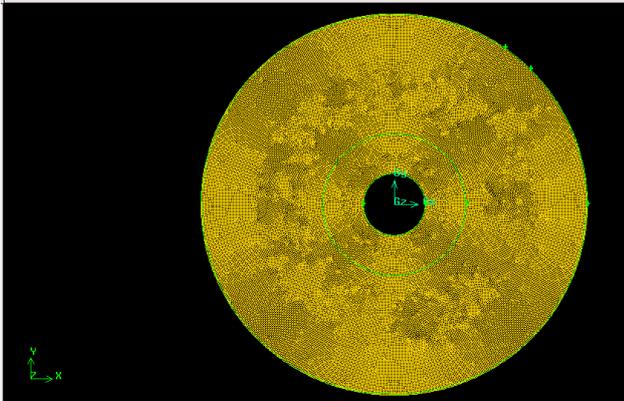


Figure 15: grille de maillage (Gambit)

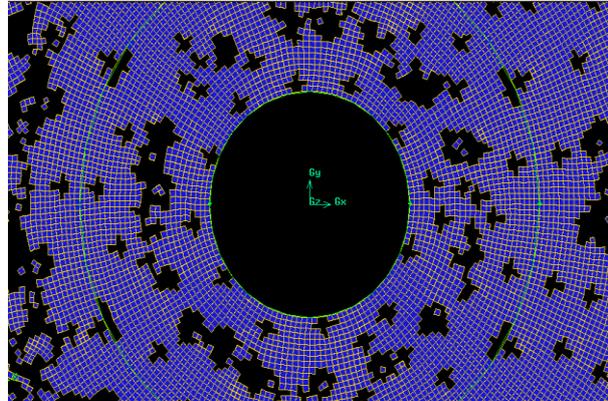


Figure 14: zoom et vérification du maillage

## 2- Préparation des calculs et conditions aux limites

Nous résolvons la version laminaire de l'équation de Navier stokes. Nous avons adopté le schéma de discrétisation utilisé dans [19] pour chacun des fluides (voir annexe2).

### Conditions aux limites :

- A l'entrée, nous imposons aléatoirement une vitesse totale de 300m/s et un angle d'injection  $\alpha=30^\circ$  par rapport à la tangente (i.e.  $V_r/V=-0.5$  et  $V_t/V=0.86$ ). cette valeur est fixe pour tous nos calculs.
- A la sortie, nous imposons une pression statique égale à la pression atmosphérique, avec une pression gauge égale à 0 Pa.
- Aux parois, nous imposons une vitesse de rotation de 25000tr/min. les conditions de périodicité n'ont pu être mis en place à cause de l'inactivité de ladite fonction sur l'outil Gambit disponible. Par ailleurs, en imposant une rotation aux disques, la visualisation de l'écoulement du fluide est plus perceptible.

### Conditions de relaxation et convergence:

Les conditions de relaxation nous permettent de maîtriser la stabilité et la consistance de notre simulation. Nous avons opté pour les conditions standards (voir annexe2)

En raison des capacités relativement réduites de la machine (1Go de RAM, 1.66Ghz), nous avons limité les critères de convergence à  $10^{-3}$  dans chaque cas de fluide.

### Justificatif du régime laminaire choisi :

En calculant le nombre de Reynolds pour chacun des cas de fluide et conformément à la géométrie choisie et aux conditions aux limites fixées, nous avons obtenu  $Re(\text{air}) = 5,1 \times 10^6$  et  $Re(\text{vapeur}) = 3 \times 10^6$ . La limite laminaire-turbulente pour l'écoulement d'un fluide sur un plan est  $Re = 5 \times 10^5$  [21], ce qui veut dire que l'écoulement est turbulent pour notre cas de figure. Or, quel que soit le régime d'écoulement, au voisinage des parois, il demeure une couche limite dynamique dans laquelle l'écoulement est laminaire et dont l'épaisseur est d'autant plus réduite que le nombre de Reynolds est grand [21]. L'épaisseur de cette couche limite varie en fonction de nombreux paramètres: nature du fluide, température, rugosité de la paroi, ... Rappelons que l'étude de l'influence de l'épaisseur de couche limite ne fait pas partie de ce travail; nous résolvons l'équation de Navier Stokes en régime laminaire.

## II- Présentation des résultats

### 1- Résultats pour utilisation de l'air comprimé comme fluide.

Après 600 itérations sur 1000 validées, la courbe de convergence obtenue est la suivante.

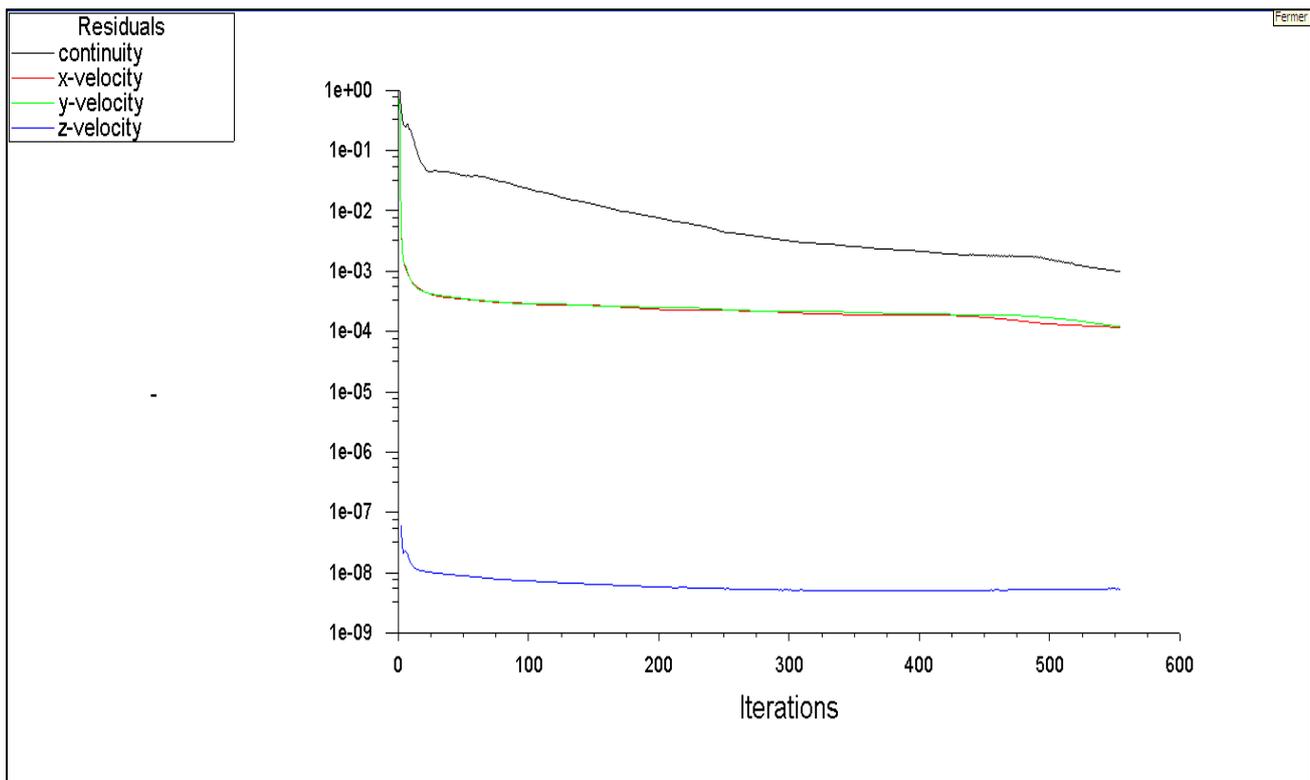
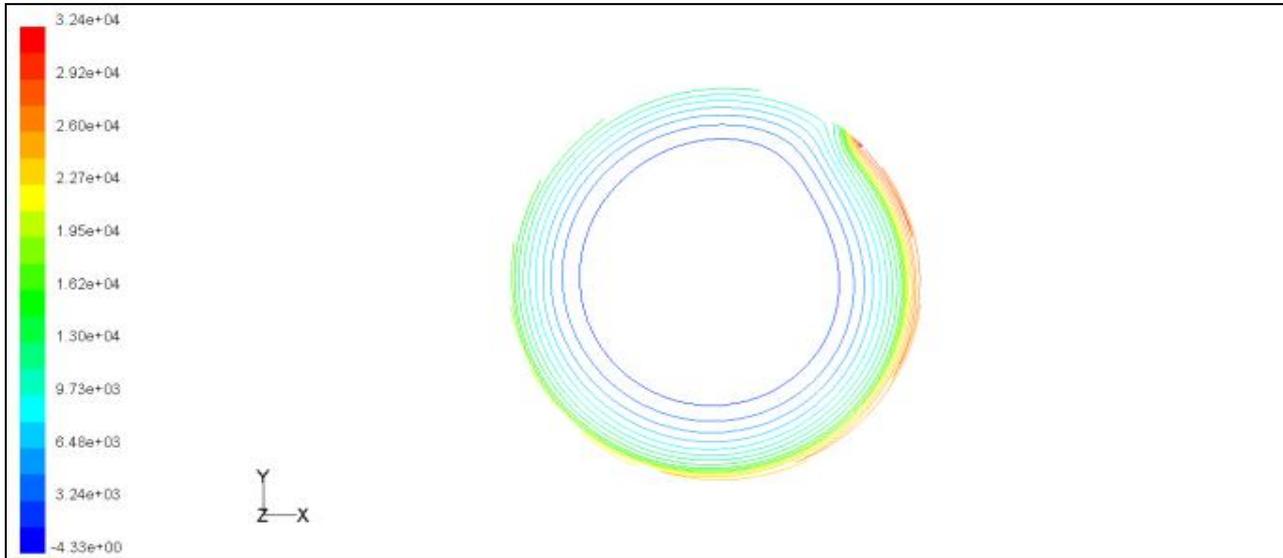
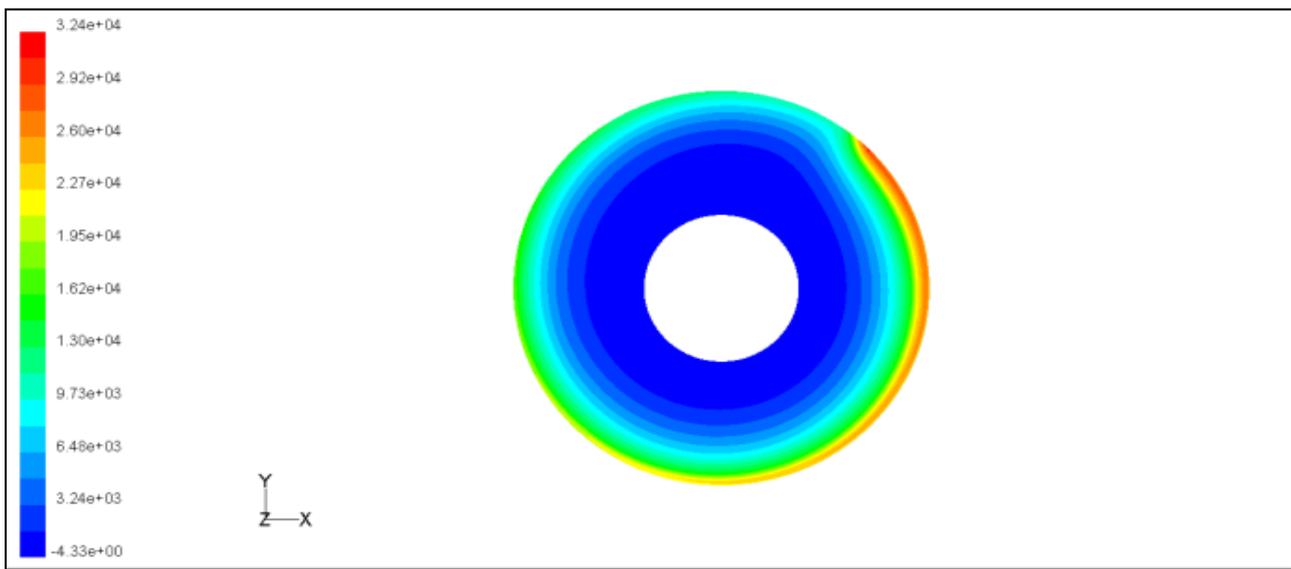


Figure 16: courbe de convergence air comprimé

- **Contour de la pression totale:** Une visualisation de l'évolution de la pression totale montre comme l'indique les figures suivantes que la pression injectée à l'origine est réduite au fur et à mesure que le fluide s'écoule à travers le disque.



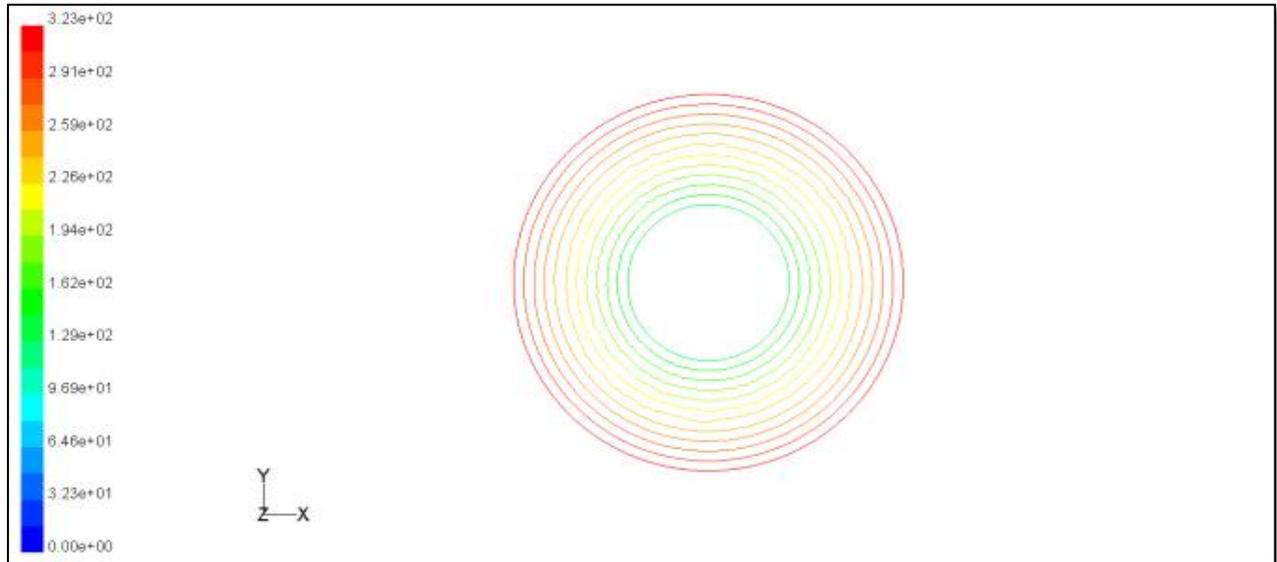
**Figure 18: contour des lignes de pression totale**



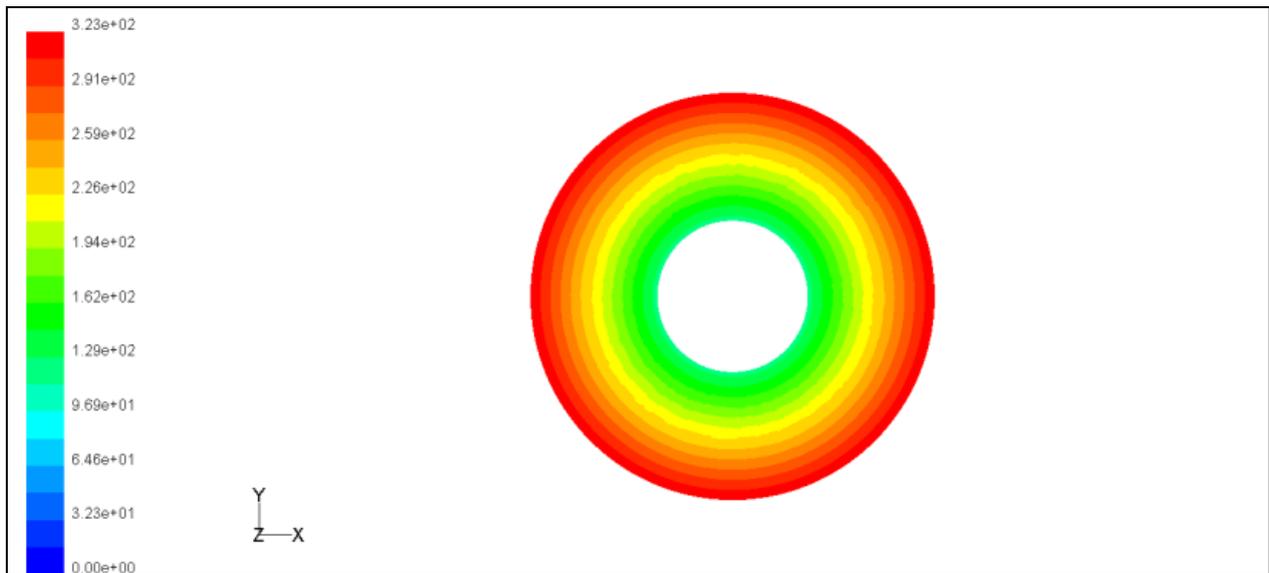
2.4-

**Figure 17: contour plein d'évolution de la pression**

- **contour de vitesses** : Ici la visualisation de l'évolution de la vitesse montre qu'à travers les deux disques, la vitesse du fluide décroît comme la pression. En effet, le fluide une fois injecté voit sa vitesse décroître jusqu'à la sortie où elle tend à s'annuler.



**Figure 19: contour de la vitesse de l'écoulement**



**Figure 20: profil de décroissance de la vitesse**

**Vecteurs vitesse radial et tangentiel** : les figures 22 & 23 présentent le profil tangentiel et radial de la vitesse. La vitesse tangentielle est très liée à la rotation du disque.

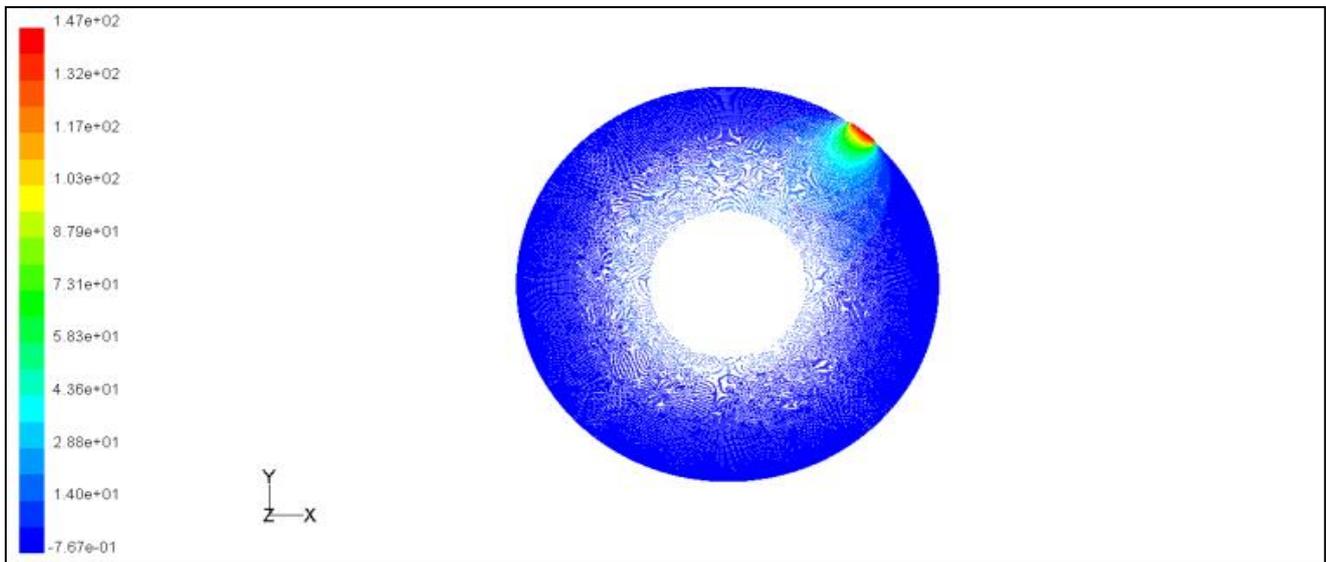


Figure 21: profil de vitesse radiale

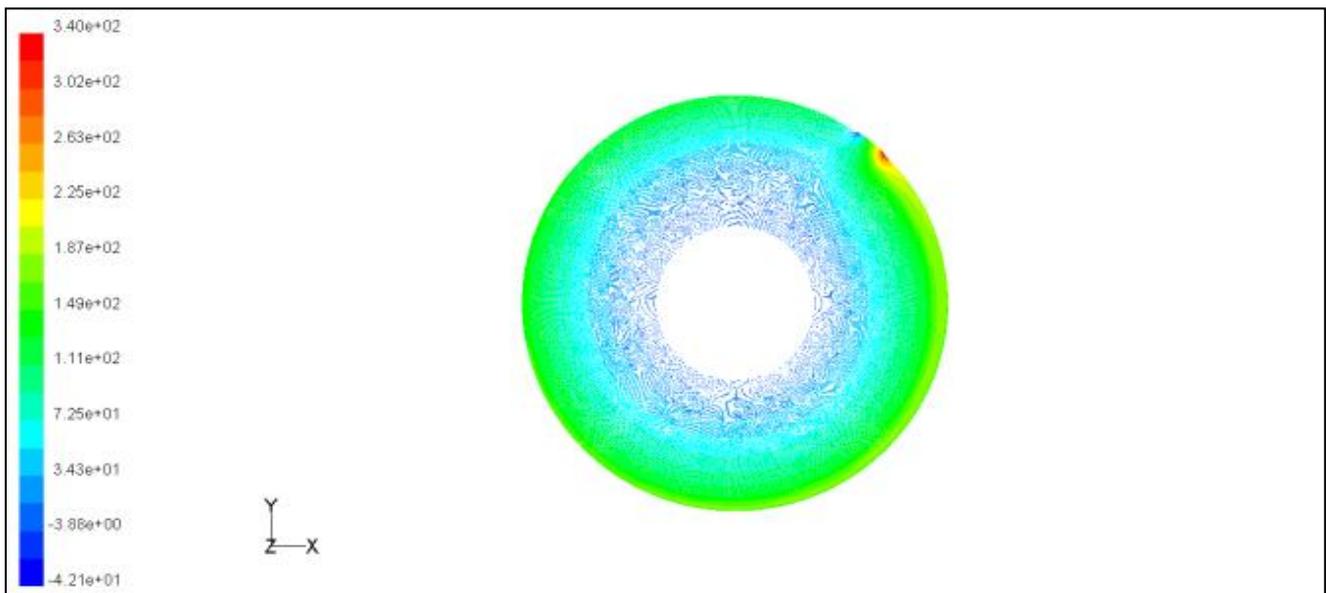


Figure 22: profil de vitesse tangentielle

## 2- Résultats pour l'utilisation de la vapeur d'eau comme fluide

En changeant uniquement la nature du fluide comme paramètre, nous avons refait les calculs et la courbe de convergence (voir annexe 2) obtenue est pratiquement semblable à celle du cas précédent.

Les contours de vitesse, de la pression et de la vitesse tangentielle obtenus pour ce cas de figure sont représentés sur les figures 23, 24, 26 & 27 ci dessous. Nous remarquons que l'écoulement de la vapeur d'eau suit la même évolution que l'air comprimé. Ce qui prouve que l'écoulement du fluide dans une turbine de Tesla est sous forme spirale et que la vitesse et la pression se réduisent au fur et à mesure que le fluide évolue vers la sortie.

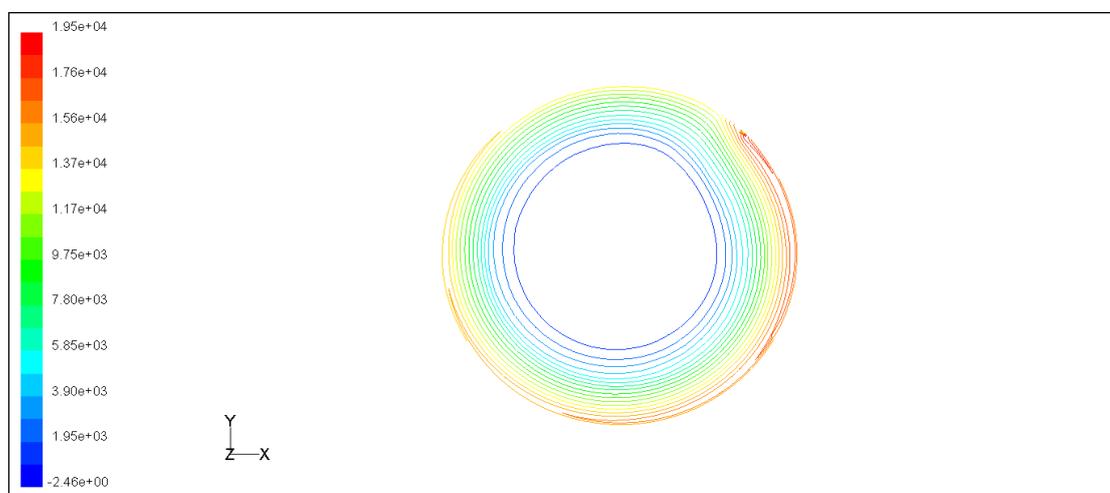


Figure 23: contours de pression vapeur d'eau

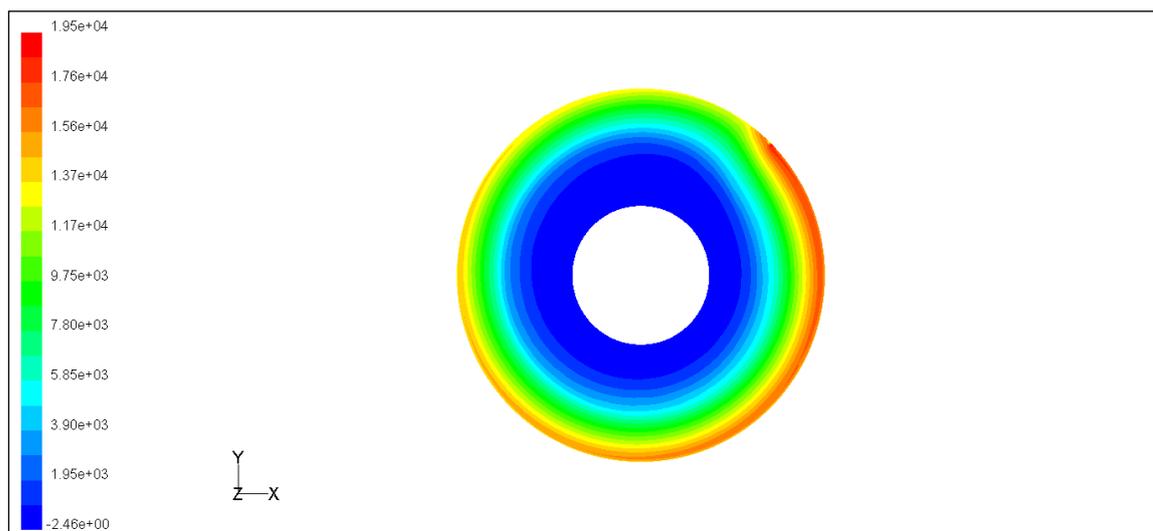


Figure 24: contours plein de la pression vapeur d'eau

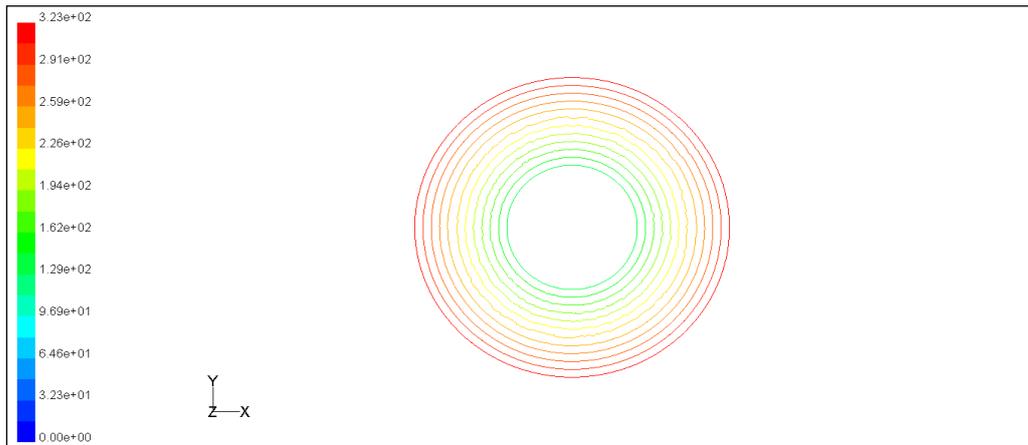


Figure 25: contours de la vitesse (vapeur d'eau)

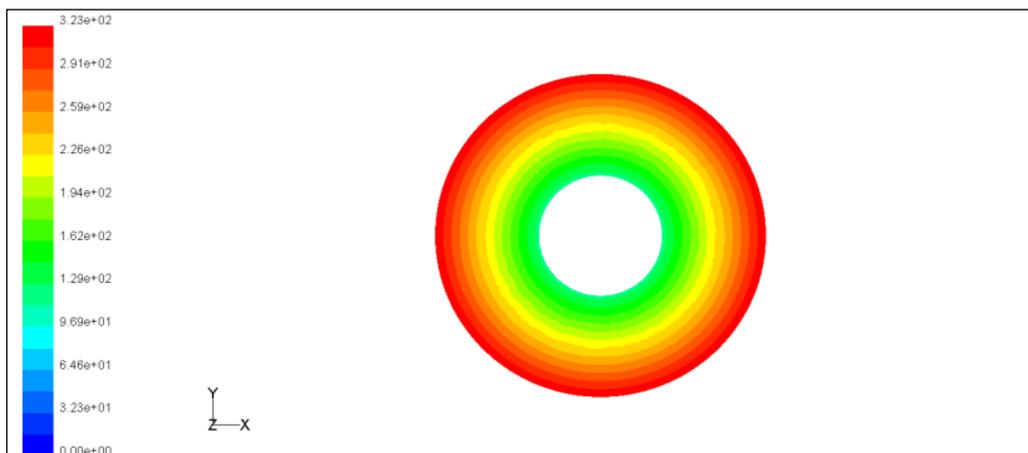
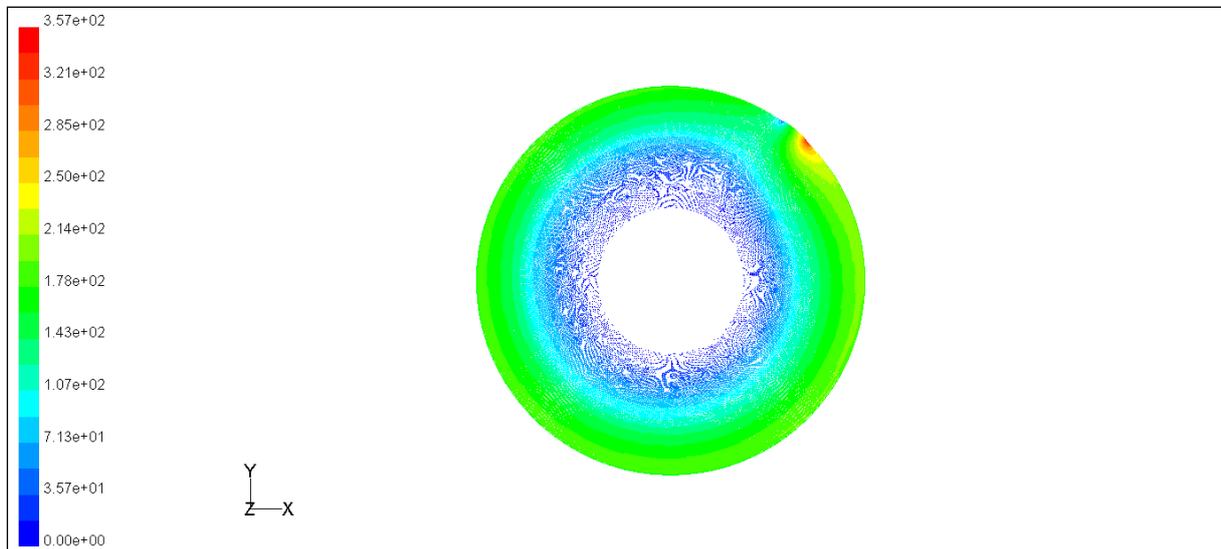


Figure 26: contours de vitesse vapeur d'eau

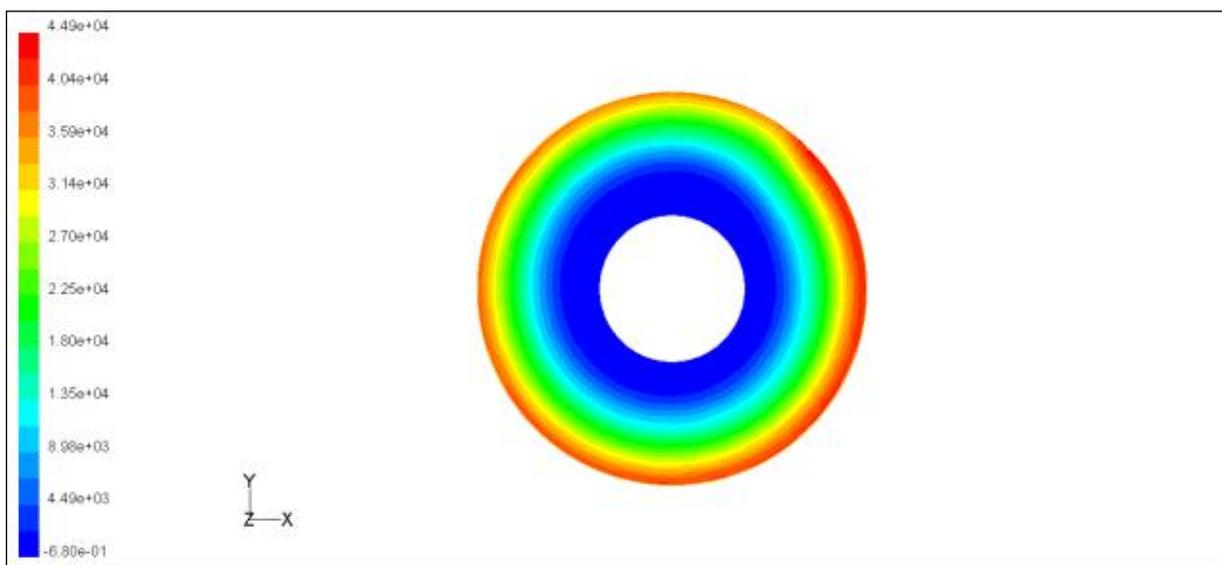
En observant minutieusement l'écoulement du fluide dans chacun des deux cas, nous constatons qu'aux mêmes conditions aux limites, l'effet de la pression d'entrée se conserve plus longtemps dans le cas de la vapeur d'eau que celui de l'air comprimé. De plus, la variation de la vitesse tangentielle est légèrement plus grande dans le cas de la vapeur d'eau que l'air. Bien que la viscosité de l'air soit plus grande que celle de la vapeur d'eau dans choisies, nous dirons que l'espace inter-disque choisi est beaucoup plus favorable avec de la vapeur d'eau comme fluide de travail. Une autre remarque, au niveau de la zone d'écoulement, la réduction croissante de la vitesse et de la pression montre qu'il est nécessaire d'optimiser cette zone avant chaque conception.

La composante tangentielle de la vitesse dans le cas de la vapeur d'eau est représentée sur la figure 27 ci-dessous afin d'en juger de sa répartition par rapport à celle obtenue pour l'air comprimé.



**Figure 27: composante tangentielle de la vitesse**

En augmentant la vitesse de rotation à 40.000tr/min en utilisant toujours de la vapeur d'eau comme fluide. Nous avons obtenu les contours de pression suivant :



**Figure 28: contours de pression à 40.000tr/min**

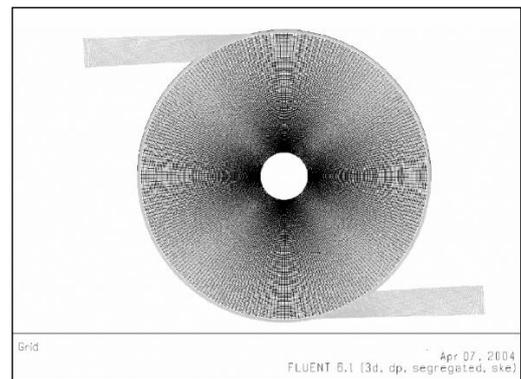
Nous constatons que la pression décroît plus lentement lorsque nous augmentons la vitesse de rotation des disques. La pression reste donc assez forte dans près de la moitié de la zone d'écoulement du fluide. Ce qui confirme encore qu'il est nécessaire d'optimiser cette zone.

### **3- Comparaison avec le modèle 3D de 'Andrés Ladino' [19]**

Dans le souci de comparer notre modèle à un modèle déjà étudié, nous avons maillé un autre modèle ayant les mêmes paramètres géométriques, mais possédant deux injecteurs diamétralement opposés, comme l'ont fait Andrés Ladino [19] et Warren Rice [22]. Contrairement à Andrés ladino qui a pris la peine de monter un modèle complet d'une turbine de Tesla avec 1 disque comme rotor et deux tubes d'injecteur, nous avons considéré deux zones diamétralement opposées comme des injecteurs à notre modèle numérique et nous visualisons le profil d'évolution de la pression sur un disque comparativement à celui de Andrés Ladino. La position des injecteurs et les conditions aux limites ne sont pas les mêmes ; en effet, nous avons choisi une vitesse de 300m/s contre 199.27m/s pour Andrés. Avec un total de 2.412.000 cellules, il a obtenu une convergence à 5000 itérations en 14 jours [19] contrairement à notre modèle à 216680 cellules pour une convergence à 300 itérations en 3 heures. Et donc, le but de cette comparaison est simplement de visualiser le profil de l'écoulement du fluide comparativement à celui de ce dernier. Nous avons renforcé nos injecteurs en rouge pour les rendre plus visible. Nous présentons ici les résultats obtenus :



**Figure 29: grille du modèle à 2 injecteurs**



**Figure 30: grille de Andrés [19]**

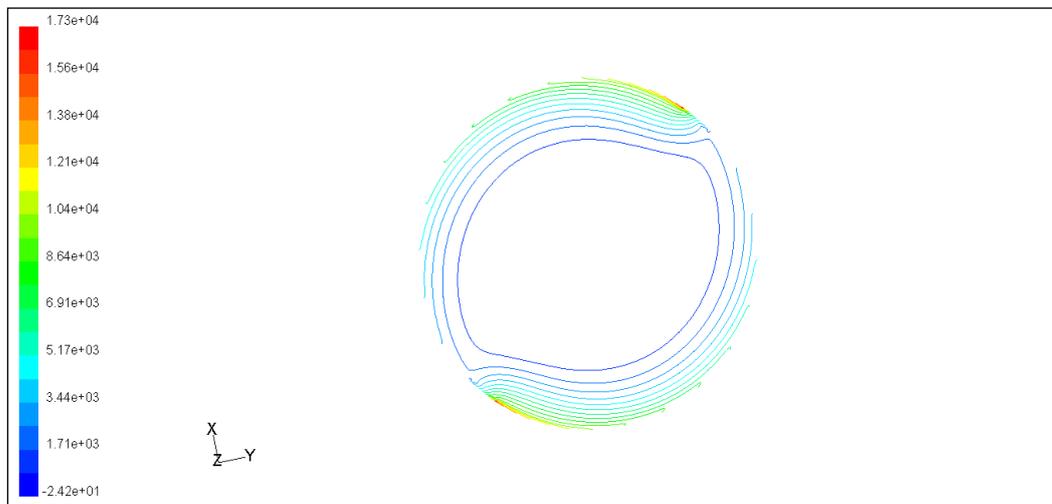


Figure 31: contour de pression

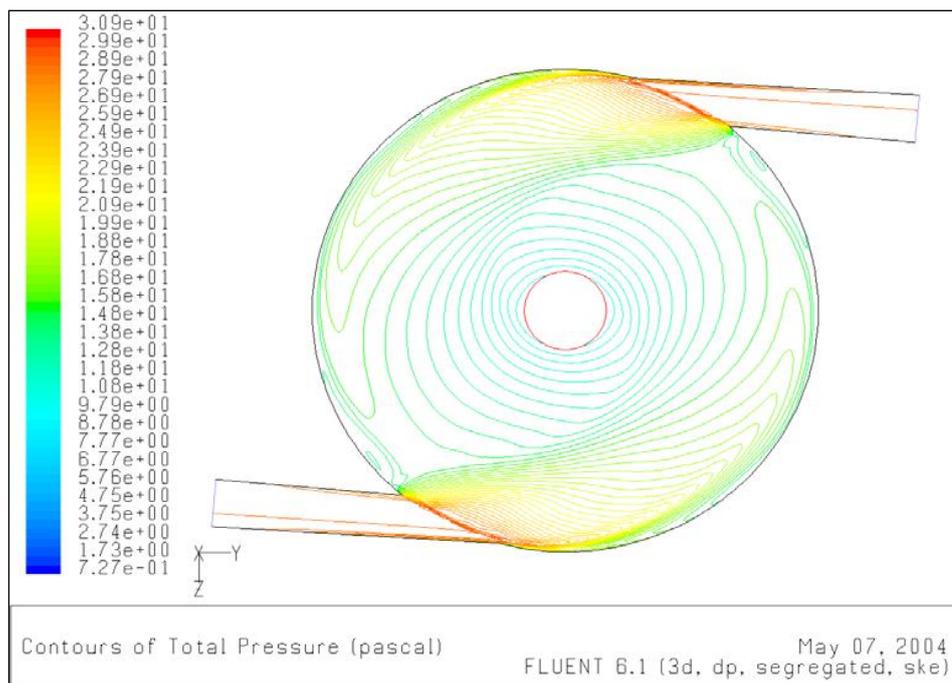
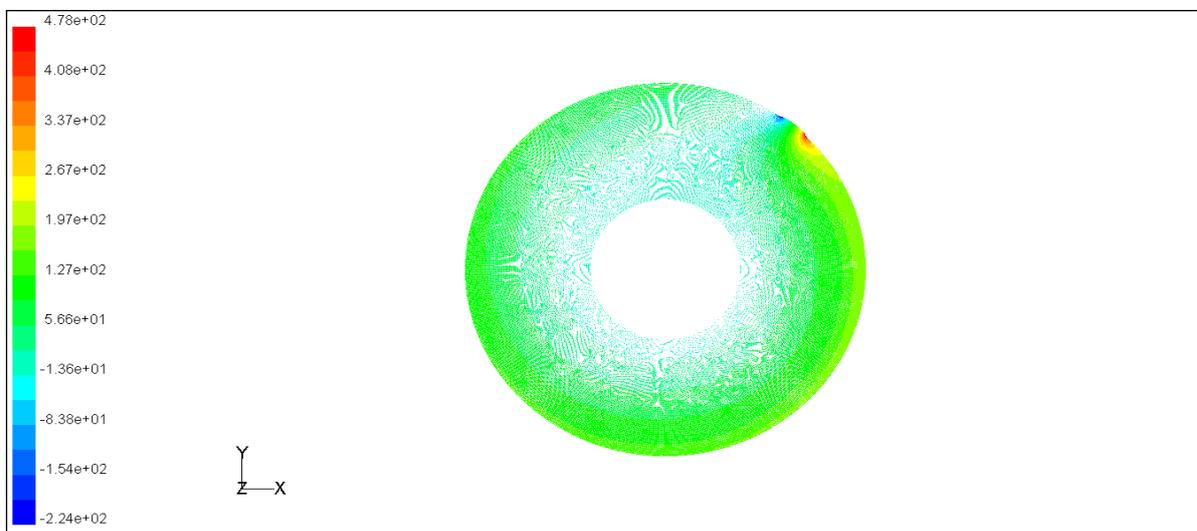


Figure 32: contour de pression "Andrés"[19]

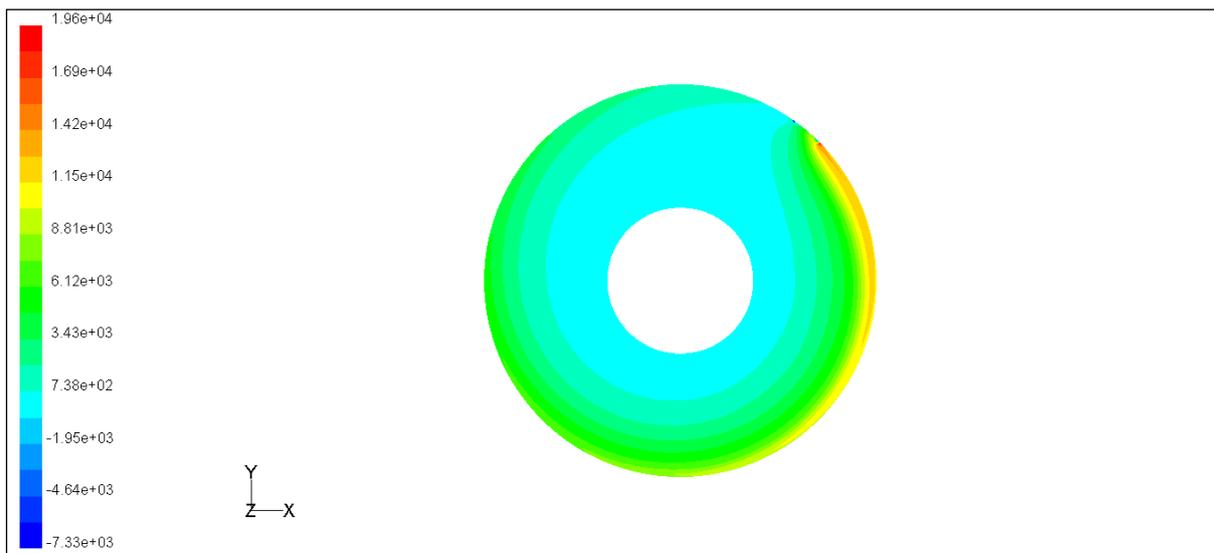
Nous remarquons que la décroissance de la pression est pratiquement la même pour les deux cas et suit la même trajectoire. Tous les autres paramètres sont différents suite à la différence nette qu'il y a entre les deux modèles. Autrement dit, dans une turbine de Tesla, on observe toujours une chute de pression du fluide lors de son écoulement. D'autre part, le contour de

pression est mieux repartie avec un injecteur qu'avec deux : le nombre d'injecteurs n'influence pas toujours positivement l'écoulement du fluide.

Nous avons aussi repris les calculs du cas avec un injecteur en changeant simplement la vitesse d'entrée à 600m/s (courbe des itérations en annexe3), bien que presque irréaliste, nous avons obtenu des profils beaucoup mieux repartis que dans le cas de 300m/s. la vitesse tangentielle est assez grande sur toute la surface du disque (figure33 ci-dessous) ; le contour de pression est aussi très représentatif (figure34 ci-dessous) Ce qui nous permet de conclure directement que la vitesse d'entrée ou la pression d'entrée du fluide augmente la transition de l'écoulement dans une turbine de Tesla.



**Figure 34: vitesse tangentielle à 600m/s**



**Figure 33: contours de pression à 600m/s**

#### **4- Discussion Générale**

L'écoulement de l'air et de la vapeur d'eau comme fluides de travail dans une turbine de Tesla ont été simulés. Aux mêmes conditions aux limites, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- ❑ La turbine de Tesla fonctionne mieux avec de la vapeur d'eau qu'avec l'air comprimé selon le modèle que nous avons simulé. Une étude expérimentale est nécessaire pour valider ce constat.
- ❑ Vu la réduction rapide de la vitesse et de la pression du fluide sur le disque, la surface d'écoulement du fluide sur un disque de Tesla doit être optimisée, ce qui signifie que, moyennant d'autres études numériques et expérimentales, la turbine de Tesla ne peut être produite à une certaine grande échelle et donc elle serait bien adaptée pour les productions autonomes.
- ❑ Le nombre d'injecteurs n'accroît pas nécessairement l'écoulement dans la turbine
- ❑ La contrainte tangentielle reste assez constante jusqu'à un certain niveau pour chacun des cas ; or cette contrainte est liée au couple moteur [18] et [19]; ce qui signifierait que la nature tangentielle de l'écoulement dans la turbine de Tesla est principalement responsable des bonnes ou mauvaises performances de cette machine.
- ❑ L'augmentation des variables d'entrée (vitesse de rotation, vitesse ou pression du fluide) a une incidence positive sur le profil d'écoulement du fluide.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Tout au long de ce travail, une étude numérique d'un écoulement de fluide entre deux disques tournants en co-rotation par rapport à une vitesse d'entrée a été faite. Le code de calcul « fluent » basé sur la méthode des volumes finis a été utilisé pour résoudre numériquement les équations de Navier stokes, gouvernant le phénomène étudié. Le modèle numérique considéré a été déduit d'une étude préalable d'une part sur les turbines conventionnelles (principe de fonctionnement, avantages et inconvénients), et d'autre part sur la turbine de TESLA (caractéristiques géométriques, avantages et paramètres influençant son fonctionnement selon la littérature). L'analyse numérique consistant à visualiser cet écoulement a permis de confirmer certains de ces paramètres d'influences notamment l'influence de la nature du fluide, du diamètre extérieur et du nombre d'injecteurs. Il ressort donc que la vapeur d'eau est plus adaptée pour le modèle choisie, le diamètre extérieur est limité en grandeur, et que le nombre d'injecteurs n'a pas une grande influence sur le parcours du fluide.

Une simulation exacte qui remplit intégralement toutes les exigences physiques est assez difficile à réaliser avec un outil CFD. Mentionnons que notre étude permet de dire avec certitude que la turbine de TESLA est digne d'une enquête plus approfondie, en particulier pour comprendre les régimes d'écoulement et le processus complexe de transition.

Un prototype physique complet de cette machine est très recommandé afin d'assurer l'efficacité réelle d'une telle technologie, et de vérifier les influences des paramètres, tandis que la modélisation numérique ainsi que les solutions d'analyse révéleront de bonnes conditions de l'écoulement et constitueront un meilleur complément à la recherche expérimentale.

Le nombre de disques, la couche limite et le couple résistant (alternateur) restent des paramètres que nous jugeons opportuns et primordiaux d'étudier prochainement. La simulation des modèles complets pourra prendre place en négligeant ou non l'influence des rondelles et des boulons d'espacement. Toutefois, l'acquisition de la bibliographie liée à cette turbine, les outils d'analyse CFD et les ressources informatiques nécessaires devront être garantis.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] **Rafael Dominguez et Al.** , *L'électricité au service du développement*, Société Financière d'Investissement et Banque Mondiale, 2003
- [2] **Bulletin Africain**, *Accès à l'énergie, résultat et résumé à l'intention des décideurs*. Numéro spécial, 2005
- [3] **Fiche technique PRISME N°7**, *les politiques de maîtrise de l'énergie : les agences d'électrification rurale en Afrique subsaharienne*, 2008
- [4] **N. Tesla**, Turbine, U.S. Patent No. 1061206, 1913
- [5] **Heinz et Capliez**, *Technologie d'électricité*, Edition Foucher, tome1, Paris
- [6] **Sunnu Albert**, *Cours de turbomachines*, Master1, 2iE, 2009
- [7] **Siemens**, *Turbines à vapeur pré-étudiées*, Publication Siemens
- [8] **Jacques Bernard**, *Turbomachines des fluides compressibles*, INSA de Toulouse, 2008
- [9] **Yves Loranchet**, *Mise en œuvre des turbines à gaz dans l'industrie*, Société Tuma Systems.
- [10] **Siemens**, *Turbines à gaz industriels*, Publication Siemens
- [11] **PACER**, *Turbine hydraulique et Energies Renouvelables*, Office Fédérale des Questions Conjoncturelles, Suisse, 1995.
- [12] **Rapport du groupe de travail de l'Académie des Beaux Arts**, *Les éoliennes*, Institut de France, 2007
- [13] **W.M.J. Cairns**, *The Tesla Disc Turbine*, Edition "Camdem miniature steam services"- 2001
- [14] **Extrait du « Gloubik Sciences »**, *La turbine à vapeur Tesla*, article d'information, mise en ligne le 28 février 2009.
- [15] **Ken Rieli**, *Rebirth of the Tesla Turbine*, Published in "ExtraOrdinary Technology" magazine – July 2003
- [16] **Mustafa Özdemir et Al.** *Design, testing and two-dimensional flow modeling of a multiple-disk fan*, Tahsin Engine, 2009
- [17] **Ken Rieli**, *Tesla Turbine Primer*, In "ExtraOrdinary Technology" magazine , July 2003
- [18] **N. Huybrechts et Al.** *Numerical study of a Tesla turbine*, , Free University of Brussels, Applied Mechanics Department; Av F. Roosevelt 50, 1050 Brussels

- [19] **Andrés F. R. Ladino**, *Numerical Simulation of the Flow Field in a Friction-Type Turbine (Tesla turbine diploma thesis)*, National University of Colombia, School of Engineering, June 2004.
- [20] **Sébastien Candel**, *Mécanique des fluides*, 2<sup>e</sup> édition Dunod, 1995, Paris.
- [21] **Yves Jeannot**, *Cours de transferts thermiques*, Ecole des mines de Nancy, 2<sup>e</sup> année, 2008.
- [22] **Warren Rice**, *Tesla Turbomachinery*, IV International Nikola Tesla symposium, Sept 2001, Arizona States University.

ANNEXES

Annexe1:

Quelques projets actuels de construction de centrale électrique en Afrique

Pays	Type de centrale électrique	Puissance (MW)	coût du projet (milliard de F CFA)	RATIO (F/MW)
Egypte	centrale à gaz	650	275	0,42
Cameroun	Centrale à Fuel lourd	86	62,8	0,73
Cameroun	Centrale à Gaz	216	170	0,79
Sénégal	Centrale à charbon	125	118	0,94
Afrique du Sud	Centrale à charbon	4764	7735	1,62

Coût des composantes d'un projet de construction en milliards (cas de la centrale à Charbon de Medupi- Afrique du Sud)

Composante	RANDS			EUROS			UC		
	Monnaie locale	Devise	Total	Monnaie locale	Devise	Total	Monnaie locale	Devise	Total
<b>ESKOM</b>									
Chaudières	8,30	12,30	20,60	0,74	1,10	1,83	0,67	1,00	1,67
Turbines	5,40	8,60	14,00	0,48	0,77	1,25	0,44	0,70	1,13
Travaux de génie civil	8,61	0,13	8,74	0,77	0,01	0,78	0,70	0,01	0,71
Matériel électrique	1,89	0,94	2,83	0,17	0,08	0,25	0,15	0,08	0,23
Commande et surveillance	1,44	-	1,44	0,13	-	0,13	0,12	-	0,12
Charbon et cendres	4,18	0,39	4,57	0,37	0,03	0,41	0,34	0,03	0,37
Services à faible pression	2,15	0,25	2,40	0,19	0,02	0,21	0,17	0,02	0,19
Logement	4,16	-	4,16	0,37	-	0,37	0,34	-	0,34
Frais de mise en exploitation des propriétaires	6,41	-	6,41	0,57	-	0,57	0,52	-	0,52
Intégration du transport	6,88	-	6,88	0,61	-	0,61	0,56	-	0,56
<b>TOTAL (coûts de base uniquement)</b>	<b>49,43</b>	<b>22,60</b>	<b>72,03</b>	<b>4,40</b>	<b>2,01</b>	<b>6,41</b>	<b>4,01</b>	<b>1,83</b>	<b>5,84</b>
Ajustement/indexation des prix des contrats	12,09	-	12,09	1,08	-	1,08	0,98	-	0,98
Coût de couverture	2,59	-	2,59	0,23	-	0,23	0,21	-	0,21
Intérêt pendant la construction	28,36	-	28,36	2,53	-	2,53	2,30	-	2,30
Provision pour aléas	7,24	3,31	10,56	0,65	0,29	0,94	0,59	0,27	0,86
<b>TOTAL PROJET</b>	<b>99,71</b>	<b>25,92</b>	<b>125,63</b>	<b>8,88</b>	<b>2,31</b>	<b>11,19</b>	<b>8,08</b>	<b>2,10</b>	<b>10,18</b>

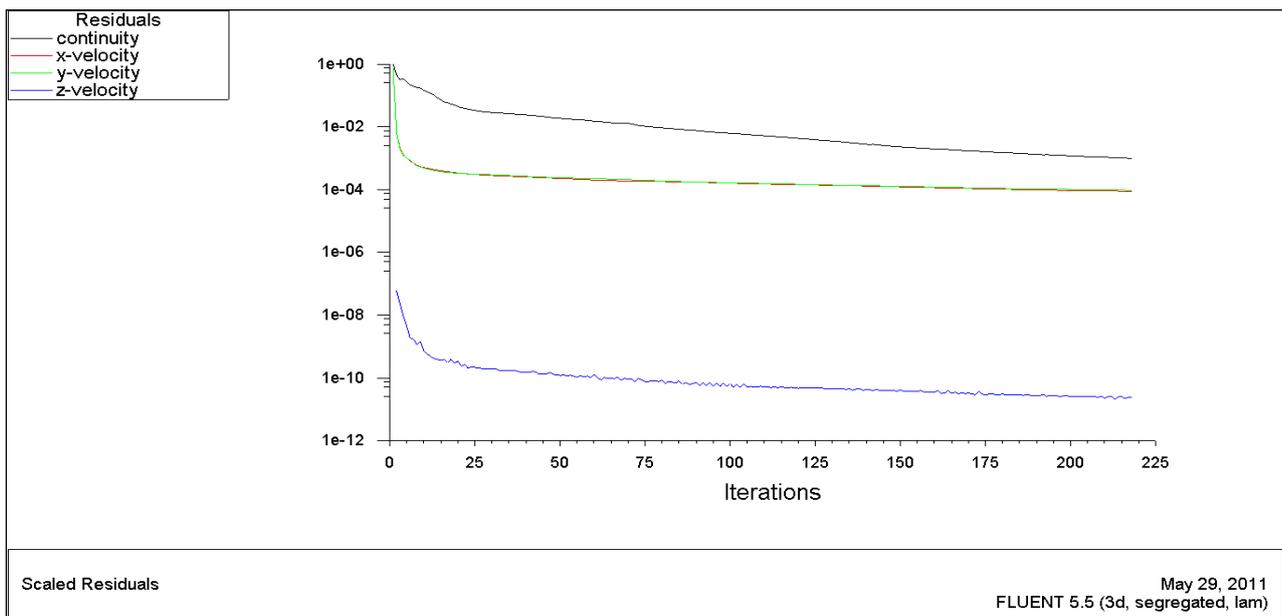
Source: Rapport d'évaluation du projet, BAD, Octobre 2009

Annexe2:

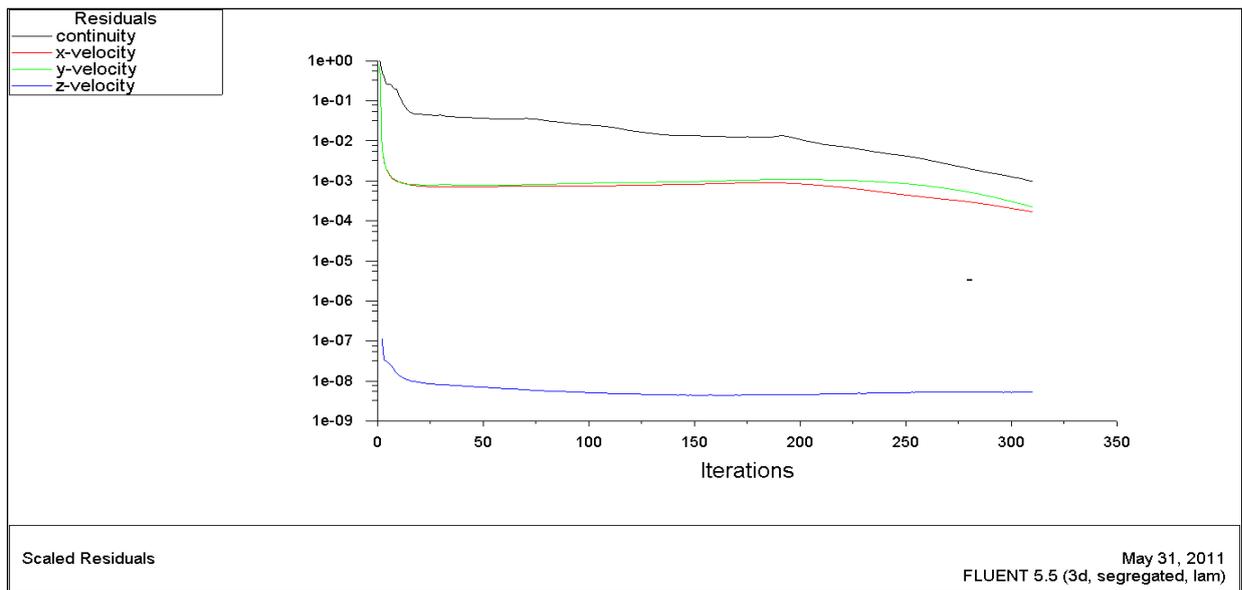
Schéma de discrétisation	
Variable	Schéma de discrétisation
Pression	PRESTO !
Couplage pression-vitesse	SIMPLE
Momentum	Implicite de second ordre.

Facteurs de Relaxation	
Variables	Facteurs de Relaxation
Pression	0,3
Densité	1
Body forces	1
momentum	0,7

Courbe de convergence pour le cas de la vapeur d'eau



Annexe 3 : courbe de convergence dans le cas du double injecteur



Courbe des itérations à 600m/s

