

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Conception et réalisation d'une éolienne de type  
Savonius hélicoïdale et tests de performances en  
Soufflerie/CFD**

Présenté par :

M. Aimen GUEDIRI

M. Abdelhakim KHALDI

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Présenté et soutenu publiquement le : 23/06/2018

Composition du Jury:

Président	M. Brahim GUERGUEB,	MAA	ENP, Alger
Promoteur	M. Arezki SMAILI,	Professeur	ENP, Alger
Co-Promoteur	M. Mohamed LATRECHE,	MAA	ENP, Alger
Co-Promoteur	M. Belkacem BELABES,	Docteur	CDER
Examineur	M. Salah LARBI,	Professeur	ENP, Alger
Examineur	M. Hocine BENNOUR,	MAA	ENP, Alger



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدونة الوطنية المتعددة التخصصات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Conception et réalisation d'une éolienne de type  
Savonius hélicoïdale et tests de performances en  
Soufflerie/CFD**

Présenté par :

M. Aimen GUEDIRI

M. Abdelhakim KHALDI

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Présenté et soutenu publiquement le : 23/06/2018

Composition du Jury:

Président	M. Brahim GUERGUEB,	MAA	ENP, Alger
Promoteur	M. Arezki SMAILI,	Professeur	ENP, Alger
Co-Promoteur	M. Mohamed LATRECHE,	MAA	ENP, Alger
Co-Promoteur	M. Belkacem BELABES,	Docteur	CDER
Examineur	M. Salah LARBI,	Professeur	ENP, Alger
Examineur	M. Hocine BENNOUR,	MAA	ENP, Alger

# Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*A mes chers et tendres parents, les meilleurs du monde, que dieu les protège,*

*Ils sont ma source de bonheur et d'inspiration, ils sont ma vie.*

*A mon adorable sœurs Mebaraka, Amira et à mes frères, Ahmed, Soufiane, Hicham,  
Oussama.*

*A toute ma famille.*

*A tout mes amis : Hacem, Bilal, Laroucci, Mohamed, Anouar,*

*Youcef, Oussama, Salah, Ismail et bien sûr Youcef*

*A tout le département de génie mécanique en général.*

*A tout les membres de ma classe. La meilleure classe du monde,*

*Et bien sûr à mon binôme Abdelhakim.*

*JE VOUS AIME*

*Aimen GVEDIRI*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, qui ont toujours prié pour moi et qui n'ont pas cessé de*

*M'encourager et de me soutenir.*

*A ceux qui m'ont soutenu et qui m'ont supporté durant toute cette année*

*A mon cher frère Abdelhalim, A mes chères sœurs*

*A tous mes amis surtout badredinne, Ibrahim, Anouar.*

*A mon binôme Aimen GVEDIRI*

*Aux personnes qui m'ont aidé et encouragé et qui m'ont accompagné*

*Durant mon chemin de vie.*

*Abdelhakim KHALDI*

## **Remerciements**

*On tient à remercier Dieu notre créateur de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.*

*Premièrement et avant tout, nous adressons le grand remerciement à notre promoteur, Professeur SMAILLI Arezki, pour nous avoir toujours fait confiance quant à la façon de mener nos travaux, ses conseils et ses directives. On le remercie également pour sa disponibilité, son aide, son soutien et ses qualités humaines.*

*On tient à lui exprimer notre gratitude pour sa bienveillance pendant ces trois années d'étude au sein du département Génie Mécanique, pour son travail effectué au sein du département et tout ce qu'il a fait pour le bien des étudiants.*

*Un grand Merci à monsieur Belgacem BELABESS notre co-promoteur qui s'est toujours montré à notre écoute et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce projet Merci pour votre aide, gentillesse et encouragement.*

*On remercie également Monsieur Mohamed LATRECHE notre co-promoteur pour ses conseils judicieux ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de notre travail.*

*On remercie particulièrement les responsables de l'entreprise nationale AMC pour ses confiance, Monsieur Abdelkarim LAHLAH l'ingénieur du département GM pour son aide et sa disponibilité pendant la réalisation de ce projet.*

*Un grand remercie pour monsieur Brahim GUERGUEB, monsieur Salah LARBI et Hocine BENNOUR d'avoir accepté de juger ce travail. C'est un honneur de le compter parmi le jury de ce projet de fin d'étude.*

*Notre reconnaissance la plus sincère aux enseignants du département Génie Mécanique et de l'ENP en général, grâce à qui nous avons pu en arriver Et plus précisément à Mr RECHAK Saïd, pour ses conseils, pour son soutien, pour tous ses efforts et pour son aide et surtout pour ses qualités humaines.*

## ملخص

الهدف الأول من هذا العمل هو التصميم بمساعدة الكمبيوتر باستخدام برنامج (صوليديوركس), وهما نوعان من توربينات الرياح ( صافونوريوس ), الأول هو النوع التقليدي ص ت, النوع الثاني ص ح 90. الهدف الثاني هو صنع نموذج مقياس 2: 3 لنموذج (كاموجي) المختبر, توربينة الرياح ص ح 90, واختبار باناش لتحديد خصائصه. تم إجراء محاكاة رقمية ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد بواسطة برنامج (فلوينت), وتم التحقق من صحة النتائج الرقمية والتجريبية التي تم الحصول عليها على توربينة الرياح ص ح 90 من خلال عمل, ( كاموجي ) للتوربينات الرياح, و( هياشي ) للتوربينات الرياحية ص ت. كما تم التحقق من اختبارات الأداء على النموذج المصنع من خلال مراجع اعمال الباحثين المذكورة سابقا.

**الكلمات المفتاحية:** توربينة صافونوريوس, اختبار باناش, المحاكاة الرقمية, حساب الموائع الديناميكية.

## Abstract

The first target of this work is on computer-aided design using SolidWorks software, two types of Savonius wind turbines, the first is conventional type S-C, the second type S-H90. The second target is to produce a 2: 3 scale models of the tested Kamoji model, the S-H90 wind turbine, and a test bench to determine its characteristics. A two-dimensional and three-dimensional CFD numerical simulation was made by the ANSYS Fluent 17.1 Software, the numerical and experimental results thus obtained on our S-H90 wind turbine are validated through the work of, Kamoji for the SH wind turbine, and Hayachi for the S-C wind turbine. The performance tests on the realized model were also validated through these same references.

**Key words:** Savonius Turbine, Test Bench, Numerical Simulation, Aerodynamics.

## Résumé

Le premier objectif du présent travail porte sur la conception assistée par ordinateur en utilisant le logiciel SolidWorks, de deux types d'éoliennes Savonius, la première est conventionnelle de type S-C, la deuxième hélicoïdale de type S-H90. Le second objectif est de réaliser un modèle réduit à l'échelle 2 : 3 du modèle testé de Kamoji, de l'éolienne S-H90, et d'un banc d'essai permettant de déterminer ses caractéristiques. Une simulation numérique CFD, en bidimensionnelle et tridimensionnelle a été faite par le logiciel ANSYS Fluent 17.1, les résultats numériques et expérimentaux ainsi, obtenus sur notre éolienne S-H90 sont validés à travers les travaux de Kamoji pour l'éolienne S-H90, et de Hayachi pour l'éolienne S-C. Les tests de performance sur le modèle réalisé ont été également validé à travers ces mêmes références.

**Mots clés :** Savonius Turbine, Banc d'Essai, Simulation Numérique, Aérodynamique.

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

Abréviations

Introduction générale .....	16
<b>1. <u>CHAPITRE 1 : Généralités</u> .....</b>	<b>20</b>
<i>1.1. Introduction</i> .....	20
<i>1.2. Les énergies renouvelables</i> .....	20
1.2.1. Programme des énergies renouvelables en Algérie .....	21
1.2.2. L'énergies éolienne dans le monde.....	23
<i>1.3. Potentiel du vent en Algérie</i> .....	24
<i>1.4. Les différents types d'éoliennes</i> .....	25
1.4.1. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT) .....	25
1.4.2. Les éoliennes à axe vertical (VAWT).....	26
1.4.3. L'éolienne de type Darrieus.....	26
1.4.4. L'éolienne de Type Savonius .....	27
1.4.5. Principe de fonctionnement des éoliennes à axe verticales .....	28
<i>1.5. Les notions sur la récupération de l'énergie éolienne</i> .....	29
1.5.1. Puissance instantanée du vent.....	29
1.5.2. Le coefficient de vitesse ( $\lambda$ ).....	29
1.5.3. Le coefficient de moment ( $C_m$ ).....	29
1.5.4. Le coefficient de puissance ( $C_p$ ).....	30
<b>2. <u>CHAPITRE 2 : Formulation mathématique</u>.....</b>	<b>33</b>
<i>2.1. Conservation de la masse</i> .....	33
<i>2.2. Equation de Navier-Stokes</i> .....	33
<i>2.3. Modélisation de la turbulence</i> .....	34

2.4.	<i>Les équations moyennées de Reynolds RANS</i> .....	35
2.5.	<i>Modèle standard k-ε</i> .....	37
2.6.	<i>La couche limite</i> .....	38
2.6.1.	Calcul l'épaisseur de la couche limite $\delta$ .....	38
2.6.2.	Analyse de la couche limite pour le cas d'une plaque plane .....	39
2.6.3.	Loi de la paroi « low of the wall » .....	39
2.6.4.	Maillage de la couche limite.....	40
<b>3.</b>	<b><u>CHAPITRE 3 : Méthodologie et simulation numérique CFD</u></b> .....	<b>43</b>
3.1.	<i>Introduction au CFD</i> .....	43
3.2.	<i>Les étapes de simulations</i> .....	44
3.2.1.	Géométries et domaines de simulation .....	44
3.2.2.	Technique de maillage .....	45
3.2.3.	Choix du type de maillage .....	46
3.2.4.	Présentation de la méthode des volumes finis .....	48
3.2.5.	Schéma de discrétisation.....	49
3.2.6.	Discrétisation spatiale.....	51
3.2.7.	Conditions aux limites .....	52
3.2.8.	Méthode de résolution .....	53
3.2.9.	Traitement des données .....	54
3.3.	<i>Résumé des paramètres CFD</i> .....	54
3.4.	<i>La simulation numérique de différents types de rotor</i> .....	55
3.4.1.	La simulation numérique du rotor conventionnel S-C.....	55
3.4.2.	La simulation numérique du rotor S-H90 .....	60
<b>4.</b>	<b><u>CHAPITRE 4 : La conception et la réalisation</u></b> .....	<b>62</b>
4.1.	<i>Les étapes de conception et de réalisation de l'éolienne</i> .....	62
4.1.1.	La conception de rotor S-H90.....	62
4.1.2.	L'usinage des armatures .....	63
4.1.3.	L'assemblage des armatures .....	68
4.1.4.	Le moulage et la finition .....	69
4.2.	<i>Les étapes de conception et de réalisation du banc d'essai</i> .....	70
4.2.1.	Description.....	70

4.3.	<i>Système de mesure pour l'analyse expérimentale du rotor.....</i>	73
4.3.1.	Fonctionnement du système (Banc d'essai).....	73
4.3.2.	Etalonnage du ressort.....	75
4.3.3.	Notions de similitude.....	77
4.4.	<i>Conclusion.....</i>	78
<b>5.</b>	<b><u>CHAPITRE 5 : Analyse des résultats.....</u></b>	<b>80</b>
5.1.	<i>Résultats des simulations numériques par CFD.....</i>	<b>80</b>
5.2.	<i>Rotor conventionnel S-C.....</i>	<b>80</b>
5.2.1.	Simulation bidimensionnel 2D.....	80
5.2.2.	Simulation tridimensionnel 3D.....	84
5.2.3.	Etude comparative entre la simulation 2D et 3D pour le rotor S-C.....	88
5.3.	<i>Simulation tridimensionnelle du rotor S-H90.....</i>	<b>89</b>
5.3.1.	Validation des résultats.....	89
5.3.2.	Analyse des résultats pour le rotor S-H90.....	91
5.4.	<i>Etude comparative entre les résultats de simulation du rotor S-C et S-H90.....</i>	<b>94</b>
5.5.	<i>Résultats de l'expérimentation.....</i>	<b>95</b>
5.5.1.	Les résultats des mesures expérimentales.....	95
5.5.2.	Etude comparative entre les résultats numériques du S-H90 et ceux de l'expérimentale.....	96
<b>6.</b>	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>100</b>
	<i>Biobibliographique.....</i>	<b>102</b>
<b>7.</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>105</b>
7.1.	<i>Annexe A : les équations de Navier Stocks pour le cas 2D et 3D.....</i>	<b>105</b>
7.2.	<i>Annexe B : CFD simulation numérique pour le Rotor S-H 90.....</i>	<b>106</b>
7.3.	<i>Planches des dessins</i>	

## **Liste des tableaux**

Table 3-1: Résultats de simulation numérique 2D pour les trois maillages. ....	56
Table 3-2 : Résultats de simulation numérique S-C 3D pour les 4 maillages. ....	59
Table 4-1 : Evaluation la pris totale d’usinage : .....	67
Table 4-2 : Désignations de différents composants mécaniques .....	71
Table 4-3 : les résultats d’étalonnage .....	76
Table 5-1 : Récapitulatif des résultats de mesure effectuées .....	95
Table 5-2 : Récapitulatif des résultats de calculs expérimentales .....	96
Table 5-3 : Comparaison entre les résultats du modèle réduit et ceux de Kamoji .....	96

## Liste des figures

Figure 1.1 : les énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale 2015 [1]...	20
Figure 1.2 : Les énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité [1].....	21
Figure 1.3 : L'énergie renouvelable et la production d'électricité dans l'Algérie en TWh [2].....	22
Figure 1.4 : La production nationale d'électricité dans l'Algérie en MW [2].....	23
Figure 1.5 : Capacités d'énergie éolienne pour les 10 principaux pays, 2016 [4].....	24
Figure 1.6 : Les vitesses moyennes du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol. [5].....	24
Figure 1.7 : Eolienne à axe horizontale.....	25
Figure 1.8 : Eoliennes de type Darrieus [7].....	27
Figure 1.9 : Eoliennes de type Savonius [7].....	27
Figure 1.10 : Les forces en présence dans une éolienne Savonius [7].....	28
Figure 1.11 : : Les forces en présence dans une éolienne Darrieus [7].....	28
Figure 1.12 : Courbes de puissances pour les différents types des éoliennes [18].....	31
Figure 2.1 Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence. [19].....	35
Figure 2.2 Vue plane des deux régions fluide étudiées. [10].....	36
Figure 2.3: Représentation de l'épaisseur de la couche limite. [17].....	39
Figure 3.1 : Domaines de simulations pour S-C en 2D (domaine fixe et domaine rotatif).....	44
Figure 3.2 : Domaines de simulations S-H90 en 3D (domaine fixe et domaine rotatif).....	45
Figure 3.3 : Maillage structuré de la couche limite de rotor S-C 2D.....	47
Figure 3.4 : Evolution de la taille des éléments.....	47
Figure 3.5 : Maillage du rotor S-C 3D.....	48
Figure 3.6 : Maillage de la région tournante pour le rotor S-C.....	48
Figure 3.7 : Volume de contrôle bidimensionnel [19].....	49
Figure 3.8 : Conditions aux limites du rotor S-H90.....	53
Figure 3.9 : Spécifications du rotor-S-C.....	56
Figure 3.10 : Test d'indépendance de maillage avec un TSR = 0.8 pour le rotor S-C, 2D.....	57
Figure 3.11 : Distribution de $Y^+$ autour des aubes (vitesse d'entrée = 9 m/s, $\lambda = 0.8$ ).....	57
Figure 3.12 : Schéma représentatif du rotor S-C en 3D [20].....	58
Figure 3.13 : Test d'indépendance de maillage pour TSR=0.8.....	59
Figure 3.14 : Schéma représentatif du rotor S-H90 [20].....	60
Figure 4.1 : Squelette de rotor.....	62

Figure 4.2 : Armature en forme de « S » du squelette.....	63
Figure 4.3 : Fraiseuse CNC .....	63
Figure 4.4 : Machine électroérosion par fil .....	64
Figure 4.5 : Les électrodes utiliser pour le perçage.....	64
Figure 4.6 : Perceuse par étincelage.....	64
Figure 4.7 : La pièce brute.....	65
Figure 4.8 : Simulation parcours d’outil du logiciel CAMWorks.....	65
Figure 4.9 : L’usinage par la Fraiseuse CNC du bloc des armatures .....	65
Figure 4.10 : Usinage à la perceuse par étincelage.....	66
Figure 4.11: Découpage par électroérosion à fil.....	66
Figure 4.12 : La simulation de l’armature à l’aide de SolidWorks .....	67
Figure 4.13 : Axe de rotor .....	68
Figure 4.14 : Fixation des armatures sur l’axe et sur les plaques d’extrémités.....	68
Figure 4.15 : Grille des fibres attachée sur les armatures et les plaques d’extrémités.....	68
Figure 4.16 : Moule de fortune en papier adhésif .....	69
Figure 4.17 : Rotor après moulage .....	69
Figure 4.18 : Rotor fini sur SolidWorks.....	69
Figure 4.19 : Rotor fini après ponçage .....	69
Figure 4.20 : L’éolienne montée sur le banc d’essai .....	70
Figure 4.21 : Mesure de l’allongement à l’aide de la règle graduée .....	74
Figure 4.22 : Les masses étalonnées.....	74
Figure 4.23 Anémomètre électronique à tube de Pitot pour mesurer la vitesse de l’écoulement d’air.....	74
Figure 4.24 : Tachymètre électronique pour mesurer la vitesse de rotation du rotor.....	74
Figure 4.25 : L’étalonnage du ressort.....	75
Figure 4.26 : graphique d’étalonnage $F = f(\Delta l)$ .....	76
Figure 5.1 : Variation du coefficient de moment en fonction du temps, $\lambda = 0.8$ .....	80
Figure 5.2 : Evolution de coefficient de moment $C_m$ en fonction de TSR .....	81
Figure 5.3 : Evolution de coefficient de moment $C_m$ en fonction de TSR .....	82
Figure 5.4 : Distribution des vitesses (m/s) dans le rotor conventionnel (TSR=0.8).....	82
Figure 5.5 : Parcours des lignes des courants dans le domaine de simulation, TSR=0.8 .....	83

Figure 5.6 : Distribution des pressions (Pa) dans le rotor conventionnel (TSR=0.8) .....	83
Figure 5.7 : Comparaison entre les résultats CFD et expérimentaux, S-C 3D .....	84
Figure 5.8 : Distribution des vitesses dans la direction x pour le rotor S-C 3D .....	85
Figure 5.9 : Distribution des vitesses suivant dans le zone de rotation .....	85
Figure 5.10 : Distribution des pressions statique pour le rotor S-C 3D .....	86
Figure 5.11 : Distribution des pressions pour le rotor S-C 3D dans le zone de rotation .....	86
Figure 5.12 : Etude comparative entre les simulations 2D et 3D, S-C .....	88
Figure 5.13 : La variation du coefficient de moment $C_m$ en fonction des TSR .....	89
Figure 5.14 : La variation du coefficient de puissance $C_p$ en fonction des TSR .....	89
Figure 5.15 : Distribution des vitesses dans la direction x pour le rotor S-H90 .....	91
Figure 5.16 : Distribution des vitesses suivant x pour le rotor S-H90, zone de rotation .....	91
Figure 5.17 : Distribution des pressions statique pour le rotor S-H90 .....	92
Figure 5.18 : Distribution des pressions suivant x pour le rotor S-H90, zone de rotation .....	92
Figure 5.19 : Etude comparative entre résultats des simulations 3D S-C et S-H90 .....	94
Figure 5.20 : Variation de coefficient de moment $C_m$ en fonction de TSR .....	97
Figure 5.21 : Variation de coefficient de puissance $C_p$ en fonction TSR .....	97
Figure 7.1 : Maillage non structuré de la région fixe avec des éléments tétraédriques .....	106
Figure 7.2 : Maillage non structuré de la région interne tournante S-H90 .....	106
Figure 7.3 : Distribution de $Y_{plus}$ autour des aubes (vitesse d'entrée = 9 m/s, $\lambda = 0.8$ ). .....	107
Figure 7.4 : conditions aux limites du rotor hélicoïdale 90 .....	107

## Nomenclature

	<b>Description</b>	<b>Unités</b>
$A_s$	Surface frontale du rotor	$m^2$
$a$	Facteur d'induction	/
$C_m$	Coefficient de moment	/
$C_p$	Coefficient de puissance	/
$C_\mu$	Constante adimensionnelle	/
$C_D$	Coefficient de traînée	/
$C_F$	Coefficient de frottement local	/
$D$	Diamètre du rotor	$m$
$E$	Facteur de rugosité	/
$e$	Espacement entre les aubes	$m$
$g$	L'accélération gravitationnelle	$m/s^2$
$H$	Hauteur de rotor	$m$
$k$	Constante de Karman	/
$M_r$	Moment dû à la rotation de rotor	$N.m$
$P_{vent}$	Puissance de vent	$Watt$
$P_{rotor}$	Puissance de rotor	
$p$	Pression statique	$Pa$
$p_{atm}$	Pression dynamique	$Pa$
$Re$	Nombre de Reynolds	/
$S_\emptyset$	Source de $\emptyset$	/

$U_\tau$	Vitesse à la paroi	$m/s$
$U$	Vitesse de vent	$m/s$
$Y^+$	Mesure adimensionnelle de distance par rapport à la paroi	/
$\lambda$	Vitesse spécifique	/
$\mu$	Viscosité dynamique	$kg/m.s$
$\mu_t$	Viscosité turbulente	$kg/m.s$
$\varepsilon$	Taux de dissipation	/
$\tau_w$	Contrainte de cisaillement	$Pa$
$\delta$	Épaisseur de la couche limite	$m$
$\rho$	Masse volumique de l'air	$kg/m^3$
$\omega$	Vitesse de rotation de rotor	$rad/s$
$\nu$	Viscosité cinématique	$m^2.s$
$\emptyset$	Équation instationnaire de transport d'une quantité scalaire	/
$\tau_\emptyset$	Coefficient de diffusion pour $\emptyset$	/
$\nabla\emptyset$	Gradient de $\emptyset$	$1/m$
$\Delta t$	Pas de temps	$s$

## Abréviations

CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CFD	Dynamique des fluides computationnelle (Computational Fluid Dynamics)
DM	ANSYS Design Modeler
DNS	Simulation Numérique Directe (Direct Numerical Simulation)
HAWT	Eolienne à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine)
RANS	Equations moyennés de Reynolds (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)
VAWT	Eolienne à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbine)
LES	Simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation)
RNG k- $\epsilon$	Modèle k- $\epsilon$ réalisable
S-C	Rotor Savonius Conventionnel
S-H90	Rotor Savonius Hélicoïdale 90
STANDARD k- $\epsilon$	Modèle k- $\epsilon$ standard
TSR	Vitesse spécifique (Tip Strip Ratio)
2D	Simulation bidimensionnel
3D	Simulation tridimensionnel

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées. Parmi elles, nous pouvons citer l'énergie de fission nucléaire. Cependant, le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux, d'une part et d'autre part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement, dans la moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Les éoliennes de grande puissance ont déjà fait leurs preuves et les grandes éoliennes à axe horizontal ont atteint une bonne avancée dans leur développement. Cependant, la technologie éolienne actuelle connaît certaines limites, en premier lieu, le problème majeur de cette technologie est que, souvent, son fonctionnement optimal ne correspond pas à tous les régimes de vent. En effet, les éoliennes de grandes puissances sont conçues pour fonctionner avec des vitesses de vent élevées et de direction constante. Par conséquent, les ressources éoliennes adaptées pour cette technologie sont limitées, et se situent essentiellement sur les côtes et dans les grandes plaines. Ce type d'éoliennes sont généralement des éoliennes à axe horizontale ou HAWT « Horizontal Axis Wind Turbine ».

En conséquence, de nouvelles voies sont à l'heure actuelle explorées. En particulier le développement des turbines pouvant fonctionner à de faibles vitesses de vent, pour tirer le maximum de profit du potentiel éolien et qui peuvent s'intégrer au milieu urbain, étant donné que le régime du vent des zones urbaines est défavorable aux technologies classiques. Ainsi, de nouveaux modèles qui s'adaptent mieux à cet environnement, sont constamment développés. La tendance est de concevoir des turbines qui peuvent tourner à faibles vitesses de vent et indépendamment de la direction du vent, très imprévisible en milieu urbain. La technologie qui suscite le plus d'intérêt et qui se répond le plus pour les applications urbaines sont les éoliennes à axe vertical ou VAWT « Vertical Axis Wind Turbine ».

Le but de notre projet est de comparer les performances de l'éolienne verticale Savonius hélicoïdale S-H 90 réalisée dans le cadre de ce projet, à ceux de l'éolienne verticale Savonius conventionnelle S-C.

Pour cela on a cherché une référence bibliographique afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux obtenus des modèles existants dans la littérature et par contre valider ou non notre travail en traçant les courbes de performance.

Le projet comprend également une étape de conception et de réalisation d'un modèle réduit de l'éolienne S-H 90 de Kamoji, un dispositif qui permet de mesurer le moment dynamique instantané et par conséquent la puissance à l'arbre du rotor, est également réalisé. Les résultats de l'expérimentation et de la simulation obtenus sur notre modèle seront confrontés pour validation, à ceux de Kamoji. L'étude comparative des performances commence aussitôt entre l'éolienne S-H90 réalisée et le modèle classique de la Savonius conventionnelle S-C.

Dans ce projet, on a utilisé beaucoup de connaissances acquises durant notre formation soit en énergétique soit en simulation numérique et construction mécanique.

Ce mémoire présentera le produit de notre recherche relativement à l'étude générale est de contribuer à la meilleure compréhension des éoliennes de type Savonius. Notre travail sera présenté à travers les étapes suivantes :

- Le chapitre 1 aborde une étude générale sur les éoliennes et l'énergie éolienne dans le monde en spécifiant le potentiel éolien en Algérie, en s'intéressant spécialement aux éoliennes de type Savonius en présentant les différents types existants, les avantages et les désavantages.
- Le chapitre 2 est consacré à la présentation des équations mathématiques régissant l'écoulement de l'air et les hypothèses adoptées. On a présenté, aussi dans ce chapitre le modèle de la turbulence appliquée et la méthode numérique des volumes finis utilisée dans la simulation, ainsi la mise en évidence du phénomène de la couche limite et la convergence du maillage.
- Le chapitre 3 s'enchaîne sur la méthodologie des simulations exécutées dans ce projet, telles que, la présentation de logiciel de CFD, la technique de maillage, le schéma de

discrétisation spatiale et temporelle, les conditions aux limites et en terminant le chapitre par la méthode de résolution numérique utilisée pour les deux types de rotors S-H90 et S-C pour les deux cas de simulations 2D et 3D.

- Le chapitre 4 est consacré à la conception assistée par ordinateur CAO sur le logiciel SolidWorks et la réalisation des différentes pièces tel que la modèle réduit d'éolienne Savonius Hélicoïdale ainsi le banc d'essais.
- Le chapitre 5 est entièrement dédié à l'analyse, la discussion et l'interprétation des résultats numériques et expérimentaux.

# Chapitre 1

## *Généralités*

## 1. Généralités

### 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir des généralités sur les énergies renouvelables et en particulier les énergies éoliennes, ainsi que leurs évolutions. Nous aborderons les types d'éoliennes, leurs caractéristiques techniques et les principes de fonctionnement. Comme nous évoquerons quelques notions sur la récupération de l'énergie éolienne.

### 1.2. Les énergies renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables ont fortement augmenté pour représenter, selon les estimations, 19,3 % de la consommation énergétique finale mondiale en 2016. Sur ce total, la part des énergies renouvelables modernes, en nette augmentation ces dernières années, est estimée à 10,2 %, contre seulement 9,1 % pour la biomasse traditionnelle en léger déclin, l'hydroélectricité représentait environ 3,6% du total final consommation d'énergie, d'autres sources d'énergie renouvelable 1,6%, l'énergie thermique renouvelable représentait environ 4,2%, et les biocarburants de transport ont fourni environ 0,8%. Durant 2015, les énergies renouvelables modernes ont continué de progresser sensiblement dans l'ensemble des secteurs de la consommation : l'électricité, le chauffage, le refroidissement, et le transport. [1]

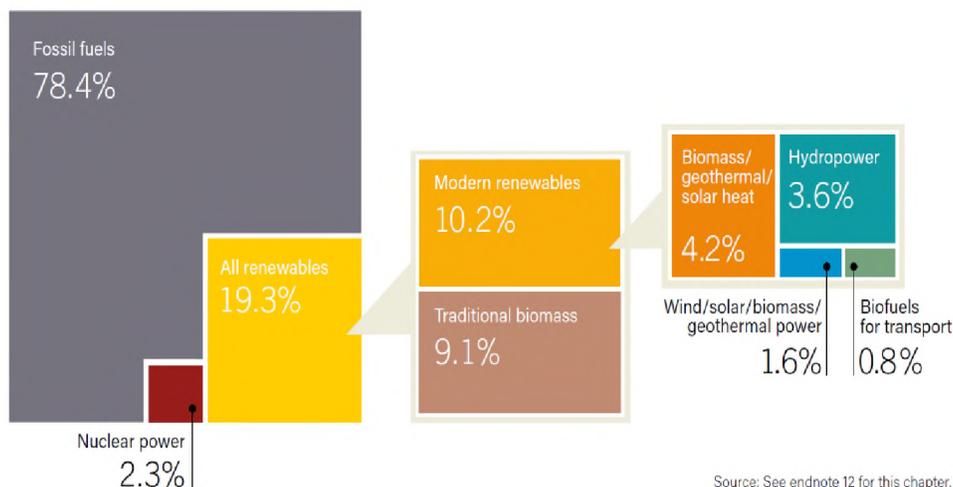


Figure 1.1 : les énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale 2015 [1]

Dans le secteur électrique, les énergies renouvelables représentent près de la moitié du total estimé de la capacité électrique mondiale ajoutée durant 2016 (208 GW). L'énergie photovoltaïque et éolienne atteint respectivement près de 47 % et 34 % de la capacité des nouvelles énergies renouvelables, devant L'hydroélectricité (près de 15.5 %). À la fin 2011, le total de la capacité mondiale des énergies renouvelables dépassait le seuil de 2 017 GW, en hausse de 9 % par rapport à 2010. À la fin de l'année, les énergies renouvelables comprenaient 30% de la capacité de production d'énergie mondiale - assez pour fournir environ 24,5% de l'électricité mondiale, avec l'hydroélectricité fournissant environ 16,6%. [1]

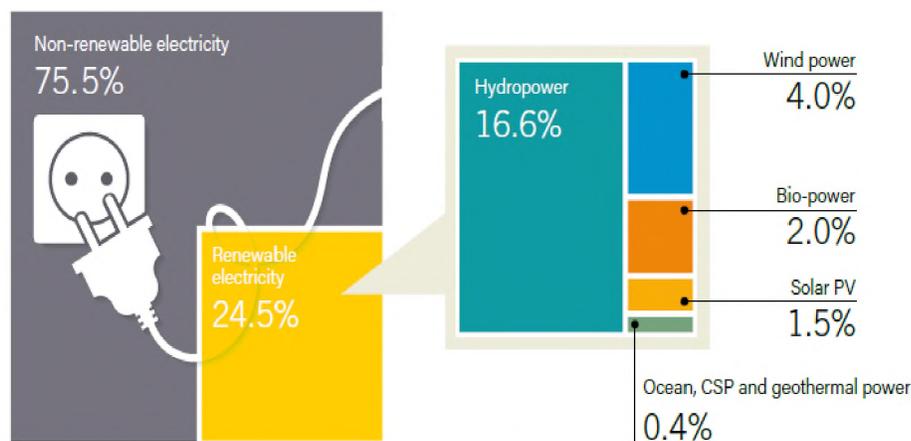


Figure 1.2 : Les énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité [1]

### **1.2.1. Programme des énergies renouvelables en Algérie**

En Algérie, avec l'absence de l'énergie nucléaire, la majeure partie de la production d'électricité (99,2% en 2009) provient des combustibles fossiles. La majorité des centrales électriques installées en Algérie sont des centrales à gaz, sauf pour le sud où les centrales électriques fonctionnant au diesel sont utilisées. [2]

En 2011, l'Algérie a mis en place une stratégie ambitieuse de promotion et développement des énergies renouvelables pour maintenir les réserves des ressources fossiles.

Le programme des Energies Renouvelables, adopté par le gouvernement en Février 2011 et modifié en 2015, afin de produire 40% de la consommation totale d'énergie à l'horizon 2030. Selon ce programme, l'électricité d'origine solaire devrait atteindre, d'ici 2030, plus de 37% de la production nationale d'électricité. L'énergie éolienne est en deuxième position et l'électricité d'origine éolienne devrait atteindre environ 3% de la production globale d'électricité en 2030. [2]

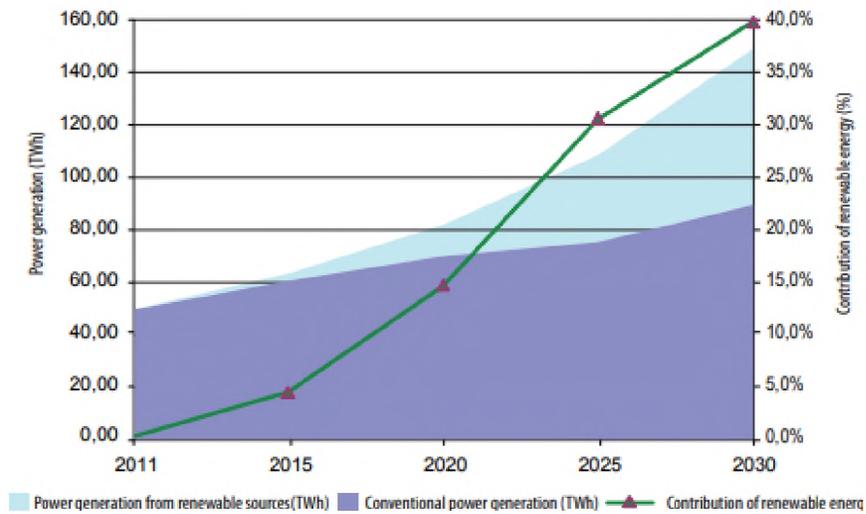


Figure 1.3 : L'énergie renouvelable et la production d'électricité dans l'Algérie en TWh [2]

Les différentes phases du programme de l'énergie renouvelable et de l'énergie fossile en Algérie qui est défini comme suit :

En 2018, il est prévu d'installer une puissance totale d'environ 110 MW ;

- En 2015, une puissance totale de près de 650 MW sera installé ;
- En 2020, il est prévu que l'installation d'une capacité totale d'environ 2 600 MW ;
- En 2030, il est prévu d'installer une capacité de près de 12.000 MW. Pour le marché intérieur et possibilité d'exportation d'environ 10 000 MW. [3]

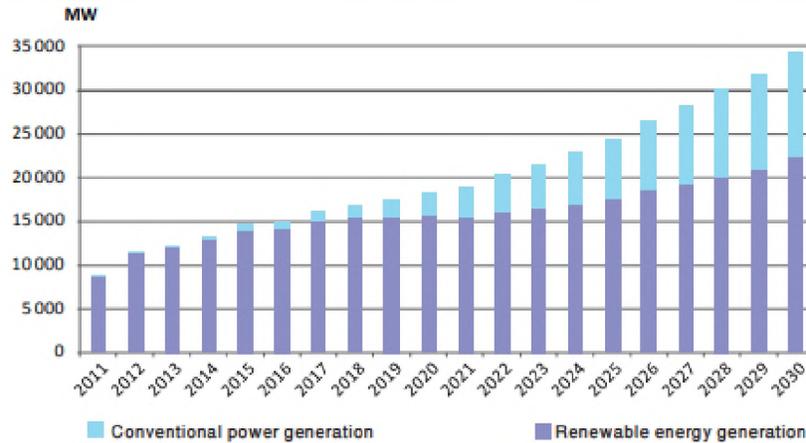


Figure 1.4 : La production nationale d'électricité dans l'Algérie en MW [2]

### 1.2.2. L'énergies éolienne dans le monde

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord fait l'appelle à l'énergie renouvelable en particulièrement l'éolien puisqu'ils n'émettent pas de dioxyde de carbone. [4]

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- Les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance,
- L'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes,
- Le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

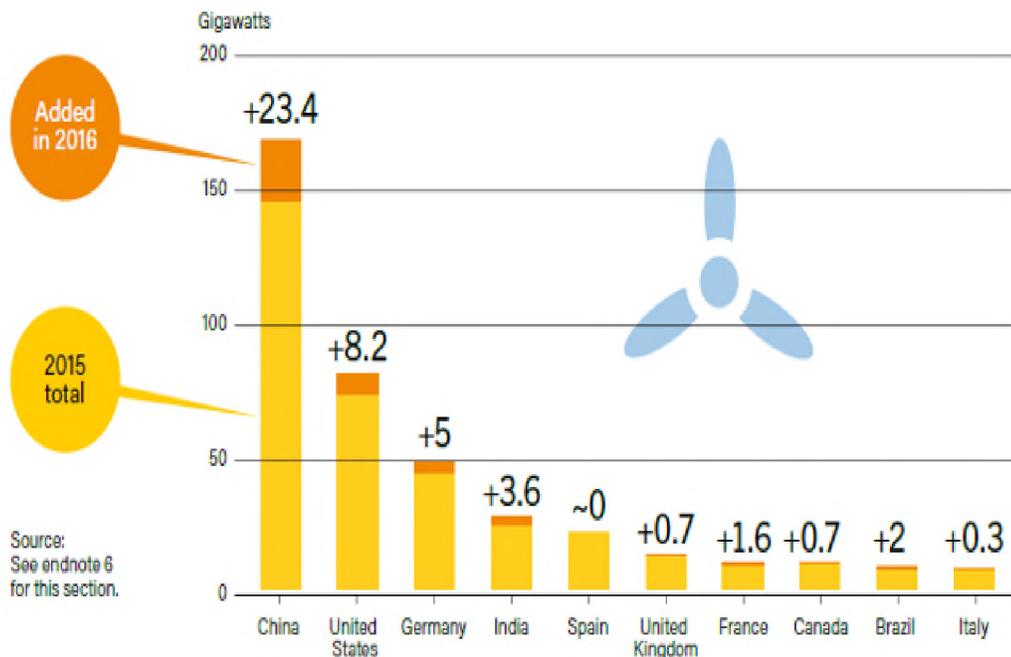


Figure 1.5 : Capacités d'énergie éolienne pour les 10 principaux pays, 2016 [4]

### 1.3. Potentiel du vent en Algérie

L'Algérie est l'un des pays africains ayant un meilleur potentiel éolien en Afrique (d'après les travaux menés au CDER, confirmé par une étude récente réalisée par une compagnie canadienne - Helimax énergie- pour la banque africaine de développement).

Essentiellement, on distingue les trois régions suivantes :

- Région du sud-ouest (Adrar, Tindouf, Timimoune) ; des vitesses de vent, dépassant 6m/s, à 10 m d'altitude, ont été mesurées dans la région d'Adrar.
- Régions des hauts plateaux (Tiaret, Khenshla, Batna, ...) ; des vitesses allant jusqu'à 4.5m/s à 10 m

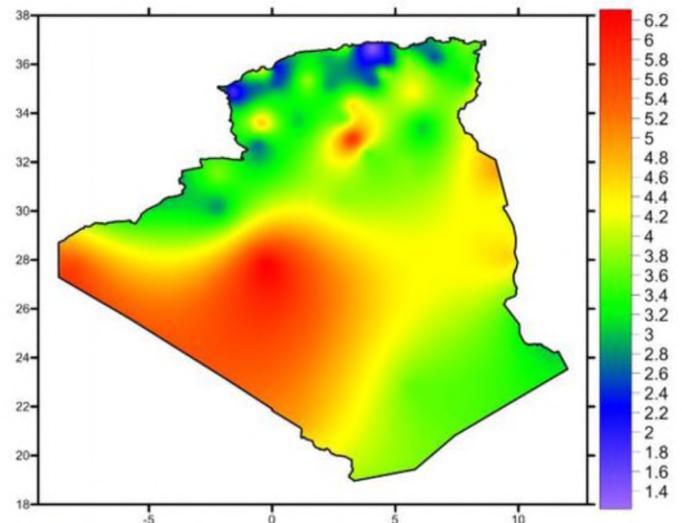


Figure 1.6 : Les vitesses moyennes du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol. [5]

- Régions côtières (zones de microclimats : Oran, Annaba, Bejaia, Alger) ; des vitesses de 3.7 m/s à 10 m. [5]

#### 1.4. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se classent en deux grandes familles : Les éoliennes à axe horizontal HAWT « Horizontal Axis Wind Turbine » et les éoliennes à axe vertical VAWT « Vertical Axis Wind Turbine ». Les HAWT sont les plus répandues dans l'éolien de grande puissance. Le développement des VAWT est plus récent, mais ce type de turbines connaît un développement accéléré, surtout pour des petites ou moyennes puissances adaptées à des applications urbaines ou domestiques. Des projets pour des VAWT de grandes puissances voient aussi le jour.

##### 1.4.1. Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à l'axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois aubes, des hélices multiples pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent. Ce type d'éolienne nécessite un gouvernail qui lui permettra de suivre la direction du vent, ce qui va alourdir la machine et augmente son encombrement. [5]



Figure 1.7 : Eolienne à axe horizontale

Les HAWT classiques utilisent des profils aérodynamiques et fonctionnent sur la force de portance. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes :

- Coefficient de puissance  $C_{p_{max}} \in [45, 50]\%$
- Vitesse spécifique optimale  $\lambda_{optimale} \in [5, 6]$
- Vitesse de démarrage :  $V_d \in [4, 5] \text{ m/s}$

### **1.4.2. Les éoliennes à axe vertical (VAWT)**

Les éoliennes à axe vertical ont été conçues pour répondre au mieux aux contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à leur structure, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins perturbées par les turbulences que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont généralement plus silencieuses que les éoliennes à axe horizontal où la vitesse en bout d'aube est plus importante, et peuvent facilement s'intégrer à l'architecture des bâtiments. Leur faiblesse réside principalement dans la faible maturité du marché, qui engendre alors des coûts d'investissement importants. En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais elles s'adaptent bien aux besoins de consommateurs individuels. En milieu urbain, la vitesse du vent et sa direction sont imprévisibles, surtout près des bâtiments. Là où la turbulence ne peut être évitée, les éoliennes à axe vertical peuvent plus facilement capter la ressource éolienne. Elles peuvent être classées selon deux catégories :

- Les éoliennes utilisant la force de trainée (les éoliennes Savonius).
- Les éoliennes utilisant la force de portance (les éoliennes Darrieus). [5]

### **1.4.3. L'éolienne de type Darrieus**

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois aubes à profils aérodynamiques, et fonctionnent sur **la force de portance**. Elles peuvent être à aubes troposkein (pour minimiser la tension d'inflexion.) ou hélicoïdales. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes [5]:

- Exploite la force de portance.
- Coefficient de puissance :  $Cp_{max} \in [35, 40]\%$
- Vitesse spécifique optimale  $\lambda_{optimale} \in [4, 6]$
- Vitesse de démarrage :  $V_d \in [4, 5] \text{ m/s}$  [5]



Figure 1.8 : Eoliennes de type Darrieus [7]

#### 1.4.4. L'éolienne de Type Savonius

Les éoliennes de type Savonius sont constituées de deux ou trois aubes, généralement en forme de demi-cylindre et fonctionnent sur la force de trainée. Elles peuvent être à aubes droites, ou torsadées. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes [6]:

- Exploite la force de trainée.
- Coefficient de puissance :  $Cp_{max} \in [15, 25]\%$
- Vitesse spécifique optimale :  $\lambda_{optimale} \in [0.8, 1]$
- Vitesse de démarrage :  $V_d \in [2, 3] \text{ m/s}$

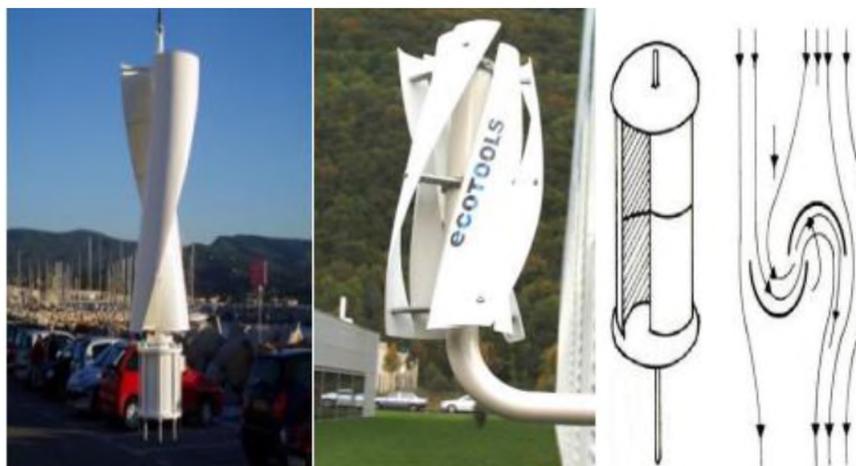


Figure 1.9 : Eoliennes de type Savonius [7]

#### 1.4.4.1. Avantages et inconvénients :

L'éolienne verticale de type Savonius présente de nombreux avantages : par exemple, elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent et ne sont pas soumises à de grosses contraintes de fabrication (concernant les aubes, ou encore les axes). Cette éolienne est tout à fait appropriée aux zones de vents gênées par le relief ou les habitations car elle a l'immense avantage de pouvoir capter les vents très faibles (à partir de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ ). De plus, elle est peu bruyante et son faible encombrement permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique.

L'éolienne Savonius présente aussi des inconvénients tels que son faible rendement qui est la cause de son développement limité, sa masse non négligeable et son couple non constant au cours de la rotation.

#### 1.4.5. Principe de fonctionnement des éoliennes à axe verticales

Les éoliennes de type Savonius mettent en œuvre les forces de trainée. On les nomme aussi éoliennes à trainée différentielle. Le moment de rotation de la turbine résulte de la différence de force entre deux formes symétriques et opposées. [7]

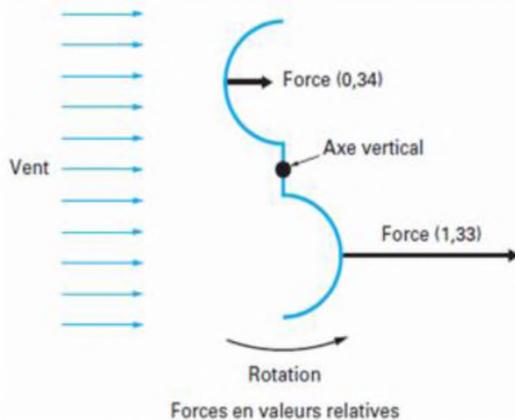


Figure 1.10 : Les forces en présence dans une éolienne Savonius [7]

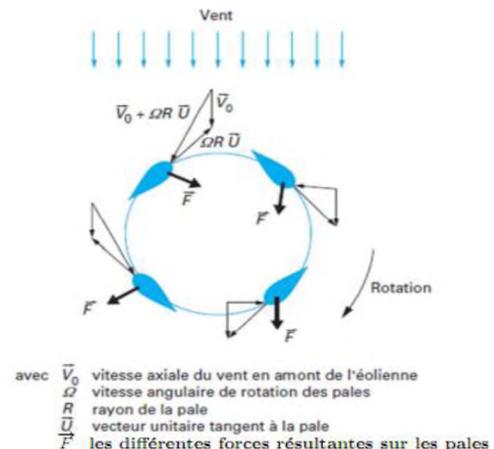


Figure 1.11 : Les forces en présence dans une éolienne Darrieus [7]

Les éoliennes de type Darrieus sont aussi appelées éoliennes à variation cyclique d'incidence. Le moment de rotation de la turbine résulte de la variation des forces de portance créée par le vent et par la rotation de la turbine. Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un

écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. [7]

## 1.5. Les notions sur la récupération de l'énergie éolienne

### 1.5.1. Puissance instantanée du vent

L'éolienne est une machine capable de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique par une génératrice éolienne. La puissance instantanée du vent est donnée par la relation :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (1-1)$$

Avec :

- A : Surface traversée par le vent.
- U : Vitesse du vent.
- $\rho$  : Masse volumique de l'air.

### 1.5.2. Le coefficient de vitesse ( $\lambda$ )

Le coefficient de vitesse  $\lambda$  est le rapport entre la vitesse périphérique d'une éolienne ( $R\omega$ ) et la vitesse du vent U. En étude expérimentale et numérique, ce paramètre permet d'étudier le coefficient de puissance  $C_p$  et le coefficient de moment dynamique  $C_t$  de l'éolienne. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad (1-2)$$

Avec :

- $\omega$  : Vitesse de rotation de l'éolienne.
- R : Son rayon.
- U : Vitesse du vent.

### 1.5.3. Le coefficient de moment ( $C_m$ )

Le coefficient de moment  $C_m$  d'une éolienne est une grandeur obtenue en calant le rotor de l'éolienne selon différents angles d'incidence du vent  $\theta$ . Son expression est donnée par la relation suivante [8] :

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{4}\rho A_s D U^2} = \frac{4M}{\rho D^2 H U^2} \quad (1-3)$$

Pour une éolienne type Savonius :

$$A_s = H \times D \quad (1-4)$$

Avec :

- M : Moment dynamique.
- $\rho$  : Masse volumique de l'air.
- D : Diamètre du rotor.
- U : Vitesse du vent.
- $A_s$  : Surface projetée du rotor.
- H : Hauteur de rotor.

#### 1.5.4. Le coefficient de puissance (Cp)

Le coefficient de puissance, appelé aussi rendement aérodynamique Cp d'une éolienne est une grandeur obtenue lors de la simulation dynamique d'un rotor d'une éolienne. Il est obtenu en faisant varier le moment dynamique de l'éolienne  $M_m$  en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  du rotor. Une éolienne est dimensionnée par rapport à un  $\lambda$  maximum. Pour un rotor Savonius, le  $\lambda$  optimal avoisine le 1.

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_s U^3} = \lambda \times C_m \quad (1-5)$$

La théorie de Betz impose que le coefficient de puissance maximal qu'on peut atteindre d'une éolienne est de 16/27. Ce rapport est appelé limite de Betz ; quoiqu'on fasse sur l'optimisation d'une éolienne (géométrique ou autres), on n'arrivera jamais à dépasser ce rapport. Cette théorie est valable pour les HAWT's et les VAWT's.

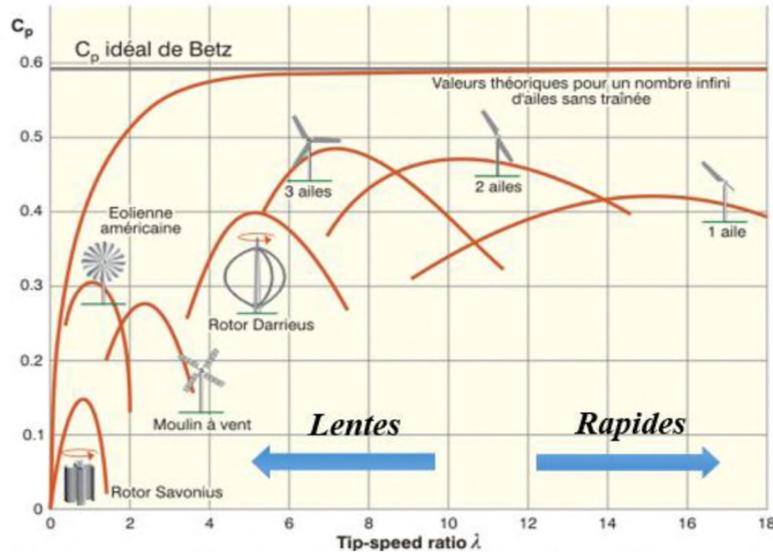


Figure 1.12 : Courbes de puissances pour les différents types des éoliennes [18]

Précédemment, on a vu que le coefficient de puissance mécanique d'une éolienne est théoriquement limité à  $16/27$  d'après la limite de Betz. En plus de cette limitation, s'ajoute une série de pertes qui définit la valeur définitive de la courbe de performance de cette éolienne. La figure 1.12 montre les courbes de rendement aérodynamique des différents types d'éoliennes, nous informe que plus l'éolienne est rapide, plus elle est performante et plus la valeur maximale de son coefficient de vitesse  $\lambda$  est élevée. Dans la catégorie d'éoliennes rapides, on peut citer les éoliennes bi et tri-aubes. Ils représentent 80% du marché mondial et servent dans la plupart de temps à équiper les fermes éoliennes on-shore et off-shore. La vitesse de rotation des VAWT est généralement faible et cela fait que ces éoliennes développent un important couple de démarrage qui se stabilise au bout d'une certaine période de fonctionnement. Avec la courbe de la figure 1.12, on voit que le coefficient de vitesse  $\lambda$  d'un rotor Savonius avoisine le 1. Ce que justifier les faibles valeurs de vitesses de rotation obtenues avec ce type d'éolienne.

# Chapitre 2

*Formulation mathématique*

## 2. Formulation mathématique

Les équations régissant le mouvement des fluides sont les trois principes fondamentaux de la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement, et la conservation de l'énergie. Les écoulements fluides, où le nombre de Mach est inférieur à 0,3 peuvent être considéré comme incompressible. Puisque les vitesses étudiées avec les éoliennes sont bien en dessous de ce nombre critique, nous pouvons considérer l'écoulement comme incompressible. Ainsi, nous n'aurons pas besoin de calculer l'équation d'énergie, ni la loi des gaz parfaits, mais seulement les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ces équations dans leur notation vectorielle peuvent être écrites comme suit : [9]

### 2.1. Conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse en un point d'un fluide est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-1)$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique.

L'équation de continuité d'un fluide incompressible est déduite de l'équation (2.1), en négligeant le premier terme. Son expression devient :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-2)$$

### 2.2. Equation de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations qui transportent les phénomènes de température, de diffusion et de dispersion des particules lors de mouvement d'un fluide. La forme condensée de ces équations est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}_i) + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}_i \vec{u}_j) = -\vec{\nabla} p_i + \vec{\nabla}(\vec{\tau}_j) + \rho \vec{g} + \vec{F}_i \quad (2-3)$$

Où :

$p$  est la pression statique,  $\bar{\tau}$  le taux de cisaillement,  $\rho\vec{g}$  la force gravitationnelle,  $\vec{F}_i$  représente d'autres forces externes.

Les forces gravitationnelles sont négligé.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \vec{F}_i \quad (2-4)$$

La partie gauche de l'équation (2.4) contient les termes convectifs. La partie droite contient les termes de gradient de pression, des forces extérieures et de tenseur de contrainte visqueux. Afin de pouvoir déterminer tous ces termes, il est nécessaire de connaître la source des grandeurs responsables de ces grandeurs. Ici, toute variation de mouvement causée par la variation de la température du fluide est négligée. Il ne nous reste que la variation de mouvement de l'air causée par les forces volumiques extérieures.

### 2.3. Modélisation de la turbulence

La stabilité de l'écoulement d'un fluide dépend du nombre de Reynolds.

- Pour le cas du rotor Savonius Conventionnel :

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{1.225 \times 9 \times 0.33}{1.7894 \times 10^{-5}} = 101661.17$$

- Pour le cas du rotor Savonius Hélicoïdale :

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} = \frac{1.225 \times 9 \times 0.23}{1.7894 \times 10^{-5}} = 141709.51$$

Remarquons que le nombre de Reynolds  $Re$  est supérieure à 60000 pour les deux types de rotor. De ce fait, l'écoulement présente des fluctuations spatiales et temporelles, nous sommes donc dans un état de turbulence.

Il y a trois approches principales de simulation de l'écoulement turbulent : la simulation numérique directe (DNS), la simulation des grandes échelles (LES) et la simulation par des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS). La figure 2.1 résume les différentes méthodes utilisées pour la modélisation de la turbulence dans les équations de Navier-Stokes.



Figure 2.1 Résolution des équations de Navier-Stokes. Modélisation de la turbulence. [19]

Dans notre cas nous avons choisi le modèle de la turbulence (RANS), parce que c'est le modèle le plus reconnu dans les littératures et qui donne des résultats valides.

## 2.4. Les équations moyennées de Reynolds RANS

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des champs de vitesses fluctuants. Ces fluctuations pouvant être de petite échelle et de haute fréquence, la résolution directe des équations instationnaires de Navier-Stokes (2.4), pour des écoulements turbulents, est trop coûteuse en temps de calcul. Alternativement, les équations précédemment définies peuvent être moyennées dans le temps. Selon Reynolds, pour chacune des variables instationnaires dans les équations de Navier-Stokes une composante moyenne dans le temps  $\bar{u}_i$  et une composante variable  $u_i'$  peuvent être définies. La vitesse peut être décomposée de la manière suivante [10]:

$$U_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (2-5)$$

Avec

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u_i dt \quad (2-6)$$

En remplaçant  $\bar{u}_i$  dans les équations (2.5) et (2.6), on obtient l'équation de continuité suivantes :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

Cette équation est valable pour les deux domaines fluides de la Figure 2.2 suivante.

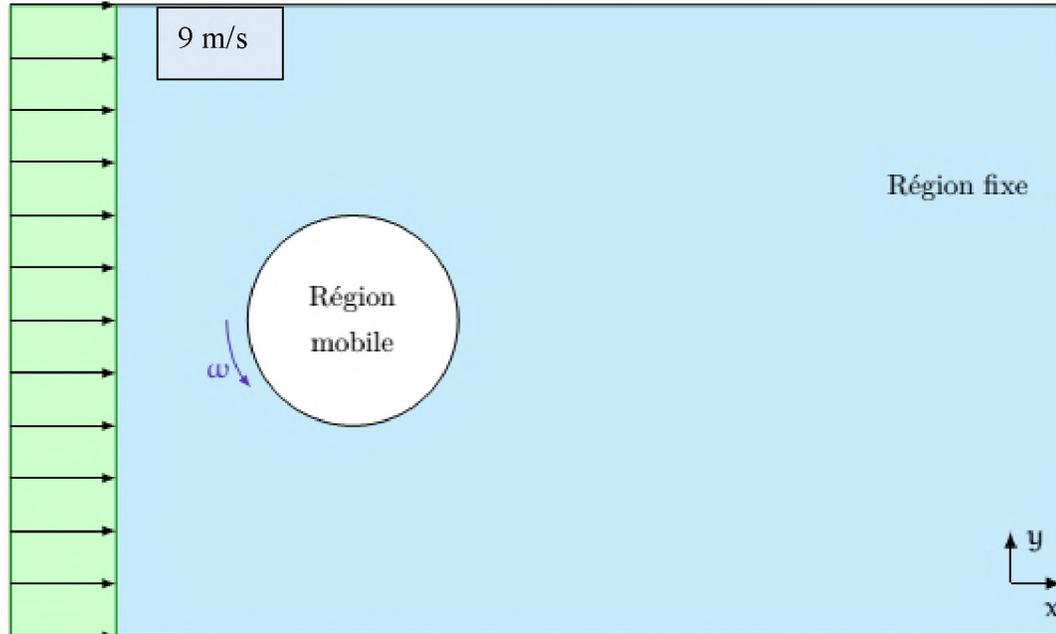


Figure 2.2 Vue plane des deux régions fluides étudiées. [10]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \quad (2-7)$$

L'équation (2.7) est définie sur la région fixe de la figure (2.2). L'équation moyennée de Reynolds change de forme et prend en compte de l'effet de la force de Coriolis et de la force Centrifuge dans la région mobile. L'expression de l'équation moyennée de Reynolds dans la région tournante est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \\ & + 2\varepsilon_{ijk} \omega_i \omega_j x_k - \omega_j \omega_i x_i \end{aligned} \quad (2-8)$$

Avec  $2\varepsilon_{ijk} \omega_i \omega_j x_k$  et  $\omega_j \omega_i x_i$  sont respectivement les forces de Coriolis et les forces centrifuge.

Après l'application de l'expression précédente à toutes les variables dans les équations de N-S, on obtient les équations moyennées de N-S, communément appelées RANS « Reynolds-Averaged Navier-Stokes ». Les équations RANS permettent de modéliser efficacement les écoulements turbulents en réduisant considérablement les ressources nécessaires aux calculs numériques. Cependant, ces équations modifiées introduisent des inconnues supplémentaires. En conséquence,

des modèles de turbulence sont nécessaires pour déterminer ces inconnues. Une large gamme de modèles de turbulence sont disponibles dans FLUENT notamment Spalart-Allmaras, k-ε, k-ω, et d'autres.

Le modèle standard k-ε est largement utilisé par la communauté des chercheurs qui travaillent dans le domaine de la CFD, de nombreux auteurs ont tenté de le réviser et de l'améliorer. Parmi les modèles issus de la révision du modèle k-ε, on peut facilement trouver dans la littérature le modèle RNG k-ε,

Dans notre étude, On a choisi le modèle standard k-ε pour la simulation en 2D et le modèle RNG k-ε pour la simulation en 3D.

## 2.5. Modèle standard k-ε

Le modèle standard k-ε est un modèle de turbulence dans lequel, deux équations de transports sont utilisées pour résoudre le tenseur de contrainte de Reynolds [11]. Ces deux équations sont respectivement, l'équation de transport de l'énergie cinétique k et du taux de dissipation ε. Les équations de ce modèle sont :

- Equation du coefficient de viscosité turbulente :

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu \times k^2}{\varepsilon} \quad (2-9)$$

Où  $C_\mu$  représente une constante adimensionnelle.

Les deux équations de transports en énergie cinétique turbulente k et en taux de dissipation ε ci-dessous ont été obtenues à partir des équations de Reynolds (2.7).

- Equation de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k2}} \right) \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2-10)$$

- Equation pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente :

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon 2}} \right) \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \quad (2-11)$$

Où les différents termes représentent :

- $\rho \frac{\partial k}{\partial t}, \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$  : Taux de changement de  $k$  ou  $\varepsilon$
- $\rho u_j \frac{\partial k}{\partial t}, \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$  : Transport convectif de  $k$  ou  $\varepsilon$
- $\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  : Taux de production de  $k$  ou  $\varepsilon$
- $\rho \varepsilon, \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon$  : Taux de destruction de  $k$  ou  $\varepsilon$
- $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma k^2} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma \varepsilon^2} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$  : Transport diffusif de  $k$  ou  $\varepsilon$

Les constantes  $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\mu}, \sigma_{k2}, \sigma_{\varepsilon 2}$ , sont issues de l'expérimentation et ont pour valeurs :

1.44, 1.92, 0.09, 1.0 et 1.3.

## 2.6. La couche limite

### 2.6.1. Calcul l'épaisseur de la couche limite $\delta$

L'épaisseur  $\delta$  de la couche limite est conventionnellement définie comme la distance à la paroi pour laquelle la vitesse dans la couche limite atteint 99% de la valeur de la vitesse extérieur de vent comme montre la figure (2.3).

Une analyse adimensionnelle des équations de Navier-Stokes 2.3, nous permet de définir «  $\delta$  » en tout point du profil en fonction de la distance au bord d'attaque «  $x$  » et du nombre de Reynolds «  $Re$  » de l'écoulement.

$$u(\delta) = 99\% U_e \quad (2-12)$$

$$\delta(x) \cong \frac{x}{\sqrt{Re}} \quad (2-13)$$

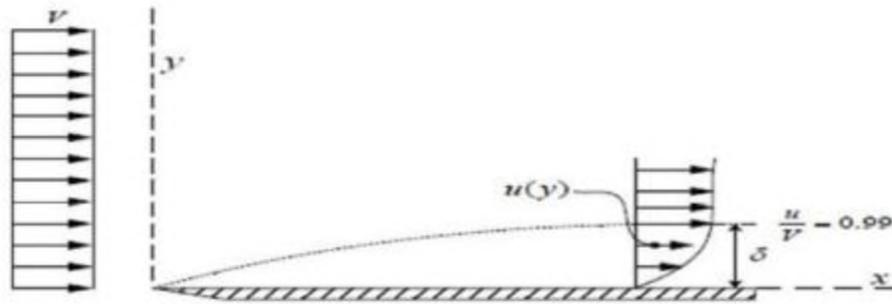


Figure 2.3: Représentation de l'épaisseur de la couche limite. [17]

### 2.6.2. Analyse de la couche limite pour le cas d'une plaque plane

Le cas de référence pour l'étude des couches limites est le cas de plaque plane à incidence nulle dans un écoulement de fluide visqueux incompressible. Dans notre étude l'écoulement atteint rapidement des nombres de Reynolds supérieurs à  $10^6$ . Le profil de vitesse croit beaucoup plus rapidement avec la distance à la paroi. [9]

La génération de maillage de la couche limite pour un écoulement visqueux est nécessaire pour mesurer avec précision le profil de vitesses proche des parois. Le maillage est donc adapté pour capter cette particularité. En effet, si la taille de maille est trop grande au départ, il sera impossible par la suite de retrouver l'intégralité des perturbations.

Dans la région de proche à la paroi, les grandeurs cinématiques sont généralement reliées aux paramètres internes de la couche limite, à savoir «  $U_\tau$  » la vitesse de frottement à la paroi et «  $\nu$  » la viscosité cinématique du fluide. Il est donc possible d'adimensionner la vitesse «  $U$  » par la vitesse à la paroi «  $U_\tau$  », et la distance au profil «  $y$  » par la taille de la première maille  $h_0 = \frac{\nu}{U_\tau}$ .

On définit ainsi les grandeurs adimensionnelles  $U^+$  et  $Y^+$  :

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \quad \text{et} \quad Y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \quad (2-14)$$

### 2.6.3. Loi de la paroi « low of the wall »

Le modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  classique utilisent généralement l'approche de la loi de la paroi. En effet, les résultats obtenus avec ce modèle ne sont pas satisfaisants à proximité d'une paroi. L'avantage de cette technique est qu'elle ne nécessite pas un maillage très fin près des parois

solides car lorsque l'écoulement est turbulent, la couche limite qui se forme près des parois est très mince et sa résolution requiert un grand nombre de cellules de calcul. [12]

$$\frac{U}{U_\tau} = \frac{1}{k} \ln E(Y^+) \quad (2-15)$$

La loi de la paroi est décrite par la relation (2.15) où  $U$  est la vitesse parallèle à la paroi (la vitesse de vent),  $U_\tau$  est la vitesse de cisaillement,  $k$  est la constante de Karman (0.4187), et  $E$  est le facteur de rugosité (9.793) ;  $Y^+$  est une mesure adimensionnelle de distance [13]:

$$Y^+ = \frac{\rho U_\tau y}{\mu} = \frac{\rho U_\tau \delta}{\mu} \quad (2-16)$$

Où : «  $y$  » est la distance à la paroi. Et «  $\delta$  » est la couche limite.

Pour une fonction modélisant la loi de la paroi, chaque cellule adjacente au mur doit se trouver dans la région logarithmique de la couche limite qui se définit telle suit :

$$30 < Y^+ < 300$$

Les résultats obtenus sont aussi précis lorsque les valeurs de  $Y^+$  proche de trente c.à.d.

$$Y^+ \approx 30$$

Finalement, on se retrouve avec :

$$\delta = \frac{\mu Y^+}{\rho U_\tau} \quad (2-17)$$

Une fois nous avons la vitesse de vent a la paroi, nous pouvons déterminer l'épaisseur de la couche limite afin d'obtenir une bonne qualité de maillage.

#### **2.6.4. Maillage de la couche limite**

La génération du maillage de couche limite est basée sur un champ continu (la distance au corps solide) et sur un maillage initial de fond. [9]

Cette distance doit être égale à l'épaisseur de la couche limite au niveau de la paroi.

La plus petite maille de taille «  $h_0$  », est calculée en utilisant la formule (2,17) :

$$\delta = h_0 = \frac{\mu Y^+}{\rho U_\tau} \quad (2-18)$$

Dans notre cas la vitesse de vent  $U = 9 \text{ m/s}$ , la longueur d'aube  $L = \pi \frac{D}{2} = 0.18078 \text{ m}$ , considérant le profil d'aube comme une plaque plane donc nous pouvons appliquée la loi de la paroi pour qu'on puisse déterminer l'épaisseur de la couche limite.

### **Application numérique :**

L'équation (2.21) nous donne :

$$\frac{U}{U_\tau} = \frac{1}{k} \ln E(Y^+) = \frac{1}{0.4187} \times \ln(30 \times 9.793) = 2.388$$

On déduit la vitesse du vent à la paroi :

$$\Rightarrow U_\tau = \frac{U}{2.388} = \frac{9}{2.388} = 3.7688 \text{ m/s}$$

L'équation (2.18) donne l'épaisseur de la couche limite et la hauteur de la plus petite maille  $h_0$  :

$$\delta = h_0 = \frac{\mu Y^+}{\rho U_\tau} = \frac{30 \times 1.7894 \times 10^{-5}}{1.225 \times 3.7688} = 0.000115 \text{ m} = 0.115 \text{ mm}$$

Il faut que la taille de la plus petite maille soit inférieure à 0.115 mm pour avoir une bonne qualité de maillage, afin d'obtenir la convergence des résultats de simulation.

Pour étudier l'écoulement de l'air autour des éoliennes il est nécessaire de s'intéresser finement à la physique du problème. En effet, il s'agit d'un écoulement complexe dont la résolution est un challenge numérique important qui requiert un solveur puissant et des outils de maillages avancés. Sachant que 60% de l'écoulement se concentre autour des pâles, il est clair que l'étude de la couche limite est un point clé de la résolution.

Cette étude nous a permis de bien comprendre les subtilités de la couche limite et va nous permettre de vérifier que le maillage de la couche limite est satisfaisant et d'améliorer son traitement si nécessaire.

# Chapitre 3

*Méthodologie et simulation  
numérique CFD*

### 3. Méthodologie et simulation numérique CFD

Après une étude bibliographique sur le modèle mathématique utilisé dans le chapitre précédent, on se propose dans ce chapitre une étude numérique des rotors Savonius avec un mouvement libre. L'approche habituelle s'articule sur l'étude aérodynamique de l'éolienne et impose la vitesse angulaire de rotation du rotor. Dans notre approche, c'est l'équation différentielle du mouvement de l'état transitoire de l'éolienne qui impose la vitesse angulaire, après un instant de démarrage. Cet état est symbolisé par une valeur moyenne stable de chaque paramètre de la simulation numérique. Notre approche dans cette étude consiste à modéliser et à simuler les deux types de rotor S-H90 en 3D et S-C en 2D et 3D pour modéliser les effets bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'écoulement d'air autour de ces rotors, afin de faire une comparaison entre eux. Actuellement, la CFD est un outil d'aide à la conception et aux décisions, efficace dans un projet éolien de petite ou grande envergure. En général, pour établir des éléments de comparaisons sur les résultats de la modélisation et de la simulation numérique de n'importe quel type d'éolienne, les modèles CFD sont utilisés pour mener à bien les éléments de comparaisons sur l'expérimentation provenant de la bibliographie.

#### 3.1. Introduction au CFD

CFD fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Il contient trois éléments principaux :

- **Un préprocesseur** : Prend en charge le maillage défini selon la géométrie étudiée, les paramètres d'écoulement et les conditions aux limites.
- **Un solveur** : Sert à la résolution des équations régissant l'écoulement du fluide dans les conditions imposées.
- **Un post-processeur** : Permet d'afficher les résultats sous forme graphique.

La plupart des programmes CFD comme celui qui a été utilisé dans ce projet (FLUENT) sont basés sur la méthode des volumes finis.

L'analyse d'un problème par CFD passe par les étapes suivantes :

- Maillage du domaine.

- Sélection des modèles mathématiques appropriés.
- Discrétisation des équations mathématiques formulées sous forme numérique décrivant l'écoulement du fluide.
- Introduction des conditions aux limites du problème.
- Enfin, la résolution du système algébrique, en utilisant un processus itératif.

Nous détaillerons toutes ces étapes dans ce chapitre, afin d'expliquer comment les calculs CFD ont été réalisés pour analyser les performances de l'éolienne.

La façon dont le logiciel CFD fonctionne est en résolvant les équations dynamiques de Navier Stocks (RNS) autour de la géométrie, suivant les contraintes spécifiées.

Afin de déterminer les points auxquels ces équations seront résolues, un maillage est généré. Le maillage discrétise l'espace physique en un nombre fini de points. Plus le nombre de points est élevé, plus la solution est précise et plus ça nécessite un temps de calcul élevé et une grande puissance de la machine.

Une fois le maillage généré, nous spécifions la configuration de Fluent. Cette partie implique plus de détails, car il nécessite de nombreuses variables (modèles, solveur, valeurs initiales, nombre de pas, conditions aux limite ...). Une fois la configuration du solveur terminée, la solution est visualisée dans l'onglet résultats.

## 3.2. Les étapes de simulations

### 3.2.1. Géométries et domaines de simulation

Le domaine de calcul composé en deux partie (région fixe et région mobile).

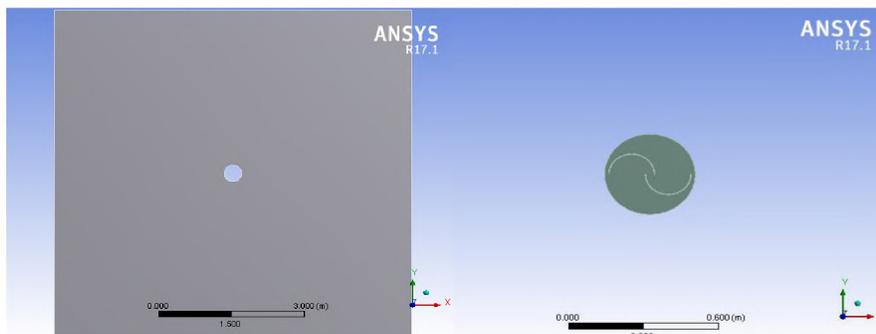


Figure 3.1 : Domaines de simulations pour S-C en 2D (domaine fixe et domaine rotatif)

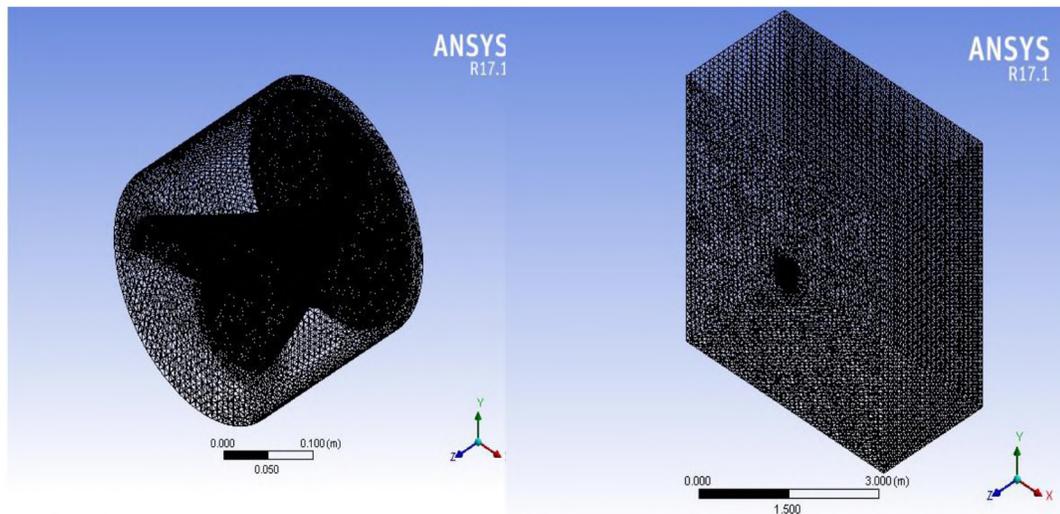


Figure 3.2 : Domaines de simulations S-H90 en 3D (domaine fixe et domaine rotatif)

Le domaine fixe : Il a une géométrie rectangulaire de dimensions (40R $\times$ 40R) pour le cas 2D et parallélépipédique de dimensions (40R $\times$ 40R $\times$ 20R) pour le cas 3D.

Le domaine rotatif : Situé au milieu du plan (Oxy) du domaine fixe, il a une forme circulaire pour le cas 2D et une forme cylindrique pour le cas 3D de diamètre = 1.1xD et une hauteur égale à la hauteur du rotor H.

La simulation dynamique : le mouvement de l'air est transitoire dans la région intérieure cylindrique, imposé à une vitesse angulaire  $\omega$ . Le rotor suit le mouvement de ce domaine.

Le maillage de la géométrie du domaine : nous spécifions le nombre de points du domaine mobil autour du rotor et sur le domaine fixe du tunnel, ainsi le sens de l'écoulement. Le but est de comprendre l'effet du vent à l'entrée de la région avoisinant la paroi du rotor où on va choisir un maillage raffiné et donc un nombre très élevé de points. Nous traitons la technique de maillage en détail dans la partie suivant.

### 3.2.2. Technique de maillage

La génération du maillage a pour but la discrétisation du domaine de calcul. Dans la méthode des volumes finis la grille de points générés par le maillage forme un ensemble de volumes qui sont appelées cellules.

### 3.2.3. Choix du type de maillage

Les maillages peuvent être catégorisés en deux groupes : les maillages structurés et les maillages non structurés. Vu la complexité de la géométrie des rotors étudiés, nous allons utiliser un maillage non structuré pour les deux types de simulations (2D, 3D).

#### 3.2.3.1. *Maillages non structurés*

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

##### Ses avantages :

- Peut-être généré sur une géométrie complexe (se conformer à presque n'importe quelle géométrie désirée) tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (rect/tétra) sont très automatisés, ce qui explique la popularité croissante de ce modèle. [14]

C'est pour ces raisons, on a opté pour ce type de maillage, vu la complexité des géométries de rotors étudiés.

En pratique, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne **Qualité** des éléments.
- Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage à fin et les parties à maillage grossier (zone où il y a des interfaces).
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

#### 3.2.3.2. *Résolution*

La plupart des meilleures méthodes proposent pour les maillages particuliers au voisinage de la paroi de rotors zone de la couche limite, des maillages structurés, dont on maîtrise la détermination de la taille selon la loi de paroi, vu dans le chapitre précédent. (Figure 3.3).

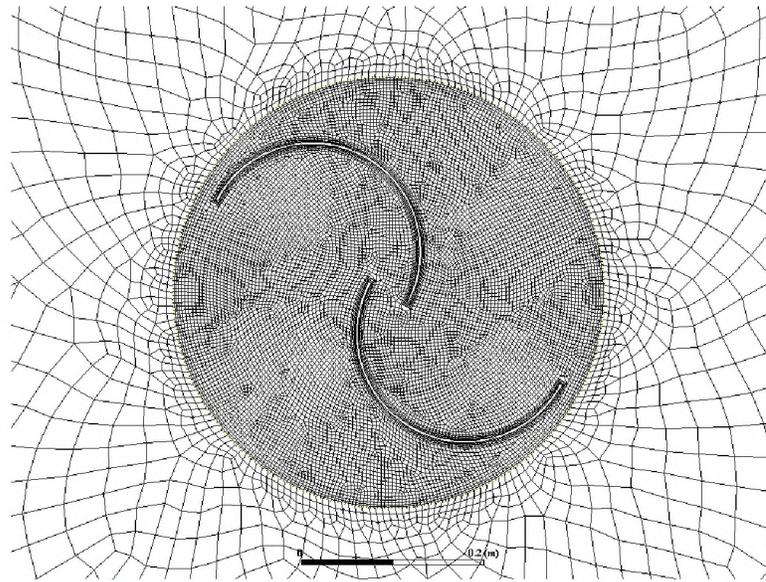


Figure 3.3 : Maillage structuré de la couche limite de rotor S-C 2D

### 3.2.3.3. Lissage « inflation »

Le changement dans la taille des éléments du maillage d'une zone maillée à une autre zone, doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit idéalement pas dépasser 20% à 30% (voir Figure 3.4). [14]



Figure 3.4 : Evolution de la taille des éléments

Dans un tel problème, il faut définir l'épaisseur de la couche à mailler et doit couvrir toute la géométrie du rotor par des cellules (tétraédriques pour le cas 3D et de rectangulaires pour le cas 2D), dont la taille optimale des cellules au proche des parois du rotor doit être égale à l'épaisseur de la couche limite, dans notre cas la taille minimale des cellules sur le rotor vaut 0.115 mm pour un  $Y^+$  optimal proche de 30.

Le reste du domaine se couvre d'éléments plus grossiers, lorsque on est loin du rotor, on peut observer sur la figure ci-dessous la concentration des éléments tétraédriques est conséquente autour du rotor afin de garantir une représentation de l'écoulement du fluide dans cette région.

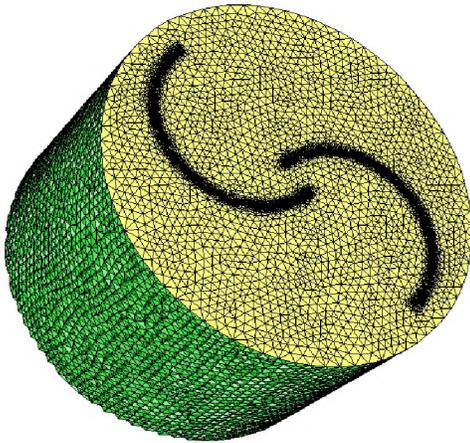


Figure 3.6 : Maillage de la région tournante pour le rotor S-C

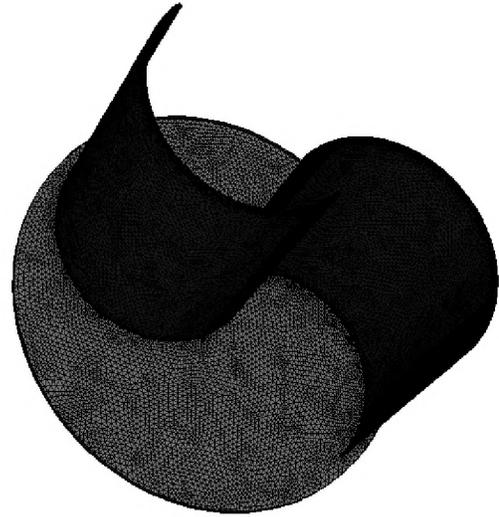


Figure 3.5 : Maillage du rotor S-C 3D

Comme le champ de l'écoulement d'air autour d'éolienne est instable en raison de la rotation du rotor, la méthode du maillage mobile « Moving mesh » est utilisée dans cette étude pour promouvoir une étude mécanique et aérodynamique de l'éolienne.

Une fois le maillage a été construit il faut faire un test de convergence, afin d'assurer d'optimisation le temps de calcul ainsi que le nombre des cellules.

#### **3.2.4. Présentation de la méthode des volumes finis**

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes de contrôle ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple, la méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, ou chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisant les quantités stockées aux nœuds du volume de contrôle. Ces équations algébriques obtenues expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul.

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis.

Un avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non-structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient pas compte de la complexité du maillage. En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu. [15]

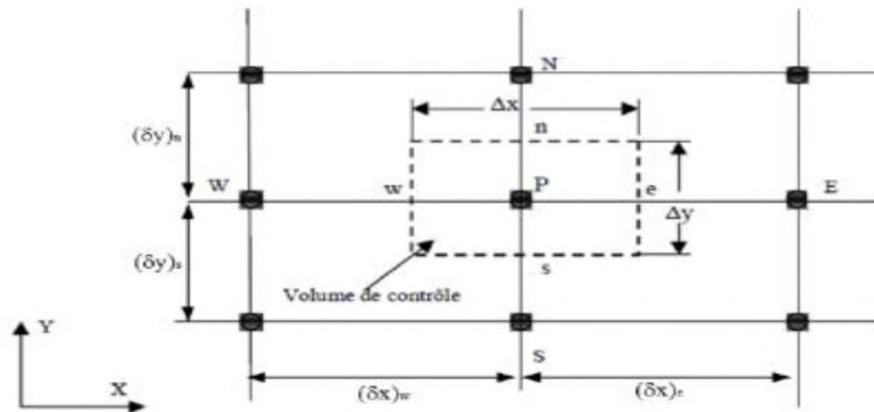


Figure 3.7 : Volume de contrôle bidimensionnel [19]

Pour un nœud principal **P**, les points **E**, **W**, **N** et **S** sont les centres des volumes de contrôle adjacents, situés respectivement à l'Est, à l'Ouest, au Nord et au Sud du point **P**. Le volume de contrôle entourant **P** est montré par les lignes discontinues, et ces faces sont localisées aux points **e** et **w** dans la direction **x**, **n** et **s** dans la direction **y**.

### 3.2.5. Schéma de discrétisation

Les codes CFD comme FLUENT utilisent une technique basée sur les volumes finis afin de convertir une équation scalaire de transport en une équation algébrique qui peut être résolue numériquement. Les équations des lois de conservations sont intégrées sur chaque volume de contrôle, et ensuite discrétisées. La discrétisation de ces équations peut être illustrée de manière générale en considérant l'équation instationnaire de transport d'une quantité scalaire  $\phi$  écrite sous sa forme intégrale pour un volume de contrôle arbitraire :

$$\oint \frac{\partial \rho_{\phi}}{\partial t} dv + \oint \rho_{\phi} \vec{v} d\vec{n} - \oint \tau_{\phi} \vec{\nabla} \phi d\vec{n} = \oint S_{\phi} dv \quad (3-1)$$

Où :

- $\rho_{\phi}$  : Densité de la fonction scalaire  $\phi$  ;
- $\vec{v}$  : Vecteur de vitesse ;
- $\vec{n}$  : Vecteur normal à la surface ;
- $\tau_{\phi}$  : Coefficient de diffusion pour  $\phi$  ;
- $S_{\phi}$  : Source de  $\phi$  ;
- $\vec{\nabla} \phi$  : Gradient de  $\phi$  ;

L'équation (3.1) précédente est appliquée à chaque volume de contrôle, c'est à dire chaque cellule dans le domaine de calcul. La discrétisation de l'équation de transport sur une cellule donne :

$$\frac{\partial \rho_{\phi}}{\partial t} v + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v} \phi_f \vec{A}_f - \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \tau_{\phi} \vec{\nabla} \phi_f \vec{A}_f = S_{\phi} v \quad (3-2)$$

Où :

- $N_{faces}$  : Nombre de faces de la cellule ;
- $\phi_f$  : Valeur de  $\phi$  traversant la face  $f$  ;
- $\rho_f \vec{v} \vec{A}_f$  : Débit massique à travers la face  $f$  ;
- $\vec{A}_f$  : Aire de la face  $f$  ;
- $\nabla \phi_f$  : Gradient de  $\phi$  sur la face  $f$  ;
- $v$  : Volume de la cellule ;

La discrétisation des équations de conservation consiste en une discrétisation spatiale et autre temporelle pour les écoulements instationnaires. Les schémas de discrétisations spatiale et temporelle sont présentés ci-dessous. [14]

### 3.2.6. Discretisation spatiale

Dans FLUENT, les valeurs discrètes des variables scalaires  $\phi$  sont enregistrées au centre de la cellule. Cependant, les valeurs sur les faces  $\phi_f$  sont requises pour les termes convectifs dans les équations de conservation intégrales et doivent être interpolées à partir des valeurs du centre de la cellule. Ceci est accompli en utilisant un schéma « upwind ». Plusieurs schémas « upwind » sont disponibles dans un code CFD comme FLUENT. Le schéma « first-order upwind » est une approximation basique correspondant à un développement de premier-ordre. Dans le présent étude le schéma « second-order upwind » a été utilisé, qui correspond à un développement du second-ordre, offre plus de précision ; il est expliqué ci-dessous.

#### 3.2.6.1. *Le schéma « Second-Order Upwind »*

Dans ce schéma la valeur surfacique  $\phi_f$  est évaluée par un développement de Taylor de second ordre de la valeur centrale  $\phi$  de la cellule. L'expression obtenue est la suivante :

$$\phi_f = \phi + \vec{\nabla}\phi \vec{r} \quad (3-3)$$

$\phi$  est la valeur centrale de la cellule amont, et  $\vec{\nabla}\phi$  son gradient ;  $\vec{r}$  est le vecteur de déplacement du centre vers la face de la cellule amont. Ce modèle nécessite donc de calculer le gradient  $\vec{\nabla}\phi$  de chaque cellule. [14]

Pour les simulations instationnaires, les équations de transports doivent être discrétisées non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. On prend donc en compte la dérivée temporelle des variables  $\frac{\partial\phi}{\partial t}$  dans l'équation de transport (3.2). Comme pour la discrétisation spatiale, la discrétisation temporelle peut être un développement du premier ou du second ordre, le second étant évidemment le plus précis. Considérant que dans l'équation de transport (3.2) on peut exprimer la variation temporelle des flux en fonction des variations spatiales, une expression générale pour la variation temporelle d'une variable  $\phi$  est :

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (3.4)$$

Où : la fonction  $F$  inclus la discrétisation spatiale.

La discrétisation temporelle du second ordre peut s'écrire :

---

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (3.5)$$

Avec :

- $\phi^n$  : variable scalaire au temps  $t$  ;
- $\phi^{n+1}$  : variable scalaire au temps  $t + \Delta t$  ;
- $\phi^{n-1}$  : variable scalaire au temps  $t - \Delta t$  ;

Le pas de temps  $\Delta t$  utilisé pour la discrétisation temporelle est défini par l'utilisateur et doit être ajusté selon la périodicité de l'appareil à l'étude. Pour l'étude des rotors, nous avons utilisé le guide du logiciel ANSYS Fluent 12.0 (2009) recommande, comme mesure de référence, de laisser 5 pas de temps entre le passage de chaque aube, nous avons choisi un pas de temps constant pour les deux types de simulation en 2D et 3D,  $\Delta t = 0.0005$  s pour le cas 2D et  $\Delta t = 0.0003$  s pour le cas 3D.

### **3.2.7. Conditions aux limites**

Les conditions aux limites sont aussi nécessaires pour avoir un nombre d'équations égales au nombre d'inconnues, afin de résoudre le système algébrique. Les conditions aux limites ont été utilisés dans notre étude sont les suivants :

- **Vitesse du vent à l'entrée**

La vitesse à l'entre « Velocity-Inlet », permet de définir la valeur, la direction, et la variation de la vitesse de l'écoulement à l'entrée du domaine de calcul.

- **Pression à la sortie**

La pression à la sortie « Pressure-Outlet », permet de définir la valeur de la pression relative à la sortie du domaine de calcul.

- **Condition de symétrie**

La condition de symétrie « Symmetry » est utilisée lorsque la géométrie présente une symétrie physique. Dans le cas axisymétrique, la condition symétrie est à une distance radiale de l'axe de symétrie.

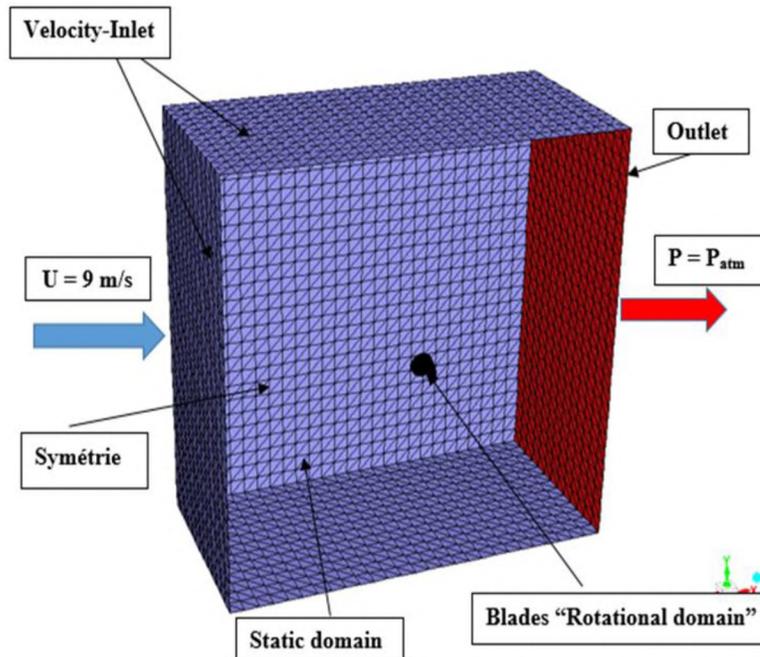


Figure 3.8 : Conditions aux limites du rotor S-H90

Dans notre problème, nous avons adopté les mêmes conditions aux limites pour les deux types des rotors, le rotor est considéré comme un mur, les deux régions parallélépipédiques et cylindriques sont considérées comme un fluide. Le mur est utilisé pour canaliser le flux d'air et pour donner de l'énergie au fluide qui passe à travers le rotor.

### 3.2.8. Méthode de résolution

Deux méthodes numériques sont disponibles dans le code FLUENT, la solution basée sur la pression « Pressure-based solver » et la solution basée sur la densité « Density-based solver ». La première a été développée pour les écoulements incompressibles à basse vitesse, tandis que la seconde a été créée pour les écoulements compressibles à grande vitesse. Dans la présente étude, la méthode « Pressure-based solver » a été utilisée.

- **La solution basée sur la pression**

Les équations de continuité et de conservation de quantité de mouvement sont couplées pour calculer le champ de pression. Les équations impliquées étant non linéaires, la résolution du

système algébrique requière un processus itératif. Ainsi les équations de conservations sont résolues répétitivement.

Après ces étapes nous pouvons lancer les calculs jusqu'à la convergence, si celle-ci aura lieu nous utilisons le post CFD pour voir les résultats.

### **3.2.9. Traitement des données**

Le logiciel FLUENT intègre un module de traitement de données. Les résultats numériques peuvent être présentés sous différentes formes, graphiques ou numériques. La visualisation graphique nous permet d'observer la distribution des variables, On s'intéresse essentiellement à observer la distribution des vitesses puisque c'est là que se trouve l'énergie cinétique et aussi à la distribution des pressions. Notre but à partir des observations graphiques, est de caractériser l'écoulement et de comprendre comment les énergies cinétiques sont dissipées. D'autre part, le logiciel permet de mesurer les coefficients adimensionnels tel que le coefficient de moment  $C_m$ . A partir de ce coefficient, on peut calculer la performance des éoliennes étudiées. Ayant choisi la vitesse angulaire et fixé la vitesse du vent à l'entrée, on peut calculer le rendement à partir de la formule (1.7). Connaissant la valeur de la vitesse spécifique donnée par l'équation (1.2). Nous ferons alternativement le lien entre les observations graphiques et le rendement mesuré pour comprendre d'où viennent les pertes.

## **3.3. Résumé des paramètres CFD**

- **Maillage :**
  - ✓ Structure : Maillages non structurés à éléments tétraédriques pour la simulation en 3D et à éléments rectangulaires pour la simulation en 2D.
  - ✓ Maillage raffinée pour le zone rotatif et grossier dans le zone fixe.
  - ✓ Maillages coulissant « Moving Meshs ».
- **Le modèle mathématique :**
  - ✓ Equations de conservation : Continuité et Navier-Stokes, instationnaire et incompressible.
  - ✓ Modèle de turbulence : k- $\epsilon$ , Standard pour la simulation en 2D et Réalisable pour la simulation en 3D.
  - ✓ Couche limite au niveau du rotor : « Low of the wall » ( $Y^+ \approx 30$ ).

- **Schéma de discrétisation :**
  - ✓ Discrétisation spatiale du second ordre : « Second-Order Upwind » pour la précision.
  - ✓ Calcul des gradients : « Green-Gauss node-based ».
  - ✓ Discrétisation temporelle du second ordre.
  - ✓ Pas de temps :  $\Delta t = 0.0003\text{s}$  pour la simulation en 3D et  $\Delta t = 0.0005\text{s}$  pour la simulation en 2D.
- **Conditions limites :**
  - ✓ En face d'entrée : « Velocity-Inlet ».
  - ✓ En face de sortie : « Pressure-Outlet ».
  - ✓ En faces latérales : « Velocity-Inlet ».
  - ✓ Dans le domaine mobile nous avons imposé une vitesse de rotation :
 
$$\omega = U \frac{\lambda}{R}$$
  - ✓ Le rotor d'éolienne suit le mouvement du domaine mobile.
- **Solveur :** « Pressure-based ».

### 3.4. La simulation numérique de différents types de rotor

#### 3.4.1. La simulation numérique du rotor conventionnel S-C

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à la simulation numérique bidimensionnelle et tridimensionnelle d'un rotor Savonius conventionnel en utilisant un logiciel de simulation CFD.

Le but premier de cette simulation est d'évaluer les performances de tel rotor, ainsi de caractériser l'écoulement de l'air à travers ce rotor, la discussion sera basée principalement sur les distributions de pression et de vitesse au voisinage des aubes. L'autre objectif est de valider nos calculs numériques, en comparant les résultats numériques avec les résultats expérimentaux obtenus par [Hayashi, 2005], en traçant la courbe de puissance  $C_p$  en fonction des vitesses spécifiques. La géométrie étudiée est caractérisée par les données suivantes (Figure 3.9) :

- Le rotor est composé de deux aubes de diamètre :  $D = 0.38\text{m}$ .
- Diamètre de l'aube :  $d = 0.184\text{m}$ .
- Le chevauchement « Overlap » :  $e = 0.038\text{m}$ .
- La hauteur du rotor :  $H = 0.23\text{m}$ .

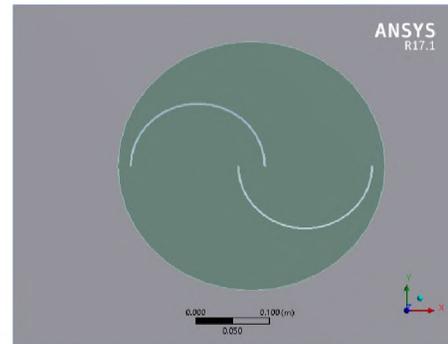


Figure 3.9 : Spécifications du rotor-S-C

#### 3.4.1.1. La simulation numérique bidimensionnelle du rotor S-C

Bien que les simulations bidimensionnelles ne tiennent pas compte de l'effet tridimensionnel, les études précédentes ont montré que les simulations bidimensionnelles donnent des résultats acceptables pour les rotors Savonius.

Par conséquent, les effets tridimensionnels sont ignorés et les simulations transitoires bidimensionnelles sont utilisées pour réduire le coût du temps dans l'étude.

##### Etude de l'Indépendance du maillage sur la solution pour le rotor S-C 2D

Pour une simulation numérique donnée, le test d'indépendance de maillage a une grande importance afin de prédire si les résultats sont en accord avec l'expérimentation ou non. Les résultats de la simulation numérique indiqués dans le tableau et le graphique obtenu avec les maillages 1,2 et 3 du domaine de simulation sont stables (Table 3.1 et figure 3.10).

Table 3-1: Résultats de simulation numérique 2D pour les trois maillages.

<u>Maillage</u>	<u>Cellules (nombre des éléments)</u>	<u>Coefficient de moment <math>C_m</math></u>
<i>Maillage 1 : Grossier</i>	8800	0.18950
<i>Maillage 2 : Moyen</i>	44000	0.22065
<i>Maillage 3 : Fine</i>	99000	0.22330

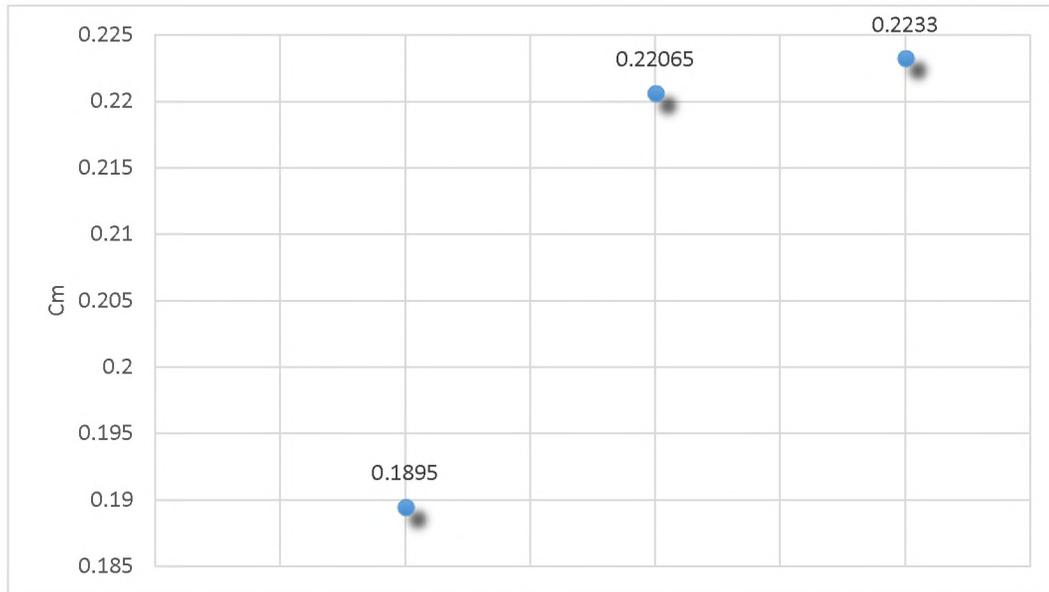


Figure 3.10 : Test d'indépendance de maillage avec un TSR = 0.8 pour le rotor S-C, 2D

Après une analyse d'optimisation graphique on remarque que les deux maillages 2 et 3 (maillage moyen et fin), les valeurs du coefficient de moment  $C_m$  obtenus sont très proche donc pour faire une optimisation en coût et en temps de simulation, nous avons gardé le maillage 2 pour faire le reste des calculs.

Pour le maillage raffiné sélectionné « maillage 2 », le diagramme typique de  $Y^+$  est représenté sur la figure 3.11, ce diagramme montre que les valeurs de  $Y^+$  sont bien inférieures à 300. Ce qui est en adéquation avec le modèle de turbulence utilisé k- $\epsilon$  standard.

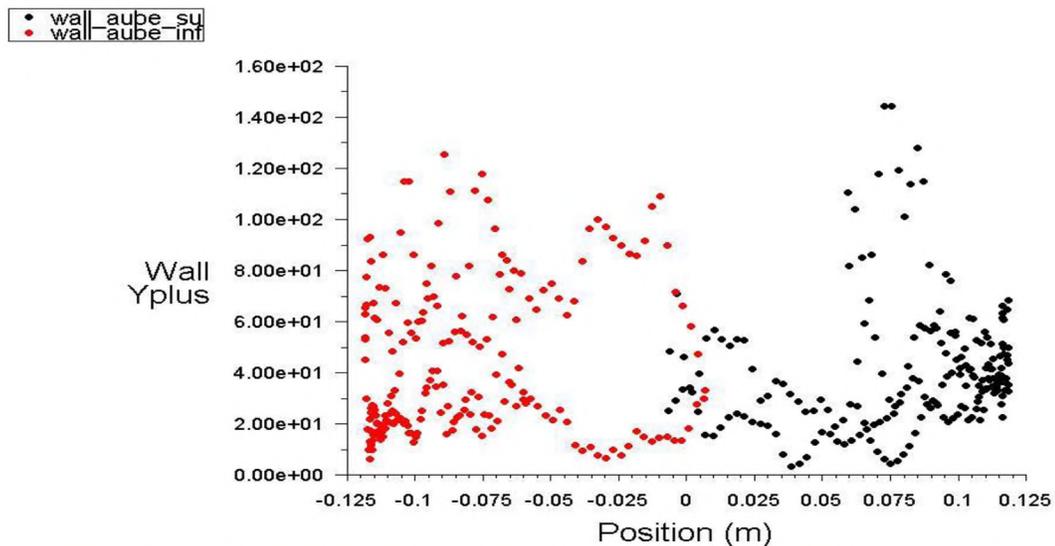


Figure 3.11 : Distribution de  $Y^+$  autour des aubes (vitesse d'entrée = 9 m/s,  $\lambda = 0.8$ ).

### 3.4.1.2. La simulation numérique tridimensionnel du rotor S-C

Nous prenons le même rotor conventionnel testé en 2D mais cette fois on tient compte de l'effet tridimensionnel, les simulations transitoires tridimensionnelles donnent des valeurs proches de ceux du modèle testé expérimentalement.

Le but de la simulation tridimensionnel est d'évaluer les performances du rotor conventionnel, ainsi que, la détermination des caractéristiques de l'écoulement de l'air autour des aubes du rotor. L'autre objectif est bien de valider nos calculs numériques en comparants les résultats numériques avec ceux de l'expérimentale publiée par [Hayashi, 2005].

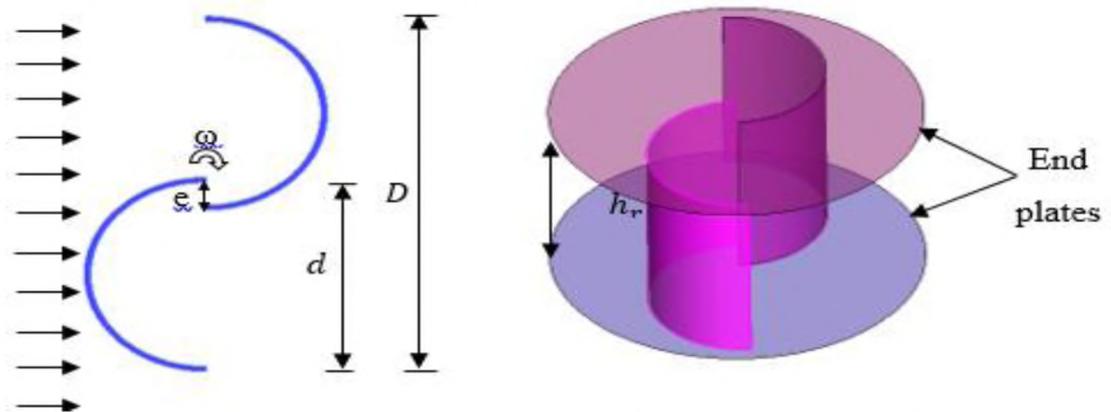


Figure 3.12 : Schéma représentatif du rotor S-C en 3D [20]

#### Etude de l'indépendance de maillage sur la solution pour le rotor S-C 3D

Comme dans la simulation bidimensionnelle les résultats des travaux de modélisation ne peuvent être satisfaisants au premier essai, les études CFD nécessitent plusieurs essais pour trouver des résultats cohérents. Trouver le bon maillage pour une simulation CFD est une tâche répétitive et fastidieuse. Les bons résultats des simulations numériques dépendent d'abord des résultats d'un test d'indépendance de maillage. Dans cette étude, le choix du test nous a conduit à la simulation instationnaire, afin de garantir la précision des résultats. Pour cela les maillages des domaines de simulation (fixe et mobile) ont été raffinés progressivement, jusqu'à ce que le coefficient de moment du rotor  $C_m$  reste invariable et en vérifiant pour chaque maillage si  $Y^+$  est au voisinage de 30. Les résultats de la simulation numérique sont indiqués dans le tableau (3.2) et le graphique (3.13) pour les maillages 1,2,3 et 4 du domaine de simulation sont stables.

Table 3-2 : Résultats de simulation numérique S-C 3D pour les 4 maillages.

<b><u>Maillage</u></b>	<b><u>Cellules (nombre des éléments)</u></b>	<b><u>Coefficient de moment <math>C_m</math></u></b>
<i>Maillage 1 (grossier)</i>	440000	0.18725
<i>Maillage 2 (moyenne)</i>	990000	0.2125
<i>Maillage 3 (fine)</i>	1440000	0.2168
<i>Maillage 4 (très fine)</i>	2166420	0.21805

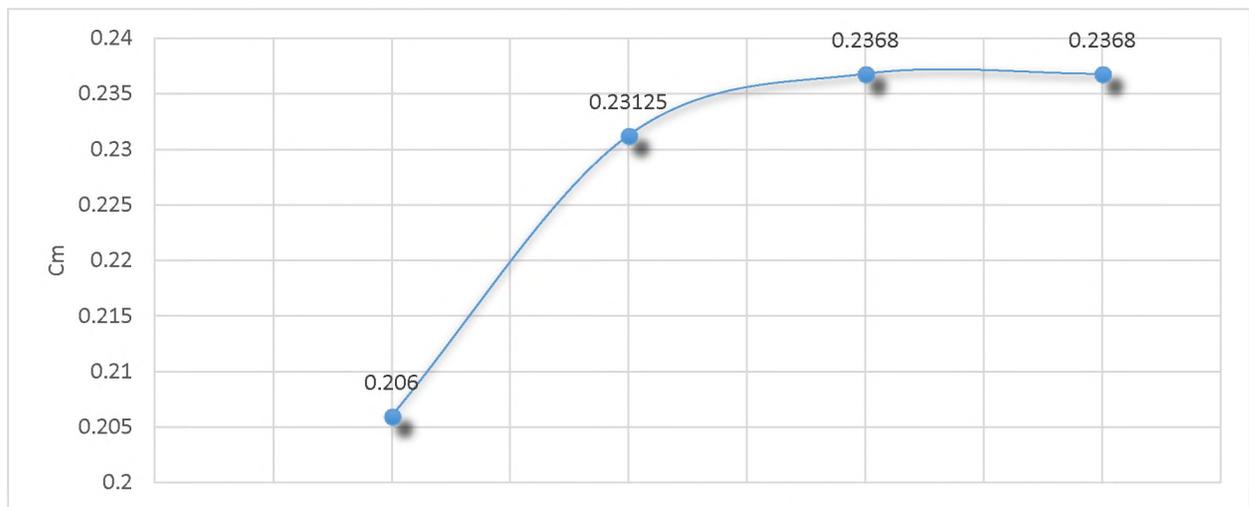


Figure 3.13 : Test d'indépendance de maillage pour TSR=0.8

Après une analyse d'optimisation graphique on remarque que pour les deux maillages 3 et 4 (maillage fin et très fin), les valeurs du coefficient du moment  $C_m$  obtenus sont très proche donc pour éviter le gaspillage de maillage et gagner en termes de temps de calcul, nous avons gardé le maillage 3 (fin) pour faire le reste des calculs.

Après la sélection du maillage optimum, les moyens de calculs mise à notre disposition au niveau de CDER « Centre de Développement des Energies Renouvelables » nous ont permis de lancer quatre simulations à la fois. La convergence aura lieu après 5 jours de calcul avec un pas de temps  $\Delta t=0.0003s$  et pour chaque simulation nous obtenons un graphique périodique de coefficient du moment en fonction de temps (s) similaire comme le cas bidimensionnel (Figure 5.1).

### 3.4.2. La simulation numérique du rotor S-H90

La seconde série de simulations est la simulation numérique tridimensionnel du rotor S-H90 par logiciel de simulation CFD Fluent.

Les simulations ont pour but d'évaluer les performances de l'éolienne en traçant les courbes de moment et de puissance de ce rotor et de caractériser l'écoulement autour des aubes. L'autre objectif est de valider nos calculs numériques, comme, dans le cas du rotor conventionnel, en comparant les résultats numériques trouvés avec ceux de l'expérimentation obtenus par [Kamoji, 2009]. La géométrie étudiée est caractérisée par les données suivantes (Figure 3.14)

- ❖ Le Rotor est composé de deux aubes attachées de diamètre :  $D_h = 0.38\text{m}$ .
- ❖ Diamètre d'une aube :  $d_h = 0.184\text{m}$ .
- ❖ Le chevauchement « Overlap » :  $e = 0\text{ m}$  (pas d'espace entre les aubes).
- ❖ La hauteur du rotor :  $H_h = 0.23\text{m}$ .
- ❖ Vitesse du vent  $V_\infty = 9\text{ m/s}$  et la pression  $P_\infty = P_{\text{atm}}$ .

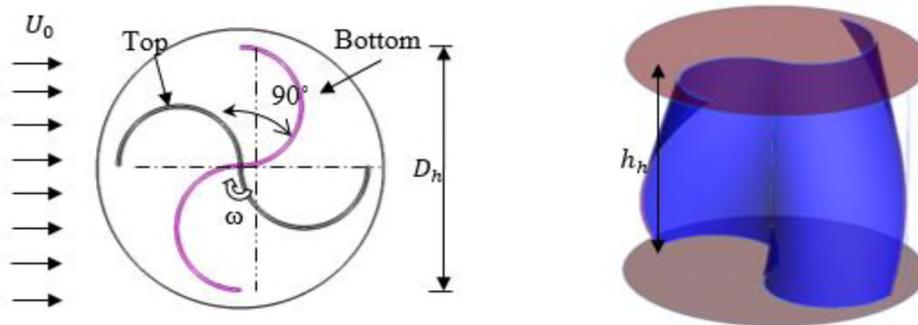


Figure 3.14 : Schéma représentatif du rotor S-H90 [20]

# Chapitre 4

*La conception et la réalisation*

## 4. La conception et la réalisation

Ce chapitre comporte une phase de conception puis une phase de réalisation d'un modèle réduit d'éolienne à axe vertical de type S-H90 à l'échelle 2 : 3 similaire au modèle utilisé par Kamoji dans son expérimentation en 2009 et d'un banc d'essai destiné pour mesurer le moment dynamique.

### 4.1. Les étapes de conception et de réalisation de l'éolienne

#### 4.1.1. La conception de rotor S-H90

À l'aide d'une similitude géométrique avec le prototype de Kamoji, nous avons conçu notre modèle réduit, le tableau sous-indiqué résume les caractéristiques géométriques du prototype et du modèle réduit :

Tableau 4-1 : Caractéristiques de l'éolienne de Kamoji et notre modèle réduit

	<i>L'éolienne de Kamoji</i>	<i>Notre modèle réduit</i>
La hauteur du rotor (mm)	220	132
Le rayon d'aube (mm)	230	150
La surface balayée (mm <sup>2</sup> )	50600	19800

Vu que la géométrie du rotor twistée à 90° est très compliquée à réaliser, nous avons opté à la confection d'un squelette formé de 9 armatures en forme de (S), Goupillées sur l'axe du rotor. Afin d'obtenir le twist à 90°, les trous de goupillage des armatures sont équidistants le long l'axe et décaler de 11,25°, 10 trous percés sur chaque armature permettent de faire passer les fils en tissu. Le squelette ainsi forme l'ossature du rotor.

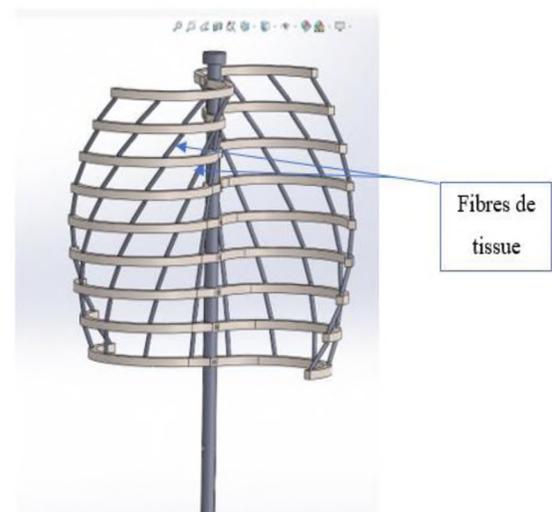


Figure 4.1 : Squelette de rotor

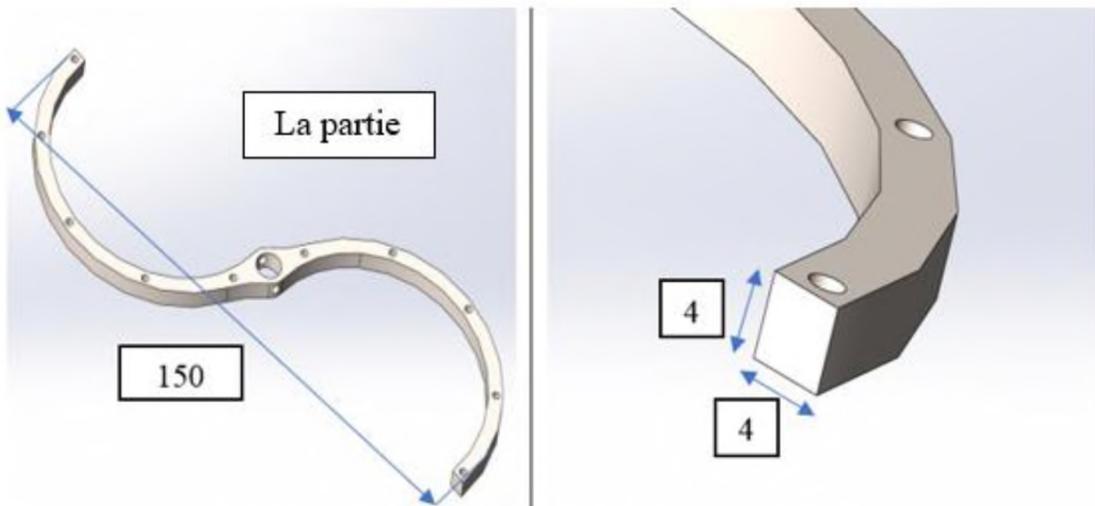


Figure 4.2 : Armature en forme de « S » du squelette

#### 4.1.2. L'usinage des armatures

##### 4.1.2.1. *Présentation des machines utilisées*

###### ➤ Fraiseuse CNC

C'est une fraiseuse à commande numérique 3axes, dotée d'un magasin de 32 outils, avec Changement d'outils automatique, assurant un usinage d'une grande précision, sans jeu.



Figure 4.3 : Fraiseuse CNC

Ce type de machine moderne possède la technologie de commande 3D, à interface utilisateur moderne, qui permet de simuler les processus d'usinage à l'avance.

➤ **L'électroérosion par fil à CNC**

C'est une machine de marque **Agie Charmilles CUT 400 Sp**, capable de découper des cônes de 45°, quelle que soit la hauteur de la pièce. Le principe de double guidage croisé des axes X, Y et U, V, indépendants, permet d'usiner en grande dépouille et donc d'élargir l'éventail des applications possibles en électroérosion par fil.

Ses avantages sont :

- Usinage de pièces délicates préalablement traitées. Évite les déformations.
- Vitesse de déplacement de 3 m / min sécurisée par une protection très efficace contre les collisions.
- Réalise des découpes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm).
- Très bonne précision et bon état de surface (identique à la rectification).

➤ **Perceuse par étincelage**

Le perçage par étincelage est un procédé d'électroérosion par enfonçage. Il utilise une électrode tubulaire pour percer les matériaux les plus durs comme le carbure de tungstène et les aciers traités à des diamètres allant de : 0.1mm à 6mm sur des hauteurs de 400mm ou plus, avec un



Figure 4.6 : Perceuse par étincelage  
contrôle de la profondeur. Les trous peuvent être débouchant ou borgnes, ce procédé est utilisé pour :



Figure 4.4 : Machine électroérosion par fil



Figure 4.5 : Les électrodes utilisées pour le perçage

- Le perçage des trous de départ du fil.
- Faire un perçage de correction des moules après traitement.
- L'enlèvement de taraud cassé ou des trous de précision dans des pièces mécaniques.

#### 4.1.2.2. Usinage

- Choix du brut

Vu que le matériau des armatures importe peu dans leur rôle et par raison de disponibilité, nous avons utilisé l'acier de nuance **14 NiCrMo13-4** à partir d'un brut en bloc parallélépipédique de dimensions (160x90x60), (voir figure 4.7).



Figure 4.7 : La pièce brute

Nous générons le programme G-code exécutable sur la **Fraiseuse CNC** sous le logiciel CAMWorks puis exécuter ce programme pour réaliser la pièce de la Figure 4.10. La durée totale d'exécution des deux phases d'usinage ébauche et finition : est de **5 heures**.

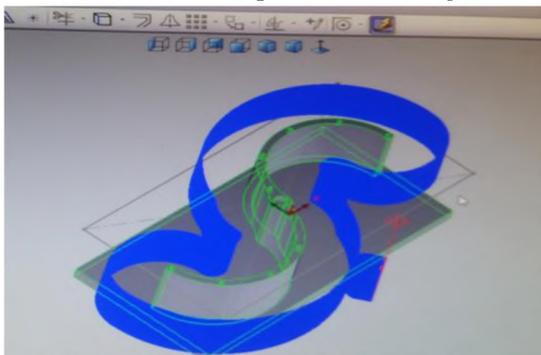


Figure 4.8 : Simulation parcours d'outil du logiciel CAMWorks



Figure 4.9 : L'usinage par la Fraiseuse CNC du bloc des armatures

A l'aide d'une **Perceuse par étincelage**, en utilisant une électrode de diamètre de 2 mm, nous exécutons les trous verticaux : Le trou de l'axe de rotation de diamètre 7 mm et les 10 trous de passage des fils de tissu de diamètre 2 mm, ainsi que, les trous horizontaux de diamètre de 2 mm pour le logement de la goupille. La durée totale d'usinage est de **2 heures**.



Figure 4.10 : Usinage à la perceuse par étincelage.

Finally, by **électroérosion à fil**, we cut the 9 identical armatures. The wire used is brass, with a diameter of 0.25. The machining time is **4 hours**. The total cost of these operations is detailed in table 4.1.



Figure 4.11: Découpage par électroérosion à fil

Table 4-1 : Evaluation la pris totale d'usinage :

Opération	Prix unitaire (DA/heure)	Durée (heure)	Prix total de l'opération (DA)	Coût total d'usinage (DA)
Fraisage	4000	5	20000	44000
Perçage	2000	2	4000	
Découpage	5000	4	20000	

#### 4.1.2.3. Validation du modèle

Nous avons effectué une simulation sur SolidWorks pour avoir idée sur la rigidité d'une armature dans le cas le plus défavorable, ou la force générée est due à une vitesse de vent extrême de 25 m/s. Nous remarquons que le déplacement maximal sur l'extrémité de l'armature est insignifiant de 4.278  $\mu\text{m}$  (Figure 4.12).

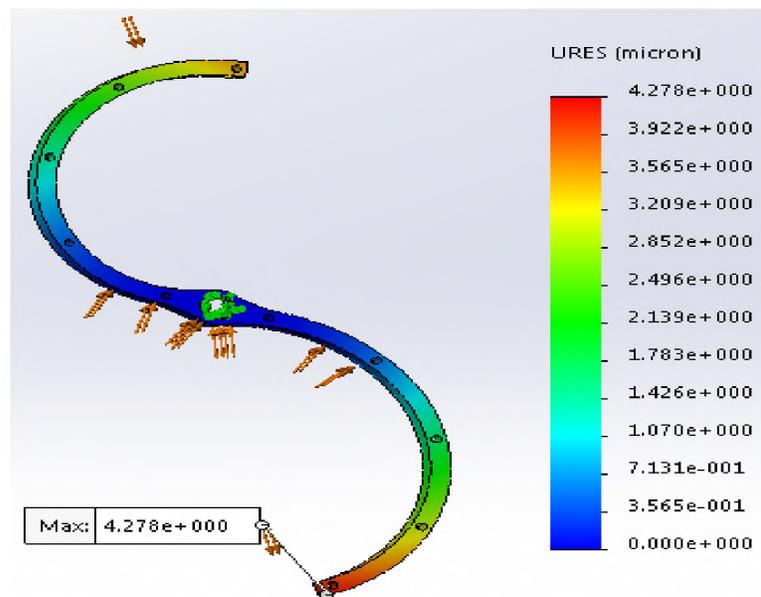


Figure 4.12 : La simulation de l'armature à l'aide de SolidWorks

### 4.1.3. L'assemblage des armatures

Nous avons trouillé l'axe en laiton en trous espacés l'un de l'autre avec un angle constant de  $11.25^\circ$  à l'aide d'un plateau diviseur monté sur une fraiseuse conventionnelle afin d'aboutir à un décalage total de  $90^\circ$  (Figure 4.13), ces trous perçoivent les goupilles de fixation d'armatures sur l'axe et sur les deux plaques d'extrémités, comme le montre la figure (4.14).

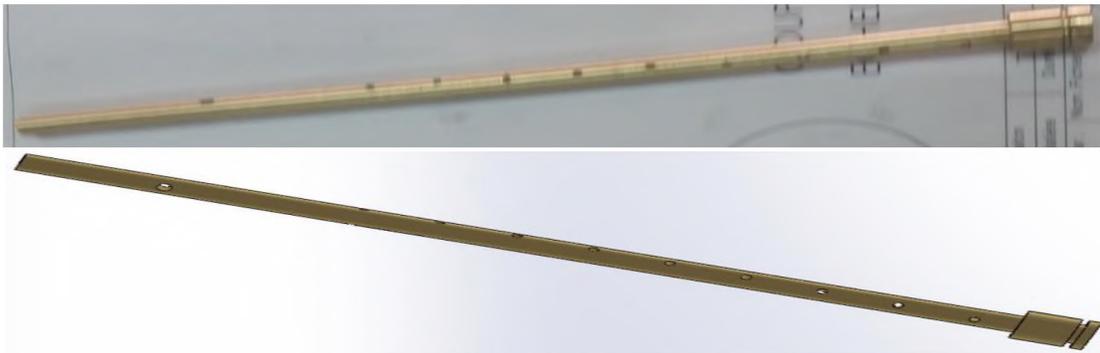


Figure 4.13 : Axe de rotor



Figure 4.14 : Fixation des armatures sur l'axe et sur les plaques d'extrémités

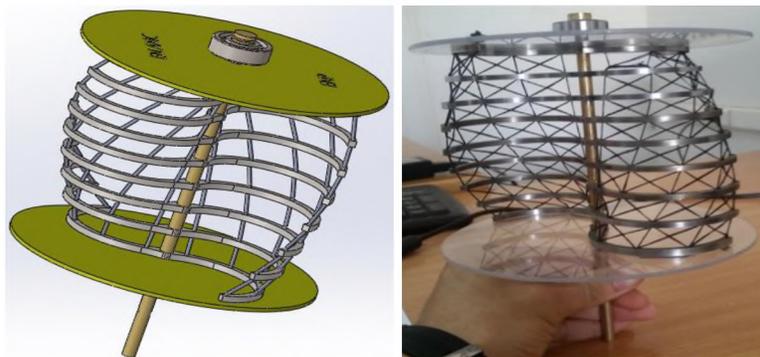


Figure 4.15 : Grille des fibres attachée sur les armatures et les plaques d'extrémités

La structure ainsi obtenue est consolidée par des fils en tissu, tissés à travers les trous des armatures et des plaques supérieure et inférieure, prévues à cet effet Figure 4.15.

#### 4.1.4. Le moulage et la finition

Un moule de fortune réalisé en papier adhésif, permet d'étendre la pâte obtenue par un mélange de résine en poudre et un diluant synthétique, après 60mn de séchage et démoulage, le brut du rotor est ainsi obtenu. Figures (4.17) et (4.18), finalement nous faisons la finition par meulage à l'aide des meules de forme et du papier adhésif approprié. Figure (4.19).



Figure 4.16 : Moule de fortune en papier adhésif



Figure 4.17 : Rotor après moulage



Figure 4.19 : Rotor fini après ponçage

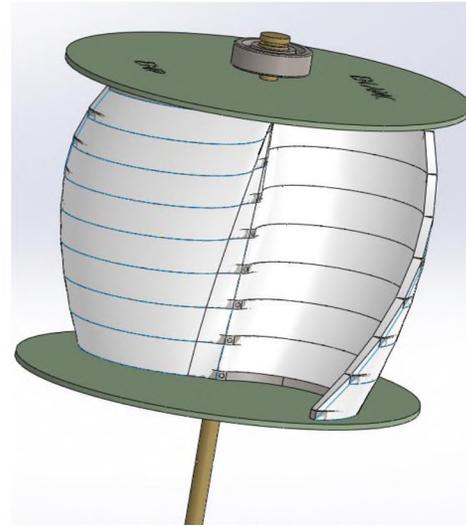


Figure 4.18 : Rotor fini sur SolidWorks

## 4.2. Les étapes de conception et de réalisation du banc d'essai

### 4.2.1. Description

La puissance mécanique du rotor Savonius peut être déterminée en neutralisant le couple mécanique sur l'arbre rotatif et la vitesse de rotation à différentes valeurs de vitesses du vent. Le banc d'essai mécanique utilisé pour se faire illustrer à la Figure (4.20). Il est conçu d'une poulie, d'une corde inextensible en tissu, d'un plateau porte masse et d'un ressort. Le plateau et le ressort ont été utilisés pour exercer la charge de freinage sur le rotor afin de mesurer le couple de ce dernier, ils étaient attachés par un fil de tissu de 1 mm de diamètre passant sur les deux poulies, La corde a été enroulé d'un tour ( $360^\circ$ ) sur la poulie fixée sur le rotor, l'accouplement est fixé sur l'axe du rotor par une goupille et également était couplée à la bride par l'intermédiaire d'un roulement, un système de guidage du rotor était bien installé afin de minimiser les perturbations de l'écoulement du vent. La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre numérique, alors que la vitesse de rotation de l'arbre est mesurée à l'aide d'un tachymètre numérique.



Figure 4.20 : L'éolienne montée sur le banc d'essai

Table 4-2 : Désignations de différents composants mécaniques

<i>Désignation</i>	<i>Illustration</i>	<i>Description</i>
<u>Axe du rotor</u>		Usiner sur un tour conventionnel, est en acier ordinaire, il supporte la bague d'accouplement au rotor et la poulie motrice.
<u>Poulie</u>		En plexiglas, elle assure la transmission du mouvement aux deux poulies de renvoi à travers le fil inextensible.
<u>Bride</u>		La bride en aluminium, usinée sur un tour conventionnel. Fixée à la table, sert de palier à roulement pour l'axe.

<p><u>Table</u></p>		<p>La table utilisée pour supporter l'ensemble (éolienne et dispositif de mesure), fabriquée en tube carré de 25x25 et en tôle noire d'épaisseur 1mm.</p>
<p><u>Ressort</u></p>		<p>Le ressort utilisé pour déterminer la force de rappel appliquée au rayon de la poulie et donc le moment de freinage.</p>
<p><u>Bras de guidage</u></p>		<p>De forme cylindrique en duralumin, fixée à la table par 4 boulons, surmontée par le bras de guidage, en tôle d'aluminium et supporte le palier à roulement supérieur.</p>
<p><u>Une porte de masses</u></p>		<p>Le plateau porte masses sert à supporter la masse nécessaire à accrochée pour neutraliser le moment du rotor.</p>

### 4.3. Système de mesure pour l'analyse expérimentale du rotor

#### 4.3.1. Fonctionnement du système (Banc d'essai)

Le rotor tourne librement sous l'effet du vent produit par la ventilateur centrifuge, la vitesse du vent ( $U$ ) et celle de rotation du rotor ( $\omega$ ) ont été enregistrés par un anémomètre, un tachymètre numériques. Lorsque le rotor atteint un état périodique et stable, de masses étalonnées de 50 g sont ajoutées progressivement pour chaque intervention jusqu'au blocage final du rotor (état d'équilibre), maintenant le ressort est bien tendu. La mesure de l'allongement du ressort ( $\Delta l$ ) et les valeurs de masses ajoutées ( $m$ ) ont été utilisés pour déterminer le couple de freinage ( $M$ ) et la puissance dynamique ( $P$ ). La formule (4.1) permet de calculer le couple de freinage, en effet :

En appliquant la relation fondamentale de la dynamique sur un système en rotation on a :

$$\sum \vec{M}_{\Sigma \vec{F}_{ext/o}} = I\alpha'' \quad (4.1)$$

A l'équilibre :

$$\sum \vec{M}_{\Sigma \vec{F}_{ext/o}} = \vec{0} \quad (4-2)$$

$$\vec{M}_r + \vec{M}_m + \vec{M}_R = \vec{0} \quad (4-3)$$

Avec :

- $\vec{M}_R$  : Moment dynamique générée par le rotor.
- $\vec{M}_r$  : Moment produit par la force de rappel du ressort.
- $\vec{M}_m$  : Moment produit par la force de poids des masses.

Par projection on trouve :

$$M_R + M_r - M_m = 0 \quad (4-4)$$

On tient compte que :

$$M_m = mgR_p \quad (4-5)$$

$$M_r = k\Delta l R_p \quad (4-6)$$

Avec :

- $R_p$  : Rayon de la poulie couplé avec le rotor

Après substitution et réarrangement des équations (4.5), (4.6) dans (4.4), on aura :

$$M_R = (mg - k\Delta l)R_p \quad (4-7)$$



Figure 4.21 : Mesure de l'allongement à l'aide de la règle graduée



Figure 4.22 : Les masses étalonnées



Figure 4.24 : Tachymètre électronique pour mesurer la vitesse de rotation du rotor



Figure 4.23 Anémomètre électronique à tube de Pitot pour mesurer la vitesse de l'écoulement d'air

### 4.3.2. Etalonnage du ressort

#### 4.3.2.1. *Détermination du raideur k de ressort*

##### ➤ *Méthode théorique*

L'expression théorique du coefficient de raideur k d'un ressort est donné par la relation (4.7) :

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (4-8)$$

Avec :

- G : Coefficient de cisaillement.
- D : Diamètre moyen des spires égal  $D = \frac{D_{ext} + D_{int}}{2}$ .
- n : Nombre de spires actives.
- d : Diamètre du fil à ressort.

En faisant l'application numérique avec les données suivantes :

G = 80000MPa (Pour l'Acier), D = 7.5mm, n = 39, d = 0.5mm.

On trouve :  $k = 38\text{N/m}$

##### ➤ *Méthode expérimentale*

En accrochant successivement les masses marquées et on note l'allongement du ressort, on peut représenter la courbe d'étalonnage dont la pente représente le coefficient de raideur k

On sait qu'à l'équilibre, on a :

$$P - F = 0$$

Avec :  $F = k\Delta l$  et  $P = mg$

- P : Poids de masses m (N).
- F : Force de tension du ressort (N).

D'où :

$$k\Delta l = mg$$



Figure 4.25 : L'étalonnage du ressort

Le tableau suivant résume les essais d'étalonnage :

Table 4-3 : les résultats d'étalonnage

$m(g)$	$\Delta l(mm)$	$F_R(N)$
20	1,5	196,2
100	22,5	981
150	33	1471,5

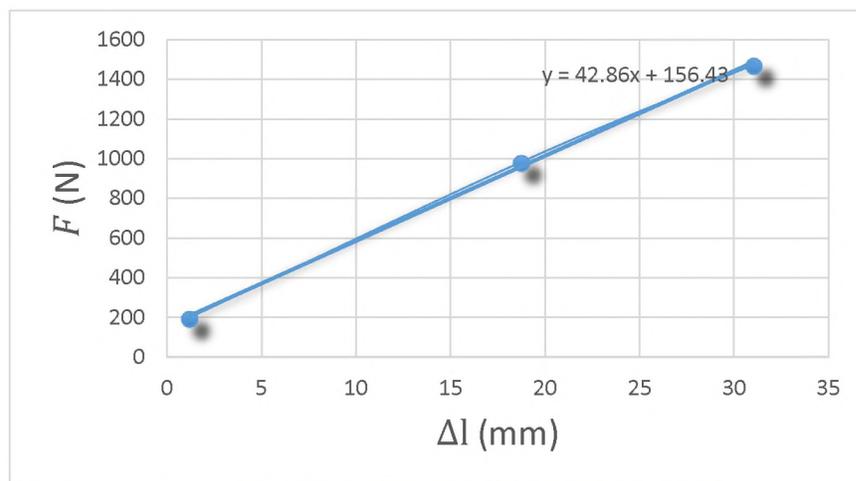


Figure 4.26 : graphique d'étalonnage  $F = f(\Delta l)$

La pente de graphe est aussi la raideur du ressort :

$$\Rightarrow k = 40,04 \text{ N/m}$$

**Erreur relative :**

$$E_{relative} = \frac{k_{exp} - k_{th}}{k_{th}} = \frac{40.04 - 38}{38} = 5\%$$

### 4.3.3. Notions de similitude

Avant de construire un prototype, les fabricants réalisent un modèle réduit pour les essais. En utilisant les techniques de similitude géométrique, cinématique et dynamique.

La transposition des résultats résume qu'il y ait similitude entre modèle réduit, prototype et ses caractéristiques, à condition de suivre les principes suivants :

- **Similitude géométrique :**

$$K_L = \frac{L_{\text{modèle réduit}}}{L_{\text{prototype}}} = \text{constante} \quad (4-9)$$

Où :

L : Longueur caractéristique (m).

- **Similitude cinématique :**

Pour avoir une similitude cinématique il suffit avoir deux points homologues entre modèle réduit et prototype dont les vitesses variées en directions et en modules tout en assurant un rapport constant  $K_V$ . [16]

$$K_V = \frac{V_{\text{modèle réduit}}}{V_{\text{prototype}}} = \text{constante} \quad (4-10)$$

V : Vitesse caractéristique (m/s).

- **Similitude dynamique :**

Dans ce cas, les forces varient tout en assurant le rapport constant  $K_F$ .

$$K_F = \frac{F_{\text{modèle réduit}}}{F_{\text{prototype}}} = \text{constante} \quad (4-11)$$

- F : Force caractéristique (N).

Les paramètres cinématiques et dynamiques doivent avoir une certaine relation, on devra avoir une relation pour la force (F), la masse (m) et le temps (t).

➤ Force :  $F_m = K_F \times F$  (4-12)

➤ Masse :  $m_M = K_M \times m$  (4-13)

$$\text{➤ Temps :} \quad t_M = K_T \times t \quad (4-14)$$

$K_F$ ,  $K_M$ , et  $K_T$  sont respectivement les constantes de proportionnalité des forces, des masses et des temps.

À partir de ces expressions, on pourra obtenir tous les rapports d'échelle modèle réduit /prototype pour n'importe quel grandeur cinématique ou dynamique et les propriétés des fluides :

$$\text{➤ Vitesse :} \quad U_m = \frac{K_F}{K_T} \times U \quad (4-15)$$

$$\text{➤ Accélération :} \quad a_m = \frac{K_G}{K_T^2} \times a \quad (4-16)$$

$$\text{➤ Masse volumique :} \quad \rho_m = \frac{K_M}{K_G^2} \times \rho \quad (4-17)$$

$$\text{➤ Pression :} \quad p_m = \frac{K_F}{K_G^2} \times p \quad (4-18)$$

$$\text{➤ Puissance :} \quad P_m = \frac{R_m^2}{R_p^2} \times P_p \quad (4-19)$$

Avec :

- $P_m$  : Puissance du modèle réduit.
- $P_p$  : Puissance du prototype.
- $R_m$  : Rayon du rotor du modèle réduit.
- $R_p$  : Rayon du rotor du prototype

#### Application numérique :

La relation (4.18), nous donne la puissance de notre modèle réduit en fonction de la puissance de prototype réelle de Kamoji :

$$P_m = \frac{R_m^2}{R_p^2} \times P_p = \left(\frac{150}{230}\right)^2 \times P_p = 0.425 \times P_p \quad (4-20)$$

#### 4.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de conception et de réalisation du modèle réduit du rotor S-H90 et celui du banc d'essai. A la fin de chapitre, les lois de similitudes et les relations mise en jeu entre modèle réduit et prototype sont établies.

# Chapitre 5

*Analyse des résultats*

## 5. Analyse des résultats

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des simulations numériques par CFD mentionnés dans le chapitre 3 et les résultats de l'expérimentation mentionnés au chapitre 4 en validant notre modèle réduit.

### 5.1. Résultats des simulations numériques par CFD

#### 5.2. Rotor conventionnel S-C

##### 5.2.1. Simulation bidimensionnel 2D

###### 5.2.1.1. *Le graphique instantané du coefficient de moment $C_m$*

Le logiciel de CFD Fluent utilise la technique des maillages glissantes (ou Moving Mesh Model) pour la résolution des équations de l'état instationnaire de l'écoulement. Le pas de temps retenu pour cette opération est  $\Delta t = 0.0005$  second correspondant à 360 pas de temps par rotation. A chaque pas de temps nous avons appliquons 5 itérations. La simulation évolue dans le temps jusqu'à ce que le coefficient de moment ( $C_m$ ) atteigne un état oscillatoire régulier (Figure 5.1). Le coefficient de moment instantané ( $C_{mi}$ ) est obtenu à chaque pas de temps ( $i$ ) dont la valeur moyenne de  $C_m$  est calculée en considérant les valeurs des ( $C_{mi}$ ) correspondantes aux deux dernières rotations. Le coefficient de puissance ( $C_p$ ) est ensuite calculé à partir de l'équation (1.5).

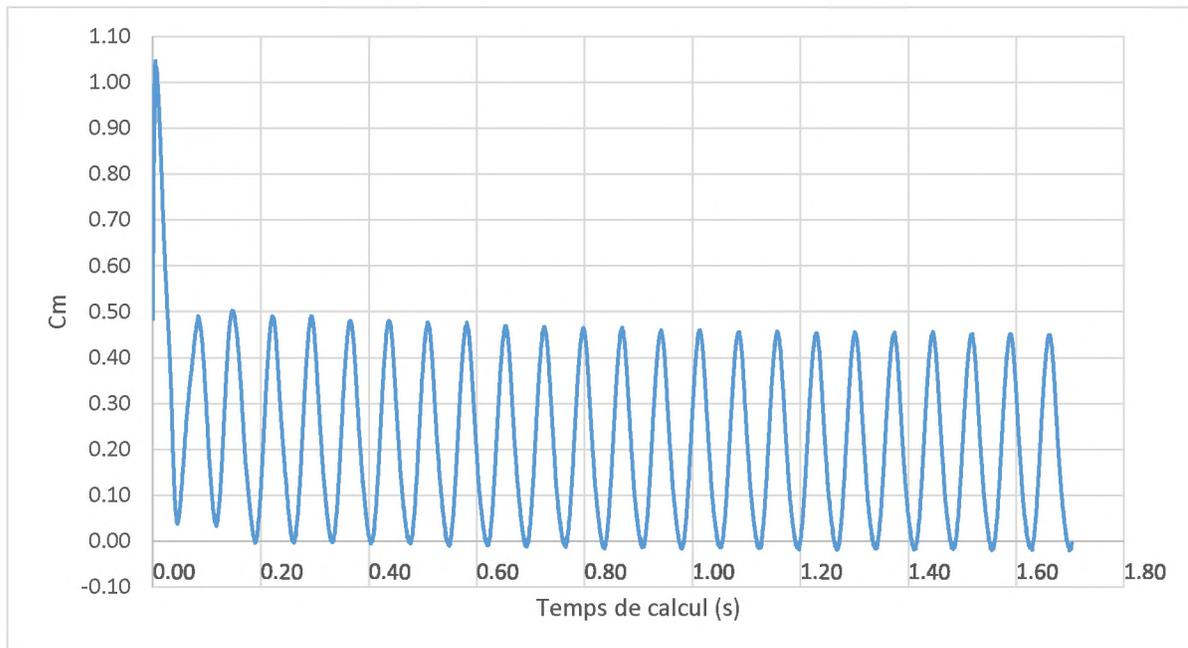


Figure 5.1 : Variation du coefficient de moment en fonction du temps,  $\lambda = 0.8$

### 5.2.1.2. Validation des résultats S-C 2D

Nous avons utilisé la même géométrie que celle de [Hayachi, 2005]. On observe une très bonne concordance entre les résultats CFD et ceux de l'expérimentale. On considère donc que nos calculs numériques pour ce modèle sont valides. On remarque sur la Figure ci-dessous que le  $C_p$  maximal est près de 18% pour une vitesse spécifique de 0.8, ces résultats sont cohérents avec ceux publiés dans le référence [Hayachi, 2005]. On remarque qu'à faible TSR le coefficient de moment est surévalué, ce qui conduit à un  $C_p$  plus élevé, cet écart traduit par le fait que le logiciel de simulation ne prend pas en considération les effets de l'inertie due au démarrage si on compare avec l'expérimentale, mais pour des valeurs de TSR supérieures à 0,5 l'accord est très bon.

Cette bonne concordance des résultats revient à l'optimisation et homogénéité du maillage choisi ce que permet au solveur de bien saisir les principales caractéristiques d'écoulement. En outre la présente étude a utilisé un maillage non structuré pour les deux domaines de simulation.

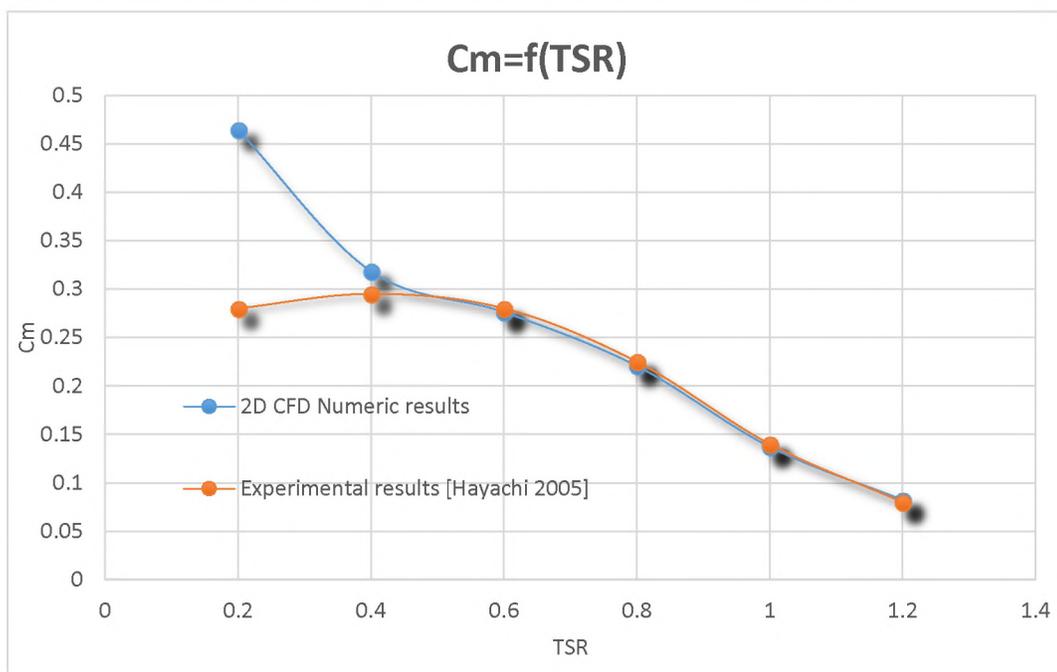


Figure 5.2 : Evolution de coefficient de moment  $C_m$  en fonction de TSR

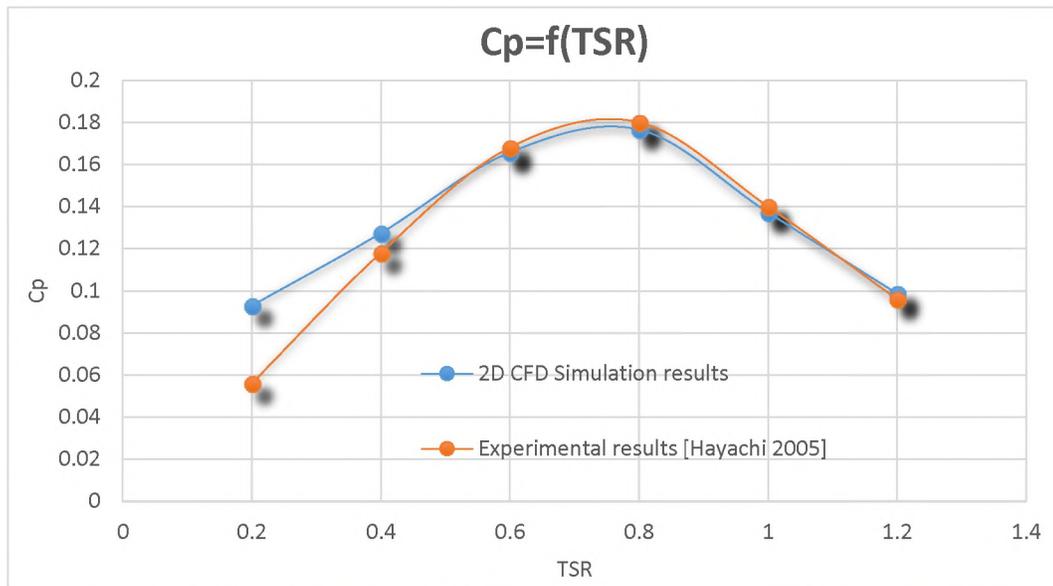


Figure 5.3 : Evolution de coefficient de moment  $C_m$  en fonction de TSR

### 5.2.1.3. *Distribution des vitesses et des pressions de l'écoulement pendant le fonctionnement du rotor S-C 2D*

Sur la figure 5.2, On observe la distribution des vitesses de l'écoulement pendant le fonctionnement du rotor. Avec un vent non perturbé de 9 m/s, et une vitesse spécifique de 0.8, On remarque bien que la vitesse d'impact sur l'aube supérieure du rotor est d'environ de 7 à 8 m/s, ce qui veut dire que ce type de turbine affecte beaucoup le vent qui l'attaque en amont. D'autre part, on observe que le vent quitte le rotor en amont est d'environ 3 m/s en moyenne, ce qui affirme que cette turbine affecte beaucoup le vent en aval.

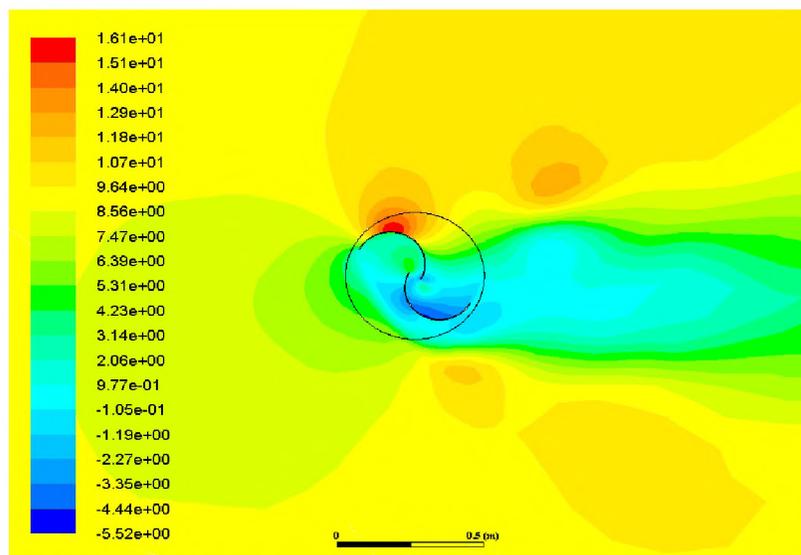


Figure 5.4 : Distribution des vitesses (m/s) dans le rotor conventionnel (TSR=0.8)

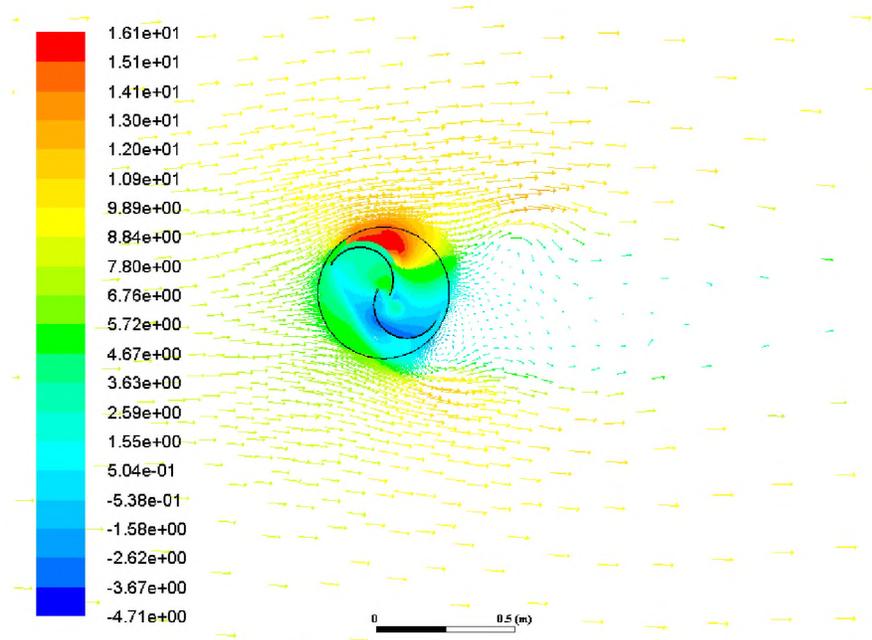


Figure 5.5 : Parcours des lignes des courants dans le domaine de simulation, TSR=0.8

On note aussi que l'écoulement est fortement accéléré sur l'aube inférieure du rotor où il est en moyenne 30% supérieur au vent exercé. Cette accélération correspond à des écoulements tourbillonnaires, ou vortex, caractéristiques des turbines qui fonctionnent sur la force de traînée (drag-divise). Ces écoulements tourbillonnaires sont causés par des grandes différences de pression entre les deux faces des aubes comme on peut le voir sur la Figure (5.5).

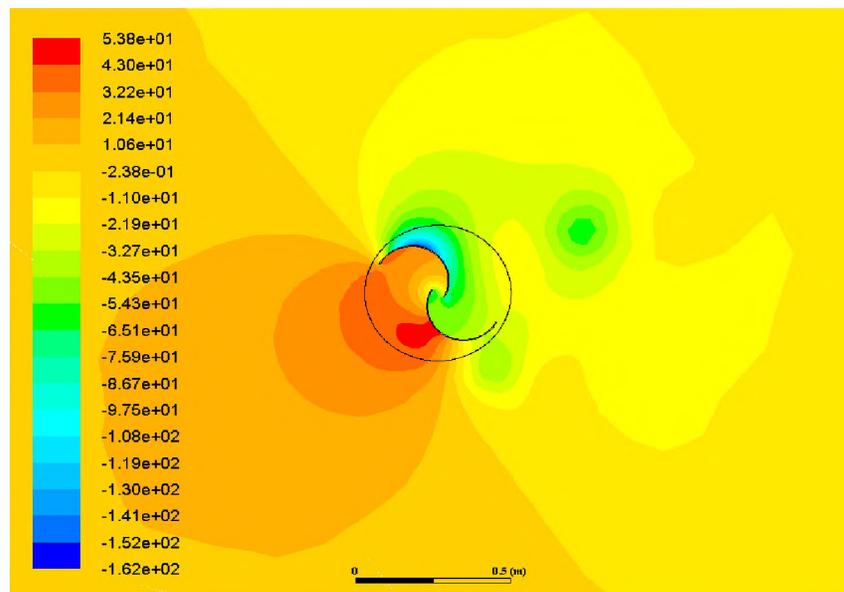


Figure 5.6 : Distribution des pressions (Pa) dans le rotor conventionnel (TSR=0.8)

On note, que le gradient de pression élevé exercé sur le bout de l'aube inférieure accélère le vent du côté de l'aube inférieure. D'autre part, la dépression élevée en amont de l'aube inférieure et de l'aube supérieure provoque un vortex au niveau du rotor.

Ces différences de pression engendrent une résultante de force de trainée qui fait tourner le rotor avec un couple élevé. Cependant ce mode de fonctionnement engendre beaucoup de pertes d'énergie cinétique.

## 5.2.2. Simulation tridimensionnel 3D

### 5.2.2.1. *Validation des résultats S-C 3D*

Les essais en soufflerie de Hayashi, 2005 sont cohérents avec l'écoulement en 3D, puisque le but de ces essais est de valider une étude CFD 3D. Pour atteindre son but, Hayashi a placé deux disques sur les extrémités de son rotor de manière à empêcher toute circulation verticale de l'air « End plates ». A quelques détails près. On observe une très bonne concordance entre les résultats de simulation et ceux de l'expérimentale. On considère donc que nos calculs numériques pour ce modèle sont valides. On observe sur la Figure (5.6) que le  $C_p$  maximal est près de 18% pour une vitesse spécifique de 0.8. Ces résultats sont cohérents avec les publications de Hayashi, 2005.

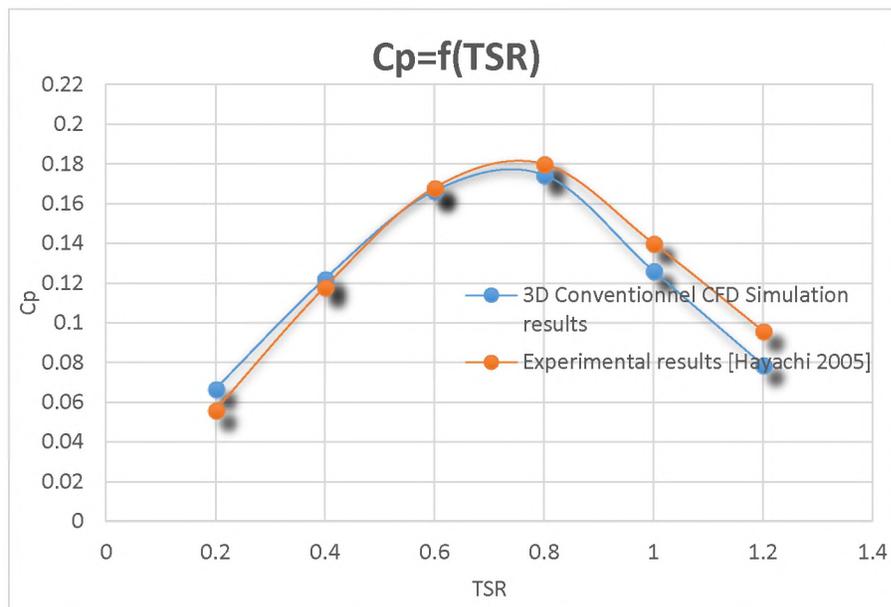


Figure 5.7 : Comparaison entre les résultats CFD et expérimentaux, S-C 3D

### 5.2.2.2. Analyse des résultats trouvés pour S-C 3D

#### ❖ Distribution des vitesses (m/s) dans le rotor S-C 3D pour ( $\lambda=0.8$ )

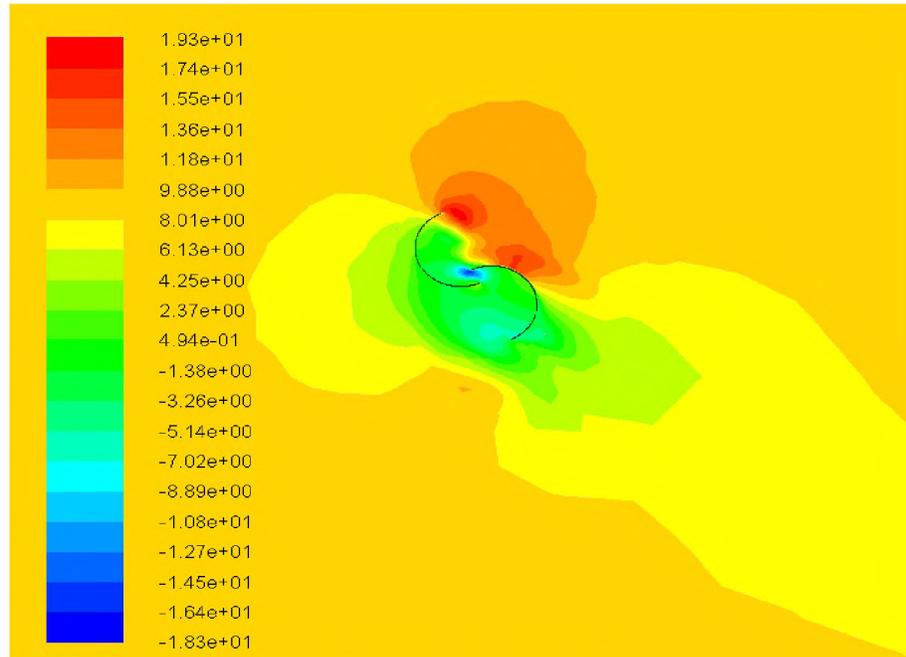


Figure 5.8 : Distribution des vitesses dans la direction x pour le rotor S-C 3D

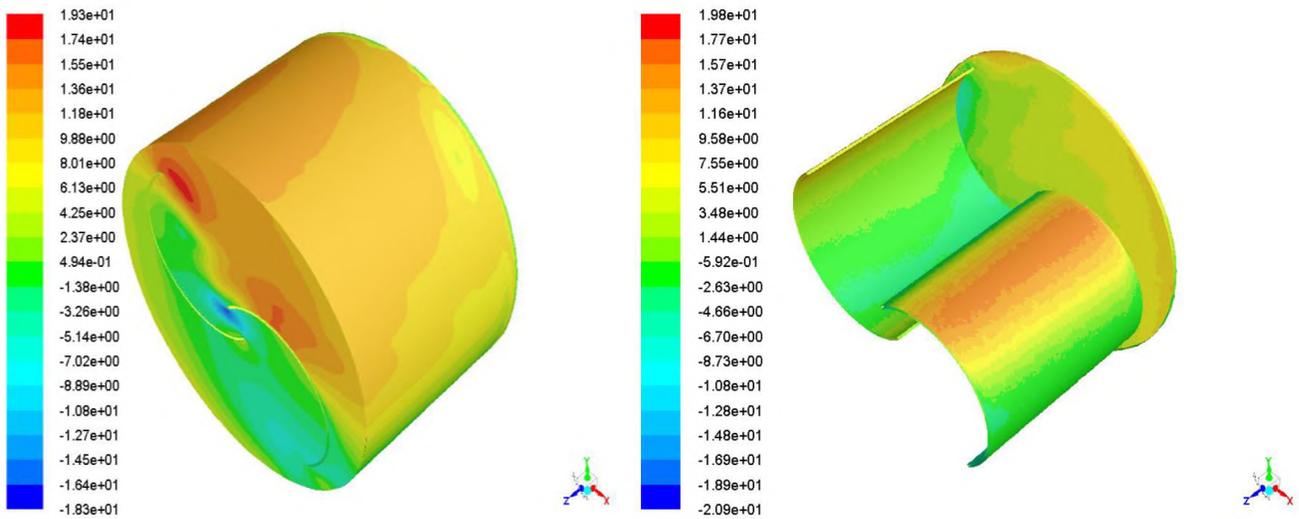


Figure 5.9 : Distribution des vitesses suivant dans le zone de rotation

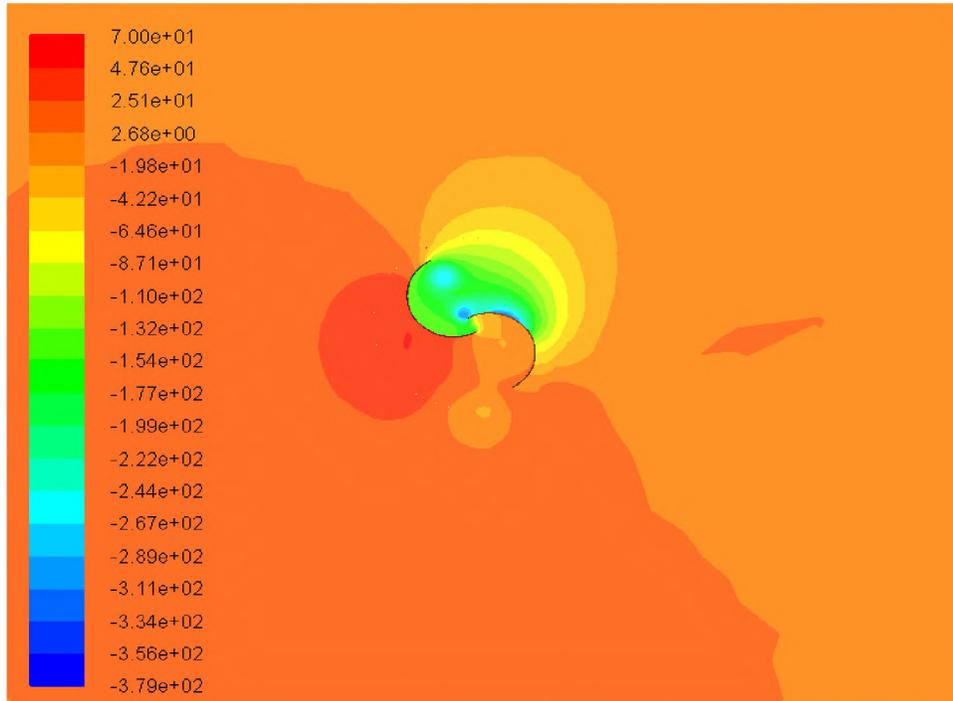
❖ Distribution des pressions (Pa) sur un profil du rotor S-C 3D pour ( $\lambda=0.8$ )

Figure 5.10 : Distribution des pressions statiques pour le rotor S-C 3D

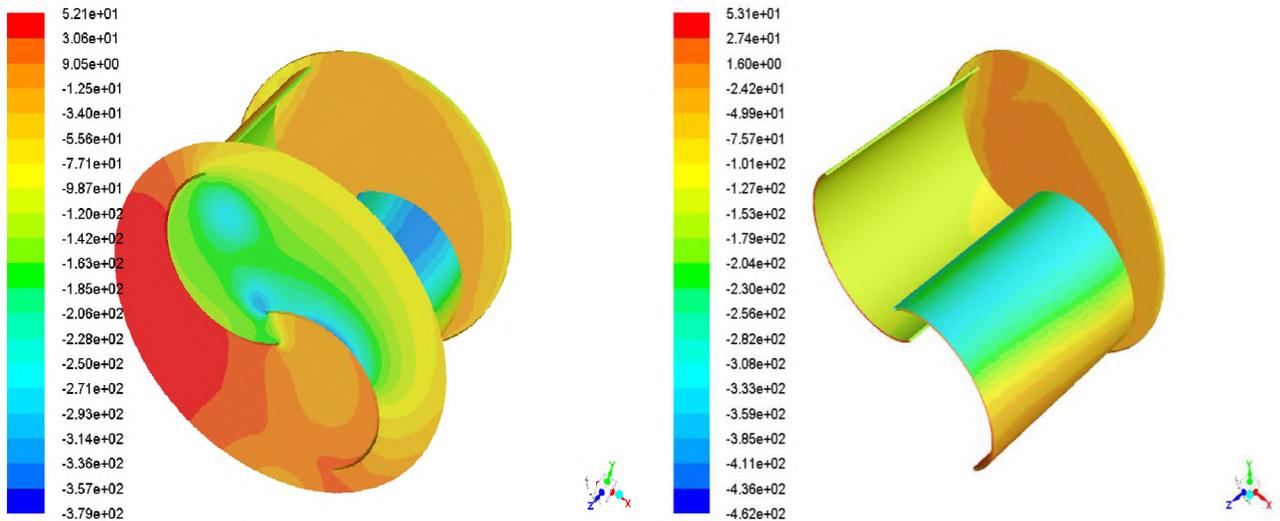


Figure 5.11 : Distribution des pressions pour le rotor S-C 3D dans la zone de rotation

---

Sur les figures 5.7 et 5.8, nous présentons la distribution des vitesses de l'écoulement autour du rotor conventionnel pour une vitesse de vent de 9 m/s, et un TSR de 0.8, nous remarquons que presque comme le cas de la simulation 2D, la vitesse moyenne qui frappe les aubes du rotor est d'environ de 8 m/s, ce que veut dire que ce type de turbine affecte beaucoup le vent qui l'attaque en amont.

Nous notons aussi que l'écoulement est fortement accéléré sur l'aube inférieure du rotor où il est en moyenne 50% supérieur au vent non perturbé. Cette accélération correspond à des écoulements tourbillonnaires, ou vortex, caractéristiques des turbines qui fonctionnent sur la force de traînée (drag-divise). Ces écoulements tourbillonnaires sont causés par des grandes différences de pression entre les deux faces des aubes comme on peut le voir sur la Figure 5.9.

Nous remarquons qu'il y a une augmentation de pression en particulier la zone extrados de l'aube supérieure et l'intrados de l'aube inférieure dans le point d'impact de l'écoulement contre la paroi des aubes (surpression) cette augmentation atteint son maximum, qui tend à faire tourner l'aube dans le sens positif. Et aussi pour l'autre côté des aubes c'est la zone de dépression ou il y a une chute de pression ce qui crée une certaine résistance qui tend à freiner l'aube donc elle engendre une décélération de l'écoulement. Pour les zones aux bouts des aubes, ces deux zones sont soumises à l'influence d'une légère turbulence due à l'effet de bord et à l'accélération des particules engendrées par la courbure des aubes donc il engendre un fort gradient de vitesse aux bouts des aubes.

Selon l'équation de Bernoulli pour les fluides incompressibles, la variation de la pression est toujours inversement proportionnelle à la variation de la vitesse, quand la vitesse atteint son maximum au point d'arrêt la pression elle atteint son maximum.

### 5.2.3. Etude comparative entre la simulation 2D et 3D pour le rotor S-C

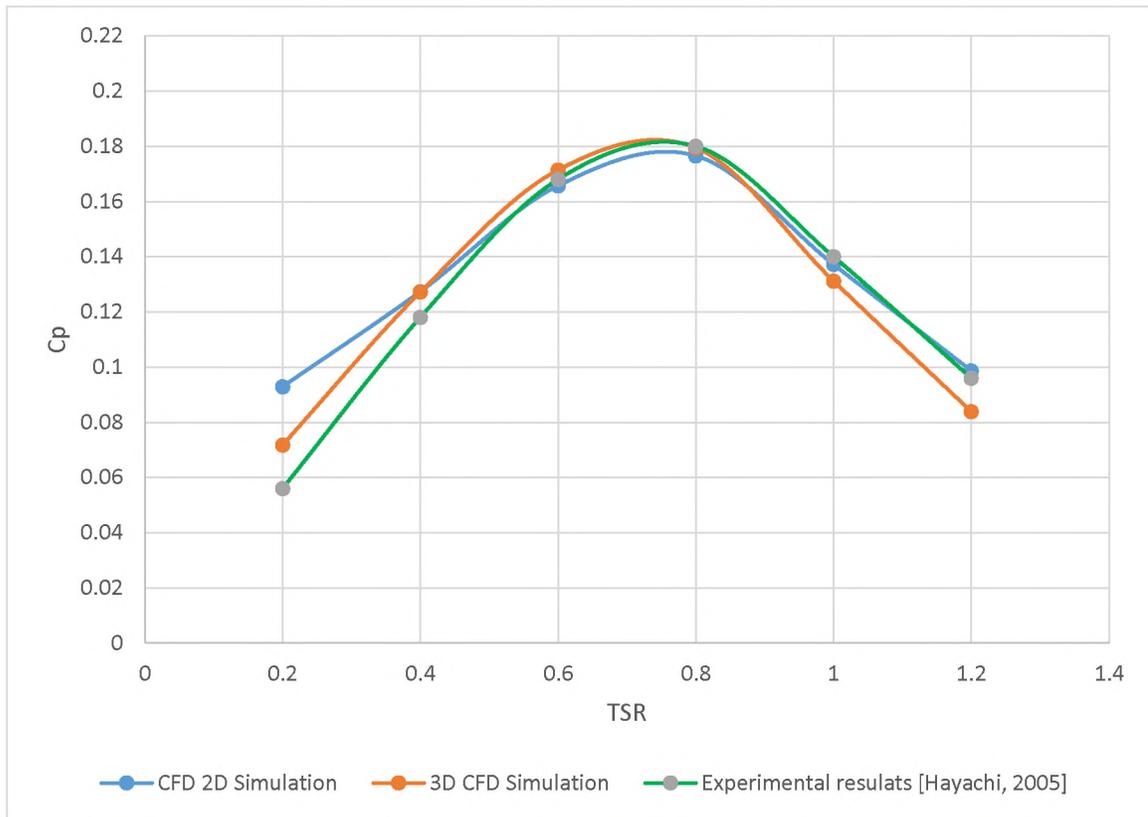


Figure 5.12 : Etude comparative entre les simulations 2D et 3D, S-C

D'après une analyse des courbes des puissances mentionnées dans la figure 5.11, nous remarquons qu'il y a une forte concordance entre les trois courbes : les résultats de simulation en 2D et 3D et ceux de l'expérimentale de Hayachi. Les résultats de simulation tridimensionnelle sont plus proches des résultats expérimentaux et surtout pour des valeurs de TSR inférieures à 0.8, ce qui nous a permis de dire que la simulation doit tenir compte de l'effet tridimensionnel. Par conséquent, la discrétisation des équations de Navier-Stokes doit être en 3D. De ce fait, ces équations décrivent bien l'écoulement de l'air au voisinage du rotor et aussi l'effet de la turbulence. La validation donc, doit se faire à partir de la simulation tridimensionnelle qui donne des résultats cohérents avec la réalité.

### 5.3. Simulation tridimensionnelle du rotor S-H90

#### 5.3.1. Validation des résultats

Pour faire la validation il faut que la géométrie du rotor simulé numériquement et la même que la géométrie du rotor testé expérimentalement, pour cela nous avons gardé le même rotor S-H90 testé par [Kamoji, 2009], dans ses travaux expérimentaux en soufflerie.

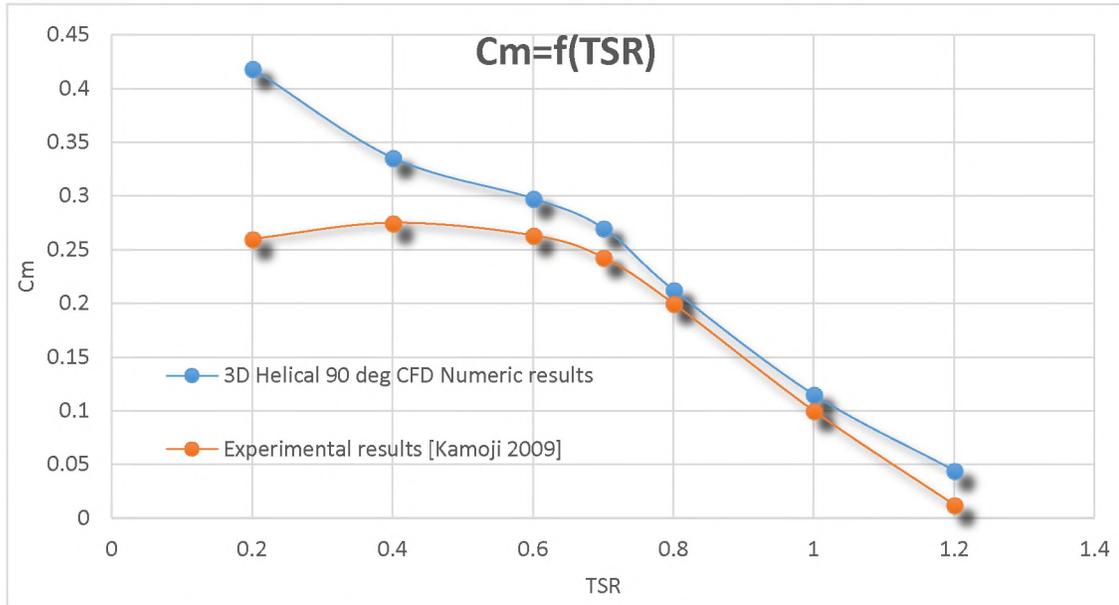


Figure 5.13 : La variation du coefficient de moment  $C_m$  en fonction des TSR

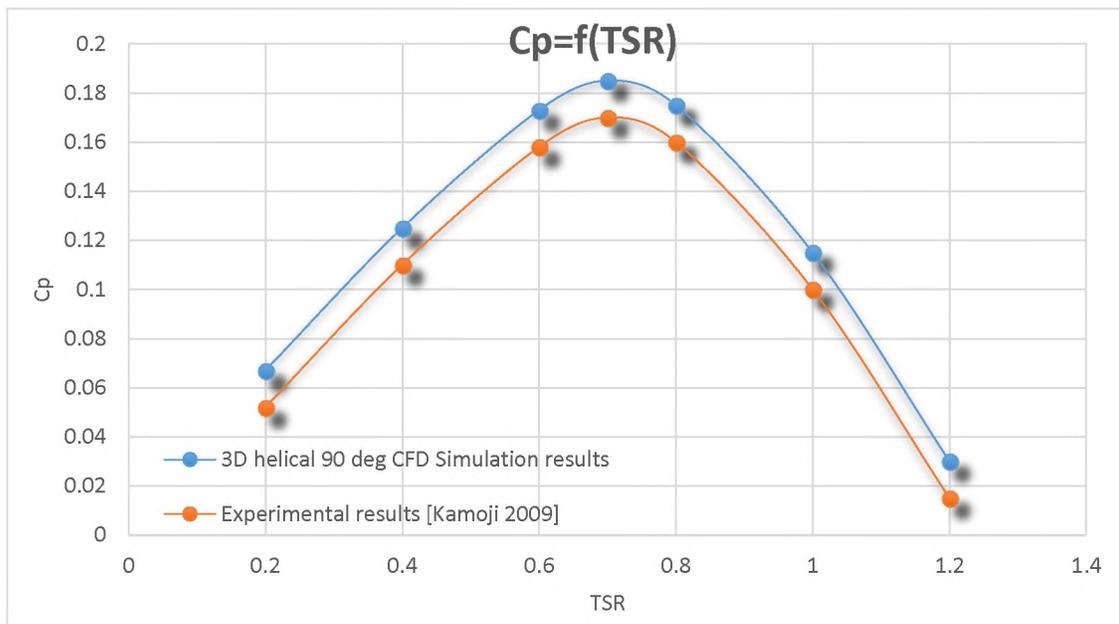


Figure 5.14 : La variation du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction des TSR

Nous observons un bon accord entre les résultats numériques obtenu lors de notre simulation par CFD, et ceux de l'expérimentale, donc nous pouvons dire que nos calculs numériques pour ce modèle sont valides.

D'après l'analyse de la courbe de puissance, nous remarquons que le  $C_p$  max est de 18.5% pour une valeur de TSR de 0.7, ces résultats sont cohérents avec les publications [Kamoji, 2009].

Nous notons aussi qu'à des faibles valeurs TSR le coefficient de moment est surévalué, ce qui conduit à un  $C_p$  plus élevé, mais à des valeurs de TSR supérieurs à 0.6 on constate un bon accord entre les deux résultats numériques et ceux de l'expérimentale.

Les valeurs de  $C_p$  sont relativement faibles en comparant avec d'autres types d'éoliennes à axe vertical, ce qui implique une perte importante de l'énergie cinétique pour ce type d'éolienne. Le rotor S-H90 fonctionne faibles vitesses de vent qui favorise un bon démarrage par rapport les autres types d'éoliens à axe vertical.

Cette bonne concordance des résultats revient à l'optimisation et homogénéité du maillage choisi ce que permet au solveur de bien saisir les principales caractéristiques d'écoulement. En outre la présente étude a utilisé un maillage non structuré pour les deux domaines de simulation.

### 5.3.2. Analyse des résultats pour le rotor S-H90

Dans cette partie nous souhaitons de présenter la distribution des vitesses et des pressions dans le plan de symétrie et au niveau des aubes, pour visualiser bien les lignes de courant traversé le rotor d'un côté et aussi de voir la dépression dans quel niveau et la perte d'énergie cinétique.

#### 5.3.2.1. *Distribution des vitesses (m/s) dans le rotor S-H90 pour (TSR=0.7)*

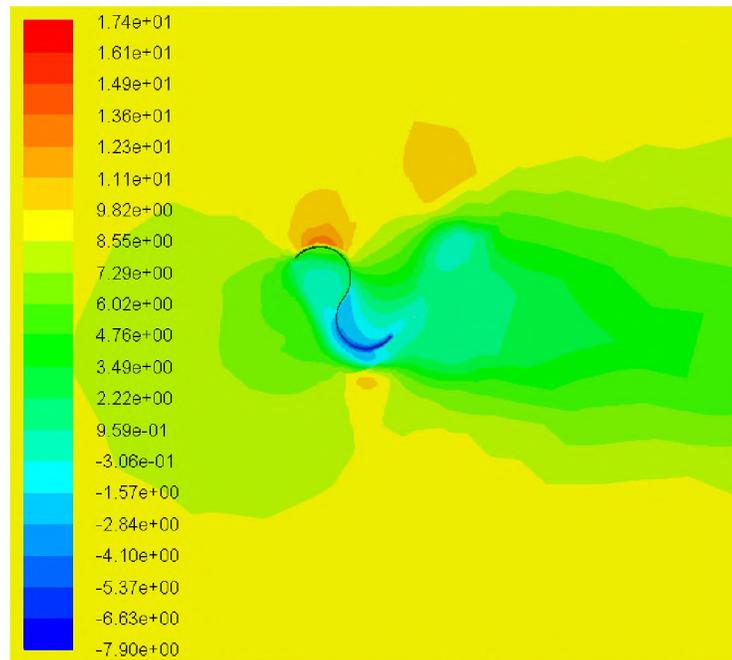


Figure 5.15 : Distribution des vitesses dans la direction x pour le rotor S-H90

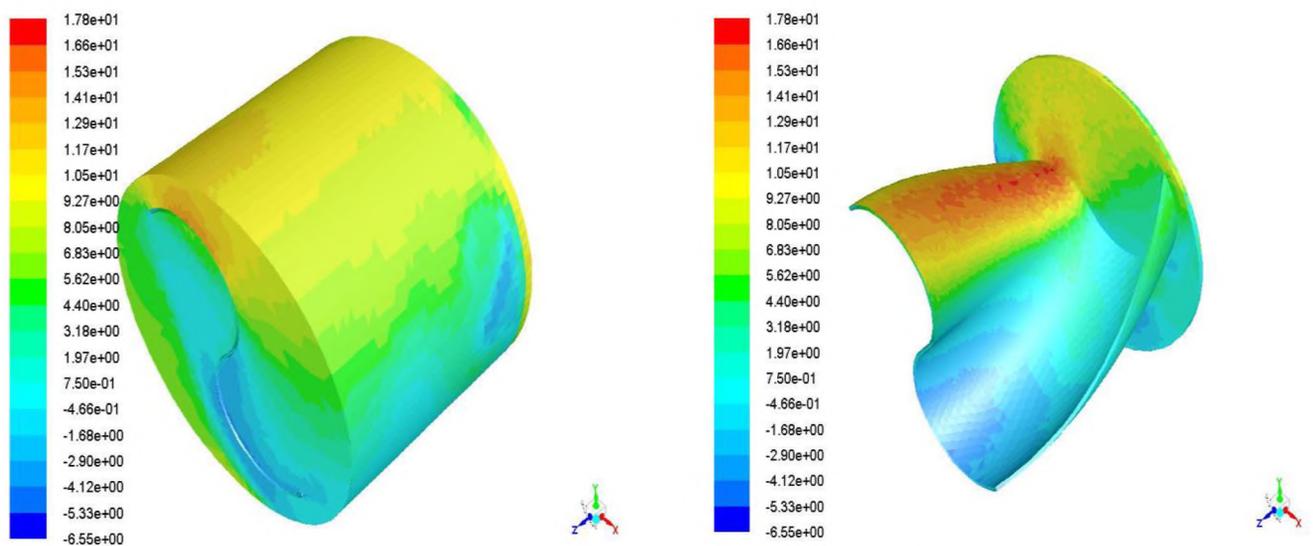


Figure 5.16 : Distribution des vitesses suivant x pour le rotor S-H90, zone de rotation

### 5.3.2.2. Distribution des pressions (m/s) dans le rotor S-H90 pour (TSR=0.7)

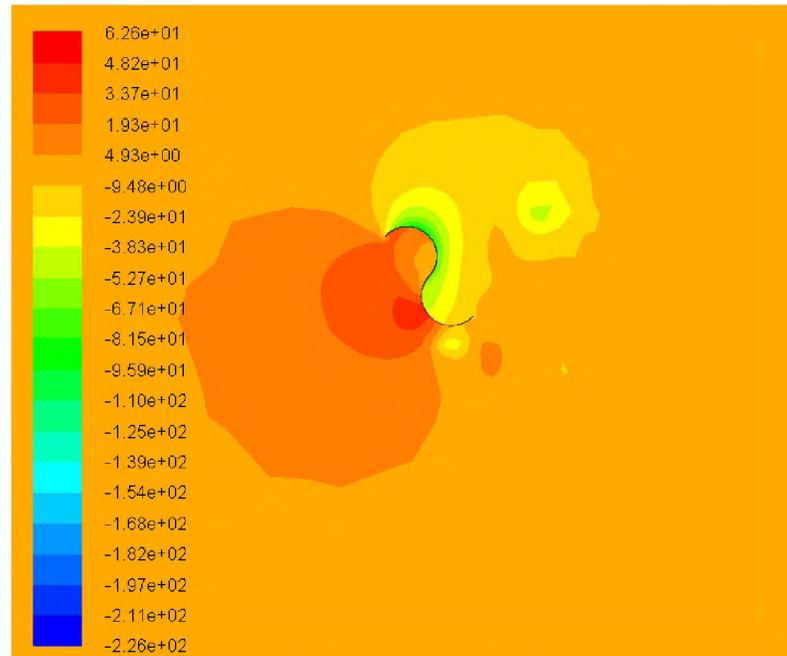


Figure 5.17 : Distribution des pressions statique pour le rotor S-H90

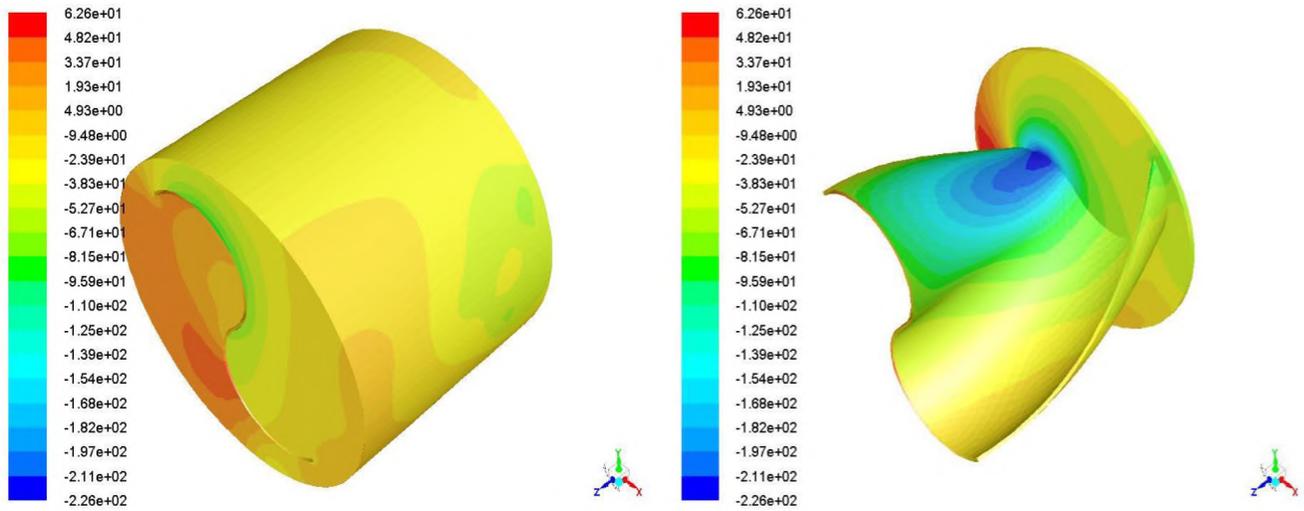


Figure 5.18 : Distribution des pressions suivant x pour le rotor S-H90, zone de rotation

---

Comme le cas du rotor Conventionnel sur les figures 5.14 et 5.15, nous présentons la distribution des vitesses de l'écoulement autour du rotor S-H90 pour une vitesse de vent de 9 m/s, et pour un TSR de 0.7, la vitesse moyenne d'impact sur le rotor est d'environ de 7 à 8 m/s, ce que veut dire que ce type de turbine affecte beaucoup le vent qui l'attaque en amont.

Nous notons aussi que l'écoulement est fortement accéléré sur les frontières des aubes inférieure et supérieure du rotor où il est en moyenne 50% supérieur au vent non perturbé. Cette accélération correspond à des écoulements tourbillonnaires, ou vortex, caractéristiques des turbines qui fonctionnent sur la force de traînée (drag-divise), et aussi la distribution des vitesses sont négative au niveau d'aube inférieure à ça d'où au retour de l'écoulement ce qui aide le rotor de tourner facilement dans le sens positif.

Pour la distribution des pressions les figures (5.16) et (5.17), nous remarquons qu'il y a une augmentation de pression en particulier la zone extrados de l'aube supérieure et l'intrados de l'aube inférieure dans le point d'impact de l'écoulement sur la paroi des aubes (surpression) cette augmentation atteint son maximum, qui tend à faire tourner l'aube dans le sens positif. Et aussi pour l'autre côté des aubes c'est la zone de dépression ou il y a une chute de pression ce qui crée une résistance qui tend à freiner l'aube donc elle engendre une décélération de l'écoulement. Pour les zones aux bouts des aubes, ces deux zones sont soumises à l'influence d'une légère turbulence due à l'effet de bord et à l'accélération des particules engendrées par la courbure des aubes donc il engendre un fort gradient de vitesse aux bouts des aubes.

Selon l'équation de Bernoulli pour les fluides incompressible, la variation de la pression est toujours inversement proportionnelle à la variation de la vitesse, quand la vitesse atteint son maximum au point d'arrêt la pression elle atteint son maximum.

#### 5.4. Etude comparative entre les résultats de simulation du rotor S-C et S-H90

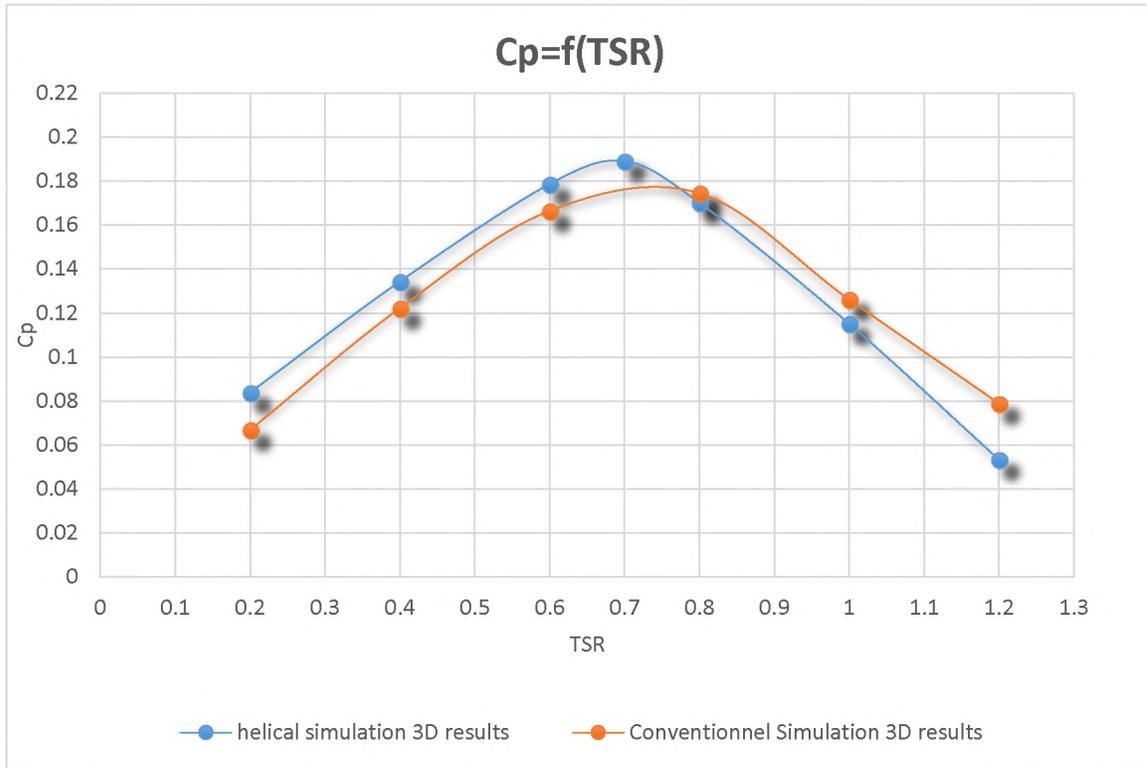


Figure 5.19 : Etude comparative entre résultats des simulations 3D S-C et S-H90

La figure 5.18 donne les courbes de puissance  $C_p$  du rotor S-C et du rotor S-H90 pour des différentes vitesses spécifiques TSR résultantes du simulation numérique CFD en 3D. Nous remarquons que pour des faibles valeurs des TSR (TSR inférieur à 0.8), la performance du rotor S-H90 est meilleur que celui de S-C, et ce que confirme le rotor S-H90 démarre facilement pour des faibles vitesses du vent (faibles vitesses de rotations). Par conte pour des valeurs de TSR supérieur à 0.8 (grandes vitesses de rotation), nous constatons que le rotor S-C est meilleur en termes de performance.

Nous pouvons conclure que le rotor S-H90 est favorable pour l'utilisation dans les milieux urbains et aussi pour le lancement des grandes éoliennes.

## 5.5. Résultats de l'expérimentation

Dès que le modèle réduit et le banc d'essais ont été réalisés, Nous entamons les tests de validation de tel modèle. Pour simuler l'écoulement du vent, nous avons utilisé un ventilateur centrifuge, les résultats de l'expérimentation sont présentés dans ce qui suit.

### 5.5.1. Les résultats des mesures expérimentales

Nous avons effectué cinq essais en faisant varier la vitesse de vent et on mesure la vitesse de rotation obtenue à l'aide d'un tachymètre, on note l'allongement du ressort et la masse correspond au freinage, les mesures sont portées sur le tableau 5-1 suivant :

Table 5-1 : Récapitulatif des résultats de mesure effectuées

	Masse (Kg)	$U_{moyen}(m/s)$	$\omega_{moyen}(rpm)$	$\omega_{moyen}(rad/s)$	$\Delta l$ (mm)
<b>ESSAIS 1</b>	0.05000	5.70000	56.49937	5.91660	7
<b>ESSAIS 2</b>	0.07000	7.78000	106.14069	11.11503	4
<b>ESSAIS 3</b>	0.09000	8.78000	139.96162	14.65675	4.5
<b>ESSAIS 4</b>	0.16000	10.75000	210.16888	22.00883	12.5
<b>ESSAIS 5</b>	0.21000	12.70000	283.86685	29.72647	14.5

L'étape suivante consiste à déterminer les paramètres de performance en utilisant les formules suivantes :

- Moment dynamique (N.m) :

$$M = (mg - k\Delta l)R_p \quad (5-1)$$

- Moment disponible dans le vent :

$$M_{vent} = \frac{1}{4}\rho A_s d U^2 = \frac{1}{4}\rho d^2 h U^2 \quad (5-2)$$

- Coefficient de moment dynamique est donnée par la relation (1.3) :

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{4}\rho A_s d U^2} = \frac{4(mg - k\Delta l)R_p}{\rho d^2 h U^2} \quad (5-3)$$

- Coefficient de moment dynamique est donnée par la relation (1.7)
- La vitesse spécifique est donnée par la relation (1.2)

Après des applications numériques, nous avons abouti aux résultats suivants :

Table 5-2 : Récapitulatif des résultats de calculs expérimentales

$\omega$ (rad/s)	$\lambda$	<b>M (N.m)</b>	<b>M<sub>vent</sub> (N.m)</b>	<b>P (W)</b>	<b>P<sub>vent</sub> (W)</b>	<b>C<sub>m</sub> (exp)</b>	<b>C<sub>p</sub> (ex)</b>
5.91660	0.15570	0.0082	0.00517	0.06120	2.24593	0.17500	0.02725
11.11503	0.21430	0.0104	0.01294	0.28761	5.71097	0.23500	0.05036
14.65675	0.25040	0.0110	0.01744	0.51117	8.20833	0.24870	0.06227
22.00883	0.30710	0.0198	0.02632	1.15854	15.06596	0.25040	0.07690
29.72647	0.35110	0.0278	0.03682	2.18921	24.84176	0.25100	0.08813

Nous remarquons d'après les résultats mentionnés dans le tableau 5-4 que la performance de notre modèle construit est bien augmentée avec l'augmentation de vitesse spécifique (TSR), par contre le coefficient de moment  $C_m$  reste constant.

### **5.5.2. Etude comparative entre les résultats numériques du S-H90 et ceux de l'expérimentale**

Dans ce qui suit, nous présentons une étude comparaison entre les résultats trouvée lors des de notre tests expérimentaux, les résultats numériques et l'expérimentaux de Kamoji. Le résumé de cette étude est présenté dans la table 5-3.

Table 5-3 : Comparaison entre les résultats du modèle réduit et ceux de Kamoji

<i>Résultats expérimentaux du modèle réduit</i>			<i>Résultats numériques et expérimentaux du rotor de Kamoji</i>					
$\lambda$ Exp	$C_m$ Exp	$C_p$ Exp	$\lambda$	$C_m$ Exp	$C_p$ Exp	$C_m$ Num	$C_p$ Num	Erreur (%)
0.15570	0.17500	<b>0.02725</b>	0.15	0.218	<b>0.0327</b>	0.450	0.068	<b>8.078</b>
0.21430	0.23500	<b>0.05036</b>	0.20	0.252	<b>0.0504</b>	0.420	0.084	<b>0.047</b>
0.25040	0.24870	<b>0.06227</b>	0.25	0.254	<b>0.0635</b>	0.400	0.100	<b>1.226</b>
0.30710	0.25040	<b>0.07690</b>	0.30	0.258	<b>0.0774</b>	0.370	0.111	<b>0.452</b>
0.35110	0.25100	<b>0.08813</b>	0.35	0.26	<b>0.091</b>	0.350	0.123	<b>2.346</b>

Nous remarquons que les résultats expérimentaux de performance de modèle réduit construit après similitude et de prototype ( $C_p$ ) sont très proches l'erreur maximale est de 8%, ce qui nous permettons de dire que nos calculs sont valides, cette bonne concordance des résultats prouve que l'efficacité de notre procédure de réalisation.

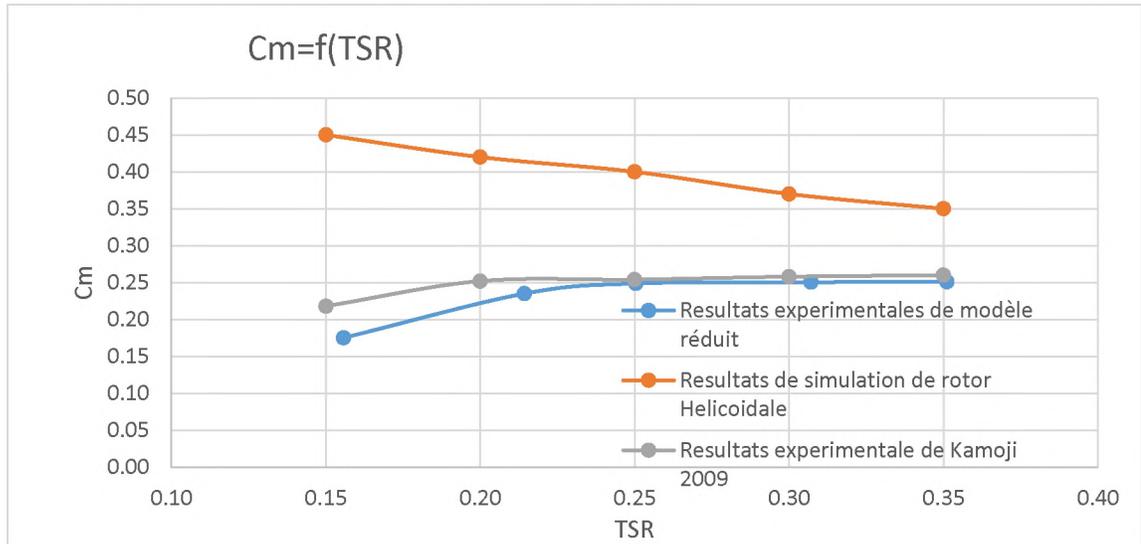


Figure 5.20 : Variation de coefficient de moment  $C_m$  en fonction de TSR

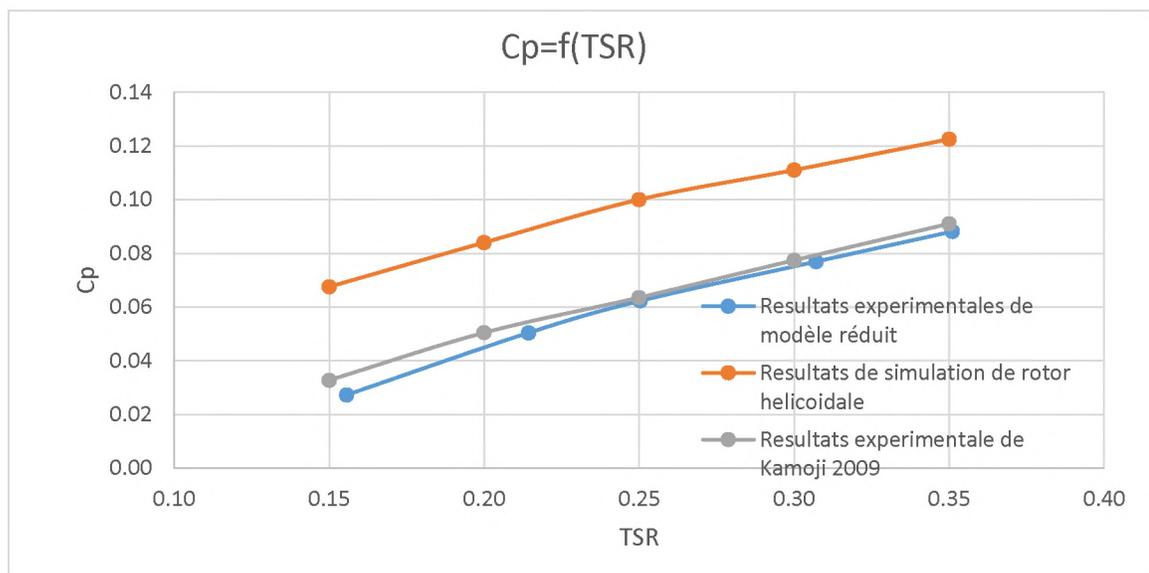


Figure 5.21 : Variation de coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de TSR

Les graphes (5.19) et (5.20) présentent les variations du coefficient de puissance  $C_p$  et du coefficient de moment  $C_m$  respectivement en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour les essais expérimentaux sur notre modèle réduit réalisée échelle 2 : 3 et les résultats expérimentaux de Kamoji et celles de simulation sur le rotor S-H90, D'après l'analyse de ces graphes nous remarquons que les courbes des résultats expérimentaux de notre modèle réduit et ceux de Kamoji sont bien en concordance aux les graphes des résultats numériques, ce qui confirme la validation de notre modèle réduit de point de vu performance.

Nous constatons aussi que pour des faibles TSR, correspondant au démarrage du rotor, le coefficient de moment  $C_m$  pour les résultats numériques est en écart par rapport au cas expérimental, cela est justifié par le faite que la vitesse du rotor au démarrage varie progressivement de zéro à la vitesse nominale prise dans le calcul et dans la simulation, supposée quasi-constant. Néanmoins, ce coefficient diminue pour des TRS entre 0,15 et 0,25.

# *Conclusion générale*

## 6. Conclusion générale

L'objectif principal de ce projet était de réaliser un modèle réduit d'éolienne à axe vertical de type S-H90 et le banc d'essai destinée pour mesurer son moment dynamique, puis tester les performances de ce modèle en soufflerie,

L'autre objectif consistait à modéliser et à simuler en utilisant le logiciel de CFD Fluent, en 2D et 3D pour deux types d'éoliennes S-C et S-H90 de mêmes dimensions, disponible dans la littérature et comparer les résultats expérimentaux et les performances de chacun d'eux à ceux de notre modèle. Nous avons constaté que les résultats de la simulation en 3D étaient plus réalistes et cohérents avec la réalité, Ce qui laisse à conclure qu'il faut en tenir compte de l'effet tridimensionnel.

L'étude comparative entre les résultats de simulations de S-H90 et S-C, nous a permis de dire que le rotor S-H90 est plus performant que le rotor S-C à des faibles vitesses de rotation et donc fonctionne mieux à des faibles vitesses de vent, ce qui favorise son utilisation dans les milieux urbains. Le démarrage facile de ce type d'éoliennes leur permet d'être utilisées pour l'amorçage du démarrage et le lancement des grandes éoliennes.

La conception et la réalisation de notre modèle réduit d'éolienne et du banc d'essais nous ont permis d'utiliser et de maîtriser au mieux le logiciel de SolidWorks, et d'acquérir une maîtrise de travail sur les machines-outils et sur les procédés d'usinage. Les difficultés rencontrées lors de la phase de réalisation, nous ont appris énormément, comment les surmonter et trouver des solutions alternatives à chaque problème, notamment, lors de la confection du rotor et des armatures.

Enfin, on peut dire, qu'à travers ce travail, on a pu réaliser notre modèle d'éolienne, le tester et valider les résultats de simulations et expérimentaux, comparés à deux références de la littérature scientifique de renommée.

Comme perspective à ce projet :

- Continuer dans la même politique, d'étude et de réalisation, d'autres modèles d'éoliennes, dans un même rapport géométrique, et confectionner des protocoles de travaux pratiques, en vue de monter un laboratoire dédié aux énergies éoliennes auprès de notre département.
- Dans la partie simulation, on suggère d'utiliser d'autre approche du modèle de la turbulence, telle que le modèle de turbulence  $k-\omega$ , ou Spalart-Allmaras (S-A), et comparer les résultats obtenus par différents modèles à ceux obtenus par le modèle  $k-\varepsilon$  utilisé dans notre travail.
- Intégrer dans les projets à venir la confection d'une génératrice pour permettre d'évaluer la puissance électrique produite et les différents rendements.
- Amélioration de l'instrumentation utilisée sur le banc d'essai pour permettre des mesures fiables et plus précis.

## *Biobibliographique*

- [1] «renewables global status report,» 2017, [En ligne]. Available : [www.ren21.net](http://www.ren21.net).
- [2] <http://www.mem-algeria.org>, Ministry of energy and mines, Program for renewable energy and energy efficiency. Sonelgaz Group Company. March 2011.
- [3] «Simulation numérique de l'écoulement turbulent autour d'un obstacle en vue de la caractérisation du gisement éolien,» thèse, 2017.
- [4] I. McGowan, J. G. II. Rogers, Anthony L. Wind power, 1948- III. Title. TJ820.M374, 2009, pp 7-8.
- [5] A.SMAILI, Cour d'énergies renouvelables, Chapitre"1", Systèmes éoliens , pp. 38-40.
- [6] J. Fady, «Etude numérique d'une éolienne hybride asynchrone,» Ecole Polytechnique Montreal, MONTREAL, 2011.
- [7] R. AUBREES, «« stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance,» Unersité de Nantes, Nantes, 2016.
- [8] A. Betz, «Windmühlen im Lichte neuerer Forschung. Die Naturwissenschaften.,» Heft, vol 46, Berlin, Nov. 1927.
- [9] L. BILLON, «Étude et analyse des couches limites pour les écoulements turbulents,» CEMEF, Mines-ParisTech. Projet MAIDESC, ANR "Méthodes numériques", Paris, 10 janvier 2014.
- [10] P. Jaohindy, «Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : modélisation du couple production / Bâtiment,» Devant l'Université de La Réunion, Réunion, 20 Oct 2017.

- [11] E, Spalding D. B. Launder B. The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, pp. 269-289.
- [12] D. Wilcox, «Turbulence Modeling for CFD,,» La Cañada, ÉtatsUnis,, DCW Industries,, 1993, p. 460.
- [13] Mr. SAIDI Yazid, Mr. YAHIAOUI Yahi, «Etude et réalisation d'une turbine,» Département de Génie Electrique, Faculté de la Technologie, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Bejaia, 2014.
- [14] F. Jamati, «Etude numérique d'une éolienne hybride asynchrone,» département de génie mécanique, école polytechnique de montréal,,» Département de génie mécanique, école polytechnique MONTRÉAL, MONTRÉAL, Aout 2011.
- [15] K. Kamel, «Etude des écoulements autour des obstacles étude de simulation,» Tlemcen.
- [16] Hocine.BENNOUR, «Cours Turbo machines,» chez *Chapitre 8 analyse dimensionnelle et similitude*, ENP Alger, 2016.
- [17] M. P. R. Ion paraschivoiu, «cour sur la couche limite ParisTech,,» Paris.
- [18] [En ligne]. Available: [https://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/\\_migrated/RTE/RTEmagicC\\_TP\\_Tip\\_speed\\_ratio\\_diff\\_eoliennes.s](https://www.energieplus-lesite.be/fileadmin/_migrated/RTE/RTEmagicC_TP_Tip_speed_ratio_diff_eoliennes.s).
- [19] Z. b. Chaib bassou fatiha, «Etude de l'effet du profil de pale sur les forces aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à axe vertical,» Département de la Technologie, Khemis Miliana, 2017.
- [20] Belkacem.BELABESS, «3D numerical study of Hill mounted VAWT,» pp. 5-6, 2018.

# *Annexes*

## 7. ANNEXES

### 7.1. Annexe A : les équations de Navier Stocks pour le cas 2D et 3D

#### Le cas bidimensionnel

Pour un écoulement stationnaire et un fluide incompressible et écoulement bidimensionnel, les équations de Navier stocks pour un régime d'écoulement turbulent s'écrit sous la fourme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \end{array} \right. \quad (7-1)$$

#### Pour le cas général

Et pour un écoulement in stationnaire L'équation de continuité instantanée, l'équation de quantité de mouvement et l'équation d'énergie pour un fluide compressible peuvent s'écrire comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ji}] = 0, \quad i = 1,2,3 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_i e_0 + u_j p + q_i - u_i \tau_{ji}] = 0 \end{array} \right. \quad (7-2)$$

Pour un fluide newtonien, en supposant la loi de Stokes pour les fluides, la contrainte visqueuse est donnée par :

$$\tau_{ji} = 2\mu S_{ij}^* \quad (7-3)$$

Lorsque le taux de déformation visqueux sans trace et le flux de chaleur sont défini par :

$$S_{ij}^* = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (7-4)$$

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (7-5)$$

## 7.2. Annexe B : CFD simulation numérique pour le Rotor S-H 90

### Maillage du domaine de simulation

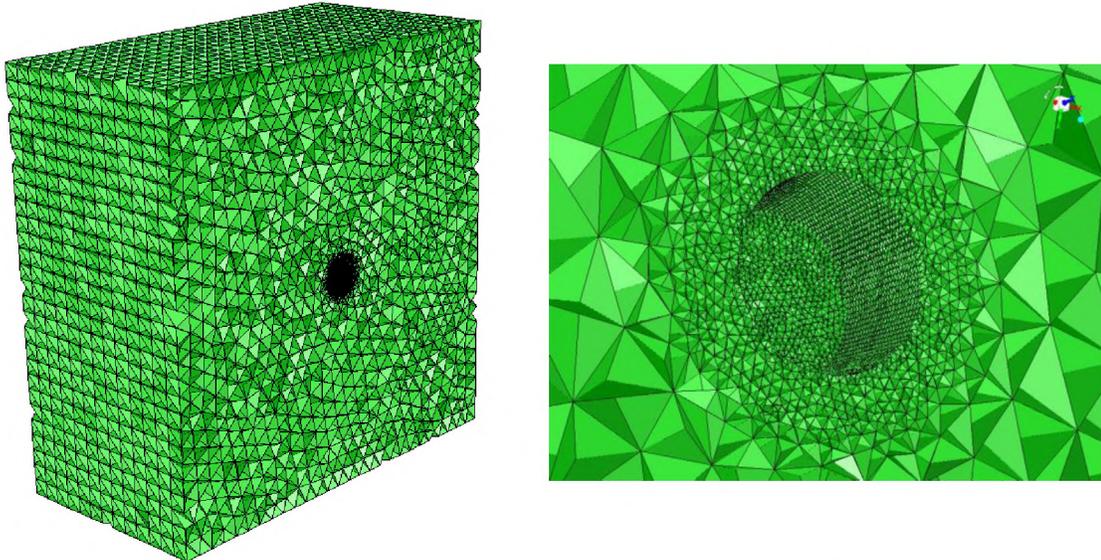


Figure 7.1 : Maillage non structuré de la région fixe avec des éléments tétraédriques

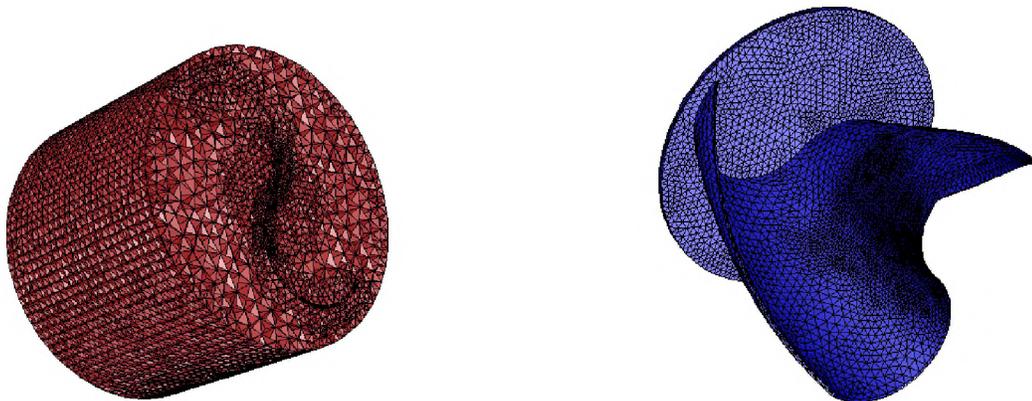


Figure 7.2 : Maillage non structuré de la région interne tournante S-H90

Pour tester la qualité maillage, le diagramme typique de  $Y_{plus}$  présentée sur la figure (7.3) affirme que les valeurs de  $Y_{plus}$  est bien proche a 30, ce qu'est adéquat le modèle de turbulence utilise  $k-\epsilon$  réalisable.

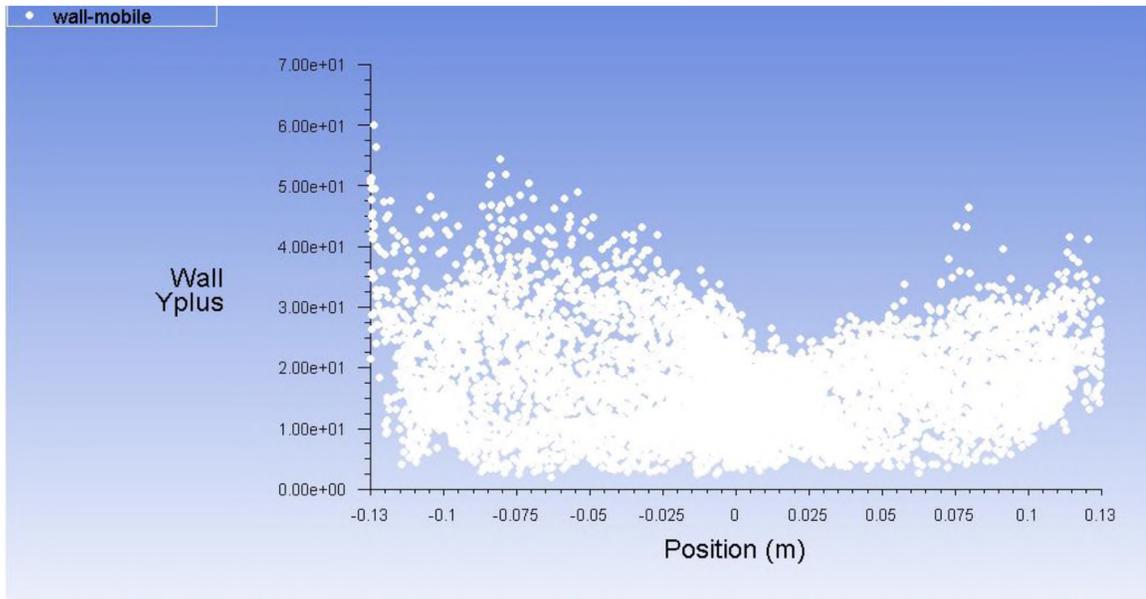


Figure 7.3 : Distribution de Yplus autour des aubes (vitesse d'entrée = 9 m/s,  $\lambda = 0.8$ ).

### Les conditions aux limites

C'est les mêmes conditions aux limites que le cas du rotor Savonius Conventionnel 3D

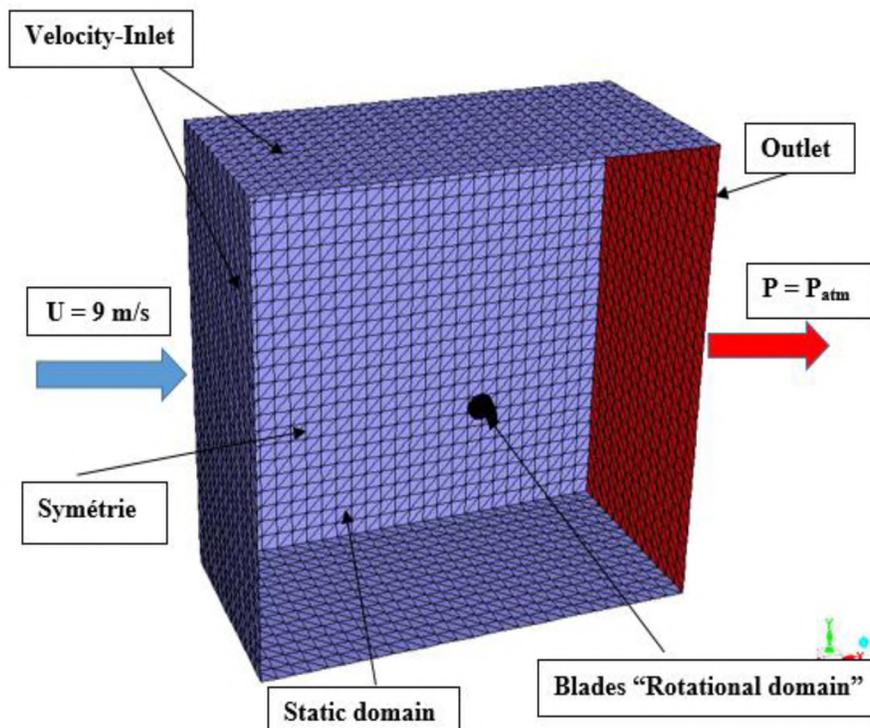
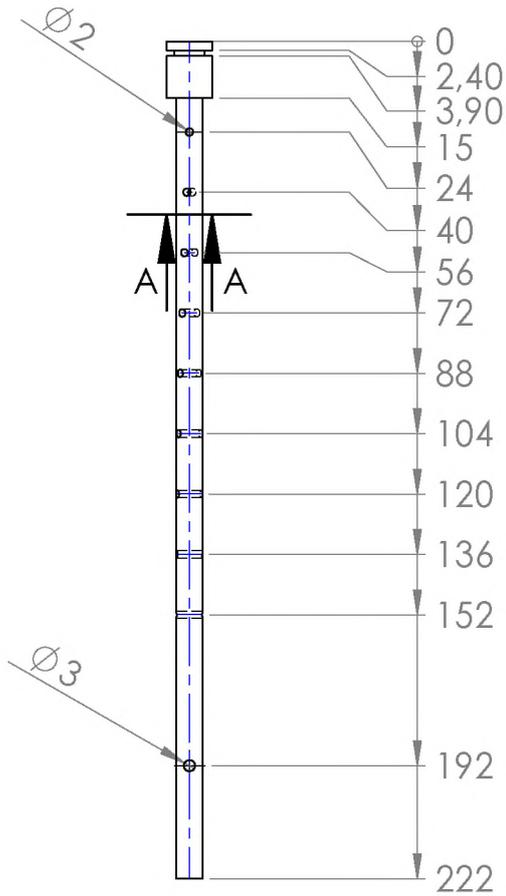
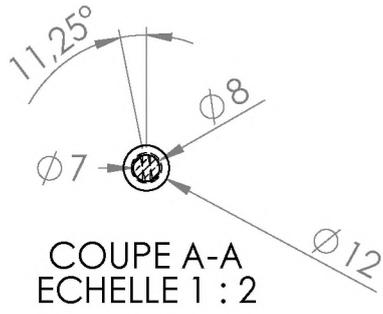


Figure 7.4 : conditions aux limites du rotor hélicoïdale 90

## *Planches des dessins*



## Ecole Nationale polytechnique

Matériaux :laiton

Nom de la pièce :

L.G.M.D



Arbre\_2

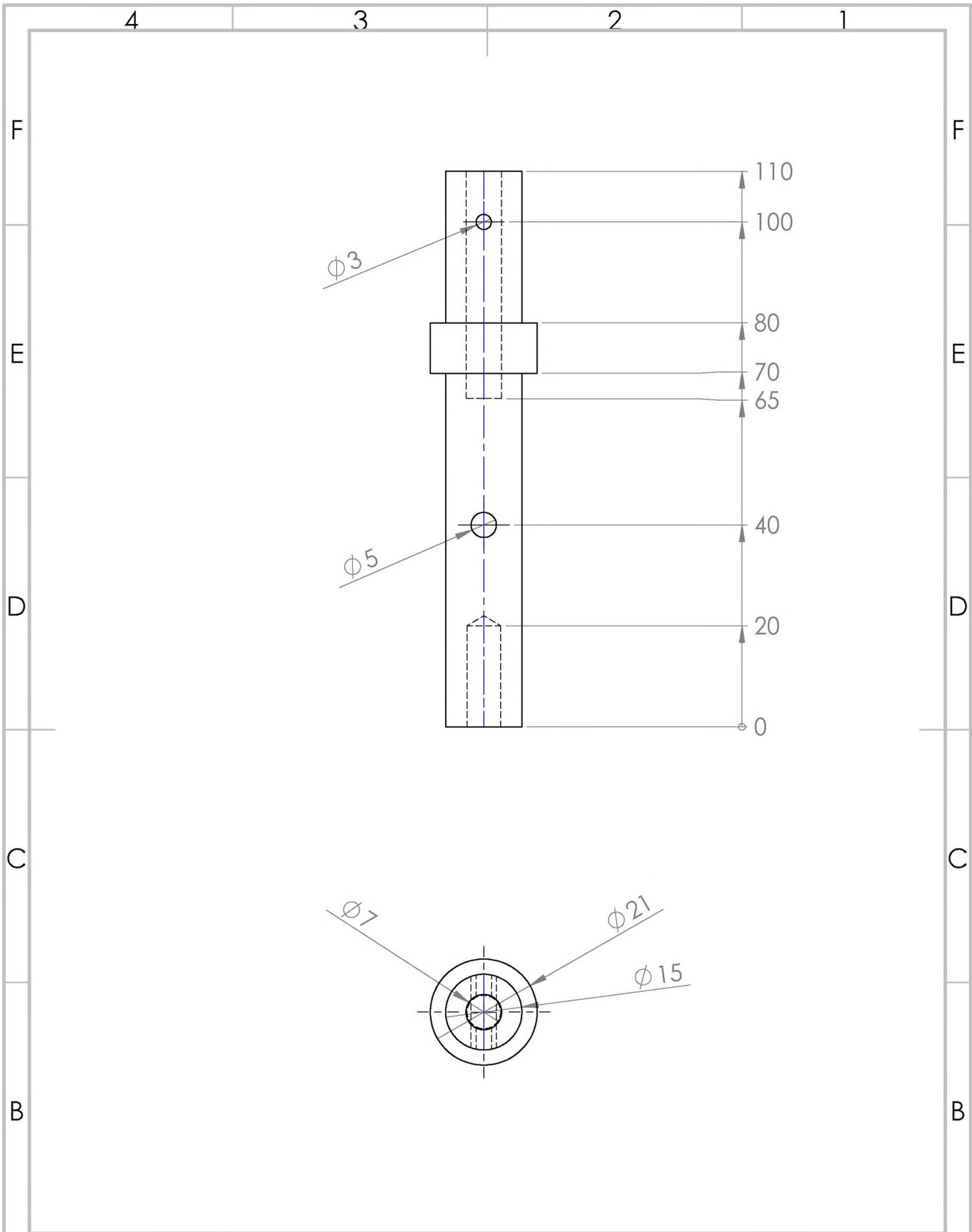
date :15/5/2018

Echelle:1:2

Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI

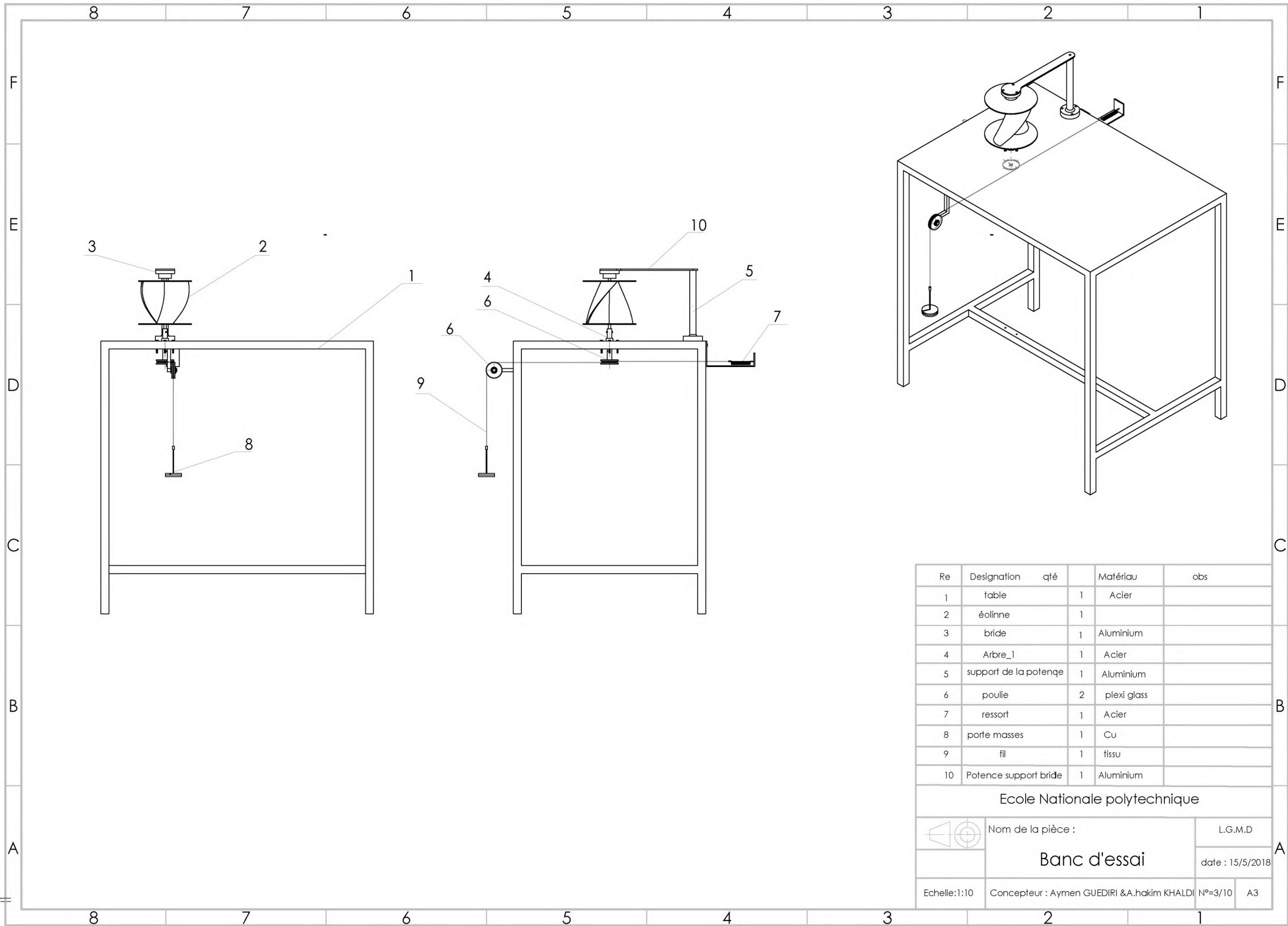
N°: 1/10

A4



Ecole Nationale polytechnique

A	Matériaux :Acier	Nom de la pièce :	L.G.M.D	
		Arbre_1	date :15/5/2018	
	Echelle:1:1	Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI	N°=2/10	A4



Re	Designation	qté	Matériau	obs
1	table	1	Acier	
2	éolonne	1		
3	bride	1	Aluminium	
4	Arbre_1	1	Acier	
5	support de la potence	1	Aluminium	
6	poulie	2	plexi glass	
7	ressort	1	Acier	
8	porte masses	1	Cu	
9	fil	1	tissu	
10	Potence support bride	1	Aluminium	

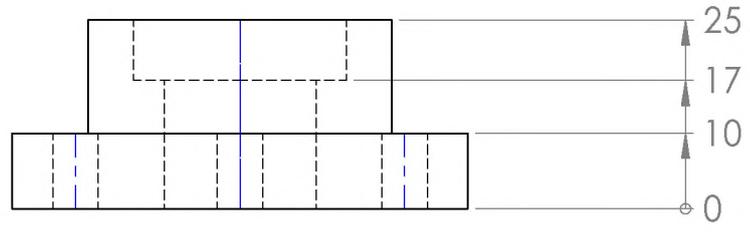
Ecole Nationale polytechnique

	Nom de la pièce :	L.G.M.D
	<b>Banc d'essai</b>	date : 15/5/2018
Echelle:1:10	Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI	N°=3/10 A3

4 3 2 1

F

F

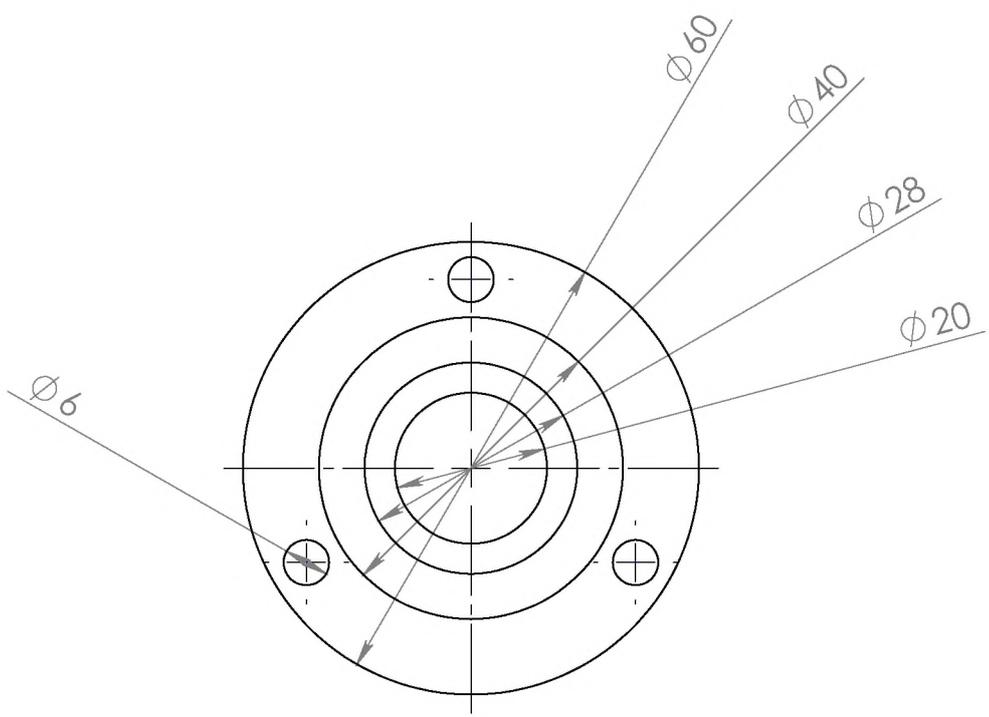


E

E

D

D



C

C

B

B

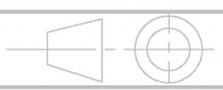
### Ecole Nationale polytechnique

Matériaux :Aluminium

Nom de la pièce :

L.G.M.D

A



Bride

date :15/5/2018

A

Echelle:1:1

Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI

N°: 4/10

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

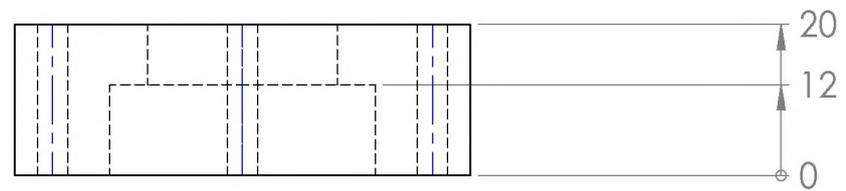
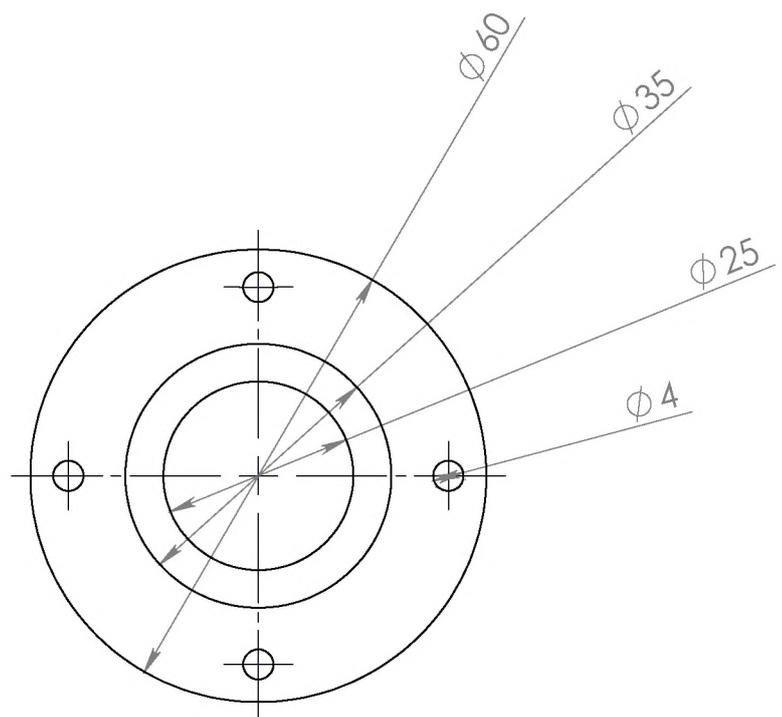
D

C

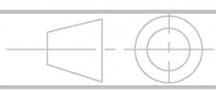
C

B

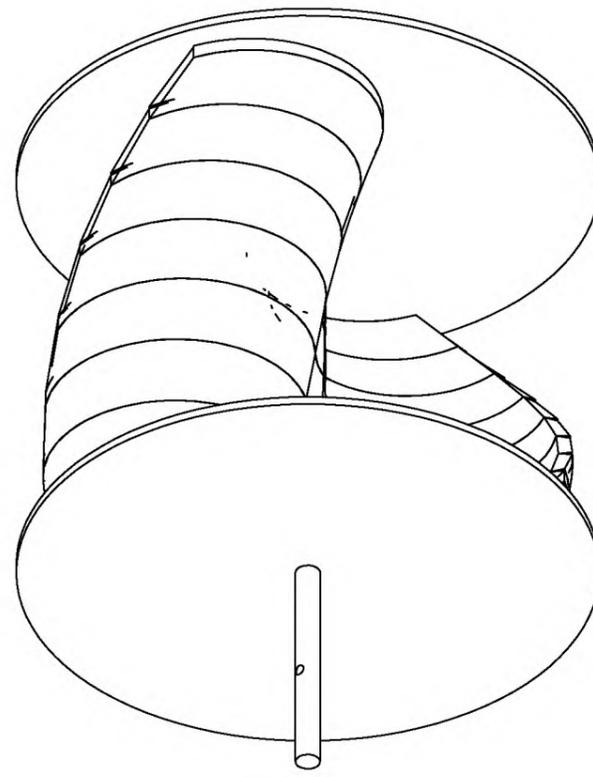
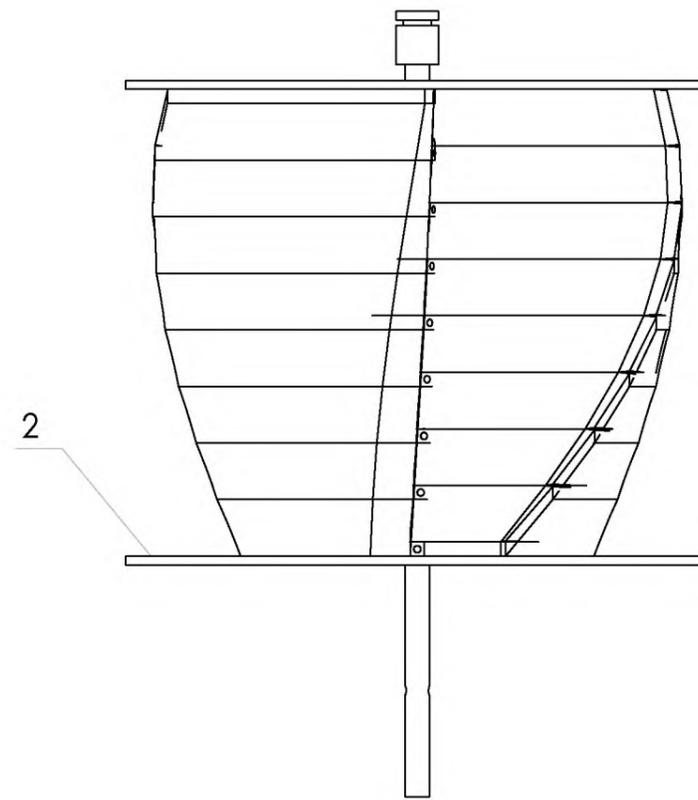
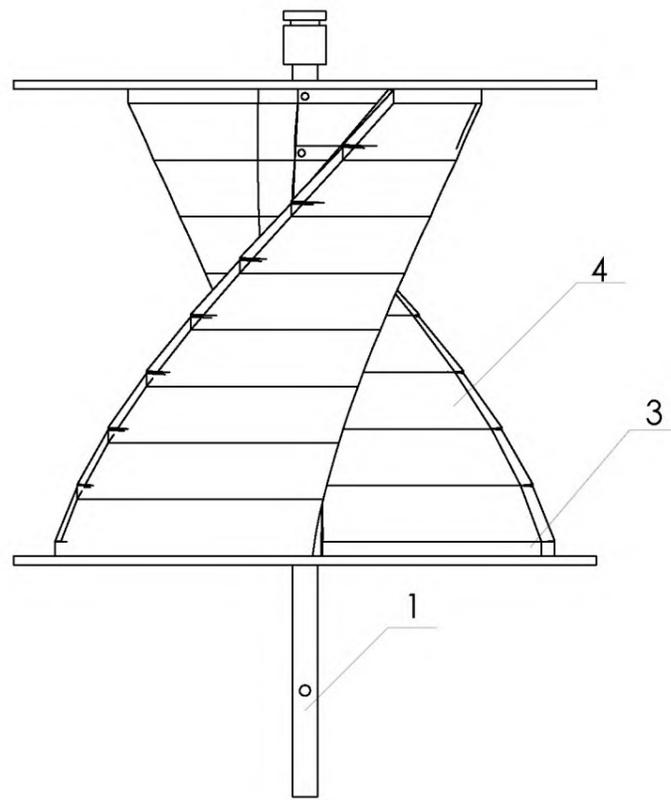
B



### Ecole Nationale polytechnique

A	Matériaux :Aluminum	Nom de la pièce : <b>Bride_1</b>	L.G.M.D	
			date :15/5/2018	
	Echelle:1:1	Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI	N°: 5/10	A4

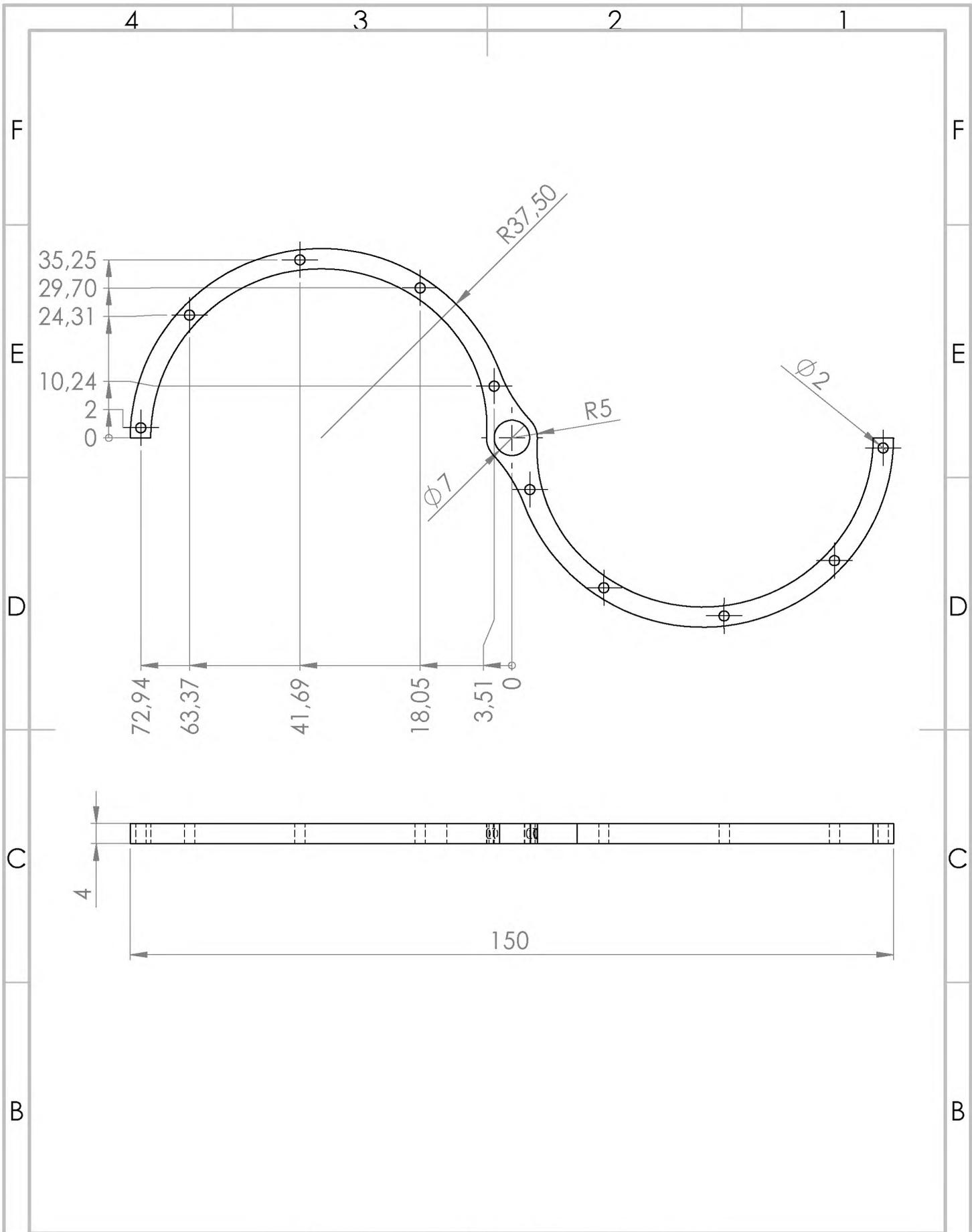
4 3 2 1



Rp	Designation	qté	Matériau	obs
1	Axe	1	Laiton	
2	plaque d'extrémité	2	plexi	
3	armature	9	14NiCrMo13-4	
4	pale	1		

Ecole Nationale polytechnique

	Nom de la pièce :	L.G.M.D
	<b>Eolienne</b>	date : 15/5/2018
Echelle:1:2	Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI	N°: 6/10 A3



## Ecole Nationale polytechnique

Matériaux:  
14NiCrMo13-4

Nom de la pièce :

L.G.M.D

Armature

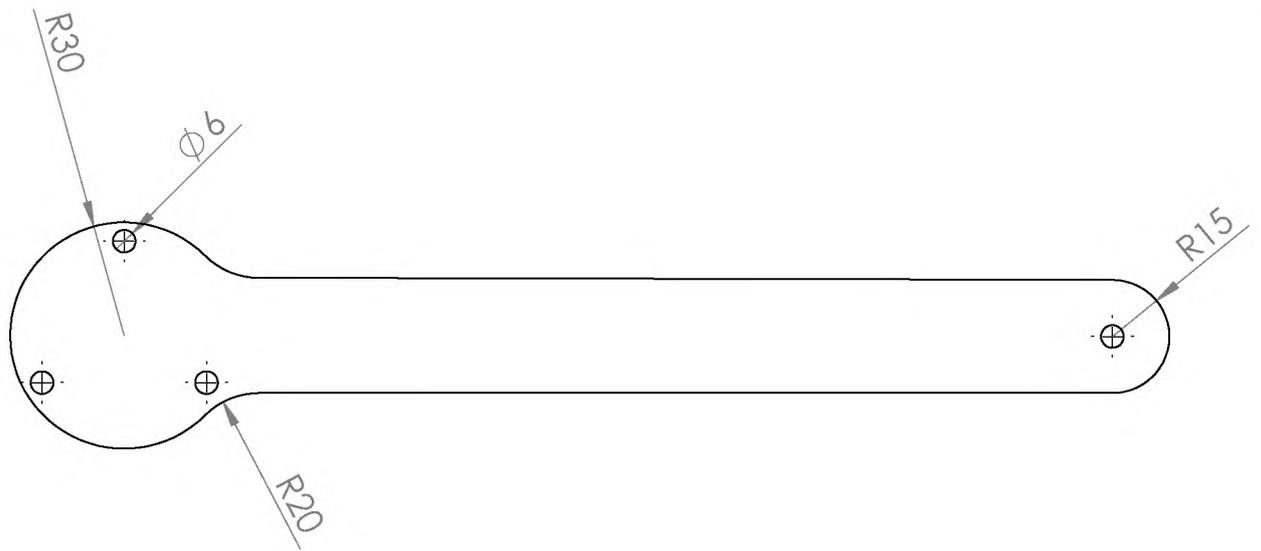
date :15/5/2018

Echelle:1:1

Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI

N°: 7/10

A4



Ecole Nationale polytechnique

Matériaux :Aluminium

Nom de la pièce :

L.G.M.D

Potence support bride

date :15/5/2018

Echelle:1:2

Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI

N°: 8/10

A4

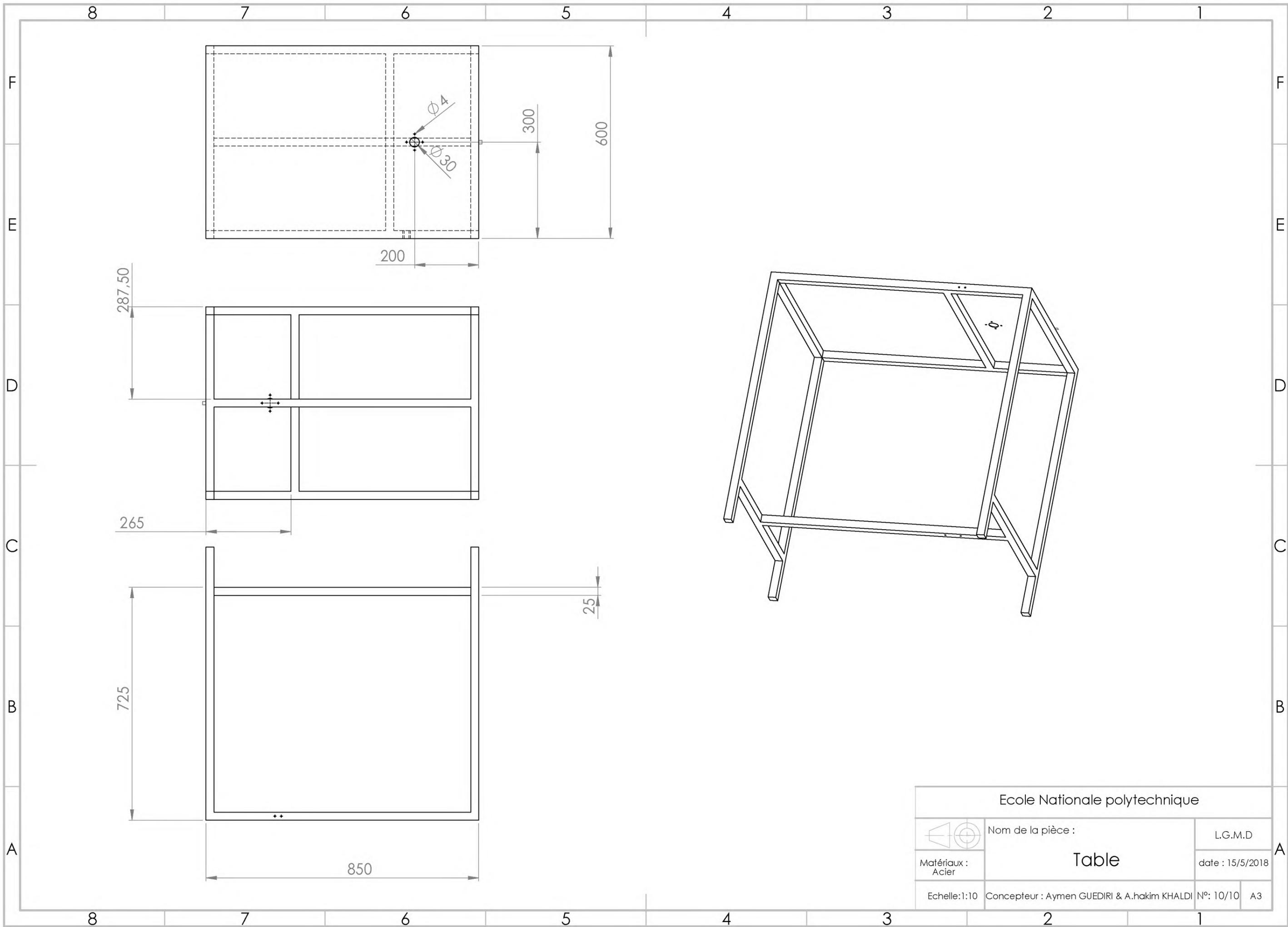
4

3

2

1





287,50

265

725

850

200

300

25

600

$\phi 4$

$\phi 30$

Ecole Nationale polytechnique			
	Nom de la pièce :	L.G.M.D	
	Table	date : 15/5/2018	
Matériaux : Acier	Echelle:1:10		Concepteur : Aymen GUEDIRI & A.hakim KHALDI N°: 10/10 A3