

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Etude numérique d'un rotor éolien de
type H-Darrieus en tandem

Préparé par :

M'HAMED Amar Sghair M'hamed et METNANI Zoubir

Soutenu publiquement le : .. / 07 / 2022, Devant le jury composé de :

M. CHAIB Khaled	Maître de Conférences "A"	(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. SAD CHEMLOUL Nord-Eddine	Professeur	(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B"	(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. AKERMI .Nasreddine	Maître de Conférences "B"	(Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 – 2022

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, pour leur soutien, encouragements et tout l'aide qu'ils m'ont apporté durant mes études. Que dieu leur procure une bonne santé et une longue vie ;

A ma chère mère Zeinabou et ma sœur fatma , A mes chère Oncles Sid 'Ahmed , Ghali et mon cousin Lellou et à toute ma famille que j'aime ;

A tous mes oncles et mes tantes, à toute ma grande famille.

A tous mes amis,

A Zoubeir , chère amie avant d'être binôme ;

A tous mes enseignants du cycle préparatoire et du cycle supérieur que je respecte tant ;

A toute personne qui m'est chère, et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur ;

M'hamed M'hamed amar sghaire

Dédicaces

A mes chers parents, (Mohamed & Boutabec Yamina) pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, A mes chères frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

*A Mon Binome: M'hamed Amar Sghair M'hamed.
Et qui m'ont toujours donné de l'espoir dans ce que je faisais.*

A tout la promotion 2^{ème} année Master Énergétique 2021/2022

Metnani Zoubir

REMERCIEMENTS

A prés avoir remercié Dieu le tout puissant

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé, de loin ou de près, à la réalisation de ce modeste travail, et en particulier, notre encadreur **Dr. AKERMI Nasreddine**, pour sa totale disposition et ses conseils efficaces qui ont permis l'accomplissement de ce mémoire.*

Nous remercions l'ensemble des professeurs et animateurs du cycle supérieur de gestion.

Nous tenons également à remercier tous les professeurs de département de génie mécanique.

*Metnani Zoubir
M'hamed M'hamed amar sghaire*

Nomenclature

Acronymes

VAWT	Eolienne à axe vertical
HAWT	Eolienne à axe horizontal
RANS	Steady Reynolds Averaged Navier-Stokes
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
URANS	Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes
SCE	Système de Conversion Eolien
NACA	National Advisory Commity for Aeronautics (Comité Consultatif National de l'Aéronautique)

Symboles Grecs

ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
μ	Viscosité	[pascal/s]
ω	Vitesse angulaire du rotor	[tr/mn]
Θ	Angle azimutal	[°]
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence	[J]
σ	Solidité/	[-]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
τ	Contrainte de cisaillement	[Pascal]
$\mu_t ; \sigma_k$	Coefficients du modèle k- ω SST	[-]

Symboles Latins

L	Force de portance	[N]
D	Force de trainée	[N]
W	Vitesse relative	[N]
Re	Nombre de Reynolds	[-]

C	Corde du profil de pale	[m]
TSR (λ)	Vitesse spécifique	[-]
H	Hauteur de l'éolienne	[m]
C_b	Longueur de la corde	[m]
C_l, F_l	Coefficient de portance, Force de portance	[-]
C_m	Coefficient de moment	[-]
C_P	Coefficient de puissance	[-]
C_q	Coefficient de couple	[-]
U_∞	Vitesse du vent à l'entrée	[m/s]
U_{eff}	Vitesse effective	[m/s]
m_r	Masse du rotor	[kg]
J_r	Moment d'inertie	[m ⁴]
M	Moment	[N.m]
Δt	Pas de temps	[s]
T	Temps total	[s]
K	L'énergie cinétique de turbulence	[J]
u,v,w	Composantes de vitesse	[m/s]
P	Pression statique	[Pascal]
P_k	Production de l'énergie turbulente	[J]
α	Angle d'attaque	[°]

Liste des figures

Figure 1.1: Ressources principales des énergies renouvelables.....	3
Figure 1.2: Part estimée de l'énergie renouvelable dans la production électrique mondiale, fin 2015	4
Figure 1.3: Rayonnement solaire.....	4
Figure 1.4: Distance entre le soleil et la terre.....	5
Figure 1.5: Chauffage d'une habitation par énergie solaire passive.....	6
Figure 1.6: Eclairage naturel.....	6
Figure 1.7: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à basse température...	7
Figure 1.8: Centrale thermodynamique parabolique	7
Figure 1.9: Centrale thermodynamique à tour	8
Figure 1.10: Centrale thermodynamique cylindro-parabolique.....	8
Figure 1.11: Les étapes pour Produire l'eau chauffée.....	9
Figure 1.12: Centrale photovoltaïque.....	10
Figure 1.13: Production de l'électricité par cellule photovoltaïque.....	11
Figure 1.14: Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.....	11
Figure 1.15: Conversion de l'énergie cinétique du vent	14
Figure 1.16: Répartition de l'énergie solaire mondiale reçue au sol.....	15
Figure 1.17: Composition d'éolienne.....	16
Figure 1.18: Schéma de principe d'un système éolien.....	17
Figure 1.19: Eolienne à axe horizontal.....	18
Figure 1.20: Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval (b).....	18
Figure 1.21: Eolienne Savonius	19
Figure 1.22: Éolienne à axe vertical de type Darrieus.....	19
Figure 1.23: Éolienne à axe vertical et à voilure tournante.....	20
Figure 2.1: Eolienne de Darrieus.....	25
Figure 2.2: Types des éoliennes Darrieus.....	26
Figure 2.3: Composantes de l'éolienne H-Darrieus.....	26
Figure 2.4: Eolienne Darrieus à deux pales droites	28
Figure 2.5: Eolienne à H-Darrieus tripales	28
Figure 2.6: Principe de fonctionnement de l'éolienne H-Darrieus.....	29
Figure 2.7: Forces sur un profil aérodynamique.....	29
Figure 2.8: Variation des forces aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque.....	31
Figure 2.9: Force et triangles de vitesses dans une turbine Darrieus.....	33
Figure 2.10: Décomposition simplifiée des efforts sur une machine Darrieus dans le plan transversal.....	34
Figure 2.11: Evolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique.....	35
Figure 2.12: Profil d'aile en soufflerie en situation de décrochage les filets d'air se sont décollés de l'extrados.....	36
Figure 2.13: Courbe de portance en fonction de l'angle d'attaque pour un profil NACA.....	36
Figure 2.14: Différente appellation du biplan.....	37
Figure 3.1: Ecoulement turbulent.....	38
Figure 3.2: Volumes finis bidimensionnels.....	43
Figure 3.3: Maillage autour d'un profil.....	44
Figure 3.4: Maillage non structuré.....	45
Figure 3.5: Maillage hybride.....	45
Figure 3.6: Technique de maillage dynamique.....	46
Figure 3.7: Interface graphique de L'ANSYS ICEM 2019.....	48
Figure 3.8: Vitesse moyenne du vent à Nouadhibou.....	49
Figure 3.9: Vitesse moyenne du vent à Tiaret.....	50
Figure 4.1: Maillage H-Darrieus Tandem tripale 329000 éléments hexaédriques.....	51

Figure 4.2: Maillage H-Darrieus tripale 276000 éléments hexaédriques.....	51
Figure 4.3: Validation expérimentale du coefficient de portance	52
Figure 4.4: Coefficient de portance pour la zone climatique de Nouadhibou.....	53
Figure 4.5: Coefficient de portance pour la zone climatique de Tiaret.....	53
Figure 4.6: Coefficient de puissance pour la zone climatique de Tiaret.....	54
Figure 4.7: Coefficient de puissance pour la zone climatique de Tiaret.....	54
Figure 4.8: Contours de vitesse ($V_{\infty}=7.75$ m/s).....	55
Figure 4.9: Contours de pression ($V_{\infty}=7.75$ m/s).....	55
Figure 4.10: Contours de vitesse ($V_{\infty}=7.75$ m/s).....	56
Figure 4.11: Contours de pression ($V_{\infty}=7.75$ m/s).....	56
Figure 4.12: Puissance aérodynamique pour la zone de Nouadhibou.....	58
Figure 4.13: Puissance aérodynamique pour la zone de Tiaret	59

Liste des tableaux

Tableau 3. 1. Vitesses du vent km/h (Nouadhibou 2021).....	499
Tableau 3. 2. Vitesses du vent km/h (Tiaret 2021)	50
Tableau 4. 1: Prototype du rotor éolien H-Darrieus tripale.....	577
Tableau 4. 2: Puissance aérodynamique estimée	588
Tableau 4. 3: Puissance aérodynamique estimée	588

SOMMAIRE

Dédicaces M'hamed M'hamed amar sghair	I
Dédicaces Zoubeir Metnani.....	II
Remerciements.....	III
Liste des symboles.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Sommaire.....	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1	
Etude bibliographique sur les énergies renouvelables	
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 ÉNERGIES RENOUVELABLES	3
1.2.1 Energie solaire	4
1.2.1.1 Types d'énergie solaire	5
• Energie solaire passive	5
• Eclairage naturel	6
• Energie solaire thermique	6
• Energie solaire thermique à basse température	6
• Energie solaire thermique à haute température	7
• Energie solaire photovoltaïque	8
1.2.2 Energie hydraulique	9
1.2.2.1 Biomasse	9
1.2.2.2 Géothermie	9
1.2.3 Energie éolienne	11
1.3 GENERALITES SUR L'EOLIENNE	11
1.3.1 Historique	11
1.3.2 Définition de l'énergie éolienne	14
1.3.3 Potentiel éolien	14
1.3.4 Composition des éoliennes	15
1.4 CLASSEMENT DES TURBINES EOLIENNES.....	16
1.4.1 Éolienne à axe horizontal.....	17
1.4.2. Éolienne à axe vertical.....	18
1.4.2.1 Eolienne Savonius	19
1.4.2.2 Eolienne Darrieus	19
1.4.2.3 Type à voile tournante	20
1.5. APPLICATIONS DES EOLIENNES	20
1.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES EOLIENNES	21
1.6.1 Avantages	21
1.6.2 Inconvénients	22

Chapitre 2

Performances aérodynamiques et principe de fonctionnement

2.1 INTRODUCTION	24
2.2 HISTORIQUE DES EOLIENNES DARRIEUS	24
2.3 EOLIENNES DE TYPE DARRIEUS	25
2.3.1 Types éolienne Darrieus	25
2.3.2 Avantages et inconvénients rotor Darrieus	26
2.3.2.1 Avantages	26
2.3.2.2 Inconvénients	26
2.3.3 Rendement de rotor Darrieus	27
2.3.4 Effet de nombre de pales sur le démarrage de l'éolienne H-Darrieus	27
2.3.4.1 Eolienne Darrieus mono-pales	27
2.3.4.2 Eolienne Darrieus bipales	27
2.3.4.3 Eolienne Darrieus tripales	28
2.3.4.4 Eolienne Darrieus multi-pales	28
2.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE DARRIEUS	29
2.5 VARIABLES AERODYNAMIQUES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	30
2.6 FORCES AERODYNAMIQUES	30
2.6.1 Force de portance L	30
2.6.2 Force de traînée D	30
2.6.3 Coefficients aérodynamiques	31
2.7 DECROCHAGE AERODYNAMIQUE	35
2.8 EOLIENNES H-DARRIEUS BIPLAN (TANDEM)	36
2.8.1 Explication du concept du biplan	37

Chapitre 3

Simulation numérique et choix des zones climatiques

3.1 INTRODUCTION	38
3.2 DESCRIPTIONS DES ECOULEMENTS DES FLUIDES	38
3.2.1 Equations de Navier et Stokes appliquées au fluide compressible	38
3.2.2 Résolution des Equations Navier et Stokes	39
3.2.2.1 Modélisation de turbulence	40
3.2.3. Modèles de turbulence statistique (RANS)	41
3.2.3.1. Modèle (k- ϵ)	41
3.2.3.2. Modèle à transport de contrainte de cisaillement k- ω SST	42
3.3. METHODE DES VOLUMES FINIES	42
3.3.1. Géométrie et zones de calcul	43
3.3.2. Génération des maillages	43
3.3.3. Types de maillage	44
3.3.3.1 Maillage structuré (quadra/hexa)	44
3.3.3.2 Maillage non structuré (tri/tétra)	44
3.3.3.3 Maillage hybride	45
3.4 METHODE DE MAILLAGE DYNAMIQUE (DAYNMIQUE MESHES)	46
3.4.1. Conditions aux limites	46
3.4.2. Présentation des logiciels de calcul	47
3.4.3. Logiciel ICEM CFD	47
3.5. CHOIX DES ZONES CLIMATIQUES	48
3.5.1. Région de Nouadhibou (Mauritanie)	48
3.5.2. Région de Tiaret (Algérie)	49

Chapitre 4
Résultats et discussions

4.1. ETUDE DE MAILLAGE	51
4.2. VALIDATION EXPERIMENTALE	51
4.3. ETUDE COMPARATIVE DE LA PORTANCE AERODYNAMIQUE	52
4.3.1. Portance aérodynamique pour la zone climatique de Nouadhibou.....	53
4.3.2. Portance aérodynamique pour la zone climatique de Tiaret.....	53
4.4. ETUDE COMPARATIVE DE LA PUISSANCE AERODYNAMIQUE.....	54
4.4.1. Puissance aérodynamique pour la zone climatique de Nouadhibou.....	54
4.4.2. Puissance aérodynamique pour la zone climatique de Tiaret.....	54
4.5. CONTOURS DE VITESSE ET DE PRESSION ($V_{\infty}=7.75$ m/s)	55
4.5.1. Contours de vitesse et de pression pour l'éolienne H-Darrieus tripale.....	55
4.5.2. Contours de vitesse et de pression pour l'éolienne H-Darrieus tripale en tandem.....	56
4.6. APPLICATION DE LA PUISSANCE AERODYNAMIQUE PRODUITE PAR L'EOLIENNE H-DARRIEUS TRIPALE EN TANDEM SUR UN PROTOTYPE.....	57
4.6.1. Fiche technique du prototype réalisé à l'URERMS (Adrar)	57
4.6.2. Puissance aérodynamique pour la zone de Nouadhibou.....	58
4.6.3. Puissance aérodynamique pour la zone de Tiaret	58
CONCLUSION GENERALE	
BIBLIOGRAPHIE	
Résumé	

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

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 trouvées. Parmi elles, nous pouvons citer les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, l'éolien devient compétitif en termes de coûts et de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre [48].

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire.

En ce 21^{ème} siècle, le paysage énergétique change radicalement car plusieurs ressources fossiles sont en voie de disparition et de nouvelles ressources associées à des technologies plus performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles [49].

L'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Cette énergie cinétique est exploitée à des éoliennes, hélices installées au sommet de pylônes et qui tournent sous l'action du vent. La rotation des hélices actionne un système produisant de l'électricité. L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation de l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Lorsque l'on ne produit qu'une force mécanique pour actionner une pompe, on parlera seulement d'éolienne; par contre lorsque l'on produit de l'électricité, on parlera d'aérogénérateur [50].

L'objectif principal du présent travail est d'estimer les coefficients de portance et de puissance qui servent à effectuer une étude comparative du rendement, de l'efficacité, et l'éventuelle possibilité d'auto démarrage de la configuration simple de l'éolienne H-Darrieus tripale et la nouvelle conception tripale en tandem proposée.

Ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique présentant quelques généralités sur les sources d'énergies

- Le deuxième chapitre explicite les notions fondamentales de l'énergie éolienne et la classification des différents types d'éoliennes ainsi que les performances aérodynamiques.
- Au troisième chapitre, les équations régissant l'écoulement turbulent (Naviers Stokes) ont été exposées. Ainsi, la description des modèles de turbulence en particulier le modèle mis en investigation et une présentation des codes de calcul.
- Le dernier chapitre résume les différents résultats obtenus par la simulation numérique ainsi que leurs discussions.

Chapitre 1

Etude bibliographique sur les
énergies renouvelables

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre expose une bibliographie sur les énergies renouvelables, en particulier, des définitions et un historique de l'énergie éolienne, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, l'importance de cette énergie dans la carte économique mondiale tenant en considération le marché énergétique et les types de leurs conceptions.

1.2 ÉNERGIES RENOUVELABLES

Sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [2]. La plus grande part de cette énergie provienne du rayonnement solaire, il existe aussi d'autres origines telles que la Terre elle-même et l'interaction exercée par le soleil et la lune sur les océans à travers les marées [3]. Le terme énergies renouvelables apparaît en 1970 sont parfois qualifiées d'énergie nouvelle tandis que la plupart de ces énergies existe depuis l'origine de la terre, remontant plusieurs milliers d'années l'homme a utilisé la biomasse pour produire le feu (maîtrisé 400000 ans avant JC), l'énergie lumineuse de soleil pour sécher les aliments, l'énergie éolienne pour propulsion des navires et l'énergie hydraulique pour pomper de l'eau [3], [4]. Qualifier aussi d'énergie propre qui rejette très peu ou pas du tout de déchets ou d'émissions polluantes [4]. Les principales ressources (Figure 1.1) des énergies renouvelables sont : Le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie selon le rapport de la source [1].

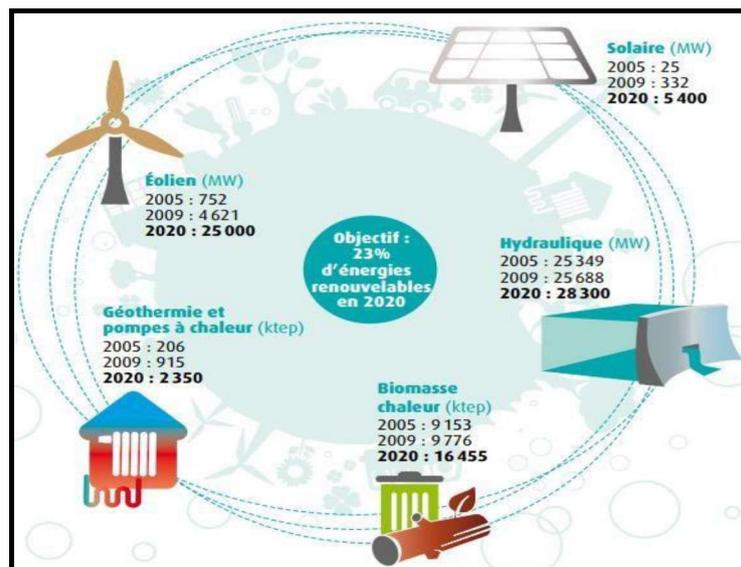


Figure1.24: Ressources principales des énergies renouvelables [1].

L'énergie électrique considérée comme un vecteur d'énergie qui présente une grande souplesse d'utilisation est obtenue par conversion à partir de l'énergie hydraulique, soit 16,6% du bilan global de l'énergie, l'énergie renouvelable (solaire, éolienne, biomasse, géothermie, énergie des mers), environ 7,1%, et les autres énergies non renouvelables (fossiles, nucléaire) représentent 76,3% de bilan global, figure 1.2 [1].

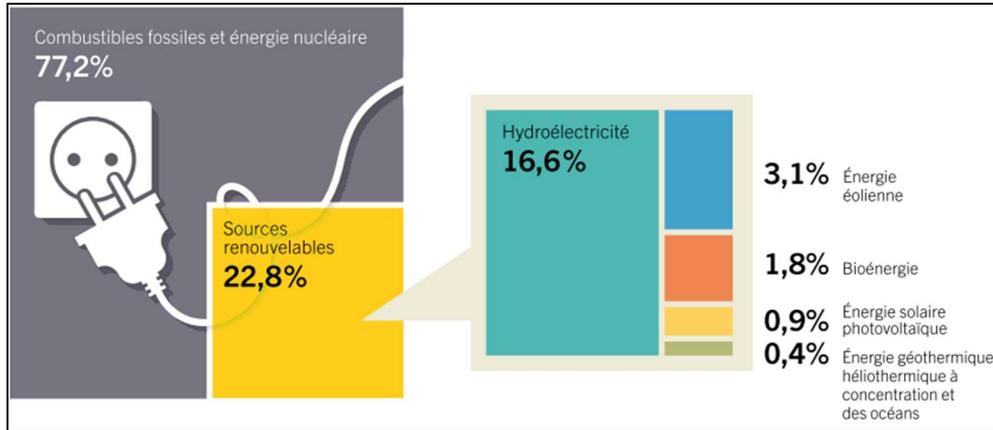


Figure 1.25: Part estimée de l'énergie renouvelable dans la production électrique mondiale, fin 2015 [1].

1.2.1 Énergie solaire

Non polluante, économique, disponible, aisément transformable, telle est l'énergie solaire. Grâce à des équipements robustes et fiables, les modules photovoltaïques, elle permet de produire de l'électricité.

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 139.10^4 Km. Le soleil est composé de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K, figure (1.3).

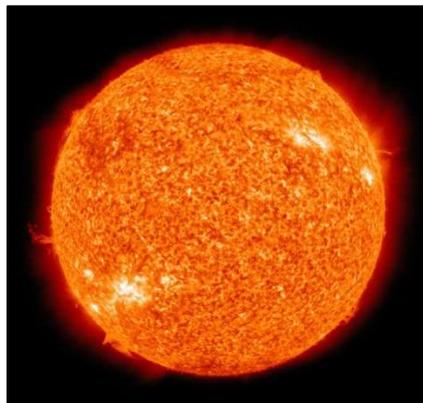


Figure 1 26: Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre ,150 millions de kilomètres environ, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180 millions de Giga watts, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux sources d'énergie fossiles figure (1.4).

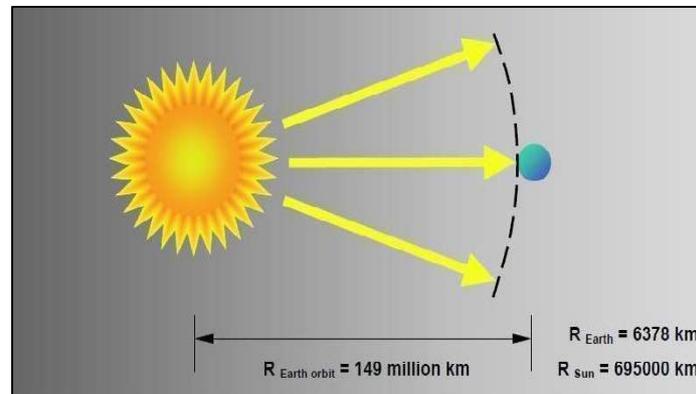


Figure 1.27: Distance entre le soleil et la terre.

1.2.1.1 Types d'énergie solaire

Les adeptes de l'énergie solaire se plaisent à rappeler que toute forme d'énergie sur terre a pour origine le soleil.

Que ce soit les vents engendrés par les fluctuations de températures à la surface de la terre, le cycle de l'eau qui s'évapore sous ses rayons, la biomasse qui transforme son énergie en matière organique ou même les combustibles fossiles façonnés lentement par sa chaleur, il est indispensable à toute forme d'énergie terrestre. [21]

- **Energie solaire passive**

L'énergie solaire passive est une énergie abondante et non polluante qui suppose la conception de bâtiments et la mise en place des composants de construction appropriés.

Le chauffage solaire passif fonctionne comme suit : l'énergie lumineuse du Soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres est absorbée par les murs, les planchers et les meubles, puis libérée sous forme de chaleur. Des baies vitrées ainsi que la thermo-circulation permettent de faire diminuer la consommation en d'autres énergies. [22]

Donc l'énergie solaire passive peut être utilisée avec profit tout en améliorant significativement le confort des occupants figure (1.5).

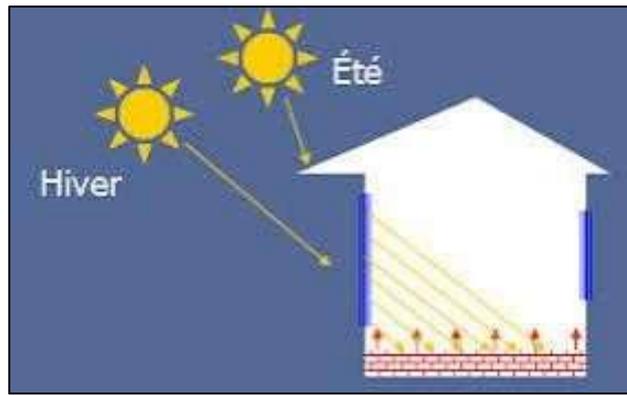


Figure 1.28: Chauffage d'une habitation par énergie solaire passive.

- **Eclairage naturel**

L'éclairage naturel est défini par l'apport lumineux fourni par le soleil, et est source de lumière dynamique, elle varie continuellement à travers la journée.

Le système doit être activé manuellement figure (1.6).



Figure 1.29: Eclairage naturel.

- **Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage.

Il existe deux types d'énergie solaire thermique :

- **Energie solaire thermique à basse température**

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus.

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct" figure (1.7). [23]

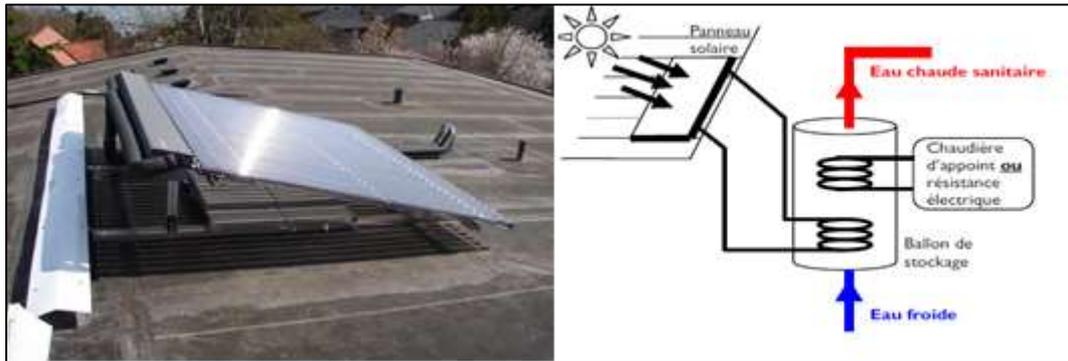


Figure 1.30: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à basse température [23].

- **Energie solaire thermique à haute température**

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1 000 °C.

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente même un générateur qui produit de l'électricité, l'hélio-thermodynamique à Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole figure (1.8).

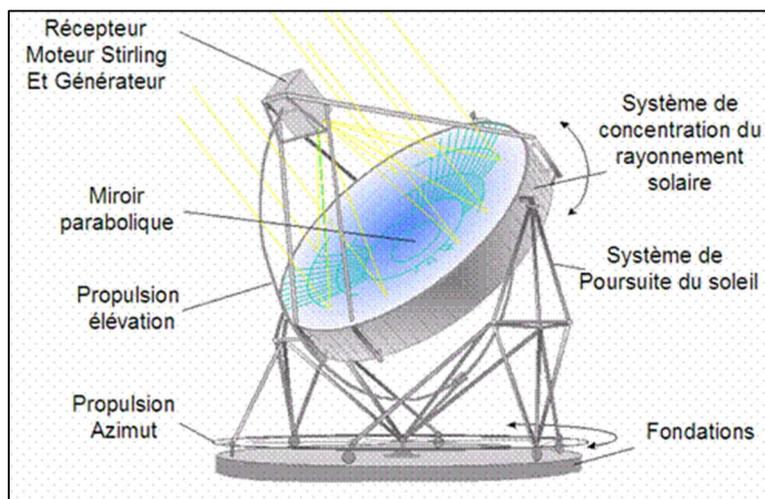


Figure 1.31: Centrale thermodynamique parabolique [66].

Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour figure (1.9).

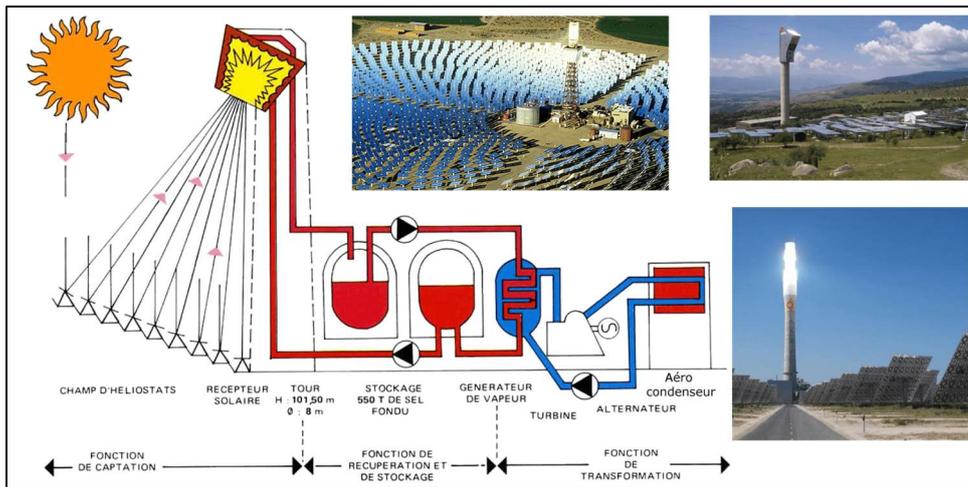


Figure 1.32: Centrale thermodynamique à tour [66].

Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire figure (1.10), figure (1.11).

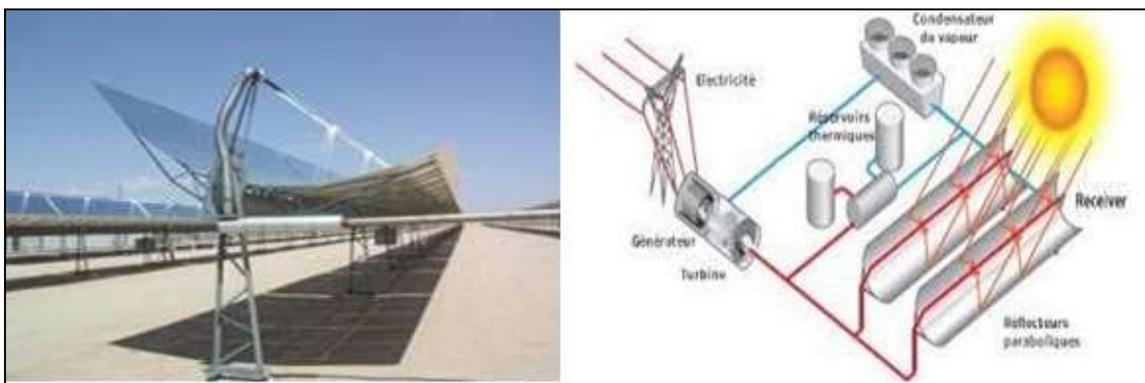


Figure 1.33: Centrale thermodynamique cylindro-parabolique [66].

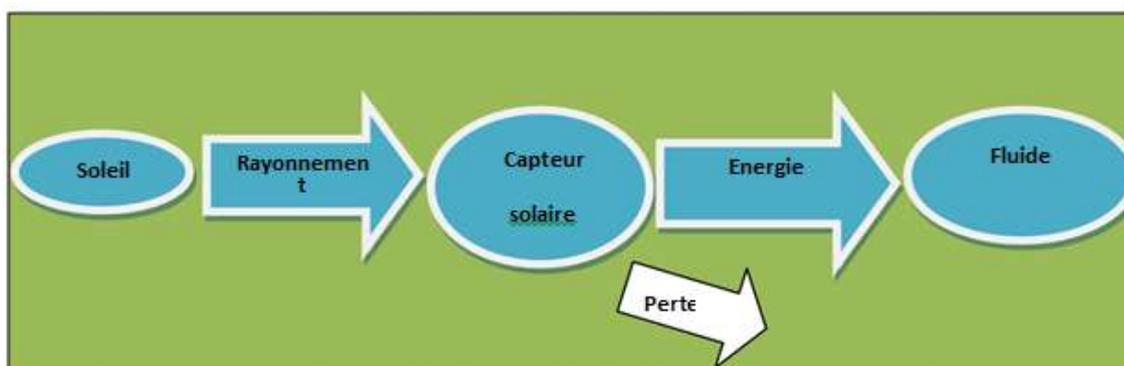


Figure 1.34: Les étapes pour Produire l'eau chauffée.

- **Energie solaire photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est la conversion directe de lumière solaire en électricité. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien

Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt".

L'énergie photovoltaïque est la manière la plus élégante de produire de l'électricité.

Elle se produit sans bruit, sans parties mécaniques, mais il y'a de pollution.

1.2.2 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique fonctionne un peu comme l'énergie éolienne : le mouvement de l'eau fait tourner une turbine qui produit de l'électricité. Plus l'eau coule vite, plus l'énergie produite est importante. En effet, la quantité d'énergie produite dépend de la pression et du volume d'eau à disposition. La pression est elle-même liée à la différence de hauteur entre la surface du lac et la position de la turbine. Ce mode de production d'électricité est l'un des plus propres et des plus efficaces (pas de déchets ni de CO_2).

Il s'appuie sur une ressource puissante et illimitée qui n'a pas besoin d'être transformée : l'eau passe à travers une centrale, et en ressort intacte ! [24].

1.2.2.1 Biomasse

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage.

Elle est la source d'énergie principale pour cuisiner et se chauffer. Cette biomasse qui comprend tous les produits obtenus à partir de plantes ou de résidus de plantes, secs ou déshydratés comme le bois, la paille, les grignons d'olives, la bagasse de la canne à sucre, est exploitée par combustion ou métabolisation. Mais pour être une réelle énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas excéder les quantités produites. En fonction des besoins, elle permet une production de chaleur ou d'électricité. De ce fait, sa participation à la production d'énergie mondiale est énorme par rapport aux autres énergies [25].

1.2.2.2 Géothermie

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète représente une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus on atteint des températures élevées. La

géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité [24]. Selon la température des différentes couches du sol, on qualifie la géothermie de « haute énergie » (150 °C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et de « très basse énergie » (moins de 30 °C). Ainsi, plus on s'enfonce dans la terre, plus la température y est élevée et on pourra en faire des usages différents

L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre.

Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu' à la surface. L'eau chaude utilisée fait tourner les turbines afin de produire l'énergie électrique ou chauffer des locaux, figure (1.12).



Figure 1.35: Centrale photovoltaïque [24].

Donc l'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable, elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie de rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque, figure (1.13).

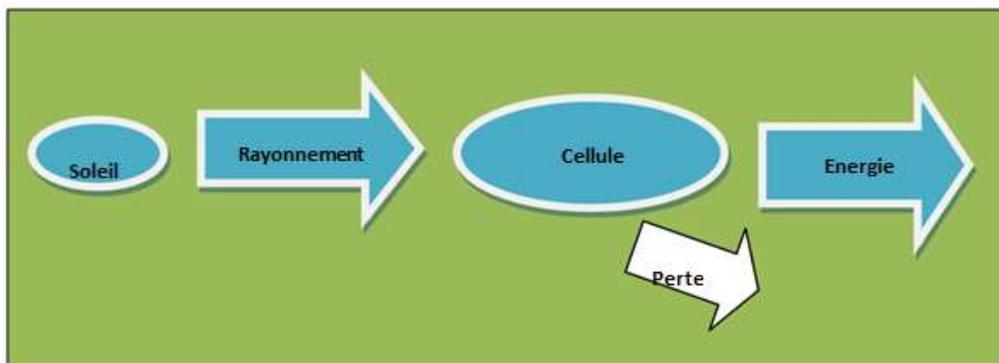


Figure 1.36: Production de l'électricité par cellule photovoltaïque.

1.2.3 Energie éolienne

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème du réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont des facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source d'énergie alternative et durable, la comparant avec d'autres sources d'énergie, l'énergie éolienne est renouvelable et produit une énergie propre, elle est devenue un moyen très important dans la production de l'énergie électrique dans plusieurs pays, l'électricité produite par l'énergie éolienne ces dernières années s'est considérablement développée de manière très remarquable, la capacité mondiale a atteint 159 213 MW, dont 38 312 MW ajoutés en 2009 avec un taux de croissance de 31,7 %, l'ensemble des éoliennes installées fin 2009 dans le monde produit 340 TWh par an, l'équivalent de la demande totale en électricité de l'Italie, septième plus importante économie mondiale, et égale 2 % de la consommation électrique mondiale, figure (1.14). [26]

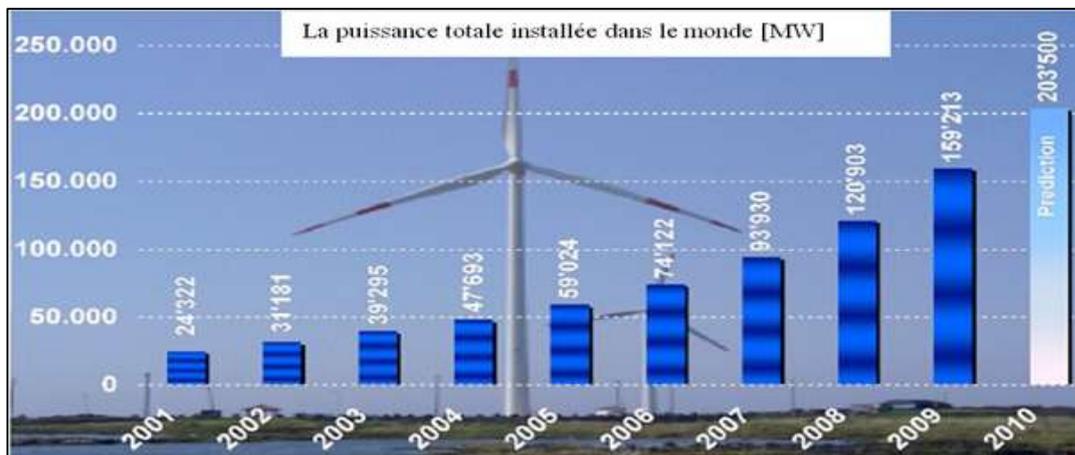


Figure 1.37: Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW [26].

1.3 GENERALITES SUR L'EOLIENNE

1.3.1 Historique

En l'an 4000 avant J.-C, l'homme apprend à maîtriser le vent. Les chinois sont, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune. Au XV^e siècle, Léonard de Vinci tente de voler.

En effet, en 1783, la première montgolfière transporte l'homme dans les airs. Henri Giffard a conçu le premier dirigeable au monde. En 1903, le premier vol mondial à bord d'un avion à moteur aux États-Unis. Les deux frères. « Orville et Wilbur Wright, réussissent à voler pendant 40 mètres avant d'atterrir en toute sécurité. Vers VII^e siècle l'utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées.

En Europe vers 1100, les premières éoliennes sont construites et utilisées pour pomper l'eau et moulinier le blé, ces moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal. Au XIV^e siècle, on a apporté des améliorations progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique, la poussée, et la vitesse du rotor. Ces améliorations permettent d'obtenir une meilleure mouture et une irrigation plus efficace. Un développement en Europe, s'installe jusqu'à ce jour et plus particulièrement aux Pays-Bas du moulin à vent pour le meulage du grain, l'irrigation des terres agricoles, le pompage de l'eau de mer, le sciage du bois, la fabrication du papier et de l'huile et le meulage de divers matériaux, [5]

Fin des années 1700, les moulins à vent sont l'équivalent du moteur électrique de l'Europe préindustrielle. Cette énergie éolienne est utilisée pour irriguer les terres, moulinier le grain, scier le bois d'œuvre et pour traiter des produits comme les épices et le tabac. En 1800, Les américains utilisent les moulins à vent pour pomper de l'eau pour alimenter leurs fermes et leurs ranches à l'Ouest. Les pales de ces premiers moulins à vent de ferme étaient de simples palettes de bois. Entre 1887-1888 l'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, construit la première éolienne qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à 2 filaments. Lampes à arc à charbon et 3 moteurs. Haute de 17 mètres et composée de 144 pales en cèdre, elle avait une puissance de 12 kW. En 1890, la première éolienne dite « industrielle » permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Poule

La Cour, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908. En 1891, Poule la Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. Il découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de nombreuses pales. Il met au point les premières éoliennes conçues à partir des principes modernes de l'aérodynamique. D'une puissance 25 kW grâce à des rotors à quatre pales elles affichent une plus grande efficacité. À la fin de la Première Guerre mondiale, l'utilisation de ces machines était largement répandue au Danemark.

En 1920 l'inventeur français Georges J.M. Darrieus développe le concept d'un rotor à axe vertical, éoliennes Darrieus. En 1930, il y a le développement de petites éoliennes dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une puissance de 1 à 3 kW, elles permettaient d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de

l'équipement de ferme. les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits destinée aux auges pour le bétail, [6].

Première moitié du XXe siècle, Les éoliennes sont confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon. En raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient.

En France à Nogent-le-Roi dans la Beauce, une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963. En 1957, Johannes Juul a créé la turbine Gedser qui sert de modèle aux éoliennes modernes, elle se compose d'un générateur et de trois pales à pivot. Ulrich Hutter met au point en 1960 des plans élaborés de turbines à axe horizontal en Allemagne. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'attaque ajustable afin d'en augmenter l'efficacité. En 1971, le premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de 5MW est installé. Plusieurs autres construits durant les années 1970 aux États-Unis ainsi qu'en Europe. En 1980, l'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne et favorise l'installation de 17 000 éoliennes de 20kW à 350 kW entre 1981 et 1990. En 1984 le projet Éole, la plus grande éolienne de type Darius au monde est construite, [7].

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage d'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW, et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes, [8].

1.3.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1.15) [9].

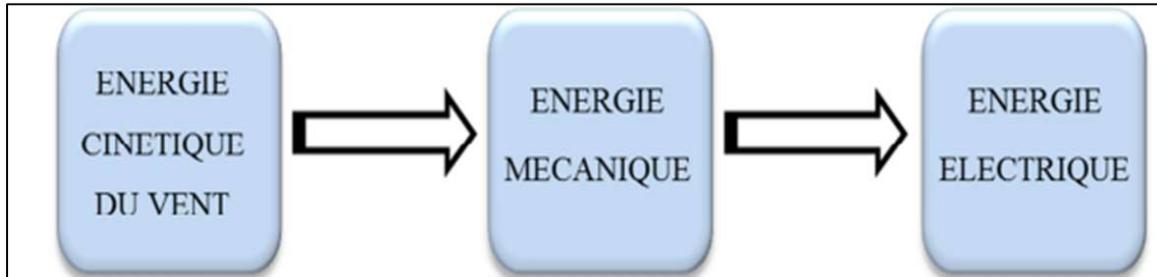


Figure 1.38: Conversion de l'énergie cinétique du vent

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. 1.3.2 [10].

1.3.3 Potentiel éolien

L'énergie éolienne est dérivée de l'énergie solaire, elle tire son nom d'Éole (en grec AILOS), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique. L'énergie solaire reçue par la terre n'est pas uniforme en tout point du globe, vers l'équateur l'angle d'incidence est proche de 90° donc la surface éclairée est plus petite et l'énergie est plus concentrée. La figure 1.1 montre la répartition de l'énergie solaire mondiale reçue au sol, [11].

Environ 2% de l'énergie solaire est transformée en énergie cinétique éolienne. Un taux de 35% de cette énergie est dissipé dans la couche atmosphérique au-dessus du sol. Si on utilisait 10% de cette énergie par an, cela correspondrait à 2,24.1021 Joules/an, ce qui correspond à environ 7 fois la consommation mondiale d'électricité. L'évaluation de l'énergie récupérable sur le site doit être entreprise avant tout autre travail. L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et la fréquence des vents présents. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents. [11]

L'énergie éolienne est une forme d'énergie indéfiniment durable et propre.

Elle est aujourd'hui utilisée pour :

- Alimenter en énergie des sites isolés (dizaine de kWh/jour)

- Produire des kWh au coût le plus faible sur des réseaux de distribution (dizaines à centaines de MWh/jour)
- Produire de l'énergie mécanique pour le pompage ou autre application (centaines de Wh/jour) L'énergie éolienne est transformée en énergie électrique par le biais d'un aérogénérateur.

Elle est très inégalement répartie au niveau mondial. Elle est plus importante au niveau les zones côtières. Dans les zones montagneuses, le vent est difficilement utilisable à cause des turbulences. Sur un site l'énergie éolienne est presque constante à l'échelle de l'année mais à l'échelle du mois, elle présente de très fortes irrégularités, ce qui présente des inconvénients importants [11], Figure 1.16.

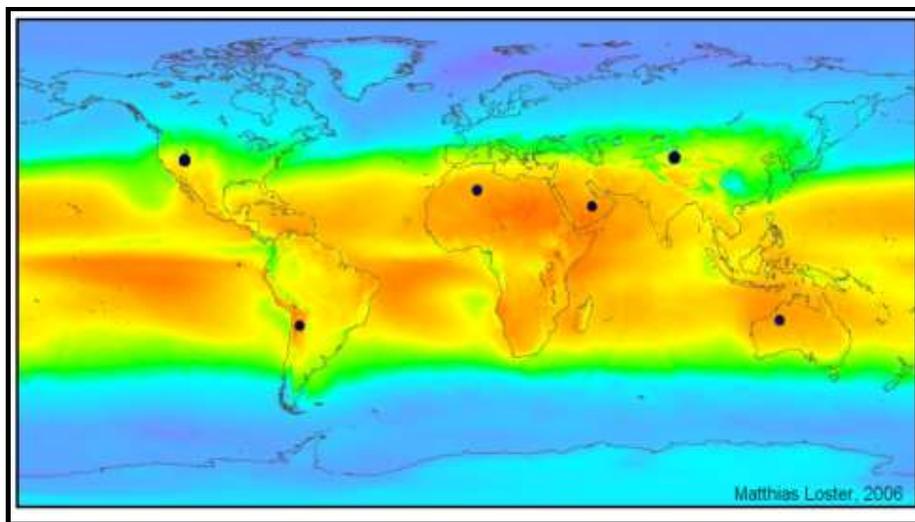


Figure 1.39: Répartition de l'énergie solaire mondiale reçue au sol, [11].

1.3.4 Composition des éoliennes

Rotor : partie rotative de l'éolienne placé en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

Nacelle : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages

(multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.

Tour : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.

Base : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale. On qualifie de turbine l'ensemble constitué du rotor et du train d'engrenages. Par extension, ce terme est souvent employé pour désigner l'éolienne dans sa globalité (Figure. 1.17) [12].

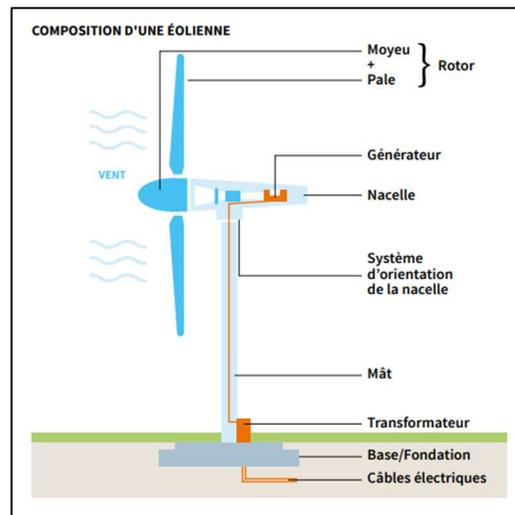


Figure 1.40: Composition d'éolienne

1.4 CLASSEMENT DES TURBINES EOLIENNES

Après ses premières utilisations à l'époque de la Perse Antique, la technologie qui permet de profiter de l'énergie du vent a évolué sous diverses formes et types de machines. La structure de base des turbines éoliennes consiste aujourd'hui en un rotor pour capter l'énergie du vent en la transformant en énergie en rotation, un système d'engrenage pour démultiplier la vitesse de rotation du rotor, une machine électrique pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Un schéma de principe est donné à la figure 1.18. Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical [13].

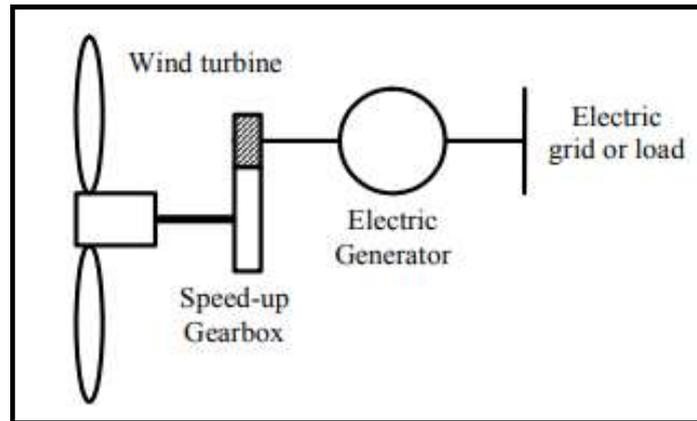


Figure 1.41: Schéma de principe d'un système éolien [13].

1.4.1 Éolienne à axe horizontal

Principe de fonctionnement

Les éoliennes à axe horizontal ont été inspirées des moulins à vent.

Elles sont généralement formées de deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur (Poitier , 2003). Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour (Figure 1.19) (El-Aimani, 2002). Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en « amont » ou en « aval ».

Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Il s'ensuit qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister au vent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes (Figure 1.20).[14]



Figure 1.42: Eolienne à axe horizontal.

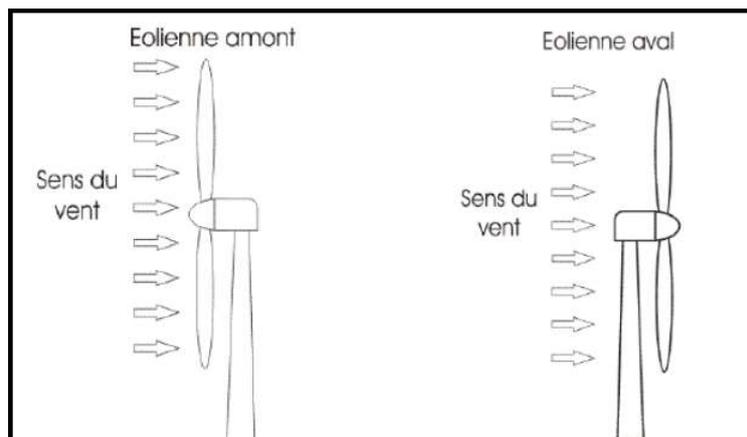


Figure 1.43: Fonctionnement des éoliennes en amont (a) et en aval (b).

1.4.2. Éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation de la turbine est vertical ou perpendiculaire au sol. Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles sont préconisées comme étant capables de capter le vent de toutes les directions. Leurs organes de commande et le générateur électrique peuvent être positionnés près du sol, et donc facilement accessible. De nombreuses versions ont été testées depuis les années 1920, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [15], [16].

1.4.2.1 Eolienne Savonius

- Le rotor Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de « traînée différentielle » ; Son rotor est composé par deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. [15], [17], figure 1.21.

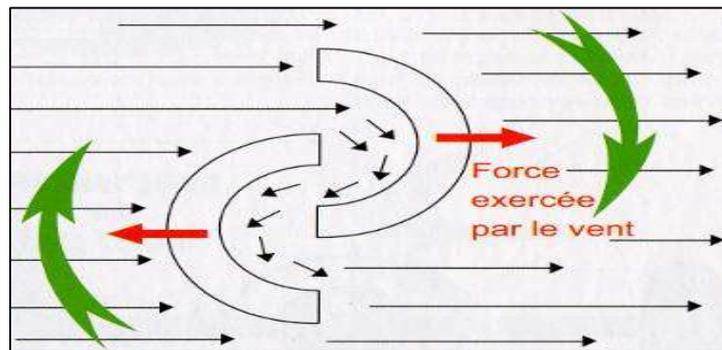


Figure 1.44: Eolienne Savonius [17].

1.4.2.2 Eolienne Darrieus

- Le rotor Darrieus (du nom de son inventeur Georges Darrieus, breveté en 1931), dont le fonctionnement est basé sur le principe de « variation cyclique d'incidence ». ce dernier est défini par un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles et est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.
- Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent, figure (1.22) [15], [17].



Figure 1.45: Eolienne à axe vertical de type Darrieus [17].

1.4.2.3 Type à voile tournante

Les éoliennes à voile tournante sont équipées de pales dont l'orientation dynamique permet de mieux exploiter l'énergie du vent, à la manière d'un navire à voile.

Ce mécanisme rend possible l'exploitation de vents plus puissants que ceux que peuvent exploiter les éoliennes classiques à trois pales. En outre, le bruit généré est fortement réduit par ce système, figure (1.23). [18]



Figure 1.46: Eolienne à axe vertical et à voile tournante [18].

1.5. APPLICATIONS DES EOLIENNES

L'intérêt qu'apporte l'utilisation des éoliennes se manifeste dans la possibilité de pouvoir récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette dernière est transformée en énergie mécanique de rotation en premier lieu, ensuite cette énergie peut être exploitée principalement de deux façons :

- ✓ Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- ✓ Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux manières :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une

infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement des régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de dessalement, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [19].

1.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES EOLIENNES

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des avantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.6.1 Avantages :

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [35], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [29].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc. ... [34].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [31].
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [34].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [27].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [28].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [28].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 1].

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [Site 1].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [30].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [32], selon l'article [33] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [30].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [28].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

1.6.2 Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques avantages :

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [28]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [34].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [28], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [34].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les

oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [Site 1].

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [32], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [Site 2]. Selon l'article de [27], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

Chapitre 2

Performances aérodynamiques
et principe de fonctionnement

2.1 INTRODUCTION

La technologie des éoliennes à axe vertical est née avec l'invention de la turbine de type Savonius par l'ingénieur finlandais Johannes Savonius en 1925. Contemporain de Savonius, l'ingénieur Français Jean-Marie Darrieus (1931) invente la turbine qui portera son nom (turbine de Darrieus). Cette dernière, est formée d'au moins deux pales aérodynamiques exploitant la force de portée du vent. [44]

Des progrès considérables dans la compréhension des VAWT peuvent être obtenus grâce à l'utilisation de CFD et des mesures expérimentales.

2.2 HISTORIQUE DES EOLIENNES DARRIEUS

Georges Darrieus (1888 - 1979) est un ingénieur français diplômé de l'école Centrale de Paris. Il publie en 1927 un brevet sur l'éolienne verticale rapide équipée de pales en forme de profil NACA. Les pales, en traversant le flux d'air, permettent de convertir la portance qu'elle génère en couple animant le rotor. Cette éolienne est de type rapide ($2 < \lambda < 5$), ce qui permet d'atteindre des nombre de Reynolds (caractéristiques aérodynamiques) suffisamment élevé pour des vitesses du vent supérieure ou égales à 10m/s pour obtenir une portance correcte des pales.

La portance est la force perpendiculaire au vecteur de vitesse relatif du vent.

Lorsque la vitesse du vent relatif devient élevé, la portance devient largement dominante sur la traînée, le rapport des 2, appelé finesse, dépasse couramment 20 ($Cl/Cd > 20$).

Ainsi, par la vitesse, ces éoliennes profitent de la finesse élevée, tout comme le vol des avions modernes ou les pales des éoliennes à axe horizontal.

- Les forces de portance deviennent majoritaires lorsque les pales traversent le flux d'air, et captent ainsi la puissance du flux. Lorsque les pales remontent ou redescendent parallèlement au vent, les forces de traînée sont faibles et ne pénalisent pas le fonctionnement de l'éolienne. Mais la vitesse de rotation élevée génère des forces centrifuges importantes de plusieurs dizaines de G.
- La première éolienne a été réalisée avec des pales en bois, renforcées par des câbles en acier dans le cœur de la pale. Sous l'effet de la rotation, la pale prend une forme de Troposkine (forme de corde soumise à une force centrifuge, ou plus communément de ballon de rugby).

- Puis l'amélioration des techniques de fabrication a permis de réaliser des éoliennes en H (pales droites, souvent réalisées en profilé aluminium),
- Puis en forme hélicoïdales (en matériaux composites),
- Hyperboloïde de révolution (à structure composite haute densité) [12].

2.3 EOLIENNES DE TYPE DARRIEUS

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure 2.1) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

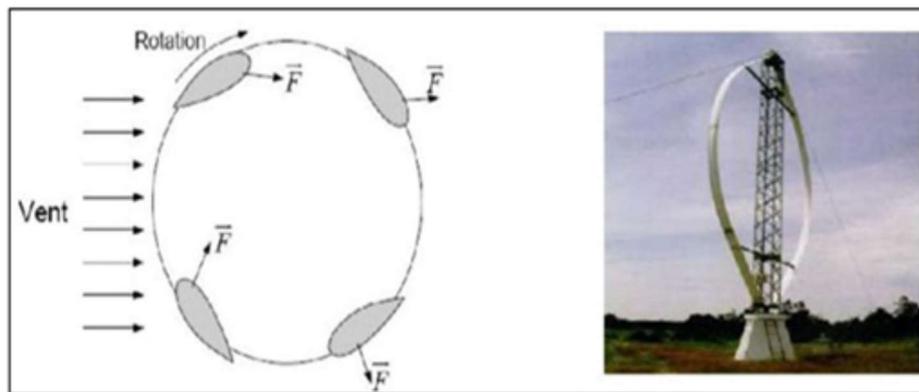


Figure 2.15: Eolienne de Darrieus.

2.3.1 Types éolienne Darrieus

Ce type d'éolienne est encore méconnu car peu étudié. Il existe plusieurs déclinaisons de ce type d'éolienne : cylindrique, parabolique ou encore hélicoïdale. Comme l'éolienne à axe horizontal, l'effet de portance est utilisé pour générer un couple mécanique. Le rendement de

l'éolienne Darrieus est en théorie le même que celui de l'éolienne à axe horizontal mais, en pratique, ce type d'éolienne s'avère être fragile, son mode de fonctionnement implique des contraintes fortes dans les matériaux. Par conséquent l'éolienne Darrieus résiste mal aux vents forts, figure 2.2.

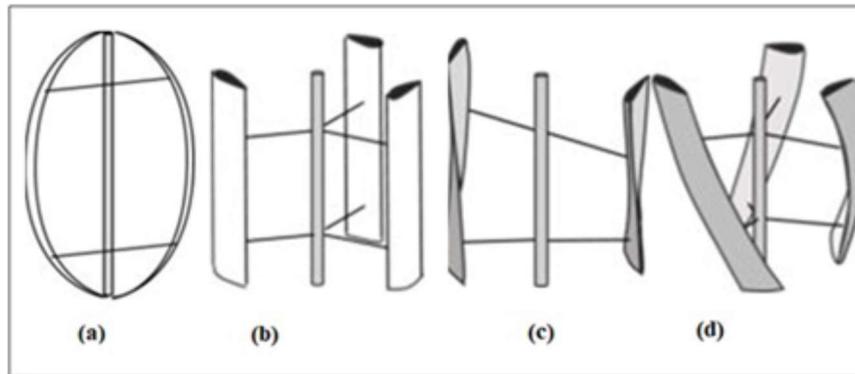


Figure 2.16: Types des éoliennes Darrieus.

2.3.2 Avantages et inconvénients rotor Darrieus

2.3.2.1 Avantages :

L'avantage essentiel de ces éoliennes est leur rendement, pouvant théoriquement atteindre 59%, la vitesse de rotation, permettant d'atteindre des vitesses de génératrice optimum pour la production électrique, et l'architecture, extrêmement simple en coût et en maintenance car le rotor est lié à la structure par un pivot unique. La génératrice est fixée au bâti, et non pas en haut d'une nacelle qui pivote, Figure 2.3

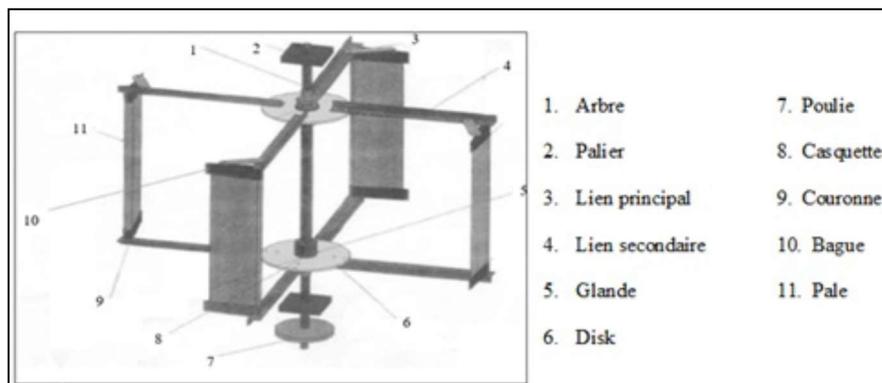


Figure 2.17: Composantes de l'éolienne H-Darrieus

2.3.2.2 Inconvénients :

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif, Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [48].

- Instable, elle est soumise à des variations du vent et à des périodes de calme, difficulté de stockage de l'énergie, les équipements sont chers et produisent du bruit, impact visuel [49].
- L'éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement [50].

2.3.3 Rendement de rotor Darrieus

Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes :

- Coefficient de puissance max = 35 à 40%
- Vitesse spécifique optimale = 4 à 6
- Vitesse de démarrage = 4-5m/s.

2.3.4 Effet de nombre de pales sur le démarrage de l'éolienne H-Darrieus

L'avantage indiscutable est un démarrage généralement plus rapide qu'une bipales pour un même vent. Le couple est aussi plus important. La fabrication n'est pas plus compliquée hormis quelques solutions simples visant à optimiser l'équilibrage. L'inconvénient, bien que ce ne soit pas un obstacle, est un poids plus élevé. Les attaches de pales sont aussi un peu plus compliquées, cependant les avantages semblent dominer. Une éolienne bipales bien construite sera équivalente à une Darrieus soit environ 24 à 40 % de rendement. La vitesse de rotation d'un rotor bipale est généralement rapide. Par contre la vitesse de rotation d'une éolienne tripale est d'environ moins 4 % par rapport à une bipales, mais, le couple sera plus important notamment au démarrage.

2.3.4.1 Eolienne Darrieus mono-pales

Très rarement utilisée du au contrepoids nécessaire et un équilibrage difficile.

Une société italienne construisait de bipales.

2.3.4.2 Eolienne Darrieus bipales

Le plus courant pour les petites unités est sa facilité de mise en œuvre à la portée de tous, ou presque. La particularité des rotors bipales est de tourner généralement très vite. Leur inconvénient est que le couple de démarrage est souvent très faible sans astuces de variation du pas (*angle d'attaque*), Figure 2.4.



Figure 2.18: Eolienne Darrieus à deux pales droites [12].

2.3.4.3 Eolienne Darrieus tripales

Une éolienne tripale semble offrir le meilleur des deux mondes. Couple nettement plus élevé au démarrage et vitesse de rotation proche des bipales. Cette vitesse de rotation est inférieure d'environ moins 4 % par rapport à une hélice bipales de même diamètre. Le couple est plus élevé, avantage non négligeable lors de vents relativement faibles, Figure 2.5.



Figure 2.19: Eolienne à H-Darrieus tripales [12].

2.3.4.4 Eolienne Darrieus multi-pales

Nous retrouvons des unités comportant de 4 à 6 pales sur des sites où les vents sont particulièrement faibles ou, lorsque le couple nécessaire est plus important que la vitesse de rotation. L'approche des moulins de pompage multi-aubes est caractéristique de ces engins où un couple important est nécessaire au détriment de la vitesse de rotation qui est très faible (*environ 50 à 75 tr/mn maxi*), [12].

2.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE DARRIEUS

Au regard de la complexité aérodynamique de ce type d'éolienne, son développement est limité car son rendement n'est pas encore suffisamment compétitif face aux éoliennes à axe horizontal classique [51], donc il y a de fortes raisons de croire qu'une meilleure compréhension des phénomènes aérodynamiques liés au fonctionnement de ce type de machine peut donner accès à une amélioration des performances, Figure 2.6.

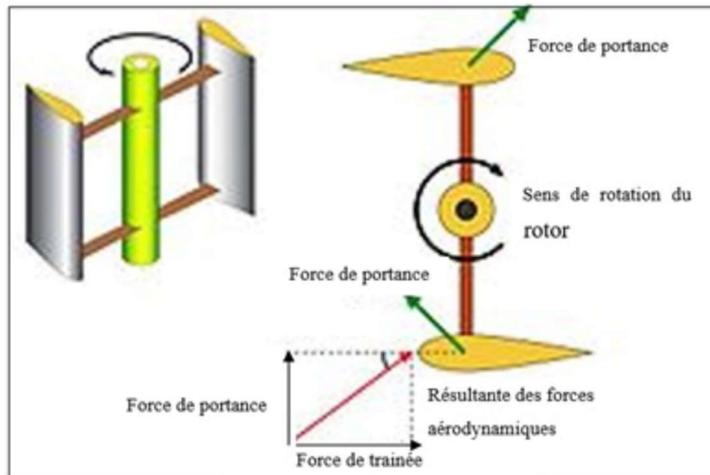


Figure 2.20: Principe de fonctionnement de l'éolienne H-Darrieus.

L'analyse du fonctionnement de l'éolienne Darrieus est facile à démontrer en considérant un aspect bidimensionnel comme le montre la (figure 2.7). La vitesse d'écoulement en champ lointain en amont est désignée par U_∞ .

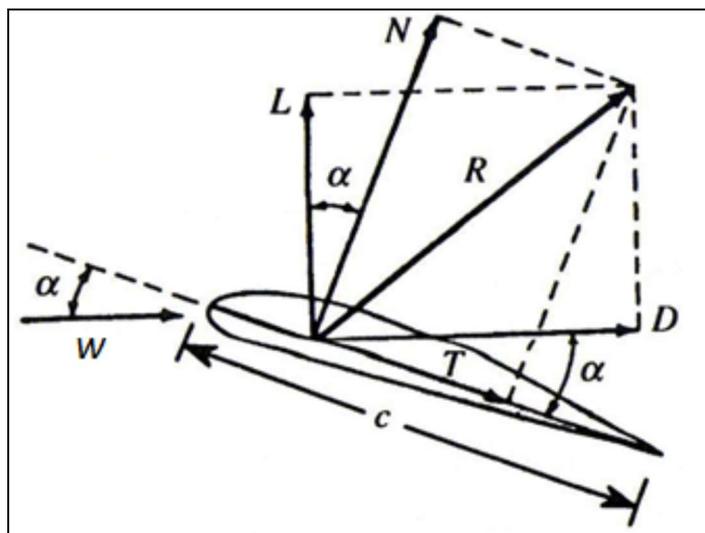


Figure 2.21: Forces sur un profil aérodynamique

2.5 VARIABLES AERODYNAMIQUES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

- **Vitesse relative W**

La vitesse relative de l'écoulement sur le profil est la sommation vectorielle du vent perturbé (par le mouvement du profil) et la vitesse de déplacement du profil aérodynamique. Si le profil est immobile alors La vitesse relative n'est autre que la vitesse du vent non perturbé.

- **Angle d'attaque α**

L'angle d'attaque est l'angle formée par la corde c du profil aérodynamique par rapport à la direction de la vitesse relative du vent (Figure 2.7).

2.6 FORCES AERODYNAMIQUES

2.6.1 Force de portance L

Quand un profil est légèrement incliné par rapport à la direction du vent (faible angle d'attaque), l'écoulement reste attaché au profil, il est accéléré sur la partie inclinée face au vent, soit l'intrados, et il est ralenti sur la partie faisant dos au vent, soit l'extrados. Il se crée alors une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados. Cette différence de pression génère une force perpendiculaire à la direction du vent, dirigée de l'intrados vers l'extrados, c'est la portance.

2.6.2 Force de trainée D

La force de trainée est la force qui résiste à l'écoulement, elle est donc de même sens et de même direction que la vitesse relative de l'écoulement. On distingue deux types de forces de trainées, la trainée de frottement et la trainée de pression. La trainée de frottement dépend de la rugosité de la paroi et de la viscosité du fluide. La trainée de pression dépend de l'importance de la dépression dans le sillage qui est due essentiellement à la forme du profil et à son orientation par rapport au vent. Ainsi, dans les écoulements attachés, la trainée est essentiellement due au frottement et son ampleur est limitée, alors que la portance est dominante. Par contre, quand un profil est fortement incliné par rapport au vent, l'écoulement se détache, une dépression apparaît dans le sillage, et la trainée de pression devient dominante, c'est ce qu'on appelle le décrochage (Figure 2.8).

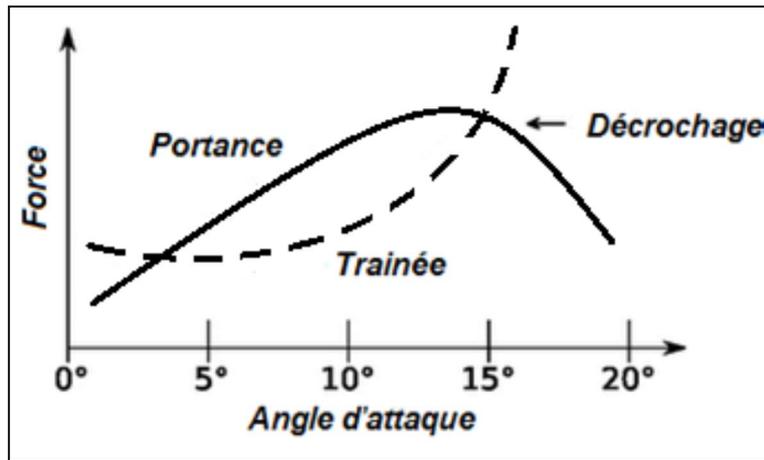


Figure 2 22: Variation des forces aérodynamiques en fonction de l'angle d'attaque [52].

- La force normale N , perpendiculaire à la corde, et de la force tangentielle T , alignée avec la corde, peuvent être exprimées en fonction des forces de Portance, de Trainée et de l'angle d'attaque α (Figure 2.7).

$$N = L \cos \alpha + D \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$T = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (2.2)$$

2.6.3 Coefficients aérodynamiques

- **Nombre de Reynolds Re**

Le nombre de Reynolds est un coefficient adimensionnel qui caractérise l'importance des forces de viscosité dans un fluide. Il est égal au rapport entre la force d'inertie et la force de viscosité. W étant la vitesse de vent relative sur la pale, ρ la densité, c la corde, et μ la viscosité, le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \frac{\rho W c}{\mu} \quad (2.3)$$

Le nombre de Mach informe sur le caractère compressible ou non de l'écoulement.

Comme pour le nombre de Reynolds, on utilise une valeur caractéristique de la vitesse pour avoir un paramètre adimensionnel unique pour une condition de fonctionnement, qu'on compare à la vitesse du son notée a . Son expression est donnée par l'équation (3.3). Sa valeur est généralement très faible dans le contexte des éoliennes de petite taille, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} . [44].

$$M = \frac{R\omega}{a} = \frac{\lambda U_\infty}{a} \quad (3.3)$$

Il est très utile pour les études aérodynamiques d'exprimer ces forces de manière adimensionnelles, pour ce faire on définit les coefficients suivants (tableau 2.1)

$$\text{Coefficient de portance} \quad C_L = \frac{L}{Sq} \quad (2.4)$$

$$\text{Coefficient de traînée} \quad C_D = \frac{D}{Sq} \quad (2.5)$$

$$\text{Coefficient de la force normale} \quad C_N = \frac{N}{Sq} \quad (2.6)$$

$$\text{Coefficient de la force tangentielle} \quad C_T = \frac{T}{Sq} \quad (2.7)$$

P : pression dynamique : $P = \frac{1}{2} V_\infty^2 \rho$

V_∞ : Vitesse du vent non perturbé

Pour une section de pale (2D) : $S = 1 \times c$ corde du profil de pale.

Pour un rotor : $S =$ surface balayée

C_L et C_D sont des coefficients adimensionnels, qui sont propre à la forme d'un profil aérodynamique mais indépendants de son échelle. Pour une géométrie de profil donnée et pour un nombre de Reynolds donné, ces coefficients varient donc en fonction de l'angle d'attaque α .

- **Coefficient de puissance C_p**

Le coefficient de puissance est un coefficient adimensionnel qui correspond au rendement aérodynamique d'une éolienne. Il est le rapport entre la puissance disponible dans le vent et la puissance développée par le rotor. (Il ne prend pas en compte le rendement du générateur):

$$C_p = \frac{P}{P_{max}} = \frac{\omega C}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (2.8)$$

Où ω est la vitesse angulaire du rotor, C le couple du rotor, et A la section balayée par le vent.

- **Vitesse spécifique (TSR « Tip Speed Ration ») λ**

La vitesse spécifique est une variable adimensionnelle qui caractérise la vitesse relative du vent sur les pales. Elle est le rapport entre la vitesse tangentielle, produit de la vitesse angulaire ω et du rayon R , et de la vitesse du vent non perturbé :

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (2.9)$$

Les performances des éoliennes sont le plus souvent caractérisées, de manière adimensionnelle, par la variation du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ , figure 1.9.

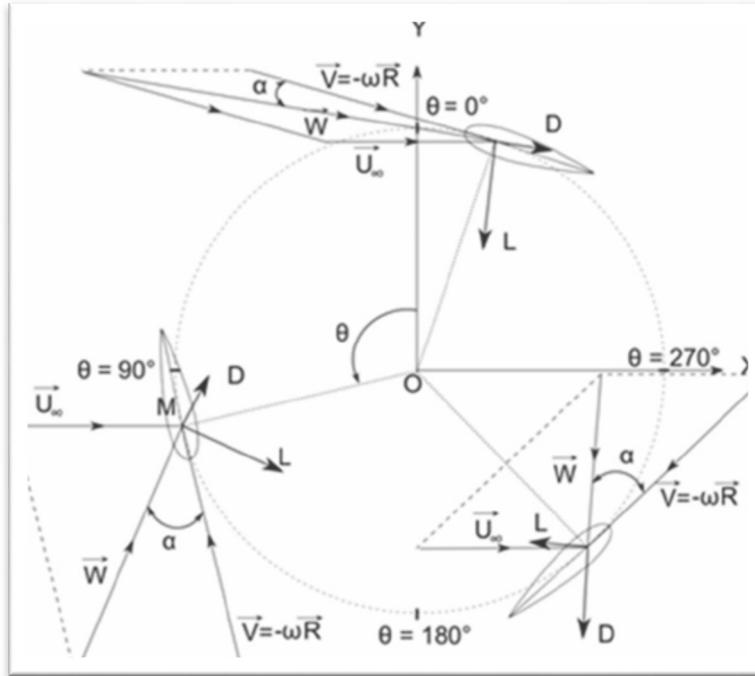


Figure 2.23: Force et triangles de vitesses dans une turbine Darrieus.

Pendant la rotation, l'angle d'attaque α varie de positif à négatif, il est exprimé par la relation (2.10). De la même manière la vitesse relative évolue avec l'angle azimutal θ suivant la relation (2.11).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin\theta}{\lambda + \cos\theta}\right) \quad (2.10)$$

$$W = U_\infty \sqrt{(\lambda + \cos\theta)^2 + (\sin\theta)^2} \quad (2.11)$$

Selon l'équation (2.10), la figure (2.9) illustre l'angle d'incidence α par rapport à l'angle azimutal θ pour plusieurs valeurs de vitesse spécifique λ .

L'action du fluide sur la pôle engendre la création d'une force F sur le profil (voir figure 2.10), que l'on peut décomposer en traînée D (composante dans la direction de la vitesse relative) et en portance L (composante perpendiculaire à la vitesse relative). Ces forces sont normalisées en introduisant leurs coefficients adimensionnels respectifs C_D et C_L comme suit :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho C H W^2} \quad (2.12)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho CHW^2} \quad (2.13)$$

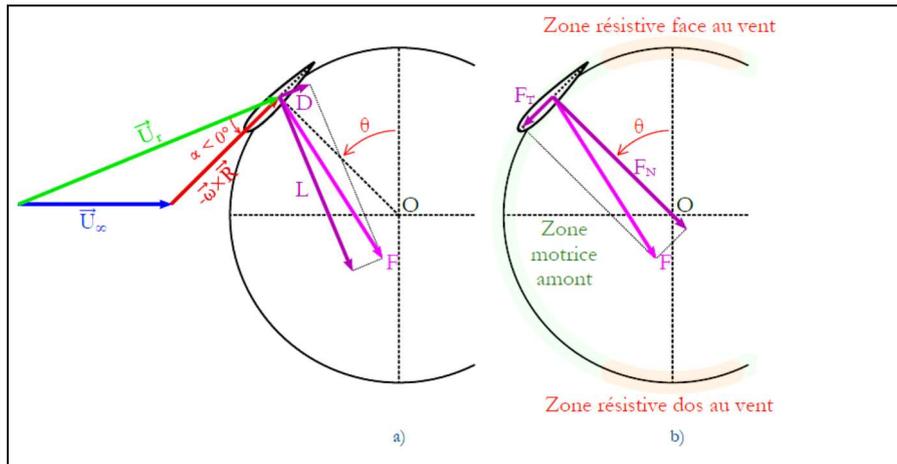


Figure 2.24: Décomposition simplifiée des efforts sur une machine Darrieus dans le plan transversal.

a) Aperçu d'un triangle des vitesses classiques et des forces de portance et de traînée qui en résultent.

b) Projection de la force totale selon les directions normale et tangentielle à la pale.

Les zones rouges symbolisent les régions qui freinent la machine, les zones vertes les régions motrices (la zone motrice aval n'est pas représentée sur ces schémas).

On définit ensuite le coefficient de puissance aérodynamique C_p (voir relation 2.14) comme étant le rapport entre la puissance moyenne et la puissance cinétique du vent qui traverse la surface balayée par la machine. Il exprime la performance de la turbine.

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho S U_\infty^3} \quad (2.14)$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable inférieure à 1, dit aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne, il est le rapport entre la puissance fournie par l'éolienne P_m et la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_M}{P_V} \quad (2.15)$$

De même, on peut déterminer un coefficient de couple C_q , version adimensionnelle du couple donné par la relation (2.16) :

$$C_q = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.16)$$

L'évolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique est illustrée par la figure 2.11. On note que pour une très faible vitesse spécifique, les angles d'incidence ont une forte amplitude qui peuvent mener à de forts décollements de la couche limite, voire à du décrochage dynamique (phénomène expliqué dans le paragraphe suivant), ce qui se traduit globalement par une perte de rendement. Par contre une vitesse spécifique trop importante induit des angles d'attaque trop faibles. Dans ces conditions, les effets secondaires parmi lesquels la viscosité, à travers la traînée de frottement notamment, jouent alors un rôle influant dans la réduction des performances. En résumé, la courbe de puissance en fonction de la vitesse réduite présente une forme de cloche, limitée d'un côté par le décrochage, de l'autre par la viscosité. Le rendement est optimal quand les effets s'équilibrent.

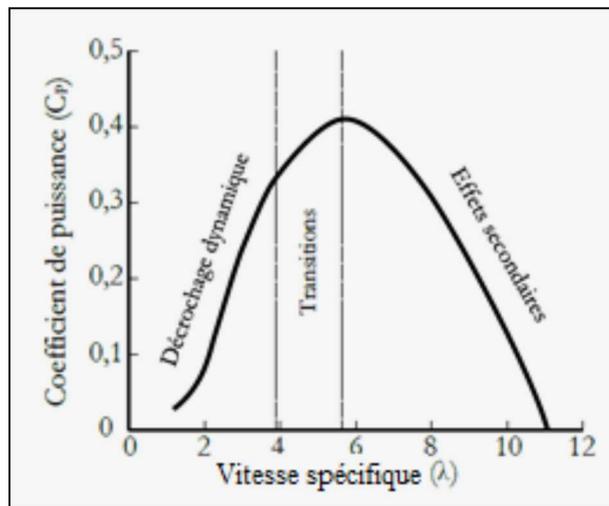


Figure 2.25: Evolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique [53].

2.7 DECROCHAGE AERODYNAMIQUE

Le décrochage aérodynamique est un phénomène qui se produit sur les profils aérodynamiques lors d'importants angles d'incidence, (figure 2.12).

Pour de faibles angles d'incidence, l'écoulement de l'air est régulier sur les deux faces, intrados et extrados, du profil. Les filets d'air collent au profil de la pôle, ce qui favorise la portance. Arrivée à une certaine valeur de l'angle d'incidence, il se produit un décollement de l'écoulement aérodynamique à l'extrados de la pôle entraînant une brusque chute de portance (causée par la dépression), (figure 2.13).



Figure 2.26: Profil d'aile en soufflerie en situation de décrochage les filets d'air se sont décollés de l'extrados [67].

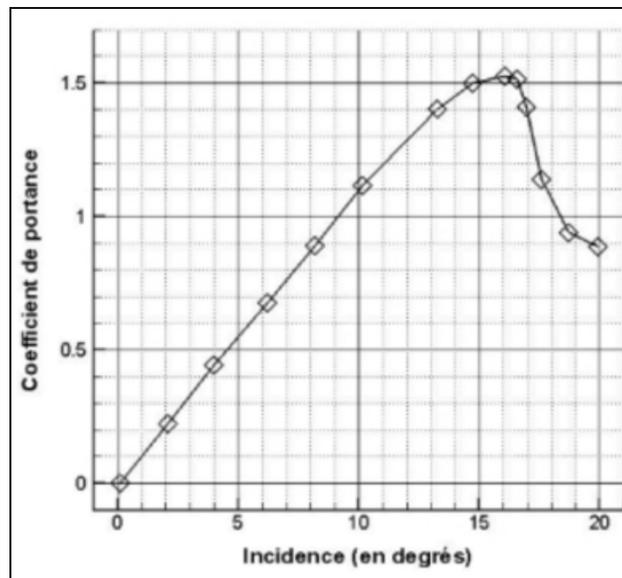


Figure 2.27: Courbe de portance en fonction de l'angle d'attaque pour un profil NACA [67].

2.8 EOLIENNES H-DARRIEUS BIPLAN (TANDEM)

L'éolienne Darrieus ayant un comportement aérodynamique complexe, une étude expérimentale s'avère nécessaire pour mieux comprendre les phénomènes aérodynamiques liés au fonctionnement de ce type de machine, et ainsi pouvoir tester de nouvelles configurations afin d'améliorer les capacités de ces machines. Ceci est l'intérêt du présent chapitre.

Deux types d'investigations expérimentales sont effectuées : la première consiste à des essais sur les éoliennes classiques à savoir la bipale, trois pales et quatre pales. Et la deuxième : des essais sont menés sur de nouvelles configurations, basés sur le principe du biplan.

2.8.1 Explication du concept du biplan

Le concept du biplan est utilisé pour la première fois aux débuts de l'aviation, époque où les moteurs étaient lourds, peu puissants et avec une vitesse de vol faible. Donc il fallait une grande surface d'aile pour assurer la portance, ce qui a conduit à réaliser des avions à plusieurs ailes, superposées et reliées entre elles par des mâts et des haubans, d'où l'idée du biplan.

Le premier vol motorisé de l'histoire a été réalisé par un biplan (17 décembre 1903), le Wright Flyer, par les frères Wright. Les biplans ont connu leur heure de gloire pendant la Première guerre mondiale.

La formule du biplan se résume en deux ailes d'envergure souvent égales, placées l'une au-dessus de l'autre.

Il existe différentes appellations du biplan (figure 2.14) :

Lorsque l'aile basse est d'une surface inférieure à la moitié de celle de l'aile haute, le biplan est nommé plus précisément sesquiplan, Cette formule permet de conserver des qualités aérodynamiques proches de celles d'un biplan ordinaire mais avec un poids moindre et une visibilité accrue vers le bas. Et si l'aile haute est d'une surface inférieure de moitié à celle de l'aile basse, on parle de sesquiplan inversé. Et quand les paires d'ailes sont décalées verticalement, on parle d'ailes en tandem. Ce dernier est utilisé dans cette recherche, [54].

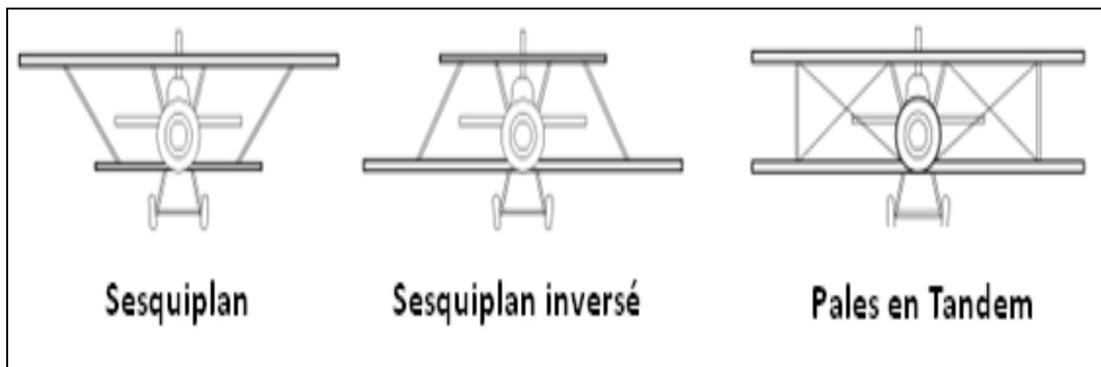


Figure 2.28: Différente appellation du biplan

La turbine éolienne Rotative Biplan (ROBIPLAN), invention originale de *Pascal HA PHAM*, est susceptible d'être placée sur les habitations, en pleine nature ou en milieu urbain pour générer une puissance mécanique, puis électrique. L'invention possède une simplicité de construction remarquable et une grande aptitude à démarrer sous de très faibles vents, tout comme à supporter des vents forts.

La ROBIPLAN exploite toute une gamme de vitesses de vent, mais son rendement, défini comme le rapport entre la puissance récupérée et la puissance cinétique incidente n'est pas encore connue. La présente étude vise à en estimer un ordre de grandeur : la mécanique des fluides étant particulièrement complexe, il faudra par la suite confirmer ces estimations par des simulations numériques d'écoulement à éléments finis, et de préférence et surtout, par des mesures en soufflerie, [55].

Chapitre 3

Simulation numérique et choix
des zones climatiques

3.1 INTRODUCTION

Les écoulements de l'industrie, tout comme ceux que l'on retrouve dans la nature, sont majoritairement turbulents. Bien qu'il n'existe à ce jour aucune définition universelle de la turbulence, ses principales propriétés sont connues. La turbulence se traduit par la présence de mouvements tourbillonnaires répartis continûment sur une large plage d'échelles.

3.2 DESCRIPTIONS DES ECOULEMENTS DES FLUIDES

Dans le domaine spatio-temporel, on caractérise la turbulence (Figure. 3.1) par sa dynamique tridimensionnelle non-linéaire, soumise à des mécanismes de transfert d'énergie entre grandes et petites structures. Ainsi, des propriétés de conservation (masse, énergie, quantité de mouvement), Le système regroupant ces propriétés est connu sous le nom des équations de Navier-Stokes. [12]

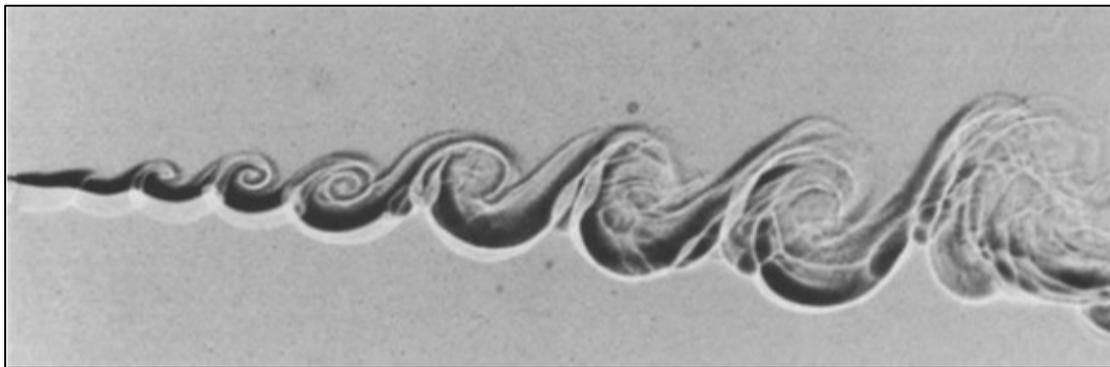


Figure3.10: Ecoulement turbulent.

3.2.1 Equations de Navier et Stockes appliquées au fluide compressible

Un écoulement turbulent d'un fluide visqueux newtonien satisfait, bien sûr, les équations de Navier-Stokes. Pour la suite, on considère uniquement le cas des écoulements compressibles. Les équations de conservation sont alors, en notation indicielle:

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

- Equation de conservation de quantité de mouvement (transport) :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_i u_j = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.2)$$

Où

u_i et u_j : Composantes de la vitesse du fluide

g_i : Composantes de l'accélération de la pesanteur

3.2.2 Résolution des Equations Navier et Stockes

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens (donc des gaz et de la majeure partie des liquides). La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase est difficile, et l'existence mathématique de solutions des équations de Navier-Stokes n'est pas démontrée. Mais elles permettent souvent, par une résolution approchée, de proposer une modélisation de nombreux phénomènes, comme les courants océaniques et des mouvements des masses d'air de l'atmosphère pour les météorologistes, le comportement des gratte-ciel ou des ponts sous l'action du vent pour les architectes et les ingénieurs, ou encore celui des avions, des trains ou des voitures à grande vitesse pour leurs bureaux d'études concepteurs, ainsi que l'écoulement de l'eau dans un tuyau et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de divers fluides.

Ces équations sont nommées ainsi pour honorer les travaux de deux scientifiques du XIX^e siècle : le mathématicien et ingénieur des Ponts Henri Navier, qui le premier a introduit la notion de viscosité dans les équations d'Euler en 1823, et le physicien George Gabriel Stokes, qui a donné sa forme définitive à l'équation de conservation de la quantité de mouvement en 1845. Entre-temps, divers scientifiques ont contribué à l'avancement du sujet : Augustin Louis Cauchy et Siméon Denis Poisson en 1829 et Adhémar Barré de Saint-Venant en 1843.

Pour un gaz peu dense, il est possible de trouver une solution approchée de l'équation de Boltzmann, décrivant le comportement statistique des particules dans le cadre de la théorie cinétique des gaz. Ainsi, la méthode de Chapman-Enskog, due à Sydney Chapman et David Enskog en 1916 et 1917, permet de généraliser les équations de Navier-Stokes à un milieu comportant plusieurs espèces et de calculer l'expression des flux de masse (équations de Stefan-Maxwell incluant l'effet Soret), de quantité de mouvement (en donnant l'expression du tenseur de pression) et d'énergie en montrant l'existence de l'effet Dufour.

Cette méthode permet également de calculer les coefficients de transport à partir des potentiels d'interaction moléculaires.

La résolution mathématiquement rigoureuse des équations de Navier-Stokes constitue l'un des problèmes du prix du millénaire.

On décrit les diverses variantes des équations valables pour des milieux de composition homogène, les problèmes liés à la diffusion et aux réactions chimiques n'y sont pas abordés. [61]

3.2.2.1 Modélisation de turbulence

- **Simulation numérique directe (DNS)** Cette approche consiste tout "simplement" à résoudre directement les équations du mouvement, sans aucun modèle de turbulence. Ainsi, toute la gamme d'échelles est résolue explicitement. Son inconvénient majeur est son coût de calcul. En effet, l'absence de modèle requiert d'avoir des mailles de l'ordre des échelles dissipatives, et de même pour le pas de temps. Or, il découle des travaux de Kolmogorov que, plus le nombre de Reynolds d'un écoulement est élevé, plus les petites échelles sont séparées des grandes, et plus il faut mailler finement le domaine étudié. De plus, un tel niveau de résolution nécessite l'utilisation de schémas numériques d'ordre élevé. Par conséquent, la DNS est, à l'heure actuelle, difficilement applicable à des situations industrielles. Les résultats obtenus constituent de véritables expériences numériques, et servent couramment de "banc d'essai" pour de nouveaux modèles, ainsi qu'à l'analyse de la structure détaillée de la turbulence. Ils ont permis de grandes avancées sur le plan fondamental. [62]

- **Simulation à grandes échelles (LES)**

Il s'agit d'une méthode numérique intermédiaire entre la DNS et les méthodes statistiques consistant à appliquer un filtre spatial en tout point du domaine. Le champ filtré est obtenu par un produit de convolution dans l'espace.

Où D est le domaine de calcul, et G le filtre déterminant la taille des tourbillons à simuler. Le filtre sépare donc les grandes échelles (simulées) des petites structures (modélisées). On suppose ici que le comportement de ces dernières ne dépend pas de la géométrie et est donc isotrope, ce qui n'est pas le cas des grandes échelles qui, elles, voient leur comportement guidé par leur environnement. La simulation des grandes échelles reste néanmoins très délicates car elles ont un comportement anisotrope, elles sont sujettes à des effets historiques, et sont fortement dépendantes du type d'écoulement et de ses conditions aux limites. La taille de maille est choisie largement supérieure à l'échelle de Kolmogorov et correspond la plupart du temps à la taille du filtre.

3.2.3. Modèles de turbulence statistique (RANS)

RANS : Equations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier-Stokes) est peu dépendant du nombre de Reynolds et peu gourmand en temps CPU: champs moyens et statistiques en un point de la turbulence uniquement, RANS est largement utilisée dans le monde industriel pour son coût de calcul faible. [60]

On peut classifier ces modèles suivant deux critères : on distingue les modèles par leur ordre (un ou deux en général) et par le nombre d'équations de fermeture supplémentaires (plutôt une ou deux selon la complexité du modèle de fermeture). [12]

3.2.3.1. Modèle (k-ε)

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence. En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds). L'idée du modèle k-ε c'est qu'on peut la construire à partir de ces quantités une « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante : [56]

$$\nu_t = C_\mu \left(\frac{K^2}{\varepsilon} \right) \quad (3.4)$$

Avec : $\mu_t = \rho \cdot \nu_t$ viscosité dynamique turbulente. L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

C_μ : est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement

k : est l'énergie cinétique de turbulence défini par :

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'^2} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right) \quad (3.5)$$

ε : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K donné par suivante:

$$\varepsilon = V \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x_j^2} \right) \quad (3.6)$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulente reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence L est Dédit de :

$$\varepsilon = K^{3/2}/L \quad (3.7)$$

3.1.3.2. Modèle à transport de contrainte de cisaillement $k-\omega$ SST

Ce modèle est une combinaison du modèle $k-\omega$ de Menter et du modèle $k-\varepsilon$ de Launder d'une manière à utiliser le deuxième modèle près de la paroi, en passant à travers une fonction du modèle $k-\varepsilon$ loin de la paroi, sachant que ces équations ont été transformées à un format :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\beta_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)}{\partial x_j} + G_k + Y_k + S_k \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial\left(\beta_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)}{\partial x_j} + G_\omega + Y_\omega + S_\omega \quad (3.9)$$

Cette méthode intègre la suite 'suggestion Bradshaw' que la contrainte de Reynolds de cisaillement doit être considérée comme étant proportionnelle à l'énergie cinétique turbulente. Le modèle $k-\omega$ SST représente le transport des contraintes de cisaillement.

3.3. METHODE DES VOLUMES FINIS

L'idée de base consiste à ne rechercher que la valeur des fonctions inconnues en un grand nombre de points : il s'agit de la discrétisation. Au lieu de résoudre un problème différentiel ou problème continu, on résout un grand système algébrique qu'on appelle le problème discret. Evidemment, les problèmes discrets dérivés de la modélisation physique se caractérisent par leur très grande taille et on n'a pu envisager leur résolution qu'avec les progrès récents de l'informatique. La formulation bidimensionnelle consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre d'éléments finis.

Chaque élément contient quatre nœuds. Un volume fini entoure chaque nœud (Figure 3.2).

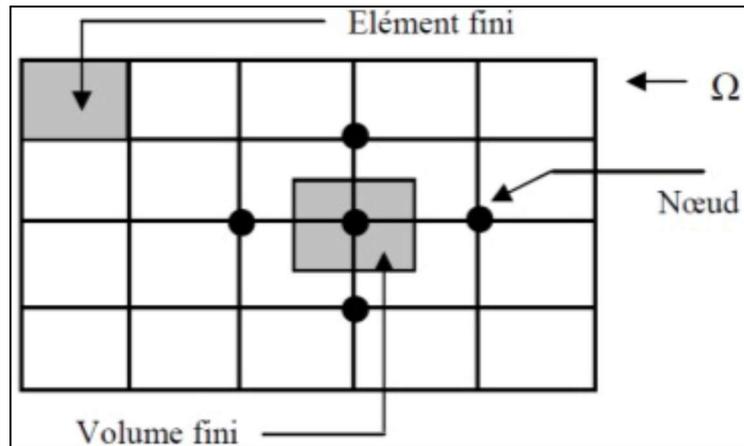


Figure3.11: Volumes finis bidimensionnels.

3.3.1. Géométrie et zones de calcul

3.3.1. Calcul de la dynamique des fluides : (Computational Fluid Dynamics)

Le CFD « Computational Fluid Dynamics » fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides*. Il offre une réduction considérable de temps et de coûts, en fournissant des données pertinentes dans la phase de conception. Un code CFD contient trois éléments principaux:

- Un préprocesseur, qui prend en entrée le maillage défini selon la géométrie étudiée, les paramètres d'écoulement et les conditions limites.
- Un solveur, qui est utilisé pour résoudre les équations régissant le fluide dans les conditions prévues.
- Un post-processeur, qui permet de manipuler les données et d'afficher les résultats sous forme graphique. [57]
- géométrie de maillage (ICEM)

3.3.2. Génération des maillages :

L'opération de maillage consiste à discrétiser le domaine de calcul. La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie, on choisit généralement le maillage suivant les frontières du domaine.

"Fluent" traite plusieurs types de maillages qui sont en général importés directement d'autres logiciels de génération de maillages ("ICEM " par exemple). Le choix entre un maillage structuré, non structuré, voire hybride est devenu possible ceci a permis de simplifier ce problème et d'obtenir ainsi d'excellents résultats, figure 3.3.

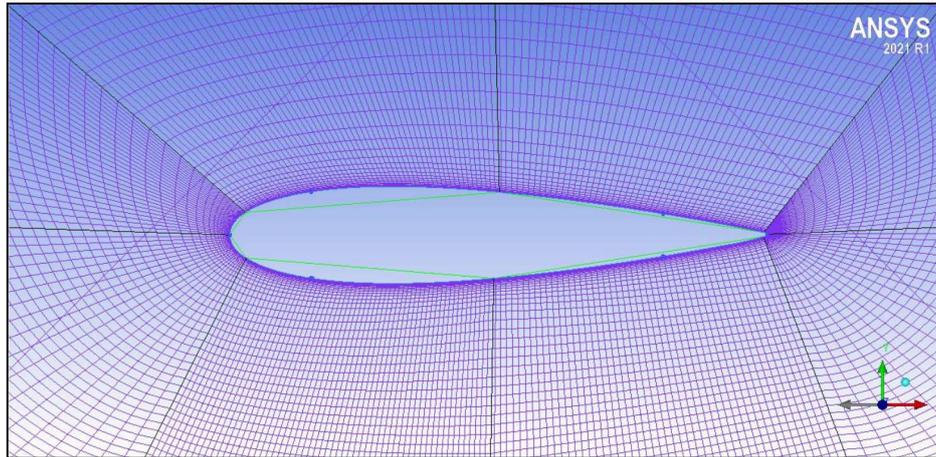


Figure 3.12: Maillage autour d'un profil.

3.3.3. Types de maillage :

3.3.3.1 Maillage structuré (quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie multi bloc.

Cette technique consiste à diviser les domaines de calcul en plusieurs compartiments de formes géométriques simplifiées et de les mailler séparément. Il présente les avantages suivants :

Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de mailles par rapport à un maillage non structuré équivalent.

Réduit les risques d'erreurs numériques dues à la diffusion numérique si l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.

Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes. Dans la majorité des cas, la division du domaine de calcul est nécessaire pour faciliter sa génération.

3.3.3.2 Maillage non structuré (tri/tétra) :

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 tout en gardant une bonne qualité des éléments.

Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés d'où un gain de calcul énorme.

L'inconvénient : Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré. Engendre des erreurs numériques (diffusion numérique) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré figure 3.4 [58]

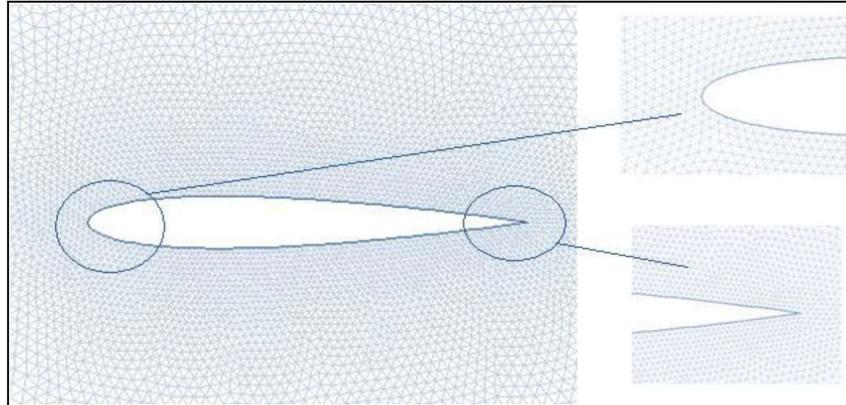


Figure3.13: Maillage non structuré.

3.3.3.3 Maillage hybride :

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Ses avantages :

Combine les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré en réduisant les erreurs dues à la diffusion numérique.

Ses inconvénients :

Ce type de maillage demeure encore difficile à générer notamment dans les endroits de liaison entre le maillage structuré et le maillage non structuré figure 3.5. [59]

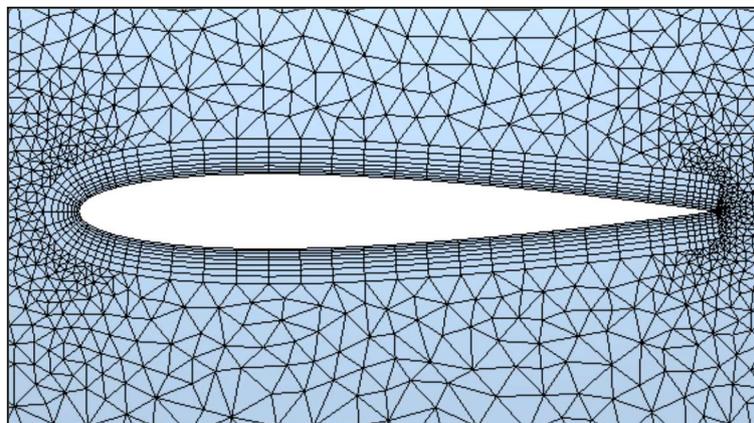


Figure3.14: Maillage hybride

3.4 METHODE DE MAILLAGE DYNAMIQUE (DAYNMIQUE MESHES)

Pour simuler l'interaction entre des éléments rotatifs comme les rotors concentriques que nous désirons étudier, en générant des résultats précis, la méthode des maillages coulissants est la plus adaptée. Cette méthode nécessite un calcul instationnaire et génère des résultats variables dans le temps plutôt qu'une moyenne temporelle comme on peut obtenir avec la méthode des référentiels rotatifs ou " multiple mouving référence frames ". Bien que ce soit une méthode plus lourde en calcul, nous avons utilisé la méthode "Sliding meshes" afin d'obtenir des résultats précis et d'évaluer les interactions entre l'air et les rotors et les observer (Figure. 3.6).

En utilisant la technique des maillages coulissants, différentes zones de fluides englobant différents éléments tournant comme nos rotors, constituent des maillages différents qui tournent l'un par rapport à l'autre. Ces zones maillées restent en tout temps adjacentes et sont liées par une interface. Lors du calcul instationnaire, les zones maillées tournent en pas de temps discret. Pour calculer le flux à travers l'interface (Figure. 3.7), l'intersection entre les zones interfacées est définie à chaque nouveaux pas de temps, de manière à déterminer quelles cellules adjacentes, d'une part et d'autre de l'interface, se transmettrons leurs informations

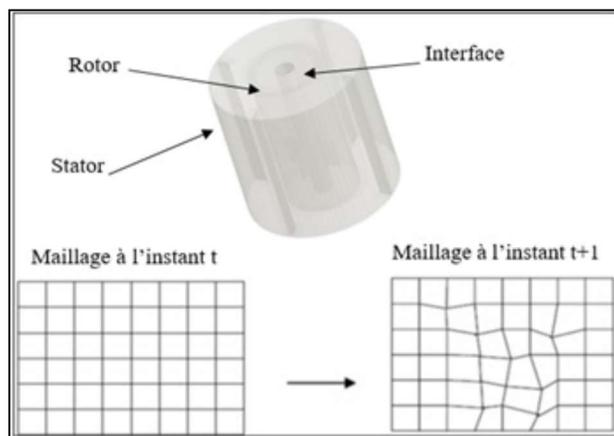


Figure3.15: Technique de maillage dynamique.

3.4.1. Conditions aux limites :

En fonction du problème physique traité, les conditions aux limites sont différentes et leur compatibilité avec les modèles numériques associés à un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques.

Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en fluent.

Entrée : inlet-vent

La condition inlet-vent pour les écoulements compressibles et incompressibles, dont la vitesse d'entrée, est connue. On doit néanmoins veiller à ne pas placer cette entrée trop près d'un obstacle solide ; cela pourrait entraîner des problèmes de stagnation et modifier les propriétés de l'écoulement.

Sortie : outlet-vent

La condition outlet-vent est utilisée pour modéliser les écoulements dont on ne connaît à priori aucun détail sur la sortie. Il est approprié pour la modélisation de fluide incompressible.

Symmetry :

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

Parois : Wall

La condition Wall doit être utilisée pour délimiter les régions solides des régions fluides. Les pales est une région solide d'où la spécification Wall.

3.4.2. Présentation des logiciels de calcul :

Pour notre simulation numérique nous avons utilisé deux logiciels de calcul qui se complètent et qui sont le meilleur Logiciel L'ANSYS ICEM 2019 et Fluent 2019.

3.4.3. Logiciel ICEM CFD

Ce module permet de préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez conviviale bien qu'assez simple. Dans le cas de notre travail on a fait recours à l'ICEM CFD 2019, l'un des avantages de ce logiciel, est sa simplicité ainsi que sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. Pour le maillage, ICEM CFD utilise des structures mono ou multi-blocs en fonction de la géométrie, il permet de générer deux types de maillages, entre autre le maillage tetrahedral et le maillage hexahedral.

Pour chaque configuration (géométrie – maillage) un fichier de données (*.mesh) doit être exporté Pour être compatible avec le code Fluent, figure 3.7.

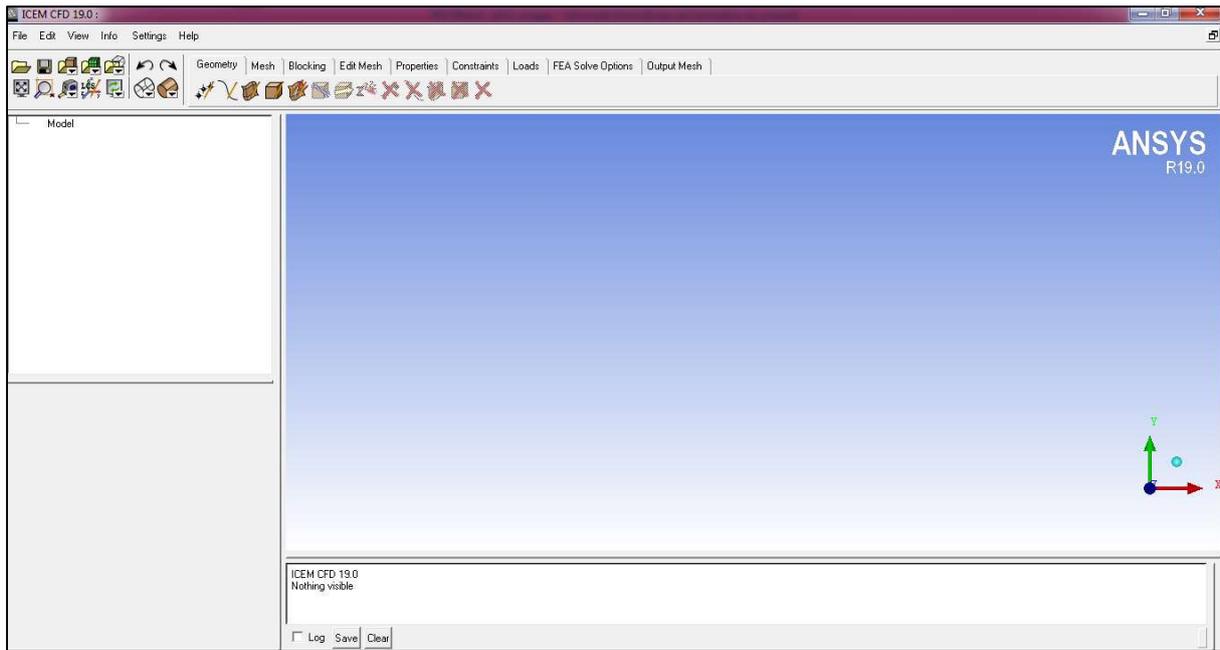


Figure 3.16: Interface graphique de L'ANSYS ICEM 2019

3.5. CHOIX DES ZONES CLIMATIQUES

3.5.1. Région de Nouadhibou (Mauritanie)

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à *10 mètres au-dessus* du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Nouadhibou connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure 3,8 mois, du 27 mars au 21 juillet, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 23,6 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de l'année à Nouadhibou est juin, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 27,9 kilomètres par heure.

La *période la plus calme* de l'année dure 8,2 mois, du 21 juillet au 27 mars. Le mois le plus calme de l'année à Nouadhibou est *décembre*, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 19,4 kilomètres par heure, Figure 3.8.

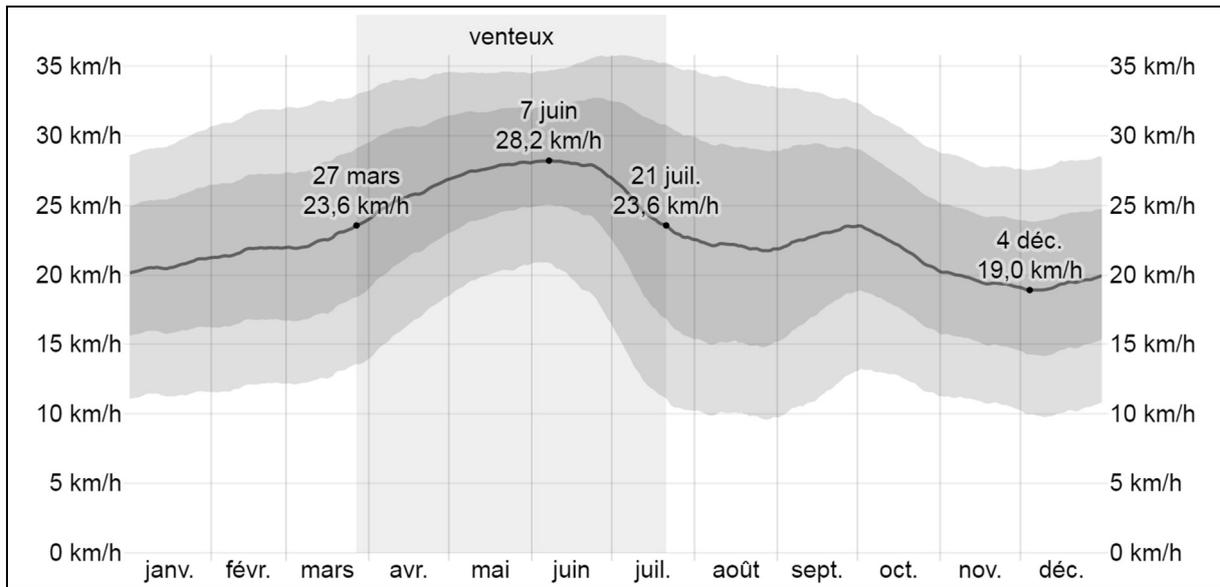


Figure 3.17: Vitesse moyenne du vent à Nouadhibou

La moyenne des vitesses des vents moyens horaires (ligne gris foncé), avec bandes du 25e aux 75e percentiles et du 10e au 90e percentile. [63]

La direction horaire moyenne principale du vent à Nouadhibou varie au cours de l'année. Le vent vient le plus souvent *du nord* pendant 12 mois, du 5 janvier au 23 décembre, avec un pourcentage maximal de 99 % le 31 mai. Le vent vient le plus souvent *de l'est* pendant 1,9 semaine, du 23 décembre au 5 janvier, avec un pourcentage maximal de 49 % le 1 janvier. [63], Tableau 3.1.

Nouadhibou	20,7	21,7	22,8	25,7	27,7	27,9	24,2	22,1	22,9	21,9	19,6	19,4
	5,75	6,03	6,33	7,14	7,69	7,75	6,72	6,14	6,36	6,08	5,44	5,39

Tableau 3.1. Vitesses du vent km/h (Nouadhibou 2021)

3.5.2. Région de Tiaret (Algérie)

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (vitesse et direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Tiaret connaît une variation saisonnière *modérée* au cours de l'année.

La *période la plus venteuse* de l'année dure 6,5 mois, du 29 octobre au 12 mai, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 14,2 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux de

l'année à Tiaret est *décembre*, avec une vitesse horaire moyenne du vent de *15,9 kilomètres par heure*.

La *période la plus calme* de l'année dure *5,5 mois*, du *12 mai* au *29 octobre*. Le mois le *plus calme* de l'année à Tiaret est *août*, avec une vitesse horaire moyenne du vent de *12,4 kilomètres par heure*, Figure 3.9.

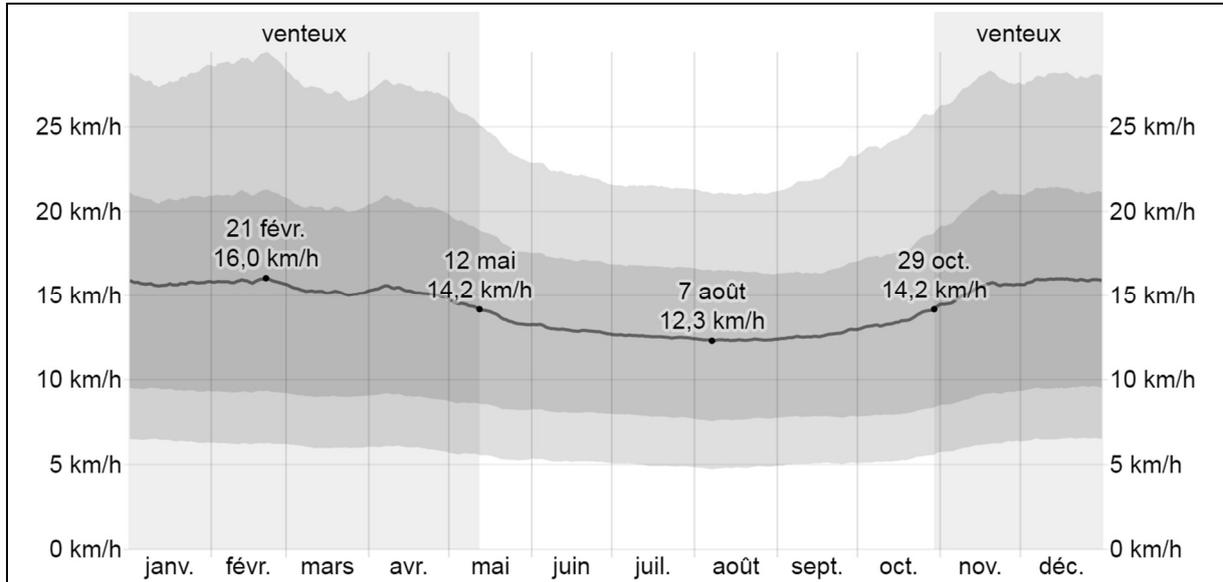


Figure 3. 18: Vitesse moyenne du vent à Tiaret

La moyenne des vitesses des vents moyens horaires (ligne gris foncé), avec bandes du 25e aux 75 percentiles et du 10e au 90e percentile, Tableau 3.2. [64]

Tiaret	15,7	15,9	15,2	15,2	13,9	12,9	12,5	12,4	12,7	13,6	15,3	15,9
	4,36	4,42	4,22	4,22	3,86	3,58	3,47	3,44	3,53	3,78	4,25	4,42

Tableau 3.2 : Vitesses du vent km/h (Tiaret 2021)

Chapitre 4

Résultats et discussions

4.1. ETUDE DE MAILLAGE

Les figures 4.1 et 4.2 ci-dessous représentent Les maillages des deux types de rotors éoliens H-Darrieus (Tripale en tandem et tripale simple). Les maillages générés à l'aide de générateur ICEM CFD 19 constitués de deux domaines de calcul bidimensionnels, l'un tournant et l'autre fixe assurant les conditions aux limites. Les cellules sont de types hexaédriques de nombre 329000 éléments pour le maillage Tripale en Tandem et 276000 éléments pour la géométrie tripale simple

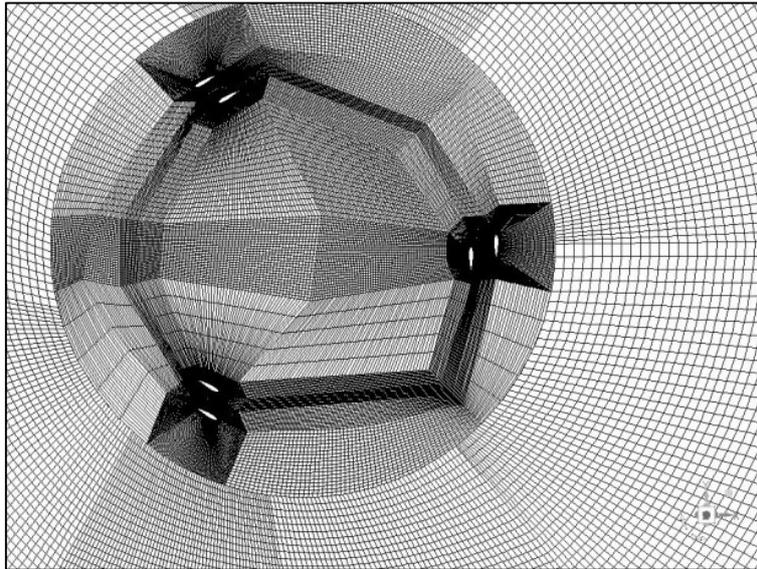


Figure 4.14: Maillage H-Darrieus Tandem tripale 329000 éléments hexaédriques

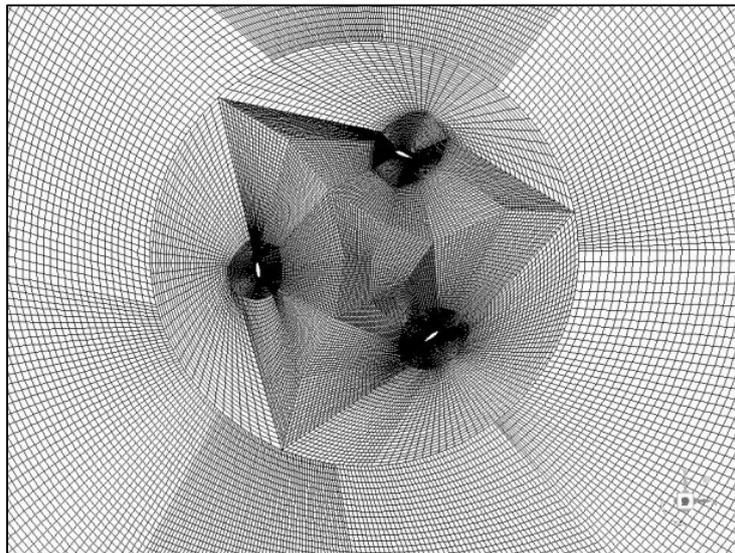


Figure 4.15: Maillage H-Darrieus tripale 276000 éléments hexaédriques

4.2. VALIDATION EXPERIMENTALE

Les différents calculs numériques ont été effectués sur une machine de calcul de processeur Intel core (TM) i5 - 3337U CPU 1,8 GHz, 4 Go de RAM, SE 64 bits à l'aide de code de calcul Ansys Fluent 19 R3.

Les résultats numériques du coefficient de portance ont été validés par celles obtenus expérimentalement.

La courbe de coefficient de portance extraire du calcul effectué numériquement sur le rotor éolien de type Tripale en tandem (figure 4.3) montre une concordance acceptable relativement caractérisée par une chute et une élévation de portance remarquable dans l'intervalle angulaire $[0, 60^\circ]$ et $[100, 120^\circ]$ successivement par rapport aux valeurs expérimentales, et ce justifié par la solidité (nombre de pales) élevée de la géométrie tripale par rapport à celle bipale, ainsi que la vitesse du vent maximale désignée pour le calcul de portance ($V_\infty=7.75$ m/s).

La validation a vécu un obstacle de l'indisponibilité des travaux sur ce nouveau type du rotor éolien en tandem tripale qui donne une originalité à cette étude.

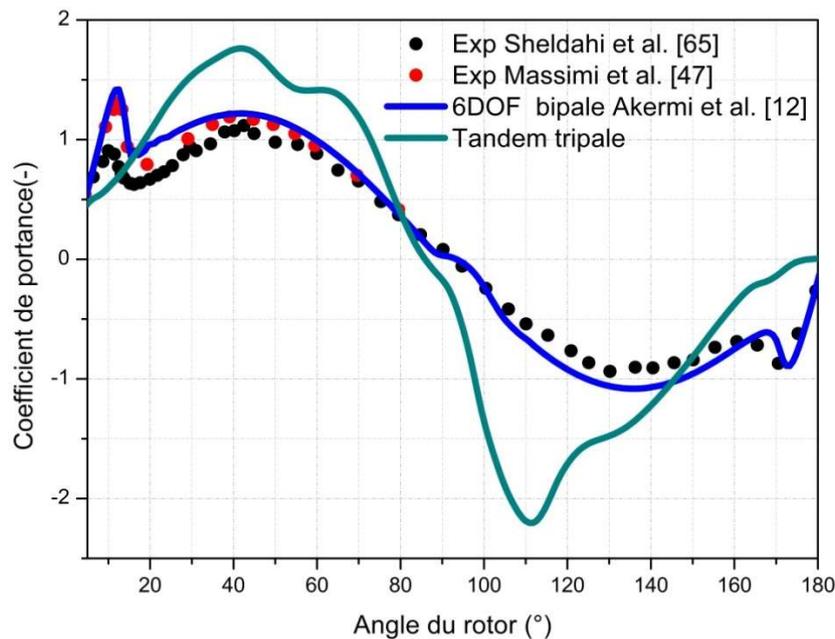


Figure 4.16: Validation expérimentale du coefficient de portance

4.3. ETUDE COMPARATIVE DE LA PORTANCE AERODYNAMIQUE

La valeur maximale de la portance est plus élevée pour la configuration en Tandem par rapport à celle tripale $C_l=2.25$ à l'angle azimutal $\theta = 110^\circ$ (Zone climatique de Nouadhibou), Figure 4.4.

La valeur maximale de la portance est plus élevée pour la configuration en Tandem par rapport à celle tripale $C_l=1.8$ à l'angle azimutal $\theta = 45^\circ$ (Zone climatique de Tiaret), Figure 4.5.

Les résultats numériques obtenus montrent que la portance est proportionnelle avec la vitesse du vent pour les deux zones climatiques ($V_{max}=7.75$ m/s pour Nouadhibou et $V_{max}=4.42$ m/s pour Tiaret).

L'accélération du rotor en Tandem est plus rapide que le rotor en tripale simple. Néanmoins, le freinage est plus important dans l'intervalle angulaire $[70, 110^\circ]$

4.3.1. Portance aérodynamique pour la zone climatique de Nouadhibou

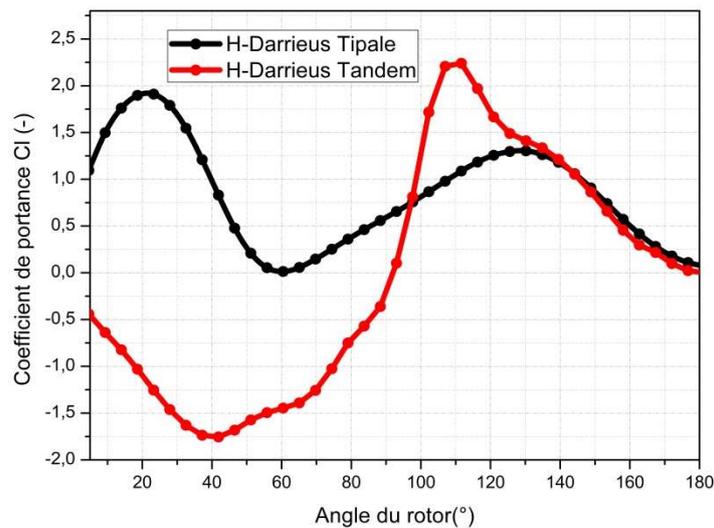


Figure 4.17: Coefficient de portance pour la zone climatique de Nouadhibou

4.3.2. Portance aérodynamique pour la zone climatique de Tiaret

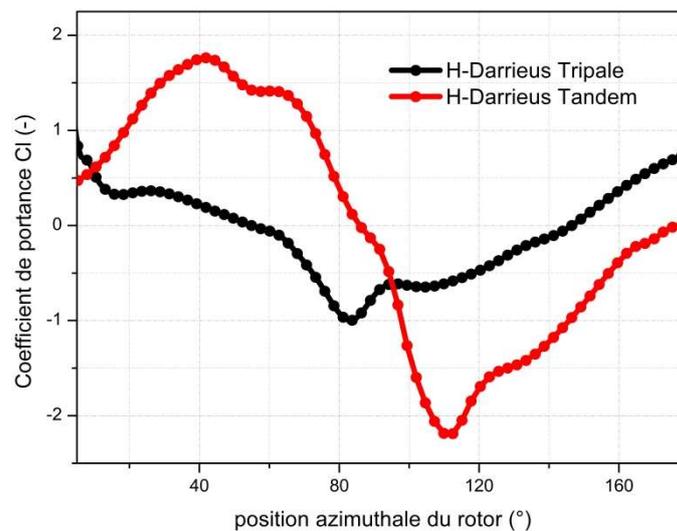


Figure 4.18: Coefficient de portance pour la zone climatique de Tiaret

4.4. ETUDE COMPARATIVE DE LA PUISSANCE AERODYNAMIQUE

Les résultats représentés sur les figures 4.6 et 4.7 montrent que le rendement du rotor éolien en Tandem est plus élevé que celui tripale simple pour les deux zones climatiques Nouadhibou et Tiaret ($C_{pmax} = 0.48$ et 0.26 successivement).

Le coefficient de puissance maximal détecté pour le mois de Mai pour la zone de Nouadhibou et Décembre pour la zone de Tiaret, qui représentent les périodes les plus venteuses de l'année.

4.4.1. Puissance aérodynamique pour la zone climatique de Nouadhibou

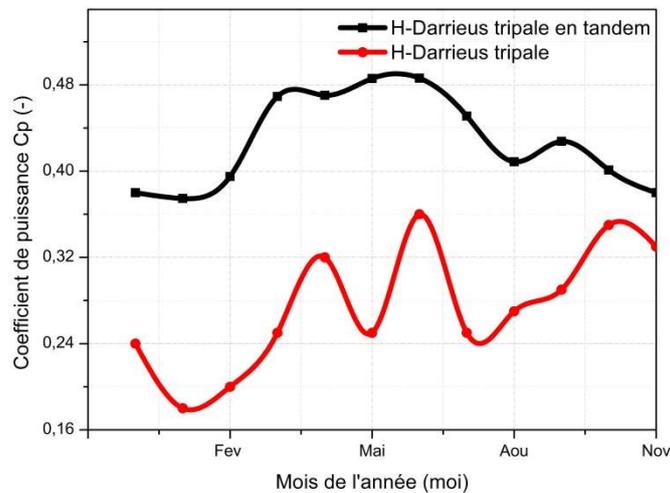


Figure 4.19: Coefficient de puissance pour la zone climatique de Tiaret

4.4.2. Puissance aérodynamique pour la zone climatique de Nouadhibou

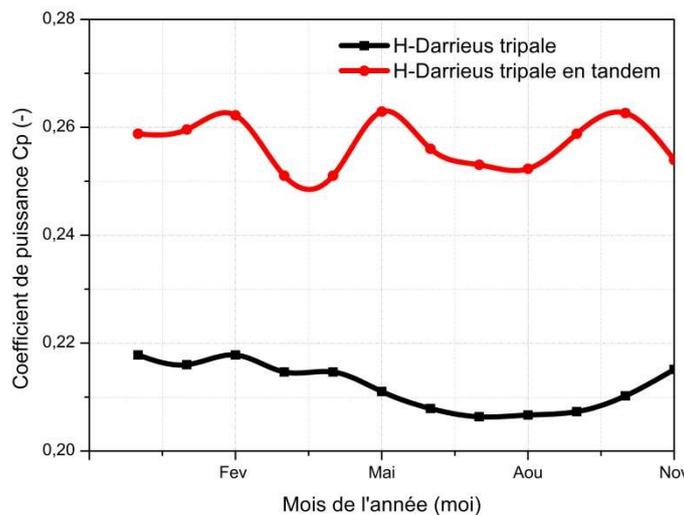


Figure 4.20: Coefficient de puissance pour la zone climatique de Tiaret

4.5. CONTOURS DE VITESSE ET DE PRESSION ($V_{\infty}=7.75$ m/s)

La vitesse spécifique prise en considération pour le calcul du coefficient de puissance est $\lambda=4$ (chapitre 2 : relation 2.16) dépendant du régime optimal de fonctionnement d'une éolienne H-Darrieus [12]

Les contours de vitesse sur les figures 4.8 et 4.10 des deux géométries indiquent une accélération importante de l'écoulement sur les partie extrados des pales en Tandem par rapport à celle tripale simple.

Le sillage après l'interaction des pales avec le vent incident est plus étalé pour la configuration en Tandem, ce phénomène est justifié précédemment par la chute de portance au cours de rotation du rotor entraînant le freinage de l'éolienne.

Les contours de pression sur les figures 4.9 et 4.11 des deux configurations indiquent une surpression sur les pales du rotor tripale plus élevée en face le vent incident bien qu'elle est inférieure pour celui en Tandem.

On peut conclure que le démarrage de l'éolienne H-Darrieus triple est plus rapide que celui de l'éolienne en Tandem.

4.5.1. Contours de vitesse et de pression pour l'éolienne H-Darrieus tripale :

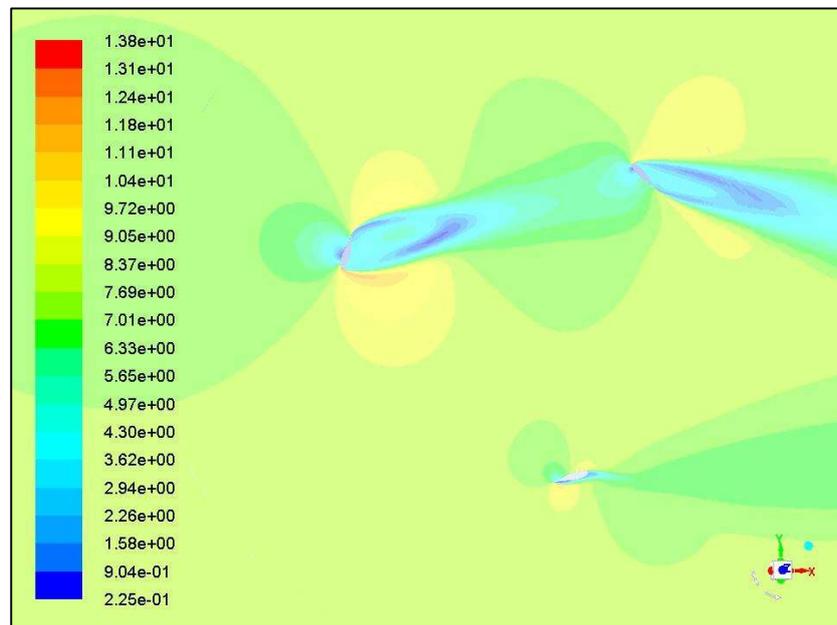


Figure 4.21: Contours de vitesse ($V_{\infty}=7.75$ m/s)

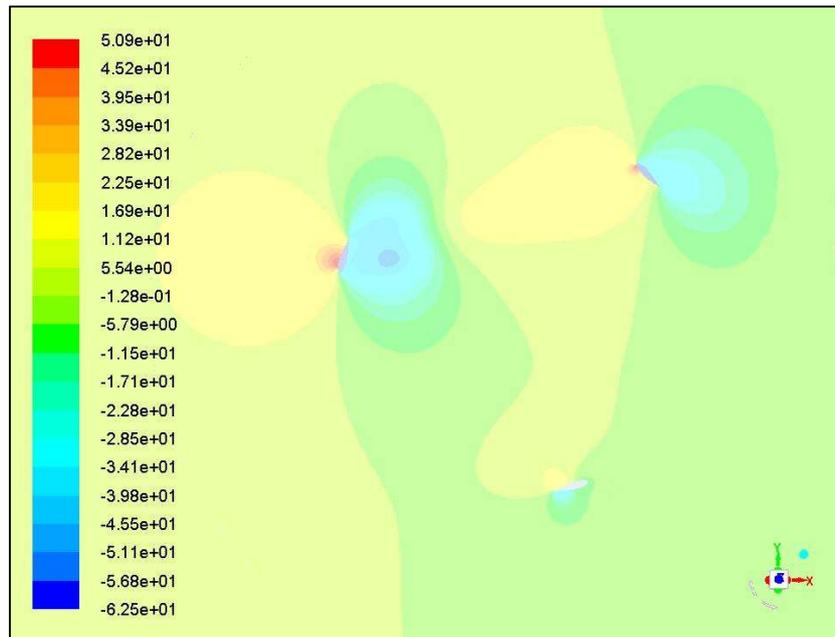


Figure 4.22: Contours de pression ($V_\infty=7.75$ m/s)

4.5.2. Contours de vitesse et de pression pour l'éolienne H-Darrieus tripale en tandem:

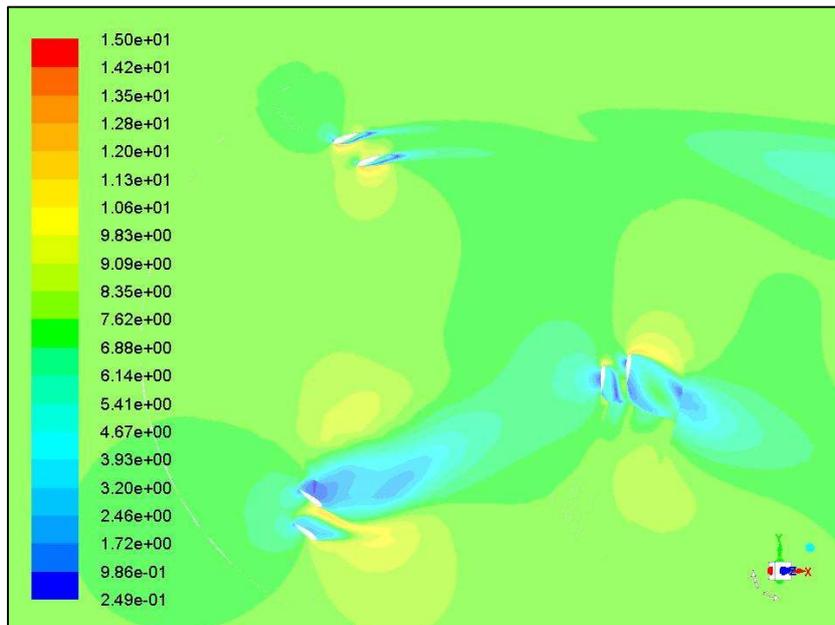


Figure 4.23: Contours de vitesse ($V_\infty=7.75$ m/s)

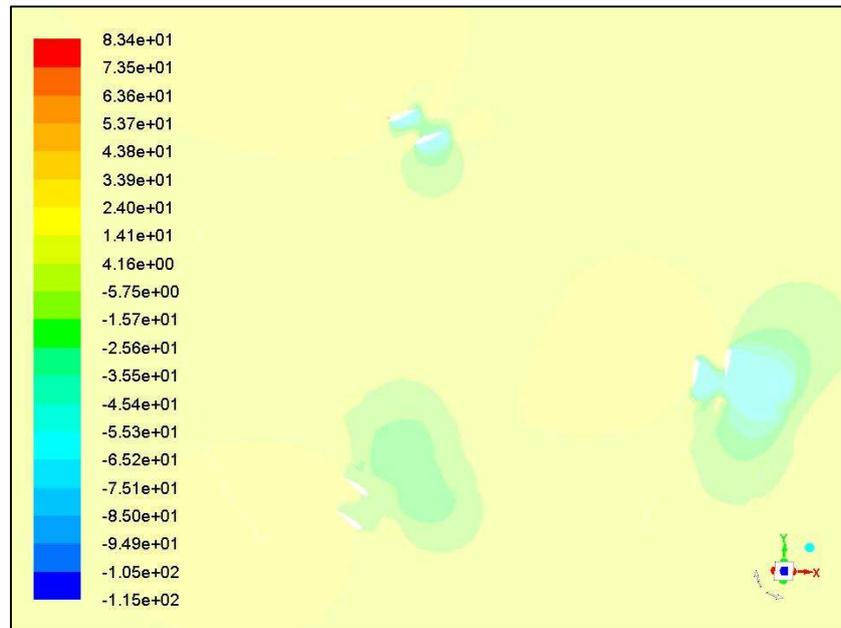


Figure 4.24: Contours de pression ($V_{\infty}=7.75$ m/s)

4.6. APPLICATION DE LA PUISSANCE AERODYNAMIQUE PRODUITE PAR L'EOLIENNE H-DARRIEUS TRIPALE EN TANDEM SUR UN PROTOTYPE

La puissance aérodynamique en KW est calculée par la relation citée précédemment au chapitre 2, relation (2.14).

4.6.1. Fiche technique du prototype réalisé à l'URERMS (Adrar) :

Caractéristiques techniques	Valeurs
Puissance nominale	10 kW
Vitesse du vent initiale	3 m/s
La vitesse du vent maximale	20 m/s
Nombre de pales	3
Matériaux des pales	Aluminum
Diamètre du rotor	8.9 m
Longueur des pales	7.6m
Surface balayée	68 m ²
Mât	14 m

Tableau 4. 1: Prototype du rotor éolien H-Darrieus tripale [48]

4.6.2. Puissance aérodynamique pour la zone de Nouadhibou :

Mois	Vitesse du vent	CP (-)	Puissance aérodynamique
Dec	5,39	0,38	2528.94
Jan	5,75	0,37	2989.47
Fev	6,03	0,40	3727.36
Mar	6,33	0,47	5066.38
Avr	7,14	0,47	7270.79
Mai	7,69	0,49	9470.31
Jun	7,75	0,49	9693.71
Jul	6,72	0,45	5803.76
Aou	6,14	0,41	4033.46
Sep	6,36	0,43	4701.42
Oct	6,08	0,40	3820.85
Nov	5,44	0,38	2599.98

Tableau 4. 2: Puissance aérodynamique estimée**4.6.3. Puissance aérodynamique pour la zone de Tiaret :**

Mois	Vitesse du vent	CP (-)	Puissance aérodynamique
Dec	4,42	0,26	954.18
Jan	4,36	0,26	915.84
Fev	4,42	0,26	954.18
Mar	4,22	0,25	798.48
Avr	4,22	0,25	798.48
Mai	3,86	0,26	635.51
Jun	3,58	0,26	507.00
Jul	3,47	0,25	443.93
Aou	3,44	0,25	432.52
Sep	3,53	0,26	486.06
Oct	3,78	0,26	596.81
Nov	4,25	0,25	815.63

Tableau 4. 3: Puissance aérodynamique estimée

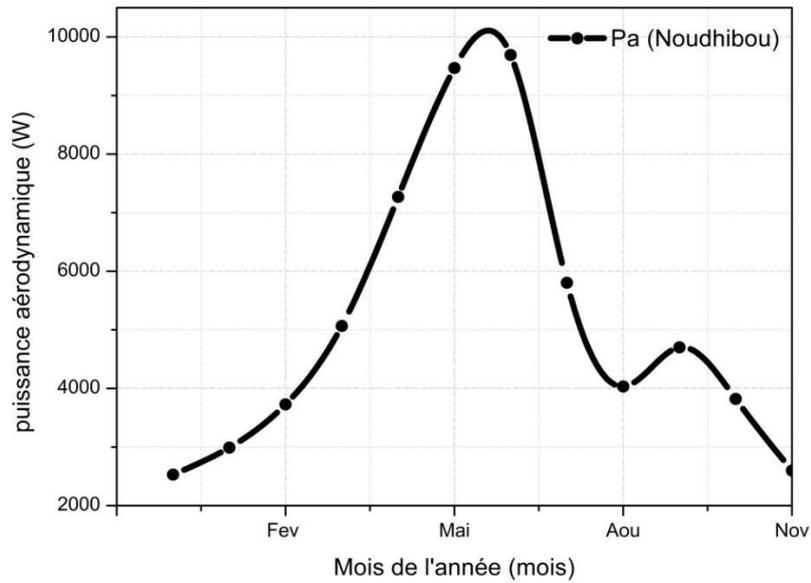


Figure 4.25: Puissance aérodynamique pour la zone de Nouadhibou

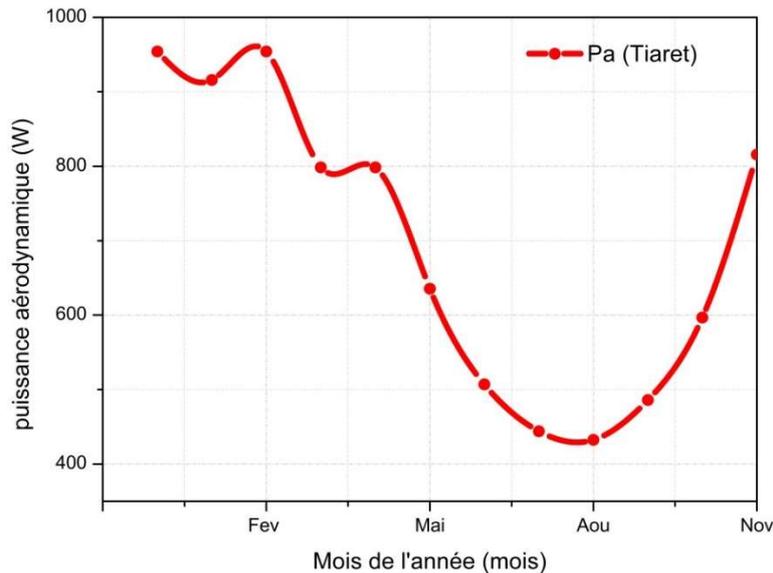


Figure 4.26: Puissance aérodynamique pour la zone de Tiaret :

Les résultats des puissances aérodynamiques estimées (figure 4.12) montrent que l'aérogénérateur en Tandem développe une puissance plus élevée pour les mois de Mars, Avril et Mai (période la plus venteuse à Nouadhibou durant l'année 2021)

La puissance produite par cette configuration donne sa valeur maximale pour la période de Décembre, Janvier et Février (période venteuse à Tiaret durant l'année 2021), figure 4.13.

La puissance aérodynamique estimée pour les deux zones montre que la production énergétique est plus élevée pour la zone climatique de Nouadhibou favorisant cette région pour l'adoption des nouvelles installations éoliennes en particulier de type H-Darrieus tripale en Tandem.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail se concentre sur une étude numérique paramétrique et comparative de deux configurations géométriques d'éolienne H-Darrieus, l'une de type tripale simple et l'autre tripale en Tandem (biplan).

L'étude comparative est basée en premier lieu sur la détermination des performances aérodynamiques des deux configurations mises en étude. Dont la portance aérodynamique prédite pour ces deux types favorise le rotor éolien tripale en terme de démarrage, néanmoins, la portance sur les pales du rotor en tandem est plus importante relativement à la surface portante des pales.

Le rendement estimé numériquement de l'aérogénérateur en tandem est le plus élevé ($C_{pmax}=0.48$) en particulier pour la zone climatique venteuse de Nouadhibou, dont la vitesse du vent dépasse 7.75 m/s.

L'inconvénient constaté après interprétation des résultats numériques obtenus est la possibilité de d'avoir un freinage aérodynamique lors de la rotation des pales, est du probablement au sillage aérodynamique généré par l'interaction des pales en tandem avec le vent à l'entrée du rotor éolien par rapport à la configuration tripale simple.

Les résultats d'étude peuvent être améliorés prochainement par la variation des paramètres géométriques et aérodynamiques comme le changement de l'angle d'incidence des pales et leur inclinaison (changement de pas) par rapport au plan du rotor éolien.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables en 2016. www.ren21.net, 2016.
- [2] C Acket, Jacques. Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives. TECHNIP, 2011.
- [3] Jean, B., Pierr, R. énergie alternative. Omiscience, 2011.
- [4] Bernard, W. promesses et réalités des énergies renouvelables. EDP sciences, 2013.
- [7] Leconte P., Rappin M., Szechenyi E., «Éolienne», Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie mécanique BM 4640, pp 1-23.
- [8] Lopez M., « Contribution à l'optimisation à un système de conversion éolien pour une production isolée », Thèse de Doctorat, université de Paris sud ; 2008
- [9] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [10] TIR ZOHEIR « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010
- [11] BOUKLI HACENE Fouad, Contribution à l'étude des Potentialités Energétiques Eoliennes de la vallée du Cheliff, En Vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat En Science, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Soutenue le 04/07/2012.
- [12] N. Akermi, « Etude des performances aérodynamiques d'une éolienne Darrieus par un modèle instationnaire à six degrés de liberté, » Thèse de doctorat, Université de science et technologie, Département de génie mécanique, Oran, 2018/2019.
- [13] Miguel Lopez, CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE CONVERSION EOLIEN POUR UNE UNITE DE PRODUCTION ISOLEE, Université Paris Sud - Paris XI, Français. fftel-00344978, 2008.
- [14] NASR SARAH et MOUBAYED NAZIH, Etude Comparative Entre Eolienne A Axe Horizontal Et Eolienne A Axe Vertical, ELECTROTEHNICĂ. ENERGETICĂ. ELECTRONICĂ, 2011.
- [15] F. Poitiers. « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone _a cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de L'Université de Nantes, France, 2003.
- [16] A.M.SYLLA. « Modélisation D'un Émulateur Éolien À Base De Machine Asynchrone À Double Alimentation ». Mémoire de maîtrise en génie électrique, université du Québec, 2013.
- [17] S.NASR, M.NAZIH. « Étude Comparative Entre Éolienne À Axe Horizontal Et Éolienne À Axe Vertical », BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IASI, Université Libanaise, Faculté de Génie, Tripoli, Liban, 2011.
- [19] Leconte P, Rapin M, Szechenyi E. Eoliennes, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640, (2001).

- [20] REDJEM. R, “ Étude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne ”, Département d’électrotechnique Université de Constantine 2009.
- [21] Diane Bastien « le potentiel des énergies solaires au Québec» B.Sc. Physique, candidate au doctorat en Génie du bâtiment, Designer Passive House 26 septembre 2013.
- [27] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l’aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No 36 mars 2004, pp. 1-14.
- [28] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l’énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l’académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [29] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [30] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [31] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l’électricité et de l’électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [32] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à 12, 2004.
- [33] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.
- [34] S El Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l’université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [35] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l’art », janvier 2006, pp. 1-129.
- [36] Robert Howell, N.Qin, J.Edwards, N.Durrani. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. Renewable energy 35 (2010)
- [37] Taher G, A.M.ali, M. Al-Ajmi, I.M.Hassan. Effect of number of blades and blade chord length on the performance of Darrieus wind turbine. American journal of mechanical engineering and automation 16-25 (2015).
- [38] M.H.Mohamed, A.M.Ali, A.A.Hafiz. CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter. Engineering science and technology, an international journal 18 (2015).
- [39] Payam Sabaeifard, H.Razzaghi, A.Forouzandeh. Determination of vertical axis wind turbine optimal configuration through CFD simulations. International conference on future environment and energy IPCBEE vol.28 (2012) © (2012) IACSIT Press, Singapore, 2012.
- [40] Taher G.Abu-El-Yazied, Hossam N.Doghiem, Ahmed M.Ali, Islam M.Hassan. Investigation of the aerodynamic performance of Darrieus vertical axis wind turbine. IOSR journal of engineering Vol.04, issue 05 (May.2014).

- [41] Samanoudy-El M, Ghorab AAE, Youssef SZ. Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine. *Ain Shams Eng J (Elsevier)* 2010;1:85-95.
- [42] M.A. Singh, Biswas, R.D. Misra. Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor. *Renewable Energy* 76 (2015) 381-387.
- [43] Thomas, R.N. (2004). Coupled vortex vertical axis wind turbine. Brevet américain US 6784566 B2. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [44] FADY JAMATI. « Etude Numérique D'une Eolienne Hybride Asynchrone », 2011, Université de Montréal.
- [45] Claessens, M.c., The design and testing of airfoils for application in small Vertical axis wind turbines, Master of science Thesis, Faculty of aerospace engineering, Delft University of Technology, November 9, 2006.
- [46] A.M.CISMILIANU, A.BOROS, I.C.ONCESCU, F.FRUNZULICA. New Urban Vertical Axis Wind Turbine Design. *INCAS BULLETIN*, Volume 7, Issue 4/ 2015, pp. 67 – 76.
- [47] G. Massini, E. Rossi, and S. D'Angelo , « Wind tunnel measurements of aerodynamic coefficients of asymmetrical airfoil sections for wind turbine blades extended to high angles of attack», In : *European Community Wind Energy Conference*, Denmark, 241 :245,(1988).
- [48] Mémoire DE FIN d'ETUDE sur le thème étude d'un système éolienne au réseau basé sur une gras auto-exiclé en 2016 -2017.
- [49] Zerari .Nazih, « Modélisation et option multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petit taille », thèse doctorat en science, université BADJE MOKHTAR-Annaba, 2015.
- [50] Kamel AMMOUR, « Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multimodèle», MEMOIRE, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, le 22/10/2014.
- [51] Laurent Beaudet. « Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical de forte solidité». Thèse de doctorat de l'université de poitiers.2014.
- [52] PARASCHIVOIU. I. « Wind Turbine Design, With Emphasis on Darrieus Concept ». Presses internationales Polytechnique, 2002.
- [53] Mme OULHACI Zohour Safia . « Etudes numérique et expérimentale des écoulements autour d'une éolienne Darrieus ». Thèse de doctorat de l'université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2018.
- [54] JAMATI Fady « étude numérique d'une éolienne hybride asynchrone » thèse en2011.
- [55] MEDDANE Fatima, Etude d'une éolienne à axe vertical, Thèse de Doctorat, département génie maritime, USTO, 2018.
- [56] M.YOUNSI, «Aeroacoustique et aérodynamique instationnaire, numérique et expérimentale des ventilateurs centrifuges a action », thèse doctorat en Mécanique de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2007.
- [57] F. JAMATI, « Etude numérique d'une éolienne hybride asynchrone,» Mémoire de l'obtention du diplôme de maitrise en science appliquées, Université de Montréal, Aout 2011.
- [58] Hamid. Lakhdari, « Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée », Magister en énergétiques avancés, Université M'HAMED BOUGARA, Boumerdes, 2009.

[59] Boubkeur.Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Université Paris XI UFR scientifique d'Orsay, 2006.

[60] 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», Mémoire Master 2, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, Energétique, 2016/2017.

[65] R. Sheldahl, and P. Klimas, «Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical.

Airfoil Sections through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines.SAND80-2114», Sandia National Laboratories, Technical Report, (1981)

WEBOGRAPHIE

[5] http://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne

[6] <http://www.info-eolien.com/historique.html>

[22] Energie solaire passive-wikipédia.

[23] <http://www.energies-renouvelables.org/accueil-systemes-solaires.asp>.

[24] www.explorateurs-energie.ch .

[25] Energie-Renouvelable.tv.htm.

[26] www.wwindea.org, World Wind Energy Association

[18] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-sont-types-eoliennes-1226/>

[Site 1] Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.arenidf.org>

[Site 2] Site Internet, www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.

[61] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quations_de_Navier-Stokes

[62] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00598800/document>

[63] <https://fr.weatherspark.com/y/31523/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Nouadhibou-Mauritanie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9>

[64] <https://fr.weatherspark.com/y/45822/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Tiaret-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9>

[66] https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-4-3-centrales_paraboles.html

[67] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/aerodynamique-des-eoliennes/>

ملخص

هذه الدراسة مخصصة لمحاكاة رقمية مقارنة لتكوينين هندسيين لتوربينات رياح ثلاثية الشفرات من النوع H-Darrieus. يتم استخدام العمل المنفذ للتحقق من أداء هندسة ترادفية ثلاثية الشفرات جديدة (ذات السطحين). H-Darrieus من النوع الهدف المرجو هو تقدير معاملات الرفع والقوة من أجل مقارنة الكفاءة والإخراج وإمكانية البدء في التصميمين، ثلاث شفرات وثلاث شفرات مترادفة.

النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة تظهر توافق نسبيًا مع الأعمال التجريبية والرقمية التي تم إجراؤها (Cp max = 0.48) ونشرها سابقًا. تكون كفاءة الدوار الترادفي أعلى من كفاءة الدوار المفرد ثلاثي الشفرات.

تعد المنطقة المناخية في نواذيبو (موريتانيا) هي الأكثر رياحًا خلال عام 2021 في إشارة إلى تباين متوسط سرعات الرياح المقاسة مقارنة بتيارت، ويفضل تركيب هذا النوع الجديد من التصميم في منطقة نواذيبو من حيث إنتاج الطاقة.

Abstract

This present study is devoted to a comparative numerical simulation of two geometric configurations of a three-bladed H-Darrieus type vertical axis wind turbine. The work carried out is aimed to verify the performance of a new three-blade tandem geometry (biplane).

The targeted objective is to estimate the lift and power coefficients in order to compare the efficiency, the efficiency and self-starting possibility for the two designs, three-bladed and three-bladed in tandem.

The results obtained by the simulation show a relatively significant agreement with the experimental and numerical work carried out and published previously. The efficiency of the tandem rotor is higher than that of the simple three-bladed rotor (Cp max = 0.48).

The climatic zone of Nouadhibou (Mauritania) is the windiest during the 2021 year according to the variation in average measured wind speeds comparing to Tiaret region. The setting of this new type of design in the Nouadhibou zone is preferable in terms of energy production.

Key words: Nouadhibou -Tiaret - performance - H-Darrieus - power - three-bladed - tandem – lift- torque

Résumé :

La présente étude est consacrée à une simulation numérique comparative de deux configurations géométriques d'une éolienne à axe vertical de type H-Darrieus tripale. Le travail effectué sert à vérifier les performances d'une nouvelle géométrie tripale en tandem (biplan).

L'objectif ciblé est d'estimer les coefficients de portance et de puissance afin de comparer l'efficacité, le rendement et l'éventuelle possibilité de démarrage pour les deux conceptions, tripale et tripale en tandem.

Les résultats obtenus par la simulation montrent un accord relativement significatif avec les travaux expérimentaux et numériques réalisés et publiés précédemment. Le rendement du rotor en tandem est plus élevé que celui du rotor tripale simple (Cp max = 0.48).

La zone climatique de Nouadhibou (Mauritanie) est la plus venteuse durant l'année 2021 référant à la variation des vitesses moyennes mesurées du vent par rapport à Tiaret, l'installation de ce nouvel type de conception à la zone de Nouadhibou est préférable en terme de production énergétique.

Les mots clés : Nouadhibou -Tiaret - performances- H-Darrieus – puissances –tripale - tandem – portance - couple