

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

THEME

**ETUDE DE L'IMPACT DE VENT-DE-SABLE SUR
LE FONCTIONNEMENT D'AEROGENERATEURS
DANS UN CLIMAT SAHARIEN**

Réalisé par :

KHATRA Ahmed

Promoteur :

Pr. A.SMAILI

Mr.M.BENBRAIKA

PROMOTION

2013

REMERCIEMENT

JE REMERCIE DIEU LE TOUT PUISSANT QUI M'A
DONNÉ LE COURAGE, LA VOLONTÉ ET LE POUVOIR
DE RÉALISER CE MODESTE TRAVAIL.

JE REMERCIE MES PARENTS, FRÈRES ET MON
UNIQUE SŒUR DE M'AVOIR SOUTENU
MORALEMENT ET MATÉRIELLEMENT DURANT
TOUT MON CURSUS.

JE REMERCIE MES PROMOTEURS MR."A.SMAILI" ET
MR. "M.BENBRAIKA" POUR M'AVOIR CONSEILLÉS ET
DIRIGÉS PENDANT LA RÉALISATION DE CE
TRAVAIL.

JE REMERCIE LES MEMBRES DU JURY, D'AVOIR
ACCEPTÉ D'ÉVALUER MON MODESTE TRAVAIL.

JE REMERCIE ÉGALEMENT LA SOCIÉTÉ
"ALCADWORKS" ET MR."A.KHEMKHOM" POUR
M'AIDER À FAIRE LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES
EFFECTUÉES PAR LE LOGICIEL "SOLIDWORKS".

Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents, la lumière de ma vie, en témoignage pour leurs amours et leurs sacrifices sans limites, et à qui je souhaite la bonne santé et que Dieu me les garde,

Mes frères : RIAD, HASSEN, WALID et ma petite sœur NAWEL que mon Dieu les bénit,

Toute ma grande famille et mes amis,

Tous mes collègues de la promotion,

Toute personne qui a contribué à ma formation,

Pour tous ceux qui comptent pour moi ...

Ahmed KHATRA.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو دراسة تأثير حبيبات الرمل على تشغيل التربينات الهوائية في مناخ صحراوي، لاسيما في الجنوب الجزائري الذي يتميز بسرعة رياح أعلى خاصة في منطقة أدرار. لهذا الغرض فإن أدوات "سي.اي.او" و"سي.اف.دي" (على سبيل المثال سوليدوركس) تستخدم للتعبير عن تأثيرات العاصفة الرملية على هيكل تربينات الرياح و خواصها الأيروديناميكية و هذه الدراسة ستكون من أجل مختلف أحجام حبيبات الرمل و مختلف سرعات الرياح بعد ذلك سندرس مشكلة التآكل التي تحدث على مستوى الشفرات .

كلمات مفتاحية :

حبيبات الرمل ، التربينات الهوائية ، الأيروديناميكية ، العاصفة الرملية ، التآكل .

Abstract:

The main purpose of this project is to investigate the impact of sand particles on the aerogenerators function in Saharan climate, in particular the Algerian south that is characterized by higher wind speed especially in the Adrar region. For this, CAO and CFD tools (e.g. SolidWorks) are used to express the effects of Sandstorm on the wind turbine structure and its aerodynamic performances and this study will be for different sizes of sand particles and also for different wind speeds. Afterward, we will study the erosion problem that occurs at the blades.

Keywords:

Sand particles, Aero-generators, Aerodynamic, Sandstorm, Erosion.

Résumé :

Le but essentiel de ce projet est d'investiguer l'impact des particules de sable sur le fonctionnement d'aérogénérateurs dans un climat saharien, en particulier le sud Algérien qui est caractérisé par des vitesses du vent plus élevées surtout dans la région d'Adrar. Pour ce fait, des outils de CAO et CFD (e.g. SolidWorks) seront utilisés pour exprimer les effets du vent-de-sable sur la structure et les performances aérodynamiques de la turbine éolienne et cette étude sera pour différentes tailles des particules de sable et même pour différentes vitesses du vent. Par la suite, on étudiera le problème d'érosion qui se passe au niveau des pales.

Mots clés :

Particules de sable, Aérogénérateurs, Aérodynamique, Vent-de-sable, Erosion.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : HISTORIQUE ET GENERALITES

I.1. Historique	6
------------------------------	----------

I.2. Généralités	13
-------------------------------	-----------

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.	13
---	----

I.2.2. Le vent	14
----------------------	----

I.2.2.1. Force de Coriolis	14
----------------------------------	----

I.2.2.2. Les différents vents	14
-------------------------------------	----

I.2.2.3. Vitesse du vent dans le monde	16
--	----

I.2.3. Situation énergétique mondiale.	16
---	----

I.2.4. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde.	17
---	----

I.2.5. Différentes configurations pour placer une éolienne.....	21
---	----

I.2.6. Différents types de machines électriques utilisées.....	21
--	----

I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	23
--	----

CHAPITRE II : ETUDES DE L'EOLINNE

II.1. Introduction.	27
---------------------------------	-----------

II.2. Etude structurelle de l'éolienne (Technologique) :	27
---	-----------

II.2.1. Introduction.	27
----------------------------	----

II.2.2. Types d'aérogénérateurs.....	29
--------------------------------------	----

II.2.3. Principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal.....	33
II.2.4. Caractéristiques technologiques des éoliennes :	34
II.2.4.1. Le supportage.....	34
II.2.4.2. Les pales.....	34
II.3. Etude aérodynamique de l'éolienne :	36
II.3.1. Théorie de Betz	36
II.3.2. Limite de Betz	40
II.3.3. Caractéristique du capteur éolienne :	42
II.3.3.1. Paramètre de vitesse	42
II.3.3.2. Coefficient de couple et le couple aérodynamique	43
II.4. Etude Mécanique de l'éolienne :	44
II.4.1. Les pales	44
II.4.2. L'arbre principal	45
II.4.3. Multiplicateur	46
II.4.4. La tour	47
II.4.5. La génératrice	48

CHAPITRE III : MODELE MATHEMATIQUE

III.1. Introduction	51
III.2. Définitions et hypothèses	51
III.3. Volume de contrôle fini	52

III.4. Equations gouvernantes	53
III.4.1. Ecriture intégrale des équations gouvernantes	54
III.4.2. Ecriture différentielle des équations gouvernantes	55

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction	59
IV.2. Calcul des performances aérodynamiques.....	59
IV.3. Etude de l'impact des particules de sable sur les pales.....	63
IV.4. L'effet d'érosion.	79
CONCLUSION	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90
ANNEXE	94

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1. moulin à vent antique	6
(a) : Moulin à vent persienne (neh, en Iran).	
(b) : Moulin à vent chinois.	
Fig.1.2. Moulin européenne	7
Fig.1.3. Moulin à vent américain	7
Fig.1.4. Eolienne de Marcellus-Jacobs 1930	8
Fig.1.5. Eolienne de Darrieus 1927	8
Fig.1.6. Résumé des différents concepts développés aux USA	9
Fig.1.7. Représentation de l'évolution des marchés entre 2000 et 2006	10
Fig.1.8. Eolienne de 100 kW de Grand Vent.	11
Fig.1.9. Conversion de l'énergie cinétique du vent.	13
Fig.1.10. L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (m/s)	16
Fig.1.11. Consommation mondiale d'énergies primaire par type d'énergie.	17
Fig.1.12. Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 1993 et 2009.	18
Fig.1.13. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).	20
Fig.2.1. Correspondance taille-puissance des éoliennes	29
Fig.2.2. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)	30
Fig.2.3. Effet du vent sur un corps creux	31
Fig.2.4. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).	31
Fig.2.5. Aérogénérateur à axe horizontal.	32
Fig.2.6. Les composantes de l'aérogénérateur.	33
Fig.2.7. Modélisation du rotor éolien par un disque actuateur	37
Fig.2.8. Paramètres opératoires d'une turbine Betz	41
Fig.2.9. La courbe de puissance en fonction de vitesse du vent.	41

Fig.2.10. La courbe de C_p et C_T	42
Fig.2.11. Schéma cinématique de l'éolienne à axe horizontal.....	44
Fig.2.12. Modélisation du chargement sur la pale.....	45
Fig.2.13. Chargement de l'arbre.....	45
Fig.2.14. Schématisation du chargement d'arbre.....	46
Fig.2.15. Schéma cinématique de multiplicateur.....	47
Fig.2.16. Les charges appliquées à la tour.	48
Fig.3.1. Volume de contrôle fini.	52
Fig.4.1. Distribution des contraintes sur la pale, obtenue à $V=6m/s$, sans effet de sable.	63
Fig.4.2. Distribution des déplacements sur la pale, obtenue à $V=6m/s$, sans effet de sable....	64
Fig.4.3. Distribution des déformations sur la pale, obtenue à $V=6m/s$, sans effet de sable....	64
Fig.4.4. Distribution des contraintes sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm)	65
Fig.4.5. Distribution des déplacements sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm).....	66
Fig.4.6. Distribution des déformations sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm)	66
Fig.4.7. Distribution des contraintes sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)	67
Fig.4.8. Distribution des déplacements sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)	67
Fig.4.9. Distribution des déformations sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)	68
Fig.4.10. Distribution des contraintes sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)	68
Fig.4.11. Distribution des déplacements sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)	69
Fig.4.12. Distribution des déformations sur la pale obtenue à $V=6m/s$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)	69
Fig.4.13. Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.	73

Fig.4.14. Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.	74
Fig.4.15. Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.	74
Fig.4.16. Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.	75
Fig.4.17. Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.....	75
Fig.4.18. Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.	76
Fig.4.19. Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.	76
Fig.4.20. Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.	77
Fig.4.21. Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.	77
Fig.4.22.Erosion causé par particule sur un métal.....	79
Fig.4.23.Schéma illustre l'angle d'incidence.	80
Fig.4.24.Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 6m/s.	81
Fig.4.25. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 9m/s.	82
Fig.4.26. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 12m/s.	83
Fig.4.27. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 20m/s.	84
Fig.4.28.Schéma illustre les différentes composantes de vitesse à l'impact.....	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : La vitesse spécifique en fonction de nombre de pale.....	43
Tableau.3.1.Variables spécifiques de l'ECG.	55
Tableau.4.1.Vitesses de rotation en fonction de vitesse du vent.	60
Tableau.4.2.Puissances en fonction de vitesse du vent.	61
Tableau.4.3.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 6 m/s.	70
Tableau.4.4.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 9 m/s.	71
Tableau.4.5.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 12 m/s.	71
Tableau.4.6.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 20 m/s.	72
Tableau.4.7.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 25 m/s.....	72
Tableau.4.8.Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 6m/s	81
Tableau.4.9.Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 9m/s.	82
Tableau.4.10.Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 12m/s.	83
Tableau.4.11.Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 20m/s.	84

NOMENCLATURE

P	Puissance	[kW]
U	Vitesse	[m/s]
F_v	La force du vent	[N]
D	Diamètre	[m]
A	Section du disque rotor	[m ²]
E	Epaisseur	[m]
M	Moment	[N.m]
R	Rayon	[m]
S	Air d'une section	[m ²]
p	pression	[Pa]
I	Moment quadratique	[mm ⁴]
A	Facteur d'induction axiale	
T	Poussée	[N]
C_p	Coefficient de puissance	
C_T	Coefficient de poussée	
F_c	Force centrifuge	[N]
C_s	Coefficient de sécurité	
C_a	Le couple aérodynamique	[N.m]
C	Le couple utile	[N.m]
σ_e	Limite élastique	[MPa]
N	Vitesse de rotation	[tr/min]
P	Poids	[N]
θ	Angle	[°]
D_i	Diamètre intérieur	[m]
h	hauteur	[m]

σ_{eq}	Contrainte équivalente	[MPa]
M_f	Moment de flexion	[N.m]
M/O	Moment	[N.m]
F	Force	[N]
C_q	Coefficient de couple	
σ	Contrainte	[MPa]
τ	Contrainte de cisaillement	[MPa]
λ	Vitesse spécifique	
ρ	Masse Volumique	[kg/m ³]
\dot{m}	Débit Massique	[kg/s]
ω	Vitesse de rotation	[rad/s]
Z	Nombre des dents de l'engrenage	
P'	Puissance conventionnelle	[kW]
C_p	Capacité calorifique du fluide à pression constante	[J/kg.K]
dS	Elément de surface	
J	Vecteur de flux combiné advection-diffusion	[kg/m.s ²]
J_D	Vecteur de flux diffusif	[kg/m.s ²]
J_C	Vecteur de flux advectif	[kg/m.s ²]
Γ_ϕ	Coefficient de diffusion	
d Ω	Elément de volume	
μ	Viscosité dynamique de fluide	[kg/m.s]
∇	Gradient nabla	[m ⁻¹]
ϕ	Variable de l'équation de conservation générale	
ϕ_{sp}	Condition limite de la variable ϕ	
Ω	Volume de contrôle	
\vec{n}	Vecteur normal à la frontière du volume de contrôle	

\vec{V}	Vecteur vitesse de l'écoulement	[m/s]
V	Vitesse de l'écoulement	[m/s]
u	Composante de la vitesse suivant x	[m/s]
v	Composante de la vitesse suivant y	[m/s]
T	Température	[K]
S_ϕ	Terme de source	
V_c	La vitesse verticale à la surface des pales	[m/s]
V_s	La vitesse tangente à la surface.	[m/s]
E_c	Energie cinétique de particule incidente	[J]
α	Angle d'impact (angle d'incidence)	[°]

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité, vue le développement technologique du monde actuel, élargissant ainsi son utilisation dans plusieurs domaines, notamment la médecine, l'éducation et l'économie.

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite 'renouvelables', permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

Ces dernières années, l'énergie éolienne s'est considérablement développée, générant une croissance significative de la puissance installée dans le monde (de l'ordre de 30 à 40% en rythme annuel). Cette tendance est poussée, d'une part, par la limitation et l'épuisement progressif des ressources fossiles (hydrocarbures, charbon...) et fissiles (uranium) et d'autre part aux émissions de gaz à effet de serre provoquées par les hydrocarbures, ceci sans parler de la production de déchets radioactifs difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles que seront sans conséquences pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs n'a cessé d'évoluer, c'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal)

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masse d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est crée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne.

Cependant, les régions sahariennes sont connues pour leurs conditions climatiques extrêmes pour ce genre de projets ouverts à l'air libre. En effet, les vents de sable et les niveaux de température extrêmement élevés, qui caractérisent justement ces régions, ont une influence grave sur le fonctionnement des éoliennes.

Pour ce fait, ce travail est consacré pour l'étude de l'impact de vent-de-sable sur le Fonctionnement d'aérogénérateurs et leurs performances aérodynamiques et qui a pour but de montrer les effets indésirables de ce phénomène afin de bien gérer l'installation des éoliennes.

Le premier chapitre est divisé en deux parties ; dans la première, nous exposons l'historique des éoliennes depuis les moulins à vents, puis on passe au développement qui subit le marché éolien. Dans la seconde partie, nous citons les différents types du vent et les descriptions de la situation énergétique dans le monde en donnant des statistiques des dernières années.

Le second chapitre est consacré pour les différentes études de l'éolienne ; au début nous exposons l'état de l'art de différentes technologies et leurs évolutions, en parlant sur les différents types d'éoliennes et leurs composants, puis en fera un rappel des principales théories dont nous aurons besoin lors de l'analyse de la structure. Nous utilisons les caractéristiques aérodynamiques de la géométrie du profil, pour calculer les forces agissantes sur ces dernières puis on applique aussi la théorie de Betz afin d'avoir une approximation de l'énergie maximale récupérable de l'énergie cinétique du vent. Par la suite, nous passera en brève sur l'étude mécanique en appliquant les lois de résistance des matériaux (RDM) sur les organes de l'éolienne.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre représente le modèle mathématique qui traduit l'écoulement de l'air (vent) à travers l'éolienne, dans ce chapitre nous développons les équations gouvernantes ensuite nous donnons l'équation différentielle générale qui permet de passer aux équations de Navier-Stokes, de la continuité et de l'énergie.

Dans le dernier chapitre, nous abordons des simulations numériques sur les pales et on va comparer les résultats obtenus, avec et sans effet de sable afin de trouver une explication convenable, et on finira avec l'effet d'érosion qui se réalise surtout au niveau des pales.

CHAPITRE I

HISTORIQUE ET GÉNÉRALITÉS

I.1. HISTORIQUE

L'idée d'exploiter le vent pour produire l'énergie mécanique remonte jusqu'à l'antiquité les premiers moulins à vent à axe vertical ont été dans l'orient (Inde, Tibet, Afghanistan, Perse, Egypte) pour des applications agricoles : irrigation, moudre du grain, (voir fig. 1.1)

En Europe, les premiers ont été apparus au moyen âge (principalement en France, en Italie, en Espagne et au Portugal). Ceux-ci été uniquement à axe horizontale (ce qui fait une énigme pour les historiens), constitués principalement par quatre pales placées en croix (voir fig. 1.2). Elles servaient principalement à moudre du gain. Les Hollandais participèrent activement au développement des moulins en Europe, grâce aux nombreuses améliorations dans la conception et à l'invention de différents types de moulins, En effet, pendant le treizième siècle, la Hollande utilisa les moulins a vent pour pomper l'eau et ainsi assécher les polders.

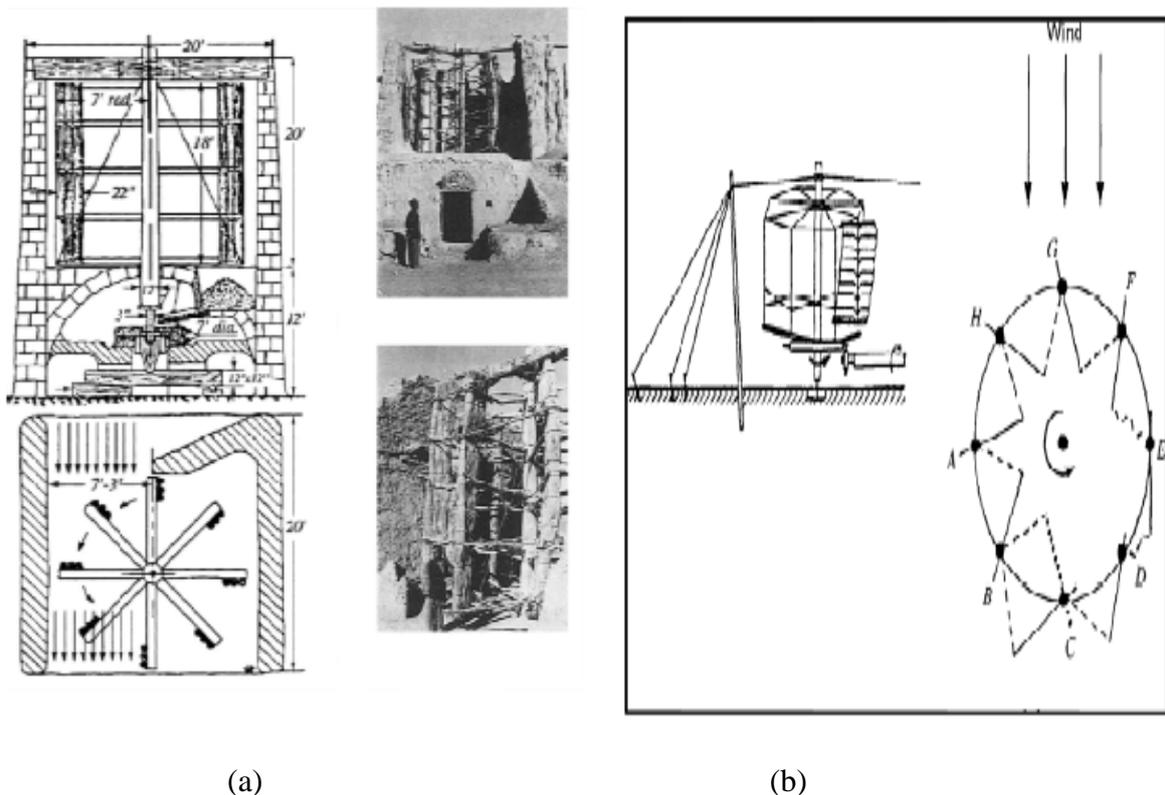


Fig. 1.1. Moulin à vent antique [1]

(a) : Moulin à vent persienne (neh, en Iran).

(b) : Moulin à vent chinois.

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

L'utilisation des moulins à vent a connu un grand succès jusqu'au dix neuvième siècle. Mais avec la révolution industrielle et l'apparition de la machine à vapeur, du moteur à combustion et plus tard le développement de l'électricité, le développement des éoliennes et l'exploitation des moulins à vent sont délaissés. Leur utilisation ont décliné jusqu'après la deuxième guerre mondiale.



Fig.1.2. Moulin européenne. [28]

Aux états unis d'Amérique les moulins étaient utilisés pour exploiter l'eau, dit « américains », sont tous similaires dans leur principe : être robuste et pouvoir fonctionner - et donc s'orienter - de façon autonome. Le rotor est multipale pour obtenir un couple de démarrage élevé avec de faibles vitesses de vent.

Un système d'effacement du rotor ou des pales ou de parties constituantes des pales garantit la survie de la machine en cas de vents violents. (Voir fig.1.3)



Fig.1.3. Moulin à vent américain

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

Pendant la fin de dix-neuvième et pendant le vingtième siècle, plusieurs projets d'éoliennes voient le jour. L'éolienne danoise de Poul La Cour (parmi les pionniers), L'éolienne lente multipale développée en Amérique par la Rural Electrification Administration, l'éolienne de Marcellus et Joseph Jacobs (voir fig.1.4).

L'éolienne rapide, inventée en France par l'Académicien français Darrieus, entraînait des générateurs électriques (voir fig.1.5). En 1950, Johannes Juul développa un modèle éolien avec trois pales, utilisant des dispositifs de réglages aérodynamiques de la puissance dans le cas de décrochage et du contrôle de dérapage et autres... ([1], [2])



Fig.1.4. Eolienne de Marcellus-Jacobs
1930 [1]



Fig.1.5. Eolienne de Darrieus 1927 [2]

En Europe et aux États-Unis, l'intérêt pour l'énergie éolienne avait perdu de sa force dans les années 1960, suite au faible prix du baril de pétrole. Il faudra donc attendre 1973 et le 1er choc pétrolier pour que les politiques énergétiques soient remises à plat.

Dès 1974, un grand programme de recherche a été lancé aux USA pour assurer le développement de la filière éolienne. Financé par le DOE « Department Of Energy », il fut confié à la NASA. L'idée était de profiter des connaissances du milieu aéronautique pour concevoir de nouvelles machines. Les partenaires impliqués dans ces développements provenaient des industries aéronautiques pour la fabrication des pales (Lockheed, Boeing et Hamilton) et industries électriques (General Electric et Westing-house).

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

Dans ce programme on étudia d'abord les anciennes réalisations. Ces réflexions ont aboutit à plusieurs réalisations, toutes basées sur des configurations bipales (downwind), il fut des prototypes de grosses machines de puissance 100kW en 1977, de 200 kW en 1977, 2 MW en 1979. (Voir fig.1.6)

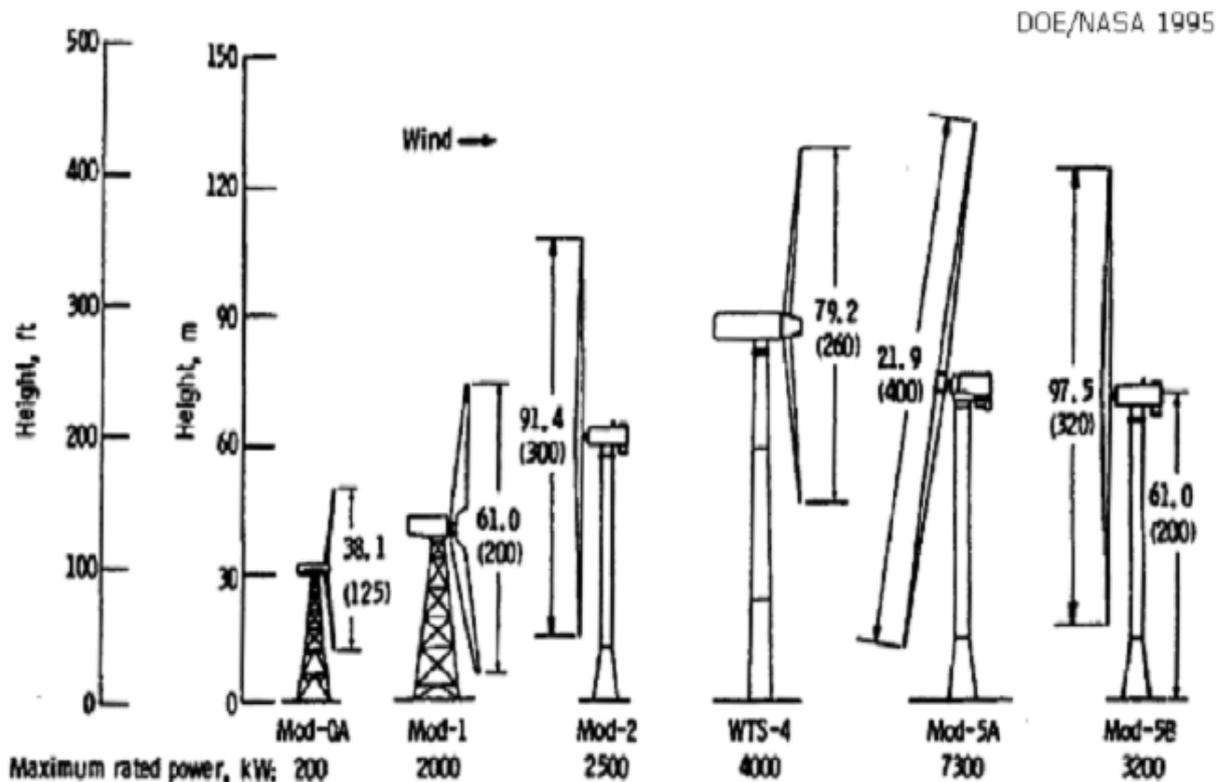


Fig.1.6. Résumé des différents concepts développés aux USA [2]

Ces énormes machines ont connues des problèmes de fatigues dus principalement à l'aéroélasticité et à l'effet de mat, qui ont parfois conduit à des échecs et des pertes considérables. Des expériences similaires ont vu le jour principalement en Allemagne, en Grande Bretagne (3 MW en 1987) en Suède (3 MW en 1983).

Malgré le grand nombre de prototypes réalisés, rarement ceux qui sont commercialisés. Malgré ces échecs le concept de bipale a resté le plus attrayant jusqu'à la fin des années 1990. [2]

Le début du XXI siècle a vu le monde de l'éolien subir des changements conséquents. Alors que son développement avait été fluctuant car lié étroitement aux contextes énergétiques et aux volontés politiques des années 60 à 80, cette filière industrielle à part entière est

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

progressivement devenue suffisamment mature pour devenir économiquement intéressante. Après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale et les prises de conscience environnementale ont accentué le besoin en énergies propres, indépendantes et durables où l'éolien occupe une place privilégiée.

Fort de son potentiel de croissance (à 2 chiffres depuis une quinzaine d'années !), celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché et des acteurs de l'éolien.

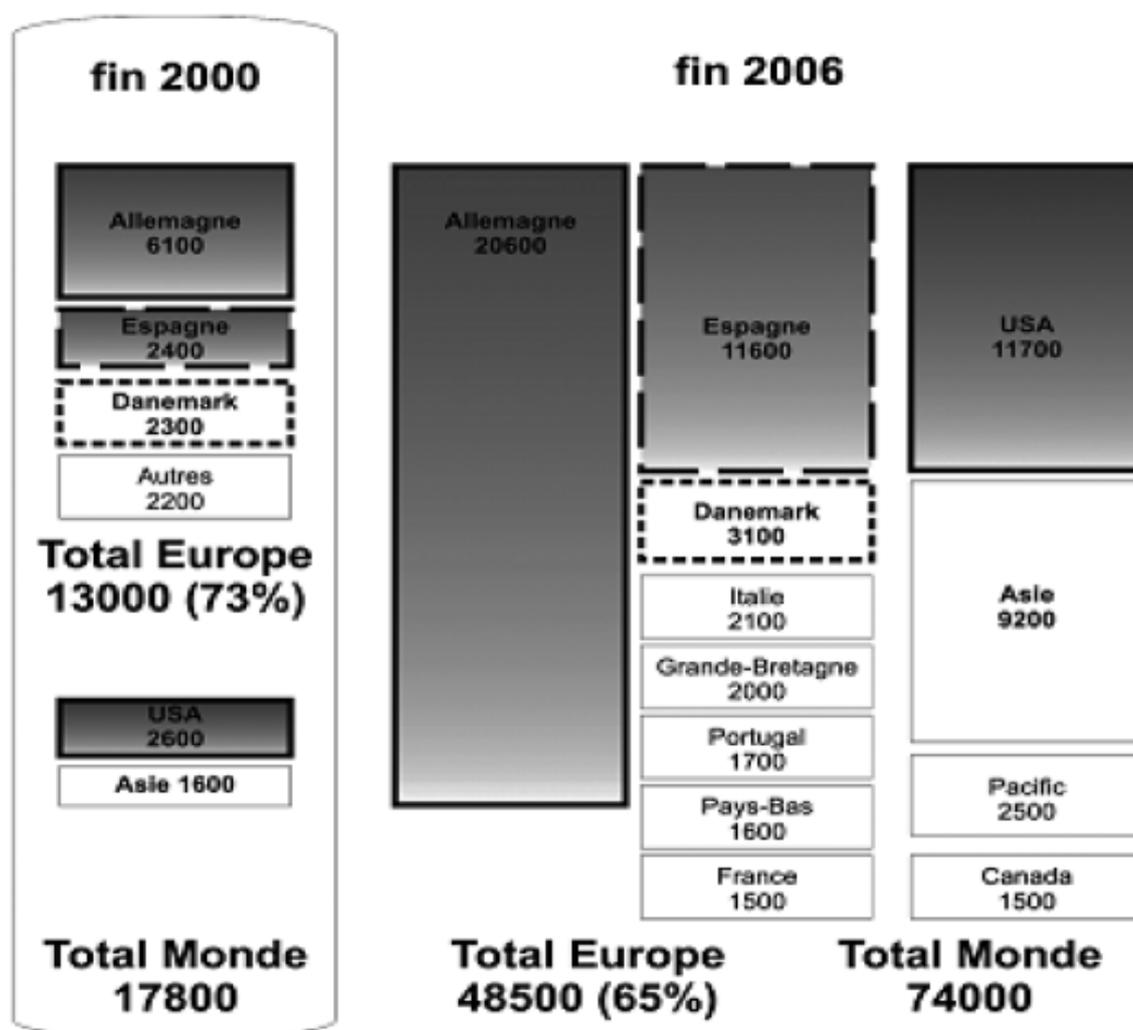


Fig.1.7. Représentation de l'évolution des marchés entre 2000 et 2006

En Algérie,

la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger)(fig. 1.8). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut rachetée par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.[4]

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications.



Fig.1.8. Eolienne de 100 kW de Grand Vent. [4]

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications.

Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et, de plus en plus grandes.

Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15m en 1989. est aujourd'hui de 7.5 MW, avec un diamètre de 127m environ. La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 215 GW en juin 2011. [5]

I.2. GENERALITES

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et parfois pour le pompage d'eau, ce type des machines entre dans la catégorie des énergies renouvelables. La figure 1.9 illustre le principe de fonctionnement d'une éolienne destinée à produire l'électricité.

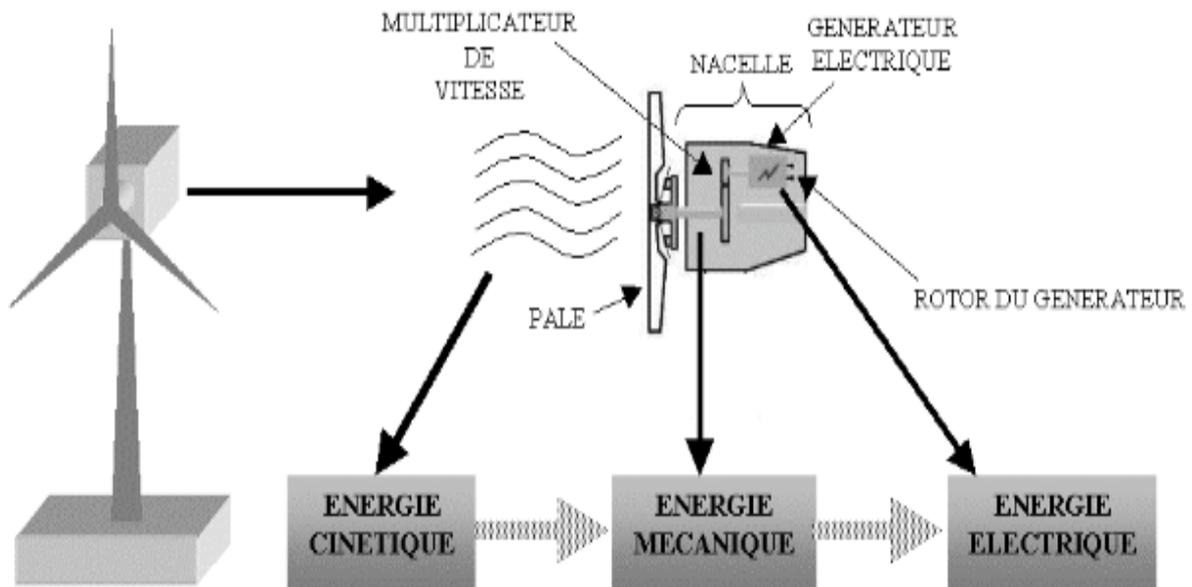


Fig.1.9. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "**d'aérogénérateurs**"

I.2.2. Le vent

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre.

I.2.2.1. Force de Coriolis :

La force de Coriolis s'exerce sur tout corps en mouvement à la surface terrestre, et produite par l'accélération complémentaire due à la rotation de notre planète. Ce phénomène a été mis en évidence au XIX^e siècle par le mathématicien et ingénieur français Gaspard Coriolis. La force de Coriolis, bien que de faible intensité, joue un rôle prépondérant dans la direction des vents et des courants océaniques. Ceux-ci sont déviés vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. La force de Coriolis est nulle à l'équateur et maximale aux pôles, c'est une force centrifuge.

Contrairement à une idée reçue, la force de Coriolis n'est pas à l'origine du sens du tourbillon d'eau dans une baignoire (ou un lavabo) qui se vide. Elle est bien trop faible à cette échelle pour avoir un effet significatif. Le sens du tourbillon dépend en fait des conditions initiales de l'eau stagnante (l'eau n'étant jamais totalement au repos, elle a un sens de rotation privilégié qui va s'accroître lors de son écoulement dans le siphon).

I.2.2.2. Les différents vents

Il existe quatre types principaux de vents : les vents dominants, les vents cycloniques et anticycloniques, les vents saisonniers et les vents locaux.

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

- **Les vents dominants**

Correspondent aux grandes tendances planétaires. Leur direction est très différente suivant la latitude où l'on se trouve sur le globe :

- près de l'équateur, l'air chaud monte et génère des vents verticaux. Il y a très peu de vent horizontal. Dans leur jargon maritime, les navigateurs appellent cette région de vents faibles et variables le « pot au noir », également appelée zone des calmes équatoriaux (ou zone de convergence intertropicale) par les météorologues ;
- dans les régions tropicales, entre 10° et 30° de latitude dans les deux hémisphères, les vents dominants viennent de l'est. Ce sont les alizés ;
- aux moyennes latitudes (entre 30° et 60°), les vents dominants viennent de l'ouest. Ils entraînent avec eux les perturbations atmosphériques cycloniques (ou dépressions) qui apportent de la pluie ;
- dans les régions polaires, les vents viennent de l'est et ont tendance à instaurer une circulation anticyclonique.

- **Cyclones et anticyclones**

La Terre connaît des vents cycloniques et anticycloniques. Les cyclones sont des zones de basses pressions (jusqu'à 970 hPa) avec des vents ascendants qui amènent de la pluie. À l'opposé, les anticyclones sont des zones de hautes pressions (jusqu'à 1 040 hPa) avec des vents descendants qui amènent du beau temps. Le climat de la France métropolitaine est par exemple conditionné par les positions de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande.

Ces systèmes de vents font plusieurs kilomètres de diamètre. La force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre, tend à dévier ces vents vers la droite dans l'hémisphère Nord (inversement dans l'hémisphère Sud). Dans l'hémisphère Nord, les vents anticycloniques tournent alors dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que les vents d'origine cyclonique tournent dans le sens inverse (et inversement dans l'hémisphère Sud). [22]

- **Vents locaux**

De la même façon qu'il existe des variations saisonnières de température et de pression au-dessus des continents et des océans, on observe des changements quotidiens qui ont des effets

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

similaires, mais plus localisés. En été, en particulier, la terre est plus chaude que la mer dans la journée, et plus froide la nuit. Les variations de pression ainsi provoquées génèrent un système de brises dirigées vers la terre pendant la journée (brise de mer) et vers la mer pendant la nuit (brises de terre). Ces brises de mer et de terre font subir leur influence jusqu'à environ 50 km des côtes. Le même phénomène se produit en montagne et engendre les brises de montagne et de vallée.

I.2.2.3. Vitesse du vent dans le monde :

la vitesse du vent est généralement mesurée par le mètre par seconde,

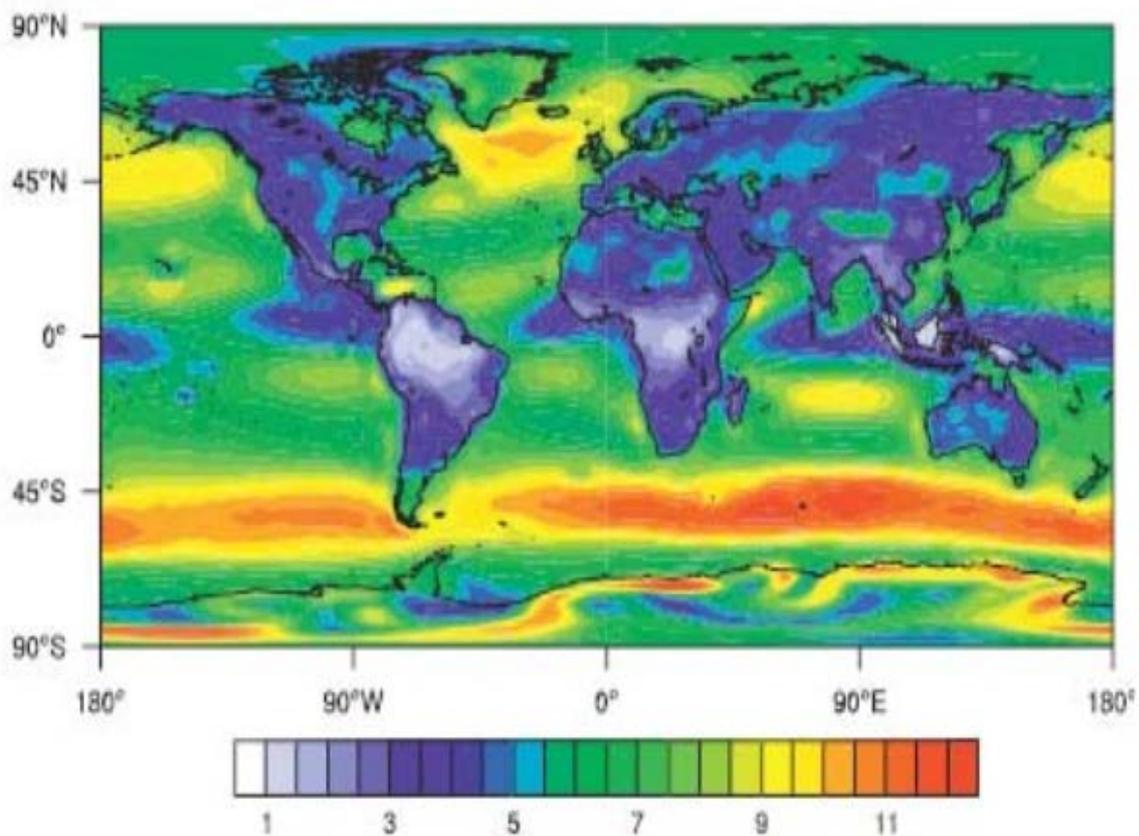


Fig.1.10. L'un des atlas mondiaux des moyennes annuelles de vitesses de vent (m/s) [9]

I.2.3. Situation énergétique mondiale :

La situation énergétique mondiale actuelle est caractérisée par une augmentation de demande d'énergie de 1.8% par an de 2000 à 2030, en effet la consommation de l'énergie est presque doublée en 40 ans (voir fig.1.8), et une diminution de l'intensité énergétique de 1.2% par an. Diminution de la réserve de pétrole. Une domination totale des énergies fossiles 85%.

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

Augmentation des prix des énergies primaire. Apparition des problèmes climatiques (Réchauffement climatique et effet de serre). Développement technologique en matière des énergies renouvelable, mais leur contribution à la demande énergétique reste toujours faible.

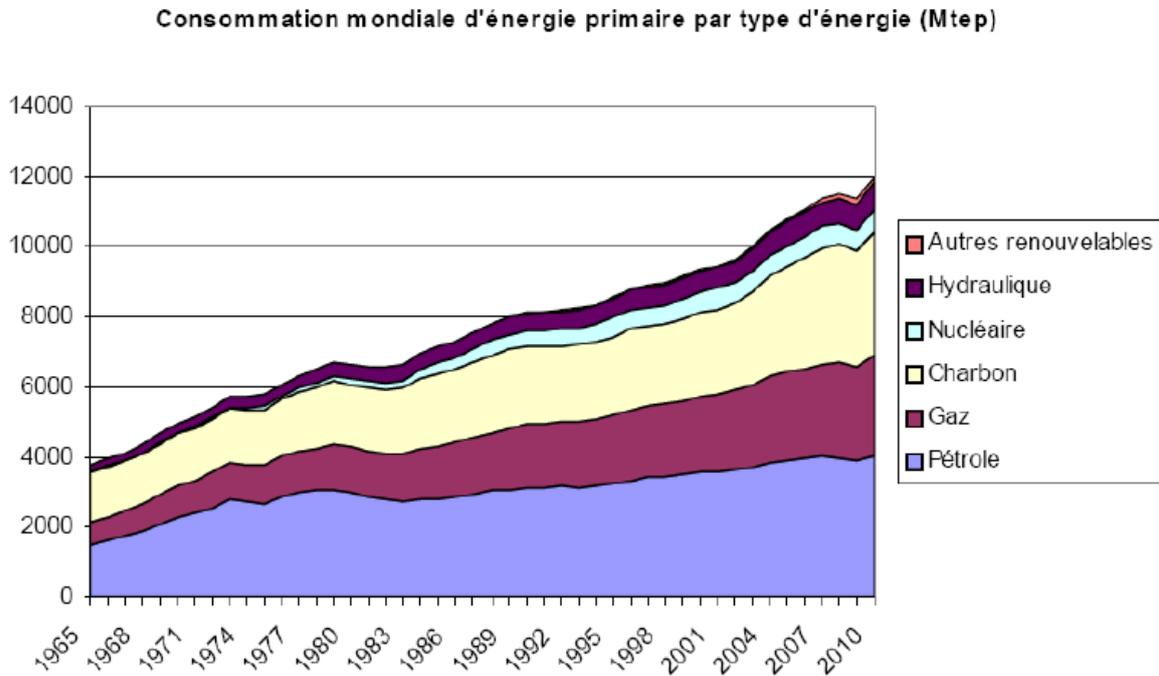


Fig.1.11 Consommation mondiale d'énergies primaire par type d'énergie [35]

1.2.4. Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde :

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences, le marché mondial de l'éolien a pu résister. En effet, selon les premières estimations, 37 GW, soit près de 10 GW de puissance supplémentaire par rapport à l'année 2008 ont été installées. A cet égard, la Chine a doublé en 2009 sa capacité de production (+ 13 GW) devançant ainsi la progression des Etats-Unis (+ 10 GW).

L'Europe, qui est traditionnellement le plus gros marché en terme d'énergie éolienne, a installé dans la même année 10,5 GW (dont 2,5 en Espagne et 1,9 en Allemagne), elle dispose désormais d'un parc éolien de 74,7 GW qui a produit 163 TWh en 2009, ce qui représente 4,8% des besoins en électricité. Selon un rapport commandé par GWEC, la capacité installée mondiale actuelle (157,9 GW) (Fig.2) permet de produire 340 TWh d'électricité propre et d'économiser 204 millions de tonnes de CO₂ par an. L'éolien représente désormais 340

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

millions de MWh de production électrique par an, soit 2% de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 63 milliards de dollars.[10]

La France possède un bon potentiel éolien, grâce notamment à son littoral étendu. De ce fait, une puissance éolienne de 4 492 MW répartie sur 446 fermes éoliennes était installée fin 2009. Aujourd'hui, quatre régions leaders en terme de puissance installée sont distinguées :

La Picardie (630 MW),

La Lorraine (490 MW),

Le centre (490 MW)

Et la Bretagne (430 MW). [11]

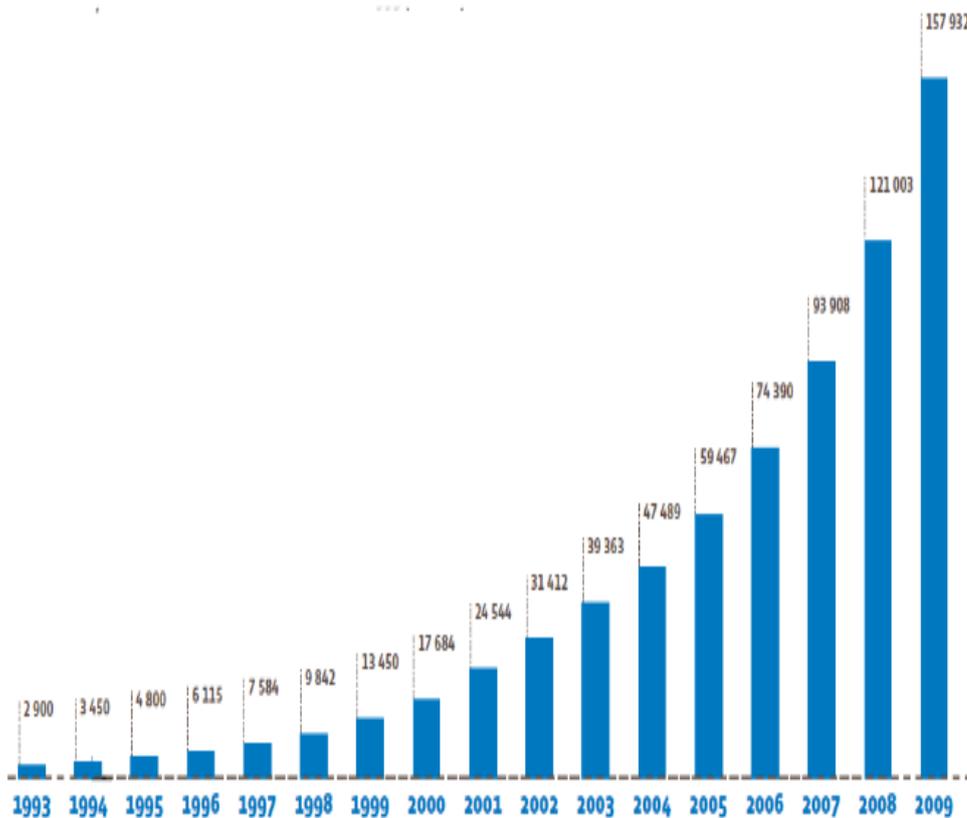


Fig.1.12. Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 1993 et 2009. [12]

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées. Au Moyen Orient, l'Iran a installé 17 MW de nouvelle capacité. Le total de la puissance éolienne installé jusqu'en 2008, était de 669 MW. [13]

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

En Algérie,

En ce qui concerne l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement en énergies renouvelables dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique.

Heureusement, ces dernières années une décision présidentielle sur l'orientation de l'Algérie vers les énergies renouvelables a été prise. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelables a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 40% de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030.

Dans ce contexte, 65 projets pour la période 2011/2020, dont 10 projets pour la seule phase pilote 2011-2013 ont été identifiés. Ces projets seront menés dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation [14]. En matière d'emploi, la réalisation du programme des énergies renouvelables prévoit la création de plus de 200 000 emplois directs et indirects.

L'Algérie vise ainsi l'investissement dans le domaine de la production électrique à partir de la filière éolienne pour atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe Sonelgaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui c'était prévue d'être opérationnelle en fin de 2012, et injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar.

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représentée à la figure 1.13, [15], montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Cependant, les sites côtiers d'Oran, Béjaïa et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que la région délimitée par Béjaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes choisies est élevée.

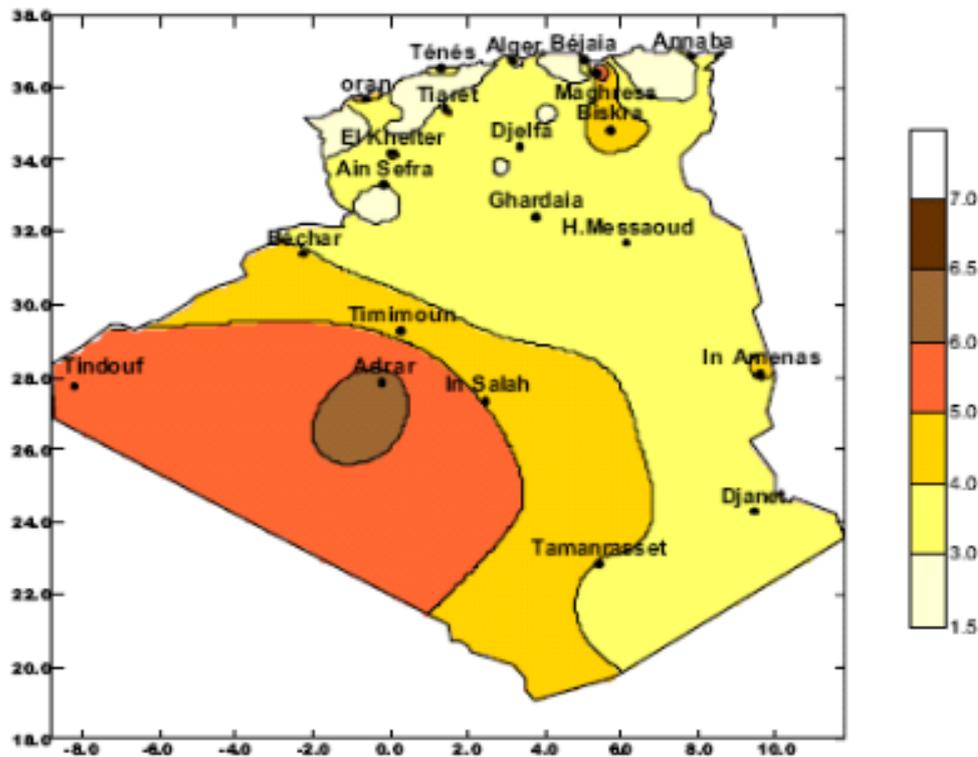


Fig.1.13. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)

Durant la dernière décennie, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW notamment pour tirer parti au maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages.

En effet, cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse du vent. Par ailleurs, les convertisseurs statiques utilisés pour le contrôle de cette machine peuvent être dimensionnés pour transiter seulement une fraction de la puissance totale (qui représente la puissance du glissement).

Afin de répondre à la demande en puissance, les fermes constituées de plusieurs éoliennes s'avèrent la solution la plus adaptée. La majorité de ces fermes est contrôlée de manière à fournir leur maximum de puissance au réseau électrique et elles se déconnectent lors d'une défaillance qui survient sur ce dernier.

I.2.5. Différentes configurations pour placer une éolienne :

- **Eolienne face au vent**

L'écoulement de vent attaque le rotor par la face. Le principal avantage de cette configuration est qu'elle permet d'éviter l'effet d'ombrage (nuance) derrière la tour qui est très important comparé au même effet avant la tour. En effet l'écoulement commence à se plier loin avant d'attaquer la tour, ce qui provoque un léger effet de nuance. Notons qu'à chaque fois que l'une des pales du rotor coïncide avec la tour la puissance subit une perturbation qui entraîne une diminution du rendement de l'éolienne.

- **Eolienne sous le vent**

L'écoulement du vent est d'incidence derrière le rotor. Le principale avantage de cette configuration est la possibilité de suivre la direction du vent sans nécessité de mécanisme annexes à condition que le rotor et la nacelle aient été conçu de sorte à permettre cette opération. Cet avantage permet une construction plus flexible des pales du rotor du fait de la mobilité de la nacelle. La flexibilité du rotor permet, aux grandes vitesses, d'absorber une partie des charges sur la nacelle et ce en se pliant tout en restant dans la limite d'élasticité du matériau. La rotation de la nacelle pour suivre le vent n'est pas sans danger.

Le risque se situe au niveau du câble électrique qui, avec la rotation de la nacelle, subit une torsion. Au-delà d'un certain nombre de tours le câble sera cisailé ce qui est très dangereux d'où nécessité d'un compteur de tours et d'un mécanisme qui permet le redressement de la nacelle. L'inconvénient majeur est le passage du rotor dans une zone d'ombrage qui provoque des fluctuations de la puissance et une fatigue des organes mécaniques.

I.2.6. Différents types de machines électriques utilisées :

La configuration électrique d'un aérogénérateur à une grande influence sur son fonctionnement, pour cela on a deux types de fonctionnement qui caractérisent la rotation des éoliennes, l'un avec une vitesse constante et l'autre avec une vitesse variable.

Les avantages principaux de ces deux types sont comme suit [19] :

- **Fonctionnement à vitesse fixée.**
 - Système électrique plus simple.
 - Pas besoin d'un système électronique de commande (cher) et plus grande fiabilité.
 - Peu de probabilité d'excitation à la fréquence de résonance des éléments de l'éolienne.

- **Fonctionnement à vitesse variable.** [19] [20]
 - Augmentation du rendement énergétique.
 - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
 - Réduction des efforts subis par le train de puissance.
 - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones sous leurs diverses variantes :

- **Les générateurs synchrones:** c'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). La gamme de puissance de ces générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien varie de 500 kW à 2 MW.
- **Les générateurs asynchrones:** c'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très faible et moyenne puissance. La gamme de puissance de ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien varie de moins de 20kW.
- **Les machines à courant continu :** présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids.
- **Les générateurs à réluctances variables :** sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple. [27]

I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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 désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

- **Les avantages**

- ✓ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement. [16]
- ✓ 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. ... [17]
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- ✓ Chaque mégawattheure 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. [17]
- ✓ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance. [18]
- ✓ 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.
- ✓ 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.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✓ 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.
- ✓ 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.

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article 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.
- ✓ 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.

- **Les inconvénients**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- ✓ L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif. 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.
- ✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, 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
- ✓ 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.
- ✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique, 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

CHAPITRE I HISTORIQUE ET GENERALITES

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 suite, 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. Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.[18]

CHAPITRE II

ETUDES DE L'ÉOLIENNE

II.1. Introduction

L'énergie éolienne a été longtemps oubliée alors qu'elle était déjà exploitée depuis l'antiquité avec l'utilisation des moulins à vent. Cependant, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent notamment après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états producteurs d'énergie fossile. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien [21] pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique. Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnent à vitesse variable permettant l'augmentation de la puissance produite. Le développement des convertisseurs statiques et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, On va faire une étude aérodynamique ainsi qu'une étude mécanique sur les composants de l'aérogénérateur.

II.2. Etude structurelle de l'éolienne (Technologique) :

II.2.1. Introduction :

Un aérogénérateur, plus couramment 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.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [23] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites. [30]

La figure (2.1) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

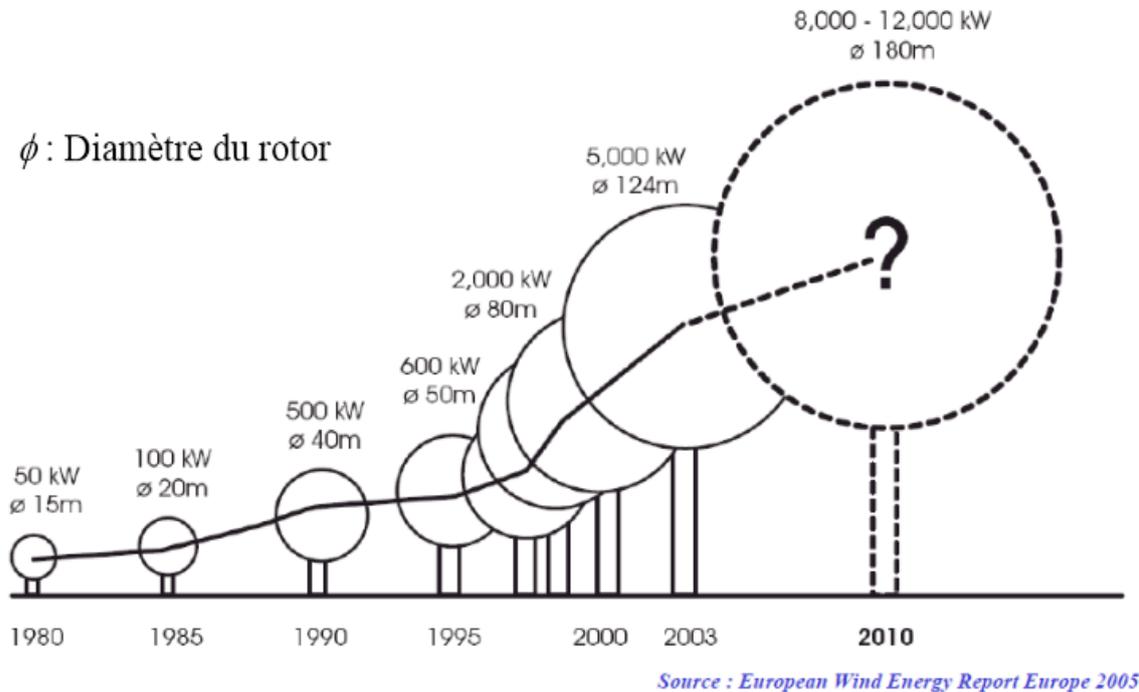


Fig.2.1. Correspondance taille-puissance des éoliennes

II.2.2. Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types: les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. [24][25][26]

II.2.2.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique.

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924).

– Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig.2.2). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique...etc

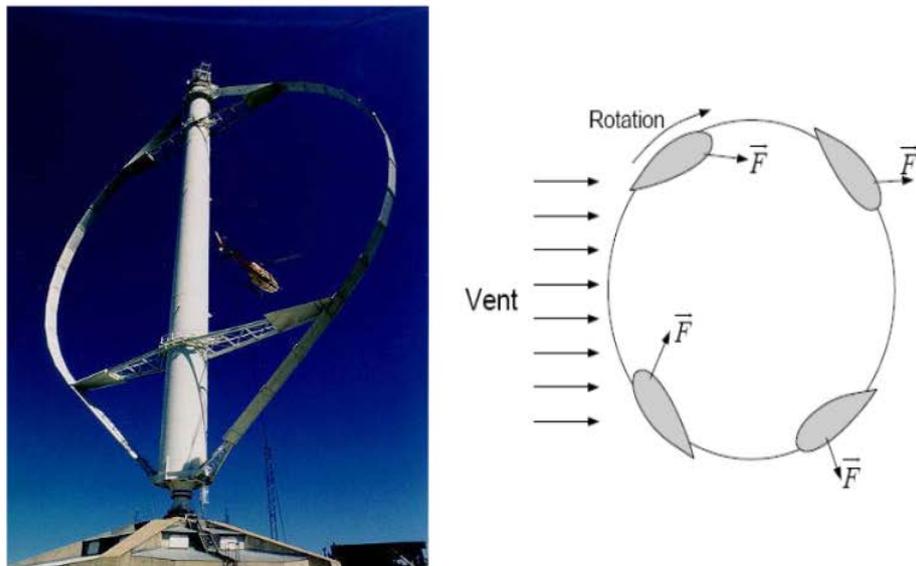


Fig.2.2 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [32]

– Aérogénérateurs à rotor de Savonius :

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1929. Elle comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (fig.2.3 et fig.2.4)

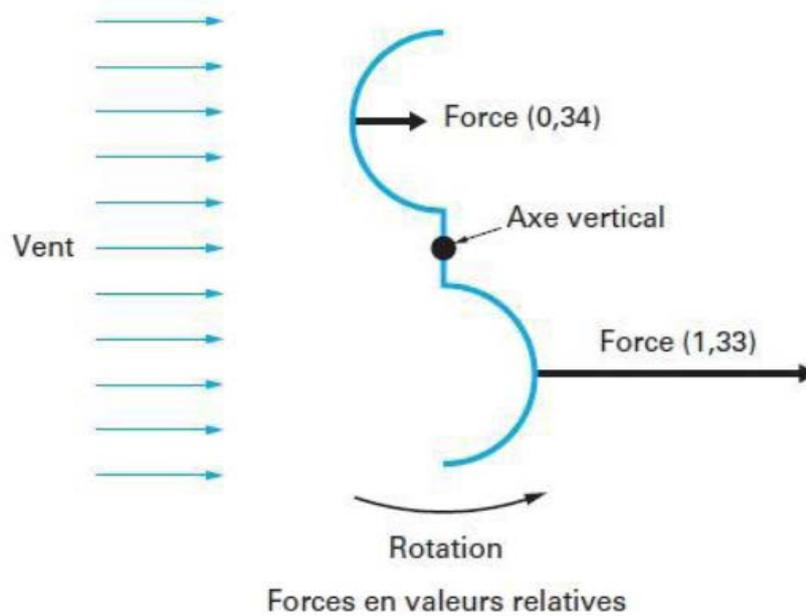


Fig.2.3.Effet du vent sur un corps creux

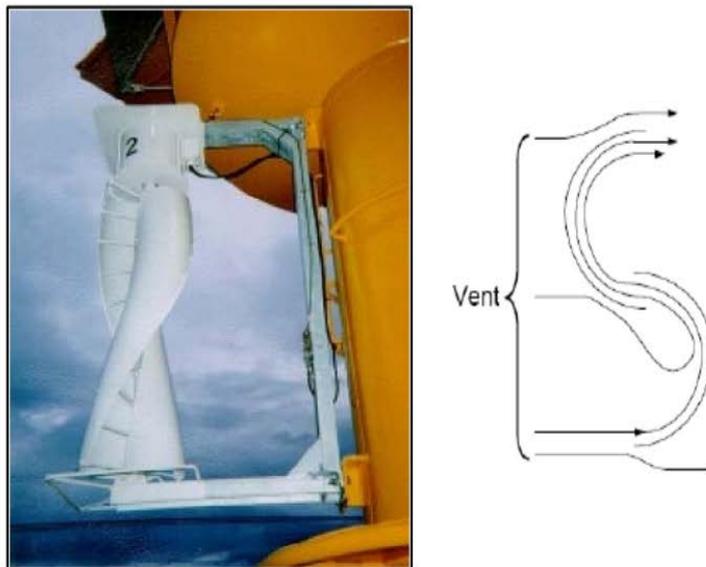


Fig.2.4. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).[32]

- Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :
 - Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
 - La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance,
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées,
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

II.2.2.2. Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (Fig. 2.5) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. [33]

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



Fig.2.5. Aérogénérateur à axe horizontal.

II.2.3. Principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal [34]

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure 2.6.

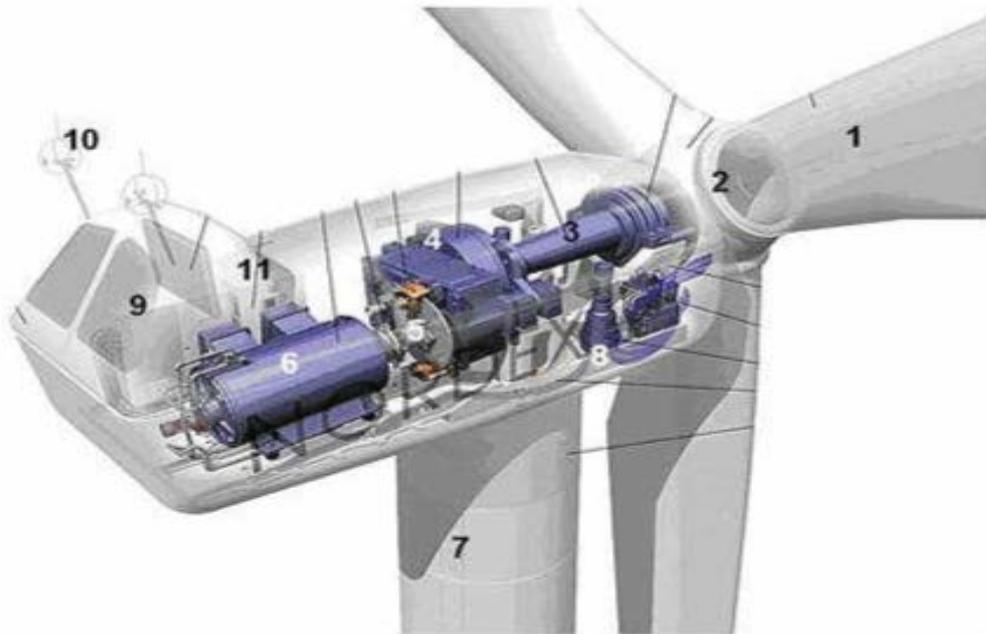


Fig.2.6. Les composantes de l'aérogénérateur.

1. Les pâles : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor et qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

2. Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

3. L'arbre primaire (ou arbre principale) : relie les pales au multiplicateur.

4. Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse.

C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. Il sert aussi à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

5. L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

6. Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

7. Le mât (la tour) : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales. . Au sommet du mat se trouve la nacelle.

8. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

9. Le système de refroidissement : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

10. Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11. Le système de contrôle électronique : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

II.2.4. Caractéristiques technologiques des éoliennes

II.2.4.1. Le mât : [6]

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. L'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le mât de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagé ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mâts en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

II.2.4.2. Les pales : [7]

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux
- le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat ...

✓ **Longueur :**

-Le diamètre de l'hélice est en fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

✓ **Largeur :**

-La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

✓ **Le profil :**

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

✓ **Les matériaux :**

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche. Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez

légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- **le bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

- **le lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.

- **les alliages d'aluminium** : Pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

- **les aciers** : La forte inertie réduit les variations de la vitesse de rotation et ainsi qu'elle donne une puissance plus stable à la sortie.

- **les matériaux composites** : Leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

II.3. Etude aérodynamique de l'éolienne :

II.3.1. Théorie de Betz :

L'une des théories élémentaires utilisées dans la conception des rotors d'éoliennes est la théorie attribuée à Betz (1929) (modèle du disque actuateur). Les développements de Betz peuvent être utilisés pour déterminer, et ce pour une éolienne idéale, la poussée développée par le vent et l'influence du rotor sur l'écoulement du vent. [29]

Modèle du disque actuateur : en mécanique des fluides, le disque actif est défini comme une surface de discontinuité où des forces de surface agissent sur l'écoulement. Ce modèle est extrêmement simplifié et repose sur les hypothèses suivantes :

Hypothèses :

- Fluide homogène et incompressible;
- La géométrie du rotor est effacée et ce dernier n'est représenté que par un disque d'épaisseur nulle de diamètre D du rotor;
- Ecoulement stationnaire, irrotationnel ;
- Poussé uniforme dans tout le disque rotor;
- La pression statique loin en amont et en aval du rotor est égale à la pression statique de l'ambiance.
- Non rotation du disque ;

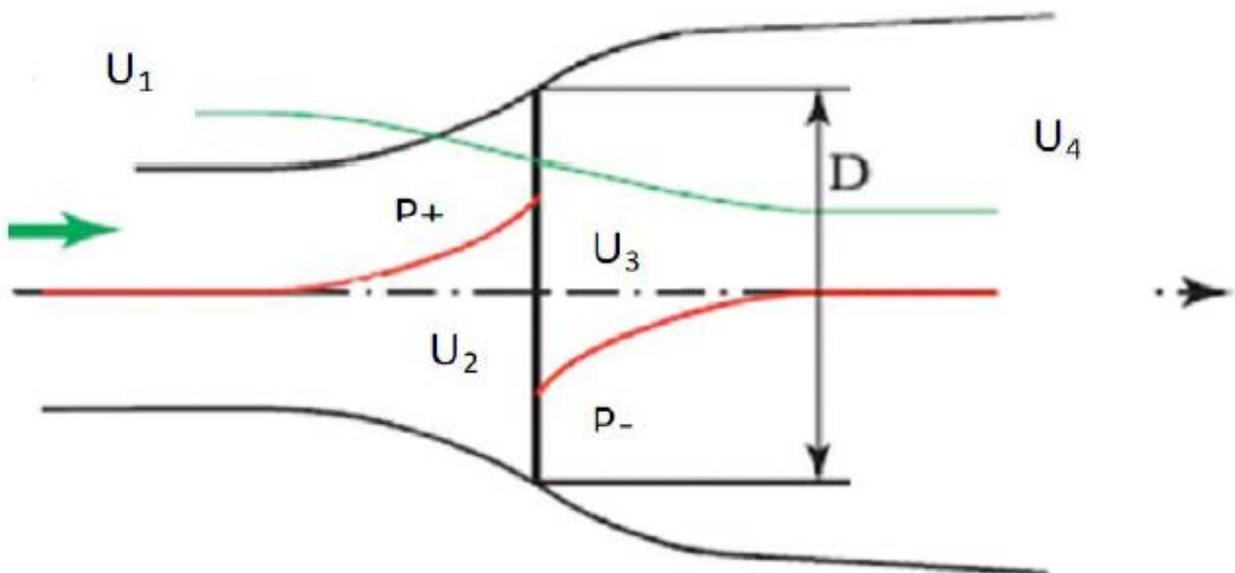


Fig.2.7. Modélisation du rotor éolien par un disque actuateur [29].

Facteur d'induction axiale

En appliquant la conservation de quantité de mouvement au volume de contrôle on peut écrire :

$$T = U_1 (\rho_a A_1 U_1) - U_4 (\rho_a A_4 U_4) \quad (2.1)$$

Avec :

A_1, A_4 : Section de l'entrée et de sortie du disque rotor

ρ_a : Masse volumique de l'air

U : vitesse de l'air

Sachant que l'écoulement est stationnaire $dm/dt = 0$ on aura :

$$(\rho_a A_1 U_1) = (\rho_a A_4 U_4) = \dot{m} \quad (2.2)$$

Donc

$$T = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (2.3)$$

La poussée étant positive, la vitesse décroît de l'amont vers l'aval $U_1 > U_4$, A présent essayons de déterminer une relation entre les vitesses des différentes zones. En amont et en aval du disque, nous avons aucune production de travail, ce qui nous permet d'appliquer l'équation de Bernoulli dans les deux volumes contrôle amont et aval.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_a U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_a U_2^2 \quad (2.4)$$

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho_a U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho_a U_4^2 \quad (2.5)$$

La poussée peut être exprimée en fonction des forces agissant de part et d'autre du disque rotor :

$$T = A_2 (P_2 - P_1) \quad (2.6)$$

D'après les hypothèses on a $P_1 = P_4$, et en admettant que la vitesse axiale au niveau du rotor reste constante ($U_2 = U_3$), on obtient en combinant les équations (2.4), (2.5) et (2.6) :

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.7)$$

En égalisant les équations (II.7) et (II.3) on trouve :

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \rho_a A_2 (U_1 + U_4) \quad \text{Ce qui nous donne : } U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.8)$$

Finalement on trouve comme résultat que la vitesse au niveau du rotor est la moyenne des vitesses amont et aval de l'écoulement.

On définit le coefficient d'induction axiale a , pour avoir les expressions des vitesses au niveau du rotor et en aval en fonction de la vitesse amont U_1 .

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.9)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.10)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.11)$$

Remarque :

- Des équations (II.8) et (II.9) on déduit que la vitesse induite au niveau du rotor est égale à la moitié de la vitesse induite à l'infini aval.
- On peut aussi remarquer que la vitesse en aval du rotor peut être égale à zéro si le coefficient $a=1/2$. La théorie de Betz est limitée par le coefficient d'induction axiale qui ne peut dépasser la valeur limite de 0.5 (< 0.5).

Coefficients de puissance et de poussée

La force dynamique du vent :

$$F_v = \frac{1}{2} \rho A U^2 \quad (2.12)$$

On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{\text{puissance du rotor}}{\text{puissance disponible dans le vent}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.13)$$

La puissance du rotor est égale à la poussée que multiplie la vitesse axiale U_2 :

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho_a A_2 U_2 (U_1 - U_4) (U_1 + U_4) \quad (2.14)$$

En substituant U_4 et U_2 par les équations (10) et (11) la puissance du rotor s'exprime par :

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_2 U^3 4a(1 - a)^2 \quad (U_1 = U) \quad (2.15)$$

Alors le coefficient de puissance est :

$$C_p = 4a (1 - a)^2 \quad (2.16)$$

On définit le coefficient de poussée par la relation suivante :

$$C_T = \frac{\text{poussée}}{\text{force dynamique du vent}} = \frac{T}{F} \quad (2.17)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_2 (U_1^2 - U_4^2) = \frac{1}{2} \rho_a A U_1^2 4a(1 - a)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A U^2 \tag{2.18}$$

Donc : $C_T = 4a(1 - a)$ (2.19)

II.3.2. Limite de Betz :

Pour déterminer le coefficient de puissance maximale, il suffit de dériver l'expression (2.15)

(par rapport à "a") et de l'égaliser à zéro, on trouve pour ce cas : $a = \frac{1}{3}$

on remplace dans (2.16) on aura : $C_{P_{\max}} = \frac{16}{27}$

Si on arrive à concevoir un rotor permettant d'avoir une vitesse axial (U_2) égale à 2/3 de la vitesse amont du vent (U_1), alors le rotor nous fournira le maximum de puissance; et d'après les lois basiques de la physique c'est la puissance maximale possible.

Le coefficient de poussée a pour expression données par l'équation (2.19). $C_{T_{\max}}$ a pour valeur 1, qui correspond à un facteur d'induction axiale $a=0,5$ et à une vitesse aval égale à zéro. Pour un maximum de puissance ($a = \frac{1}{3}$), le coefficient de poussée égale à la valeur de 8/9.

La figure 2.8 illustre les variations des coefficients de puissance et de poussée pour un rotor idéal en fonction du coefficient d'induction axiale a [31].

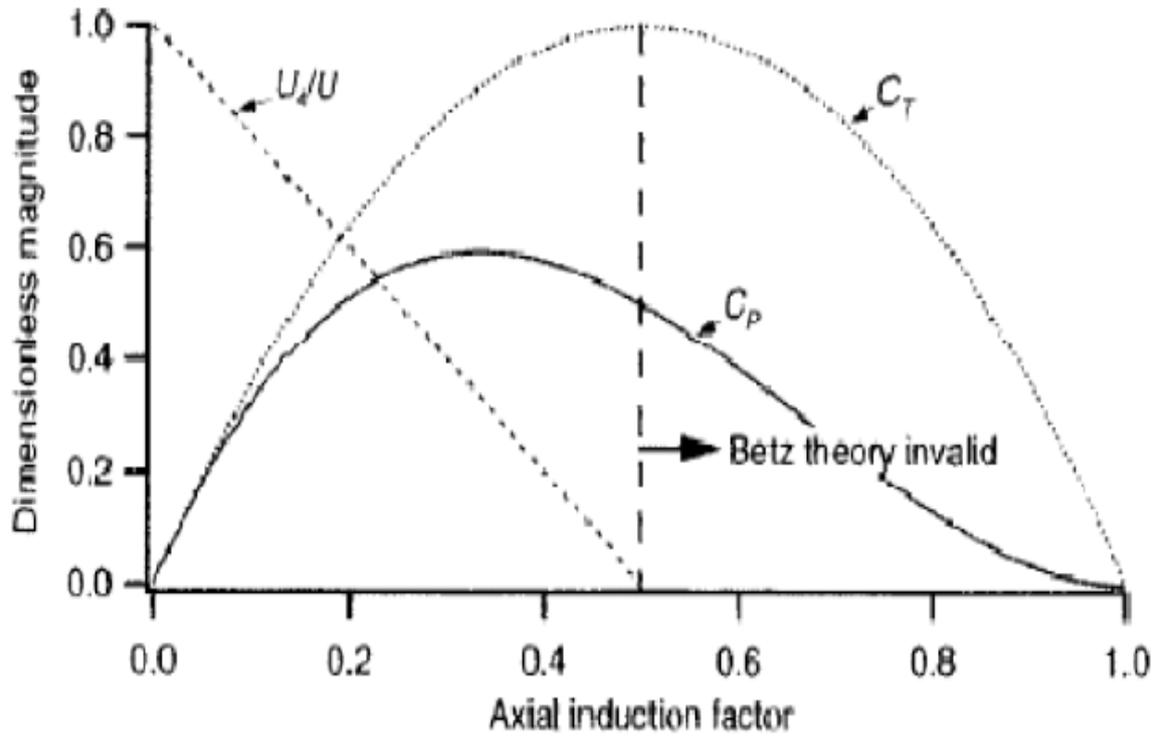


Fig.2.8. Paramètres opératoires d'une turbine Betz [31].

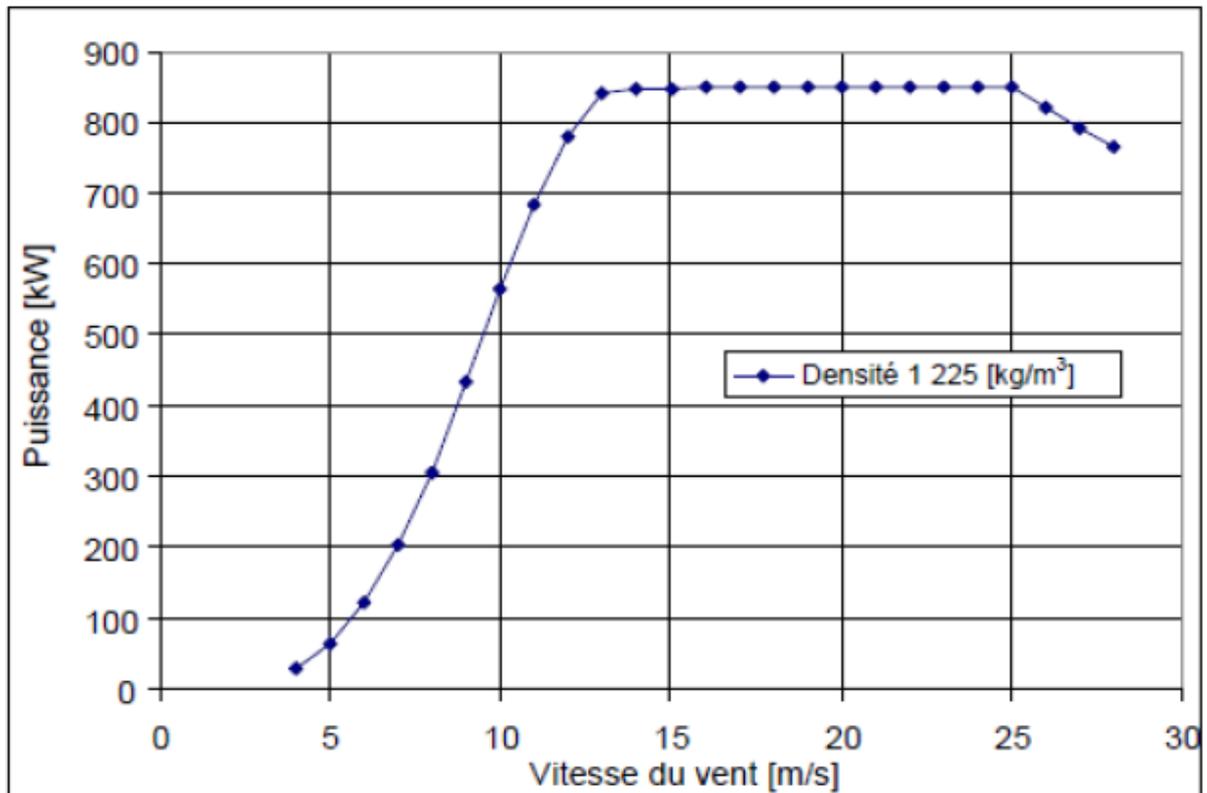


Fig.2.9. La courbe de puissance électrique de l'éolienne. [22]

La figure 2.9 présente les résultats de la courbe de puissance. L'éolienne a été dimensionnée pour une puissance de 850 kW.

Nous remarquons que le maximum est atteint autour de 850 kW pour une vitesse de 12-13 m/s. Ceci est du aux hypothèses utilisées lors de la détermination de la géométrie.

La courbe de C_p et C_T :

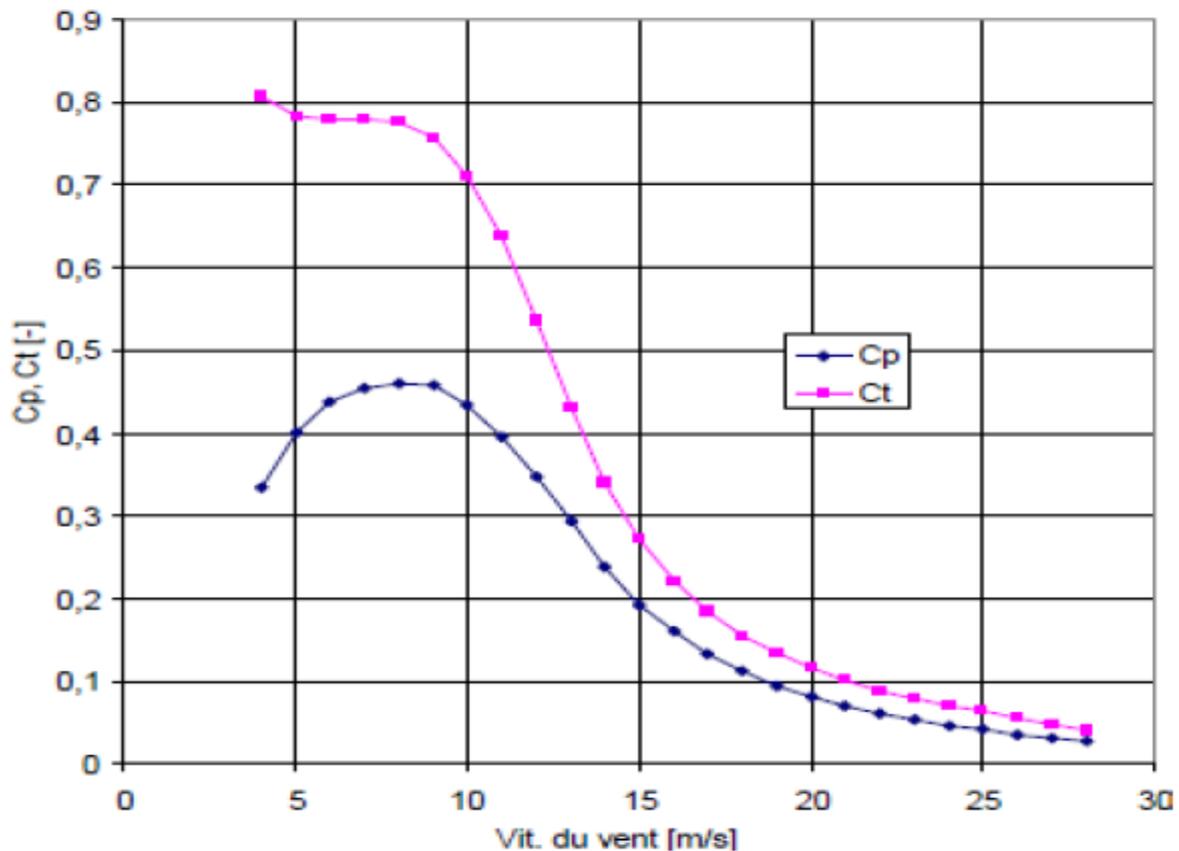


Fig.2.10. Courbe de C_p et C_T [22]

II.3.3. Caractéristique du capteur éolienne : [31]

Il existe 2 principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien :

II.3.3.1. Paramètre de vitesse

Le paramètre de vitesse λ est le rapport de la vitesse maximale de déplacement de l'aube U_0 à la vitesse du vent U avec $U_0 = \omega R$

$$\lambda = \frac{U_0}{U} = \frac{\omega R}{U} \quad (2.20)$$

Le choix de la vitesse spécifique dépend de plusieurs paramètres, il est en fonction de couple de démarrage, coefficient de puissance, le nombre de pales, et le profil de la pale. Le tableau ci-dessous [31] propose des valeurs suivant le nombre de pales.

Tableau 2.1 : La vitesse spécifique en fonction de nombre de pale.

La vitesse spécifique λ	Nombre de pale
1	8 à 24
2	6 à 12
3	3 à 6
4	3 à 4
> 4	1 à 3

De fortes valeurs de λ permettent un meilleur rendement et des meilleures possibilités d'utilisation. Les éoliennes rapides peuvent avoir un λ égale 20. cependant une grande vitesse de rotation peut entrainer des nuisances telles que le bruit, dans notre éolienne la vitesse spécifique est donnée $\lambda=4$.

II.3.3.2. Coefficient de couple et le couple aérodynamique

C'est le rapport
$$C_c = \frac{C_a}{C_{max}} \tag{2.21}$$

C_{max} : Couple moteur qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien.

C_a : Le couple aérodynamique, il est donne par la formule suivante :

$$C_a = \frac{1}{2} c_q \rho AU^2R \tag{2.22}$$

Avec :
$$c_q = c_p / \lambda \tag{2.23}$$

P : est la puissance

$$P = C. \omega \tag{2.24}$$

II.4. Etude Mécanique de l'éolienne :

La figure suivante représente le schéma cinématique d'une éolienne à axe horizontal.

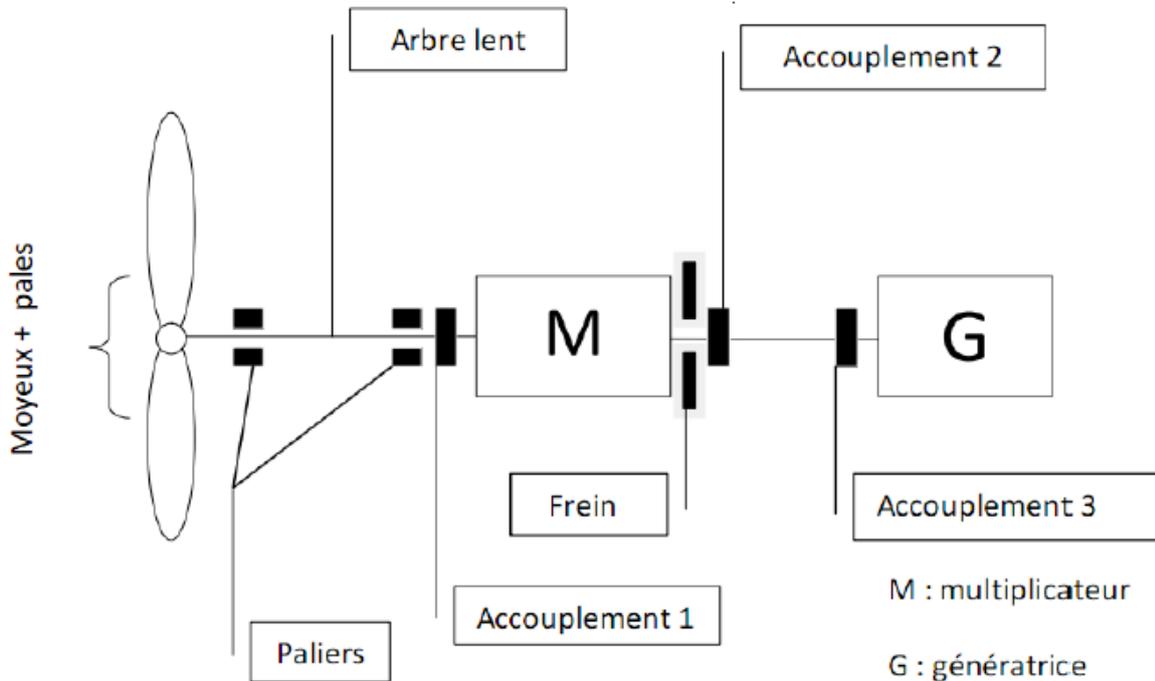


Fig.2.11.Schéma cinématique de l'éolienne à axe horizontal.

II.4.1.Les pales :

La géométrie de la pale obtenue par le calcul aérodynamique est assez complexe et un calcul analytique s'avère difficile. Nous considérerons que la pale est en forme de tronc de cône et d'épaisseur variable dépendant des contraintes au niveau de chaque section. Les charges appliquées sur la pale sont les forces aérodynamiques et la force gyroscopique. Nous pouvons alors calculer la contrainte de flexion et la contrainte normale appliquée a chaque section « i » caractérisée par :

- D_i : diamètre du cercle égal à la corde de la station i ;
- e_i : épaisseur de l'anneau ;
- Δr : espacement entre section ;

La condition de résistance d'une section au chargement est :

$$\sigma_x < \frac{\sigma_e}{C_s}$$

σ_e : Limite élastique en extension du matériau

C_s : coefficient de sécurité.

$$\sigma_x = \sigma_f + \sigma_n = \frac{M_f d}{2I} + \frac{F_c}{S}$$

M_f : Moment de flexion

F_c : force centrifuge

I : moment quadratique de la section

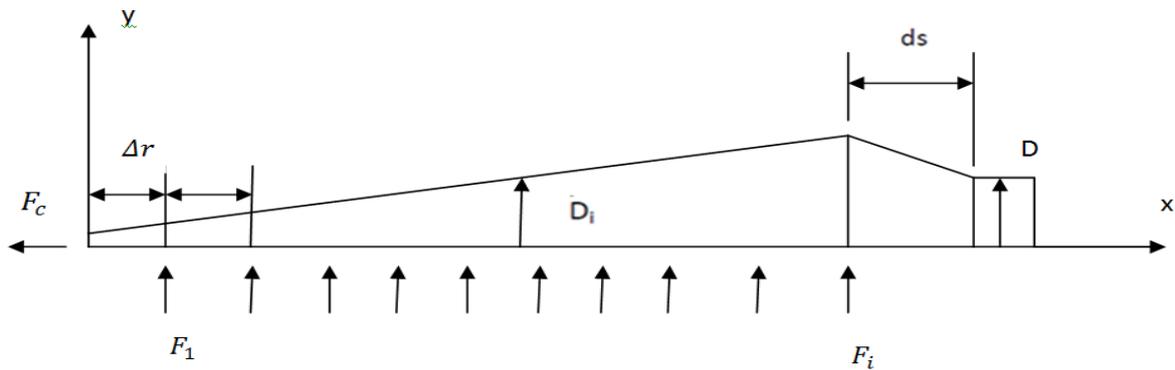


Fig.2.12.Modélisation du chargement sur la pale.

T_i : sont les résultantes des forces tangentielle et axiales pour chaque section « i ».

$$T_i = \sqrt{T_{ai}^2 + T_{ti}^2}$$

II.4.2. L'arbre principal :

L'arbre est soumis aux contraintes de compression (force de poussée du rotor), contrainte de flexion (poids propre de l'arbre), et une contrainte de torsion due au couple de l'hélice.



Fig.2.13.Chargement de l'arbre.

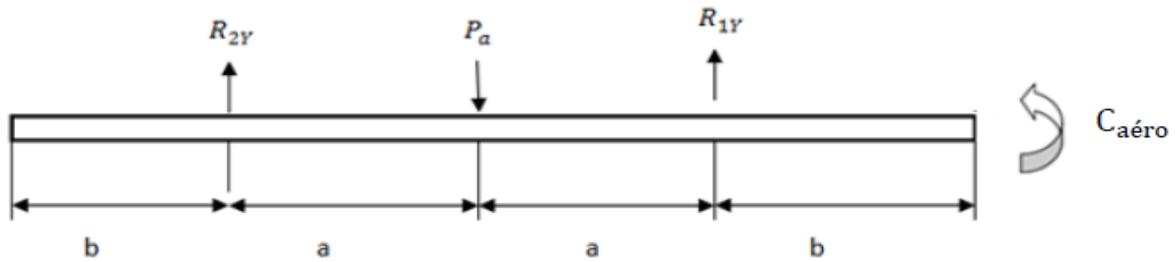


Fig.2.14.Schématization du chargement d'arbre.

$$\sum F = 0, \sum M_{/O} = 0$$

Donc : $R_{1Y} + R_{2Y} = P_a$

et $R_{1Y} \cdot a + R_{2Y} \cdot (2a + b) = P(a + b)$

Avec : $a = 2b$, La résolution du système d'équation nous donne : $R_{1Y} = \frac{P}{2}$ et $R_{2Y} = \frac{P}{2}$

- Contrainte de la torsion : $\tau = \frac{32 \cdot C_{aéro}}{\pi \cdot d^3} < \frac{\sigma_e}{C_s}$

II.4.3. Multiplicateur :

La vitesse de rotation maximale de la génératrice est de 2100 tr /min ce qui est équivalent à 60 fois la vitesse nominal de rotation du rotor

D'après le schéma cinématique (fig.2.15) , on remarque qu'il y a trois étages, et les rapports de vitesse sont repartis de telle sorte d'avoir un rapport global de 60, dans notre cas de multiplicateur la répartition est la suivante :

- Étage 1 $r = 4$, $m_1 = m_2 = 6$, $Z_1 = 80$, $Z_2 = 20$, $\alpha = 20^\circ$
- Étage 2 $r = 4$, $m_3 = m_4 = 6$, $Z_3 = 80$, $Z_4 = 20$, $\alpha = 20^\circ$
- Étage 3 $r = 15/4$, $m_5 = m_6 = m_7 = 10$, $Z_5 = 20$, $Z_6 = 30$, $Z_7 = 75$

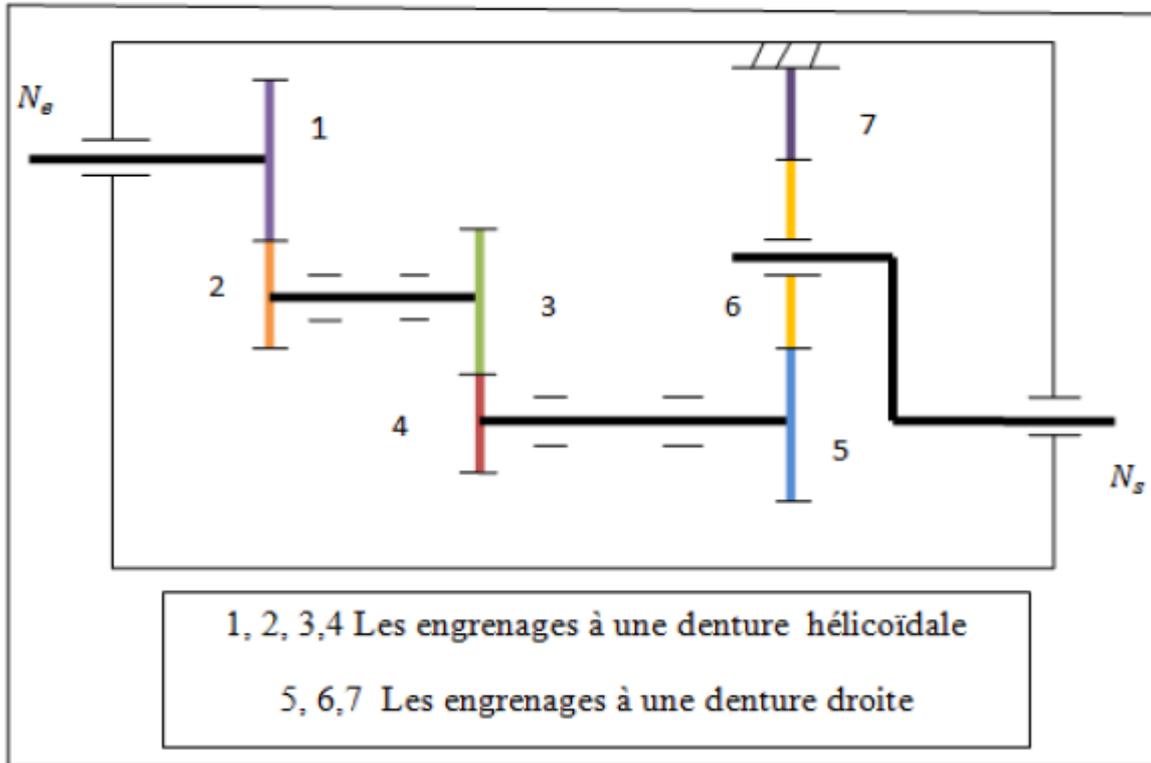


Fig.2.15.Schéma cinématique de multiplicateur.

Les arbres de transmission :

- Arbre 1 : $D_1=120\text{mm}$, $l=500\text{mm}$.
- Arbre 2 : $D_2=80\text{mm}$, $l=300\text{mm}$.
- Arbre 3 : $D_3=80\text{mm}$, $l=300\text{mm}$.
- Arbre 4 : $D_4=80\text{mm}$, $l=200\text{mm}$.

Calcul de la torsion des arbres : $\tau = \frac{32.C}{\pi.d^3}$

II.4.4. La tour :

Dans les constructions d'éolienne, la hauteur du mat qui supporte la nacelle est équivalente à 1,5 le diamètre du rotor.

La tour est soumise au poids P de la nacelle, la force de poussé T du rotor et à la force du vent. La figure suivante modélise le chargement de la tour :

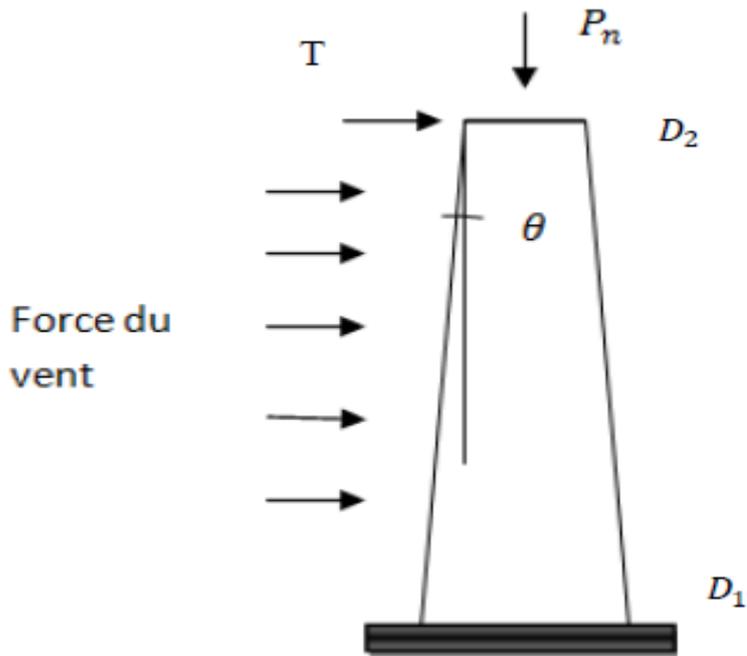


Fig.2.16. Les charges appliquées à la tour.

Résistances à la flexion-compression :

Contrainte normale : $S = (D_2^2 - D_{i2}^2) \frac{\pi}{4}$ $\sigma_n = \frac{P}{S}$

Contrainte de flexion : $S = \frac{(D_1 - D_2)}{2} \sqrt{1 + \cos^2 \theta} \pi h$

$$\sigma_f = \frac{M_x}{\frac{I_x}{v}} = \frac{h (T + \frac{1}{2} \rho U^2 S)}{\frac{I_x}{v}}$$

II.4.5. La génératrice :

Les principaux paramètres du dimensionnement sont géométriques (diamètre d'alésage, longueur utile, dimensions des encoches), électriques (densité de courant et charge linéique...), magnétiques (induction dans l'entrefer et dans les différents tronçons de la machine) et mécaniques (entrefer et vitesse de rotation). Chacun des ces paramètres a une importance lors du dimensionnement.

- **La vitesse de rotation :**

La vitesse de rotation du champ magnétique tournant est imposée par le nombre de pôles du stator (P) et la fréquence d'alimentation (f) :

$$\eta_s = \frac{60.f}{P}$$

- **La puissance apparente :**

La puissance apparente est exprimée par :

$$S = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n}$$

- **La puissance conventionnelle :**

La puissance conventionnelle est donnée par la relation suivante :

$$P' = \frac{P_n K_E}{\eta_n \cos \varphi_n}$$

K_E : est le coefficient qui tient compte des chutes ohmiques dans l'enroulement statorique. Il est défini :

$$K_E = 0.985 - 0.004.P$$

CHAPITRE III

MODELE MATHEMATIQUE

III.1. Introduction:

Les phénomènes physiques accompagnant l'écoulement des fluides, sont modélisés mathématiquement, sous un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, à des équations différentielles partielles. Dans ce chapitre nous allons montrer brièvement la formulation mathématique des termes contribuant dans ce genre de problèmes. Les équations gouvernantes obtenues sont données sous leurs formes intégrale et différentielle.

III.2. Définitions et hypothèses :

Avant la dérivation des équations de base décrivant le comportement du fluide en écoulement, il peut être commode de clarifier ce que c'est la dynamique des fluides.

C'est, en fait, la recherche sur le mouvement interactif d'un grand nombre de particules différentes. Cela signifie que nous supposons que la densité du fluide est assez grande, que le fluide qui comporte ces particules puisse être considéré comme un milieu continu. Par suite, même un élément infinitésimal du fluide contient un nombre suffisant de particules, pour lesquelles nous pouvons spécifier la valeur moyenne de la vitesse, de la pression et notamment celle de la température. Ce qui nous permet de définir ces grandeurs et d'autres quantités importantes à chaque point du fluide. La dérivation des principales équations de la dynamique des fluides est basée sur le fait que le comportement dynamique d'un fluide suit les lois suivantes :

- Loi conservation de masse,
- Loi de la quantité de mouvement,
- Loi conservation de l'énergie.

La conservation d'une certaine quantité d'écoulement signifie que sa variation totale à l'intérieur d'un volume arbitraire peut être exprimée comme l'effet net de cette quantité transportée à travers la frontière, toutes les forces internes et les sources ainsi que les forces externes agissant sur le volume.

On va considérer que :

- Le fluide est Newtonien.
- le fluide est homogène et incompressible.
- Régime stationnaire.
- La force de gravité est négligeable devant l'inertie et les forces visqueuse.
- Le problème est axisymétrique.

III.3. Volume de contrôle fini :

Le développement des lois de conservation nous mène tout à fait naturellement à l'idée de diviser le domaine d'écoulement en un certain nombre de volumes finis pour se concentrer sur la modélisation du comportement du fluide dans des régions finies.

A cet égard, nous définissons ce qu'on appelle le Volume de Contrôle Fini (Finite Control Volume) et essayons de développer une description mathématique de ses propriétés physiques.

Considérons un domaine d'écoulement général comme représenté par des lignes du courant dans la Figure (3.1). Soit une région arbitraire finie et fixe de l'écoulement, délimitée par la surface fermée $\partial\Omega$, définissant le volume de contrôle Ω . Nous présentons également un élément de surface dS et son vecteur normal extérieur associé \mathbf{n} . L'application des lois de la physique citées précédemment sur ce domaine, parvient aux équations gouvernant le problème.

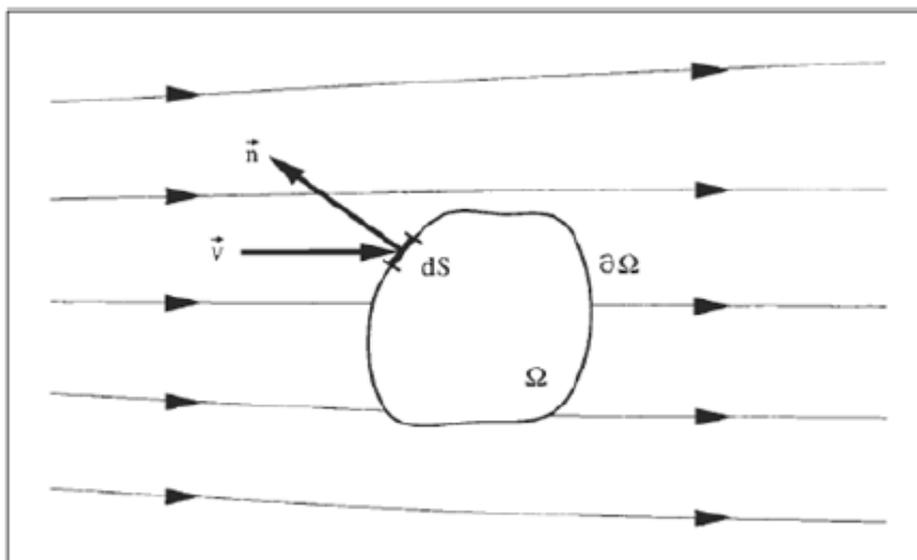


Fig.3.1. Volume de contrôle fini [3]

III.4. Equations gouvernantes :

Soit ϕ une quantité scalaire par unité de masse. On veut établir, d'une manière générale, la loi de conservation de la quantité $\rho\phi$ dans l'espace occupé par le fluide pendant un temps donné, où ρ étant la masse volumique du fluide. Il s'agit, en fait, des quantités telles que la les composantes de vitesse, la température...

Citons les termes contribuant dans l'équation qui décrit la loi en vigueur :

- La variation de ϕ dans le temps donnée par ;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho\phi \, d\Omega$$

Cette contribution, on la néglige dans tout le travail ; nous nous intéressons au cas instationnaire.

- La contribution du flux advectif de ϕ dans Ω à travers la frontière $\partial\Omega$ avec une vitesse V ;

$$\oint_{\partial\Omega} \rho\phi V \, ndS = \oint_{\partial\Omega} J_C \, ndS$$

Avec : $J_C = \rho\phi V$, dénote le flux advectif.

- La contribution du flux diffusif donnée par la loi de Fick généralisée ;

$$-\oint_{\partial\Omega} \Gamma_{\phi} \nabla\phi \, ndS = \oint_{\partial\Omega} J_D \, ndS$$

où $J_D = -\Gamma_{\phi} \nabla\phi$ étant le flux diffusif et Γ_{ϕ} dénote le coefficient de diffusion correspondant.

- La quantité générée par les sources volumiques et surfaciques ;

$$\int_{\Omega} S_{\phi} \, d\Omega$$

Tous ces termes s'équilibrent en formant la loi de conservation de la quantité ϕ , qui s'annonce ainsi,

$$\oint_{\partial\Omega} J \, ndS - \int_{\Omega} S_{\phi} \, d\Omega = 0 \quad (3.1)$$

où $J = J_D + J_C$ est le flux combiné advection-diffusion.

III.4.1. Ecriture intégrale des équations gouvernantes

Loi de la conservation de masse (continuité) :

En substituant ϕ de l'équation (3.1) par l'unité, en absence de flux diffusif et des termes de sources de génération de masse, on obtient la loi de conservation de masse sous sa forme intégrale ;

$$\oint_{\partial\Omega} \rho \phi V \, ndS = 0$$

Loi de la quantité de mouvement :

En substituant ϕ de l'équation (3.1) par les composantes de la vitesse u et v , on obtient la loi de quantité de mouvement sous sa forme intégrale ;

$$\oint_{\partial\Omega} \rho u_i V \, ndS - \oint_{\partial\Omega} \mu \nabla u_i \, ndS - \int_{\Omega} S_{\phi} \, d\Omega = 0$$

Où $u_i = u, v$ dénote les composantes de la vitesse. μ est la viscosité dynamique du fluide.

Loi de la conservation de l'énergie :

On s'intéresse dans ce cas à l'enthalpie H , donnée en fonction de la température par la relation $H = c_p T$, où c_p étant la capacité calorifique du fluide à pression constante. Pour cette loi, tous les termes contribuent dans l'équation (3.1), par suite, on obtient :

$$\oint_{\partial\Omega} \rho T V \, ndS - \oint_{\partial\Omega} \frac{k}{c_p} \nabla T \, ndS - \int_{\Omega} S_T \, d\Omega = 0$$

CHAPITRE III MODELE MATHEMATIQUE

Notons que le flux diffusif pris en compte est celui de chaleur donné par la loi de Fourier, dont k présente la conductivité thermique.

III.4.2. Ecriture différentielle des équations gouvernantes

Dans le but de parvenir à des expressions plus compactes pour les équations gouvernantes, il convient d'écrire celles-ci sous forme d'équations différentielles. Ceci nécessite la transformation des intégrales surfaciques à des intégrales volumiques. Pour ce faire, on fait intervenir le théorème d'Ostrogradski, cf. (A.1), appelé parfois le théorème de divergence de Gauss [8].

En appliquant ce théorème sur les équations précédentes, et en enlevant le signe de l'intégrale volumique, il s'avère que toutes les variables pertinentes qui ont pu apparaître, obéissent à la même équation différentielle, appelée *Equation de Conservation Généralisée (ECG)*, qui s'écrit sous la forme :

$$\nabla (\rho\phi V) - \nabla (\Gamma_\phi \nabla\phi) - S_\phi = 0$$

où ϕ peut représenter chaque variable scalaire, à savoir, la température, la vitesse, ..., Γ_ϕ est le coefficient de diffusion associé et S_ϕ étant le terme de source appropriée, comme indique la Table 3.1. où p représente la pression de l'aire.

Tableau.3.1. Variables spécifiques de l'ECG

EDP	Γ_ϕ	ϕ	S_ϕ
Continuité	0	1	0
Navier-Stokes sur x	μ	u	$S_u = S_x - \partial P / \partial x$
Navier-Stokes sur y	μ	v	$S_v = S_y - \partial P / \partial y$
Equation d'énergie	k/C_p	T	S_T

CHAPITRE III MODELE MATHEMATIQUE

Une autre écriture, est la représentation cartésienne de l'équation précédente ;

$$u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho\phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi$$

Et plus explicitement, les équations gouvernantes sous forme différentielle sont, donc, données chacune par la représentation d'Einstein ;

Loi de la conservation de masse

$$\text{div} (\rho \vec{V}) = 0 \quad \text{Autrement dit :} \quad \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

Loi de la quantité de mouvement

Cette équation représente l'équation de Navier-Stokes dans une formule générale :

$$u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - S_{u_i} = 0$$

Loi de la conservation de l'énergie

$$u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho T) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j}) - S_T = 0$$

avec ; j : indice muet.

Remarques

- S_T représente la dissipation, elle est donnée par la formule :

$$S_T = \frac{\mu \varphi}{C_p}$$

$$\text{avec :} \quad \varphi = [(\frac{\partial u}{\partial x}) + (\frac{\partial v}{\partial y})]^2 + 2[(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2]$$

CHAPITRE III MODELE MATHEMATIQUE

- La modélisation de l'éolienne stipule que l'écoulement soit laminaire, une hypothèse difficile à justifier physiquement, car il est connu que le sillage éolien est turbulent. Néanmoins les performances de l'éolienne sont peu affectées par le détail de son sillage, il est donc acceptable, pour la détermination des performances d'une éolienne, d'employer une telle hypothèse simplificatrice.
- Si on suppose que l'air s'écoule suivant x seulement, c'est à dire que la composante de vitesse suivant y est nulle, les équations deviennent alors :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Loi de la quantité de mouvement : Remplaçons l'équation de continuité on aura :

$$S_u + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

Loi de la conservation de l'énergie : Distribution uniforme des températures :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{donc :} \quad \frac{k}{c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_T = 0$$

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction :

Solidworks est un logiciel de dessin et conception assisté par ordinateur DAO et CAO. Il est considéré comme un outil essentiel dans le domaine de la conception mécanique, il permet, avec ses diverses fonctionnalités, d'aborder des problèmes de dimensionnement complexes et de les résoudre dans des délais très courts, comparé aux méthodes conventionnelles.

Ces fonctionnalités principales sont :

- modélisation numérique ;
- simulation mécanique et calcul des matériaux ;
- représentation graphique ;
- dessin de plan ;
- manipulation d'objets 3D ;
- gestion d'assemblages.

La principale étape à suivre lors du travail de simulation est résumée par introduire tous les paramètres qui sont nécessaires pour faire la simulation, à savoir les types de fixation, les forces et le couple qui s'exercent sur les éléments étudiés.

IV.2. Calcul de performances aérodynamiques :

IV.2.1. Calcul de poussée :

- Calculer les forces de poussées qui s'exercent sur les pales, pour des différentes vitesses du vent:

La surface balayée par la pale est une surface du disque: $A = \pi R^2$, avec

R : rayon des pales, dans notre cas $R = 26$ m donc $A = 2123.71$ m².

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

On calcule les performances aérodynamiques pour les différentes vitesses, $U = 6,9$ et 12 . En utilisant la figure 2.10 : on peut trouver la valeur C_T pour chaque vitesse.

D'après l'équation (2.17) :

- $U = 6$ m/s $T = 33.085$ kN
- $U = 9$ m/s $T = 69.67$ kN
- $U = 12$ m/s $T = 88.228$ kN

IV.2.2. Calcul des vitesses de rotation du rotor et de la génératrice :

D'après l'équation (2.20) et avec un multiplicateur de rapport de 60 :

Tableau.4.1. Vitesses de rotation en fonction de vitesse du vent.

	U=6m/s	U=9m/s	U=12m/s
$\omega_{\text{aéro}}$ (rad/s)	0.923	1.384	1.846
$\omega_{\text{gén}}$ (rad/s)	55.38	83.04	110.76

IV .2.3. Calcul des couples :

- Le couple utile de la génératrice :

En utilisant l'équation (2.24), et la courbe de puissance on obtient:

- Pour une vitesse $U = 6$ m/s :

$$C_{\text{gén}} = 2.166 \text{ kN.m}$$

- Pour une vitesse $U = 9$ m/s :

$$C_{\text{gén}} = 5.178 \text{ kN.m}$$

- Pour une vitesse $U = 12 \text{ m/s}$:

$$C_{\text{gén}} = 7.042 \text{ kN.m}$$

- Le couple aérodynamique :

D'après les équations (2.22), (2.23), et la courbe de C_p on obtient :

- Pour une vitesse $U = 6 \text{ m/s}$:

$$C_{\text{aéro}} = 140.98 \text{ kN.m}$$

- Pour une vitesse $U = 9 \text{ m/s}$:

$$C_{\text{aéro}} = 331.64 \text{ kN.m}$$

- Pour une vitesse $U = 12 \text{ m/s}$:

$$C_{\text{aéro}} = 448.59 \text{ kN.m}$$

IV.2.4. Calcul des puissances :

D'après l'équation (2.24), on utilise les résultats trouvés précédemment, on résume les résultats sous forme d'une table :

Tableau.4.2.Puissances en fonction de vitesse du vent.

	$P_{\text{vent}}(\text{kw})$	$P_{\text{aéro}}(\text{kw})$	$P_{\text{gén}}(\text{kw})$
$U = 6 \text{ m/s}$	254.5	130.124	120
$U = 9 \text{ m/s}$	858.9	458.989	430
$U = 12 \text{ m/s}$	2036.7	828.097	780

IV.2.5. Discussion :

- D'après les puissances calculées, et si on compare les deux valeurs de P_{vent} et $P_{\text{aéro}}$ on constate qu'il ya des pertes sur le niveau des pales, avec $P_{\text{vent}} > P_{\text{aéro}}$, c'est à dire que la puissance incidente crée par le vent n'est pas totalement extraite par l'éolienne, ceci est du aux hypothèses utilisées lors de la détermination de la géométrie. La théorie de Betz développée dans le "CHAPITRE II" nous a donné la relation (2.15) qui montre que ces pertes sont représentées essentiellement par le coefficient de puissance c_p .
- Si on compare maintenant les valeurs de $P_{\text{aéro}}$ et $P_{\text{gén}}$, on constate qu'il y a des pertes à l'intérieur de l'éolienne, elles sont dues cette fois aux pertes mécaniques dans le multiplicateur parce que ce dernier se compose essentiellement d'une chaîne d'engrenages ce qui conduit aux pertes de puissance à cause des frottements entre dents.

IV.3. Etude de l'impact des particules de sable sur les pales :

Après le dessin de l'éolienne avec le logiciel Solidworks, on introduit le type de fixation ainsi que les charges calculées précédemment, on effectue la simulation en deux cas ;

- Dans la première partie on va effectuer des simulations numériques sur une pale sans effet de sable dans le cas dynamique (pale en rotation).
- Dans la seconde partie on va introduire l'effet de sable en faisant envoyer des particules des différents diamètres avec une vitesse égale à 6m/s.

et cela pour déterminer les différentes distributions des caractéristiques structurelles (contrainte-déplacement-déformation) sur les pales.

IV.3. 1. Sans effet de sable :

Le matériau utilisé pour la simulation est l'acier allié inoxydable, en effectuant des simulations numériques pour une vitesse de 6 m/s et pour un débit de sable de 1kg/s, on obtiendra les résultats suivants :

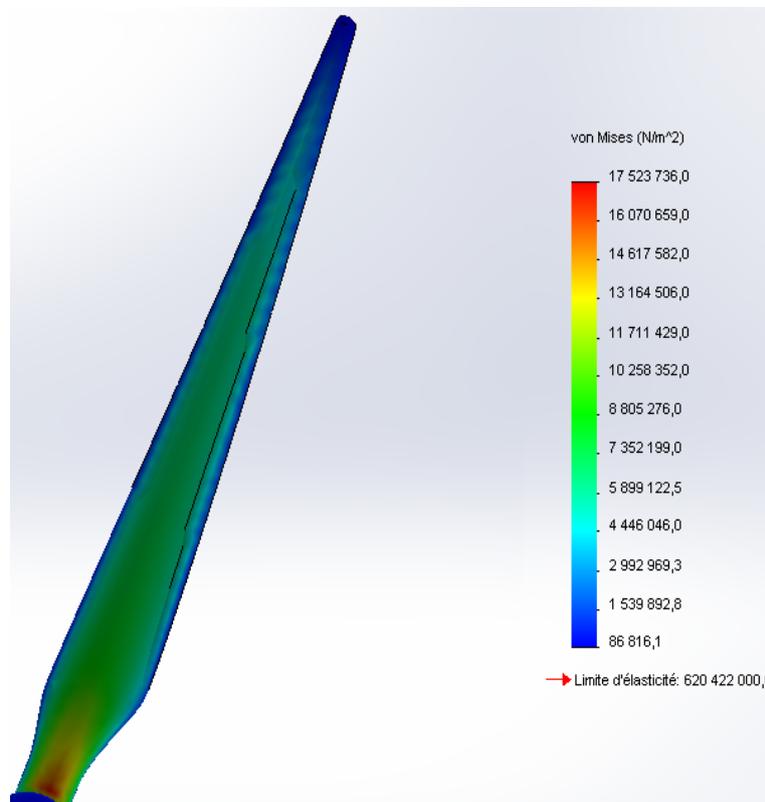


Fig.4.1.Distribution des contraintes sur la pale, obtenue à V=6m/s, sans effet de sable.

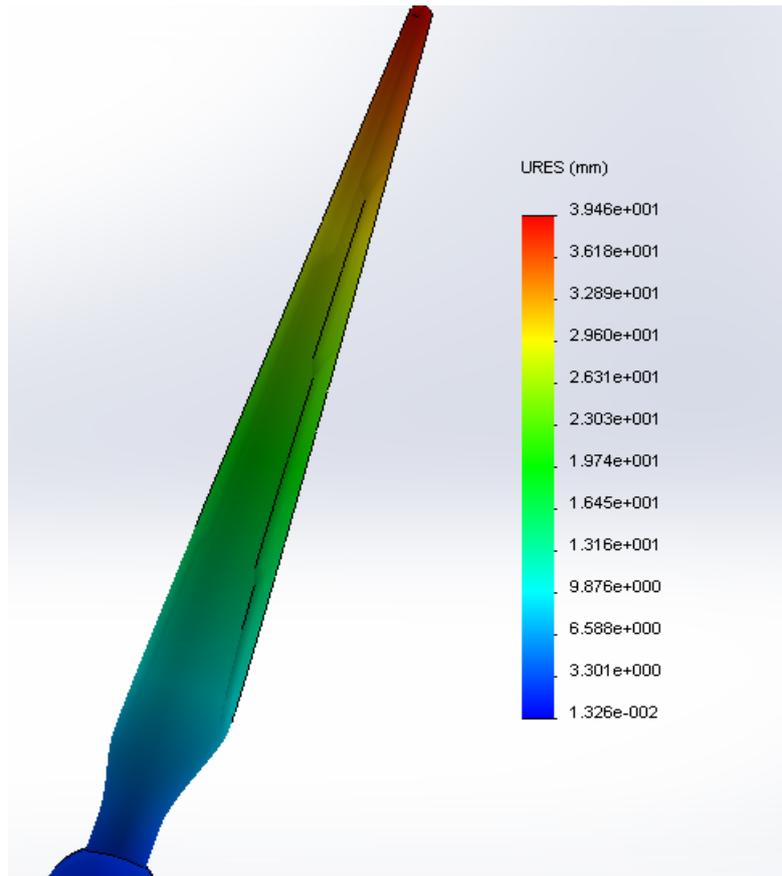


Fig.4.2.Distribution des déplacements sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$, sans effet de sable.

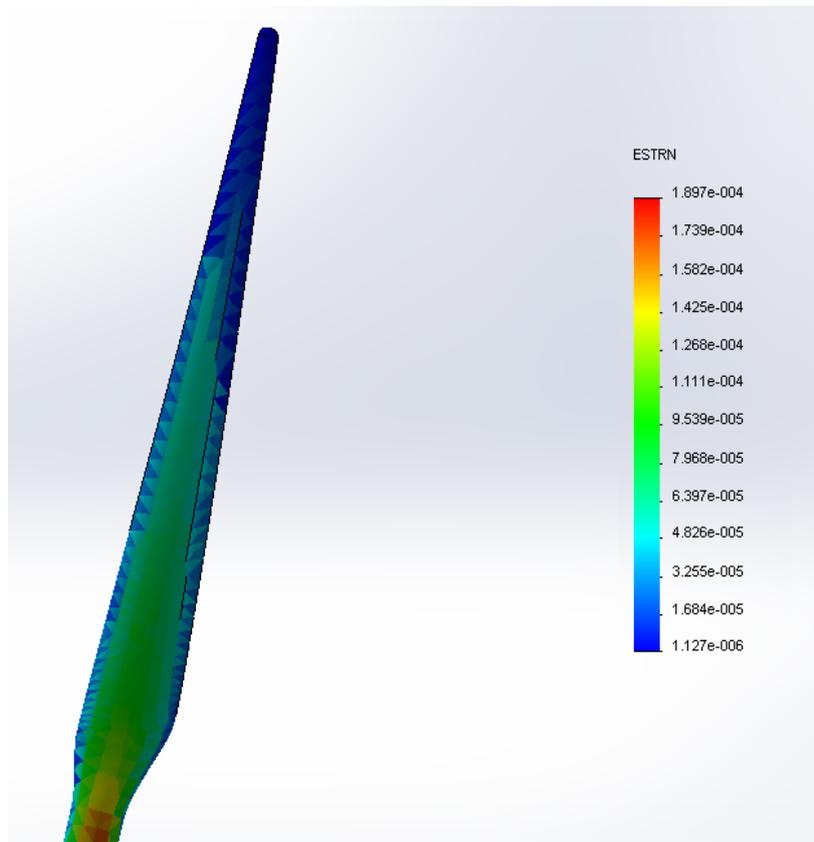


Fig.4.3.Distribution des déformations sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$, sans effet de sable.

IV.3.1. Avec effet de sable :

Dans cette partie on va effectuer des simulations numériques afin de mettre en évidence l'impact du sable sur la rotation de la pale. Pour ce faire, des particules de sable ayant différents diamètres (0,05 mm, 0.5 mm et 1 mm), ont été considérées avec des vitesses du vent différentes, à savoir, 6m/s, 9m/s et 12 m/s. Avec un débit de particules de sable de 1 Kg/s, on obtiendra les résultats suivants :

- Pour D = 1mm :

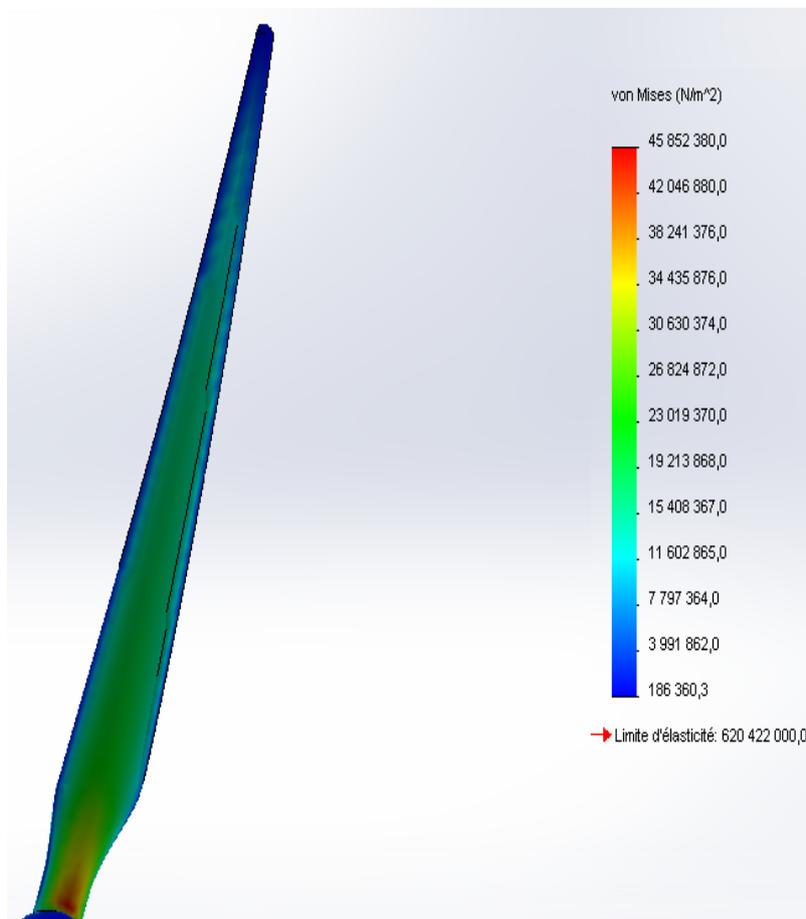


Fig.4.4. Distribution des contraintes sur la pale obtenue à V=6m/s avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm)

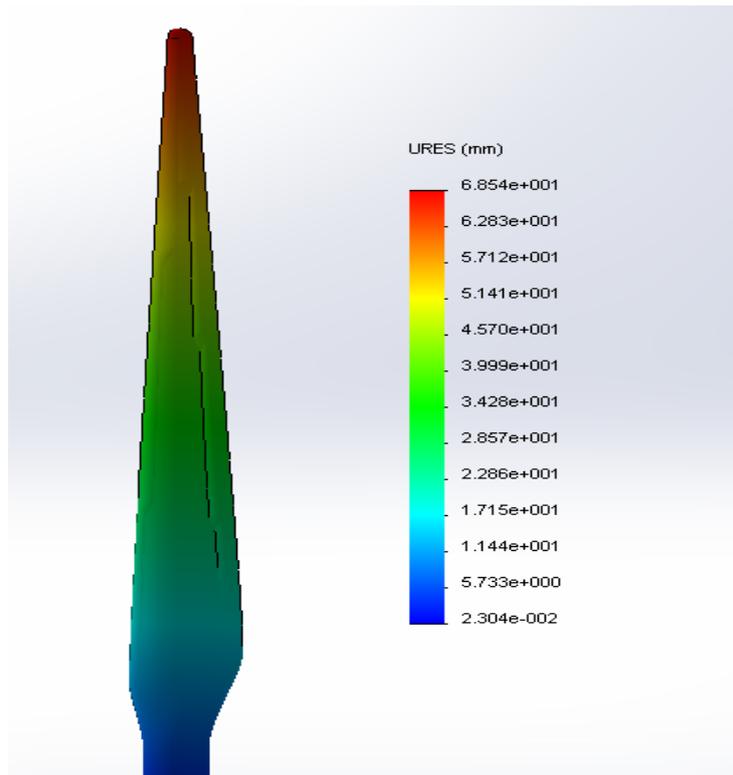


Fig.4.5. Distribution des déplacements sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm)

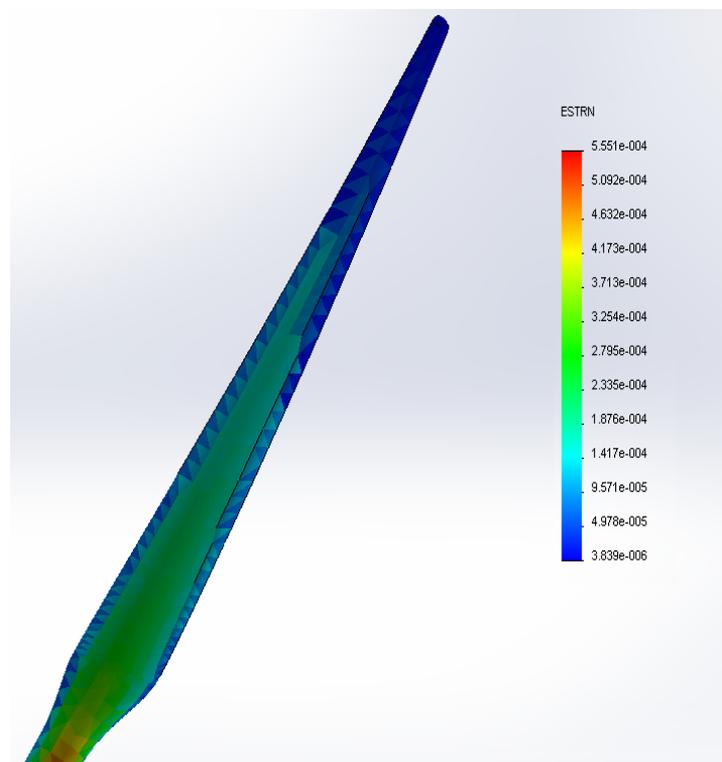


Fig.4.6. Distribution des déformations sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 1mm)

- Pour $D = 0.5 \text{ mm}$:

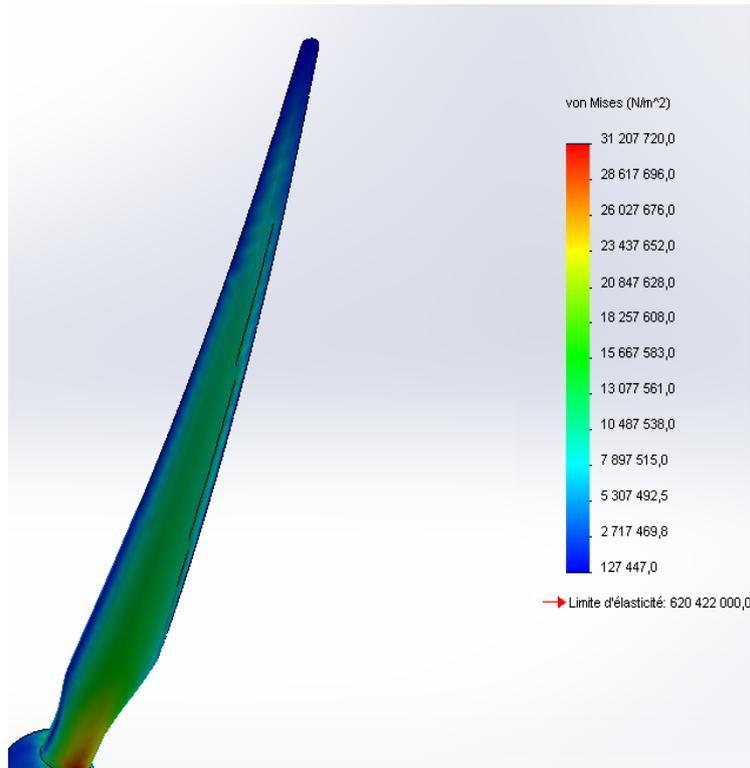


Fig.4.7. Distribution des contraintes sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)

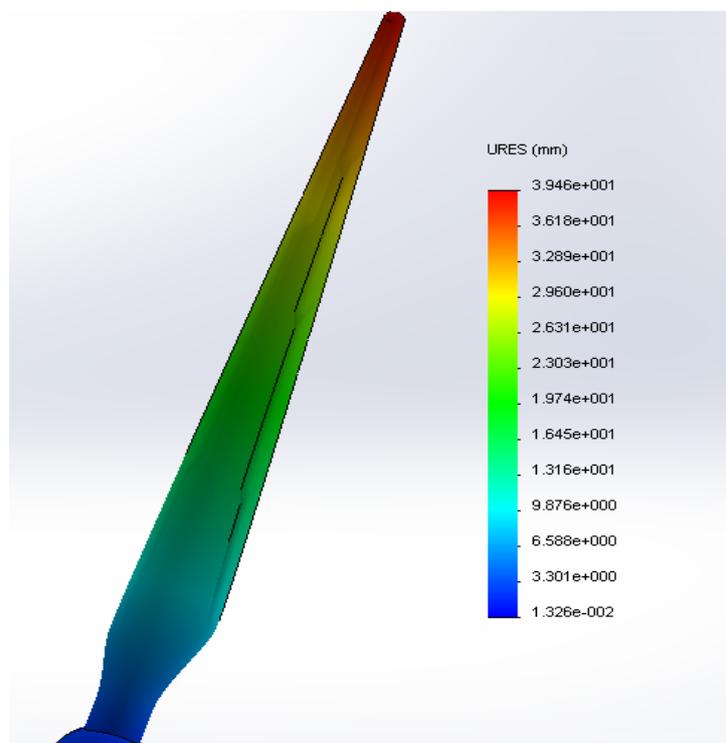


Fig.4.8. Distribution des déplacements sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)

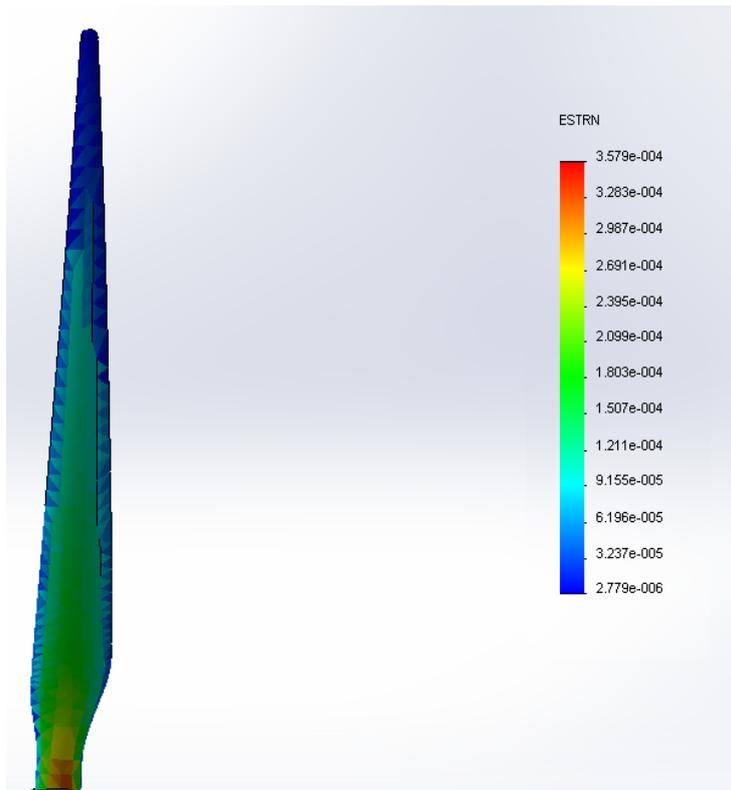


Fig.4.9. Distribution des déformations sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.5mm)

- Pour $D = 0.05 \text{ mm}$:

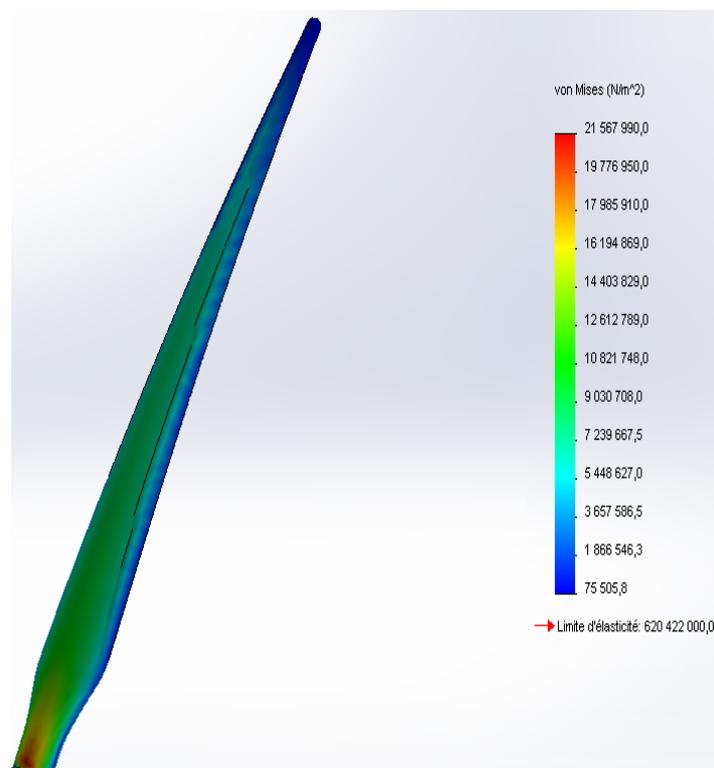


Fig.4.10. Distribution des contraintes sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)

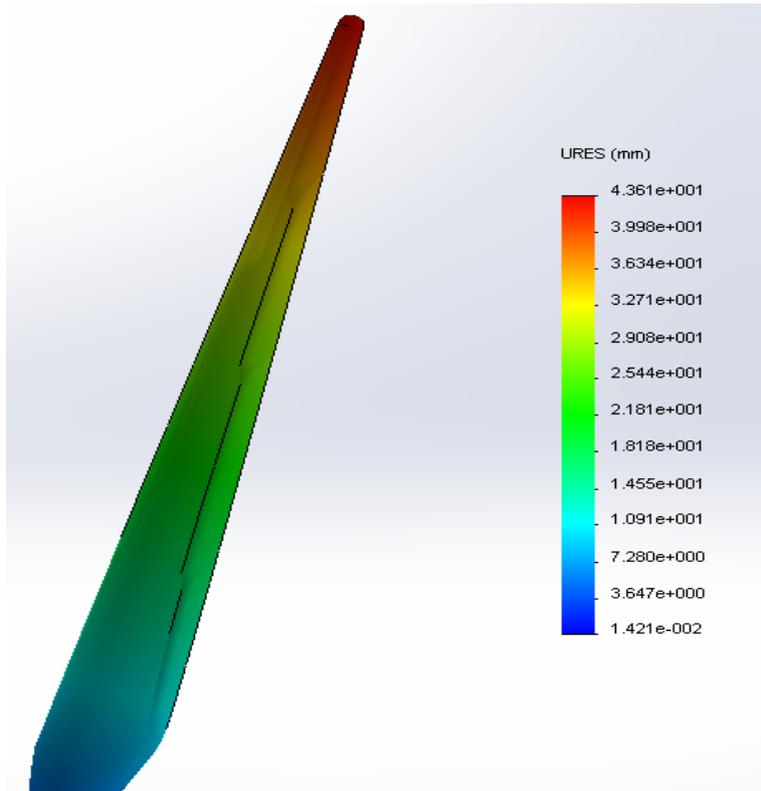


Fig.4.11. Distribution des déplacements sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)

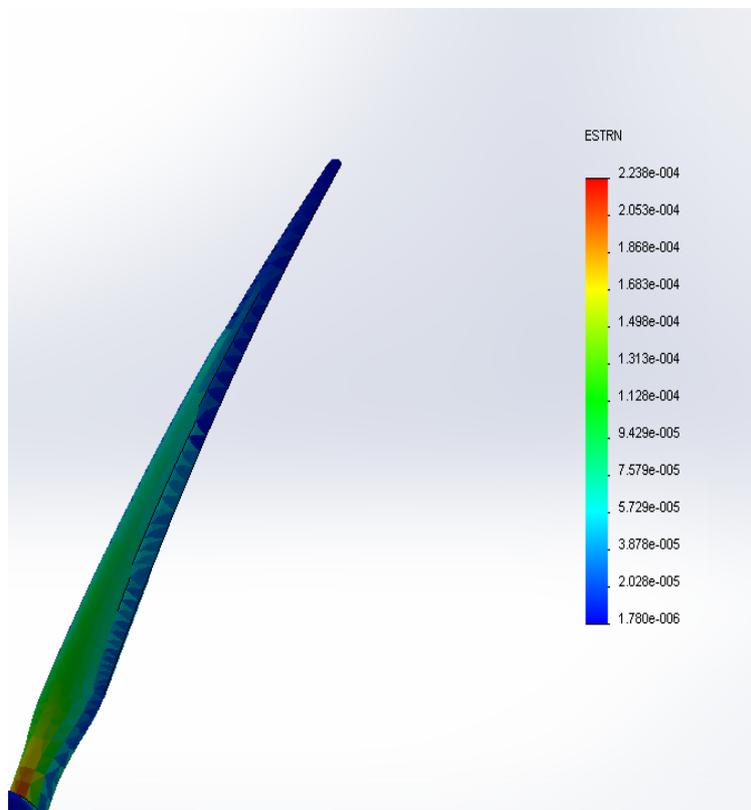


Fig.4.12. Distribution des déformations sur la pale, obtenue à $V=6\text{m/s}$ avec effet de sable (diamètre de particule de 0.05mm)

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

On récapitule les résultats obtenus à partir de la simulation numérique pour les différentes vitesses du vent sur les tableaux suivants (les valeurs maximales des contraintes, des déformations et des déplacements) :

On s'intéresse aux valeurs maximales des caractéristiques structurelles :

σ_{MAX} : Contrainte maximale appliquée à la pale.

ϵ_{MAX} : Déformation maximale de la pale.

u_{MAX} : Déplacement maximal de la pale.

D_{MAX} : Diamètre de particule incidente.

➤ Pour U = 6m/s :

Tableau.4.3.Impact du sable sur les caractéristiques structurelles de la pale à 6 m/s.

D_{MAX} (mm)	σ_{MAX} (kN/m ²)	ϵ_{MAX} (10 ⁻⁴)	u_{MAX} (mm)
Sans effet de sable	17523	1.897	39.46
0.05	21567	2.238	43.61
0.5	31207	3.579	54.42
1	45852	5.551	68.54

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Pour U = 9m/s :

Tableau.4.4.Impact du sable sur les caractéristiques structurales de la pale à 9 m/s.

D_{MAX} (mm)	σ_{MAX} (kN/m ²)	ϵ_{MAX} (10 ⁻⁴)	u_{MAX} (mm)
Sans effet de sable	52380	5.228	90.72
0.05	59790	6.037	97.01
0.5	73515	7.413	109.44
1	90237	8.906	123.26

➤ Pour U = 12m/s :

Tableau.4.5.Impact du sable sur les caractéristiques structurales de la pale à 12 m/s

D_{MAX} (mm)	σ_{MAX} (kN/m ²)	ϵ_{MAX} (10 ⁻⁴)	u_{MAX} (mm)
Sans effet de sable	92731	8.655	176.41
0.05	100301	9.204	184.96
0.5	114687	10.330	197.83
1	129406	12.102	214.913

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Pour U = 20m/s :

Tableau.4.6.Impact du sable sur les caractéristiques structurales de la pale à 12 m/s

D_{MAX} (mm)	σ_{MAX} (kN/m ²)	ϵ_{MAX} (10 ⁻⁴)	u_{MAX} (mm)
Sans effet de sable	49440	4,99	81,13
0.05	52879	5,65	87,20
0.5	67771	6,31	99,14
1	85540	7,44	110,95

➤ Pour U = 25m/s :

Tableau.4.7.Impact du sable sur les caractéristiques structurales de la pale à 12 m/s

D_{MAX} (mm)	σ_{MAX} (kN/m ²)	ϵ_{MAX} (10 ⁻⁴)	u_{MAX} (mm)
Sans effet de sable	41200	3,80	64,8
0.05	44571	4,81	70,3
0.5	57144	5,60	84,8
1	72806	6,40	94,2

IV.3. 3. Présentation graphique des résultats pour différents débit de sable :

Dans cette partie on représente les courbes des différentes caractéristiques structurelles en fonction de vitesse du vent, pour les deux cas, sans et avec effet de sable (on utilisera différents diamètres : 0.05mm ,0.5mm et 1mm). On refait ce travail pour différents débits de sable (1kg/s, 3kg/s et 5kg/s)

➤ Pour un débit de sable de 1kg/s :

• **Courbe des contraintes :**

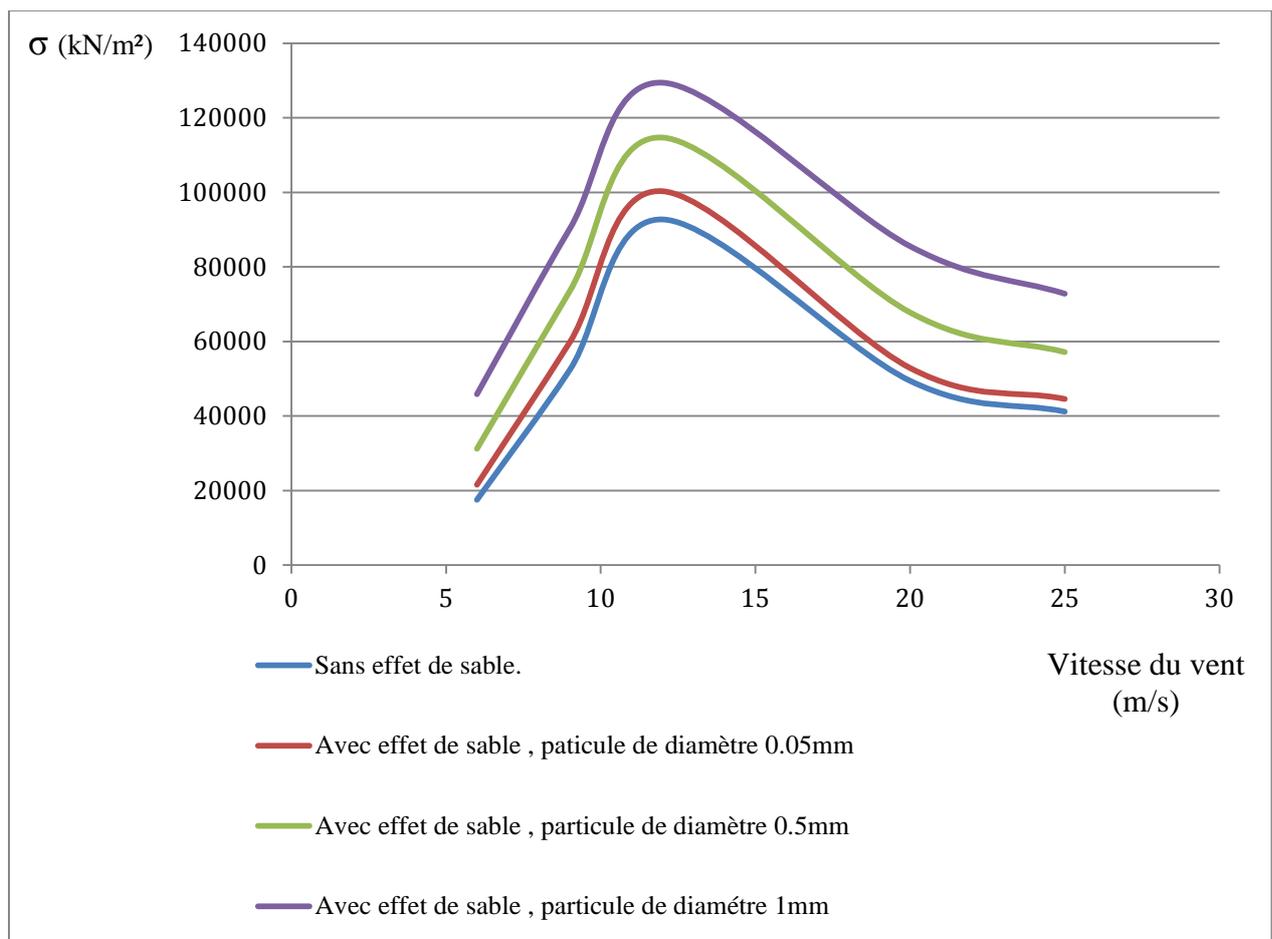


Fig.4.13.Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.

• **Courbe des déformations :**

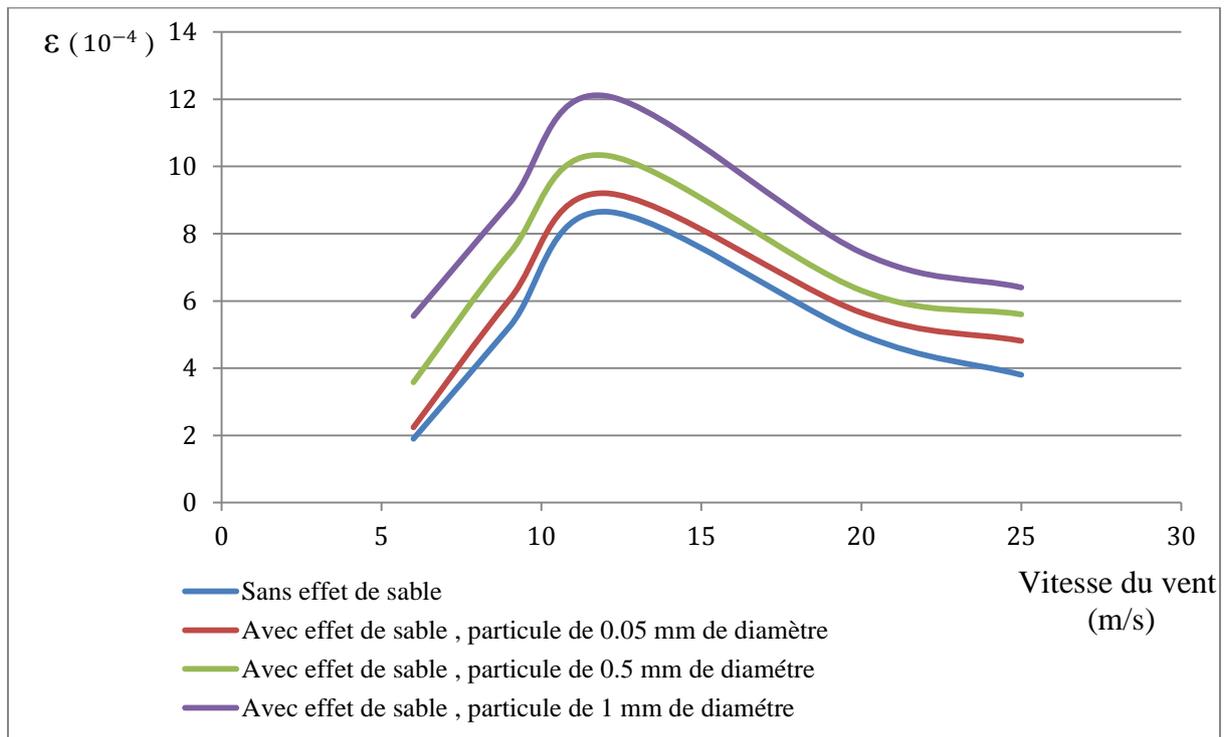


Fig.4.14. Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètres des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.

• **Courbe des déplacements :**

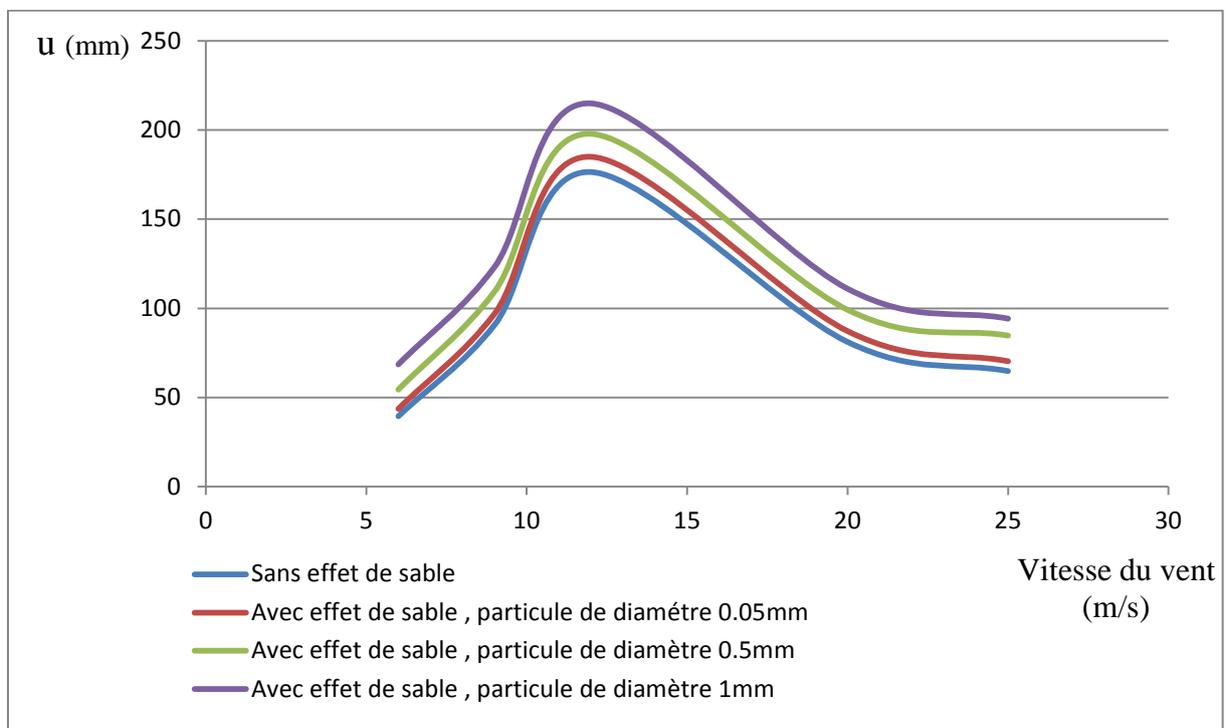


Fig.4.15. Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètres des particules de sable et avec un débit de 1kg/s.

➤ **Pour un débit de sable de 3kg/s :**

• **Courbe des contraintes :**

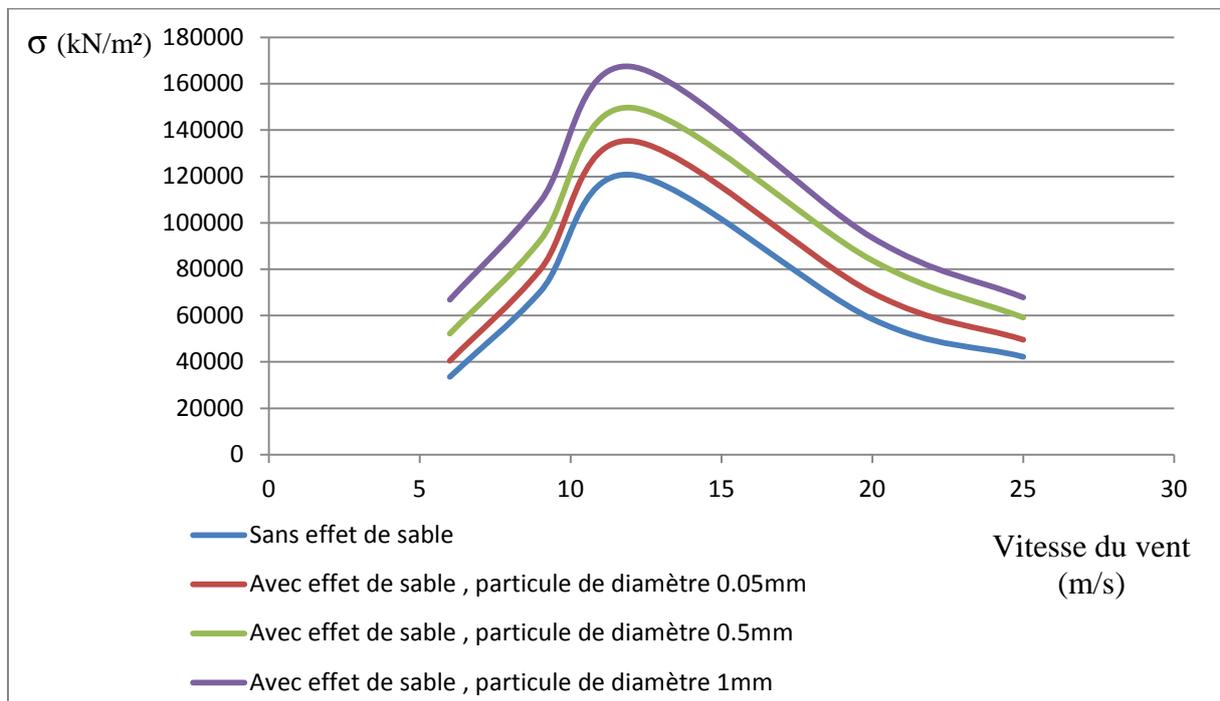


Fig.4.16. Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètres des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.

• **Courbe des déformations :**

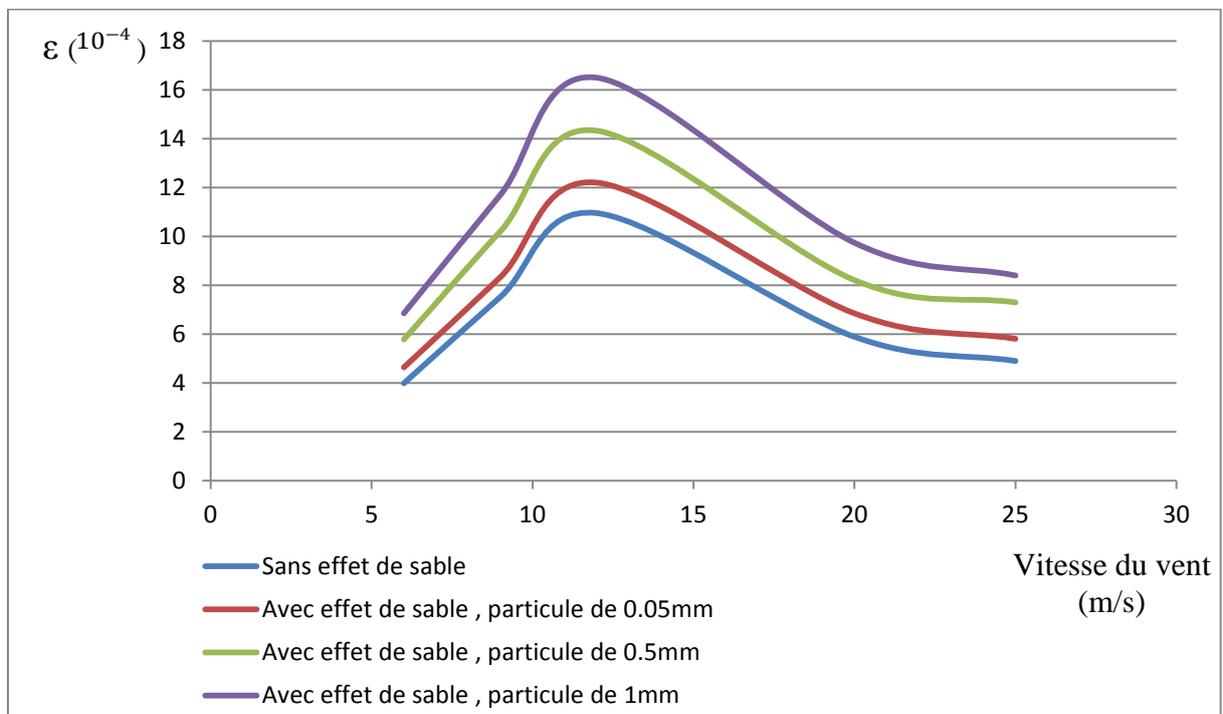


Fig.4.17. Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètres des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.

- **Courbe des déplacements :**

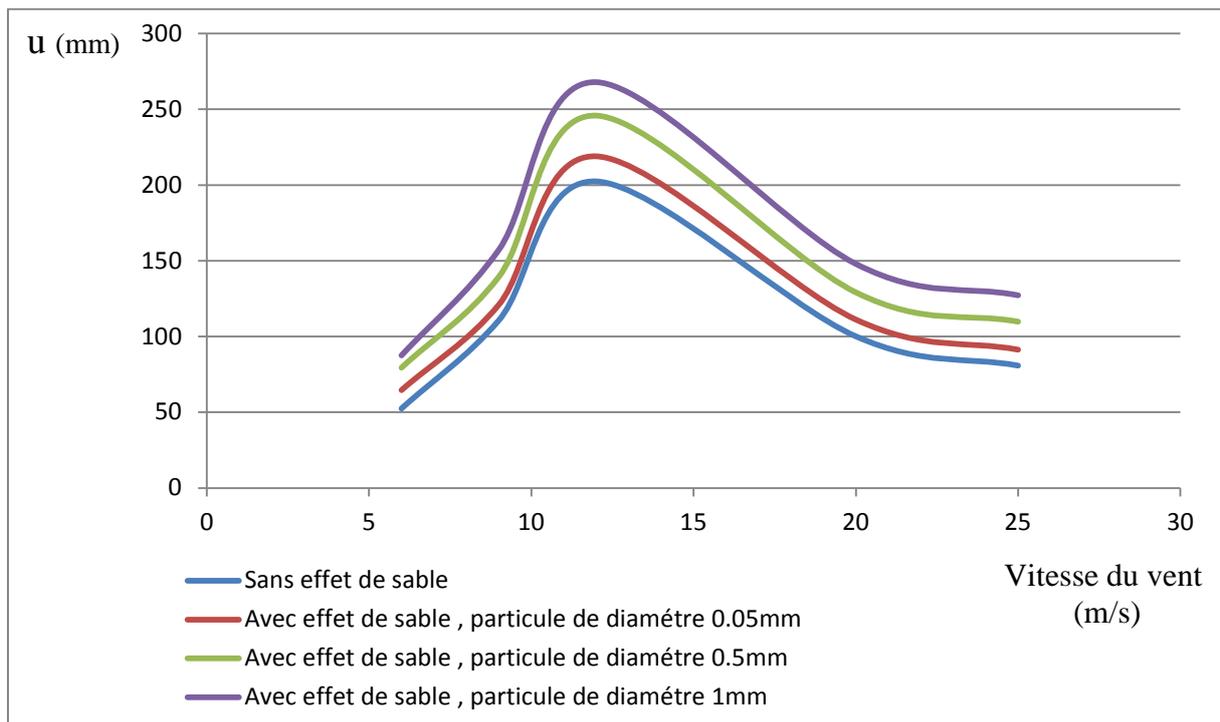


Fig.4.18.Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 3kg/s.

➤ **Pour un débit de sable de 5kg/s :**

- **Courbe des contraintes :**

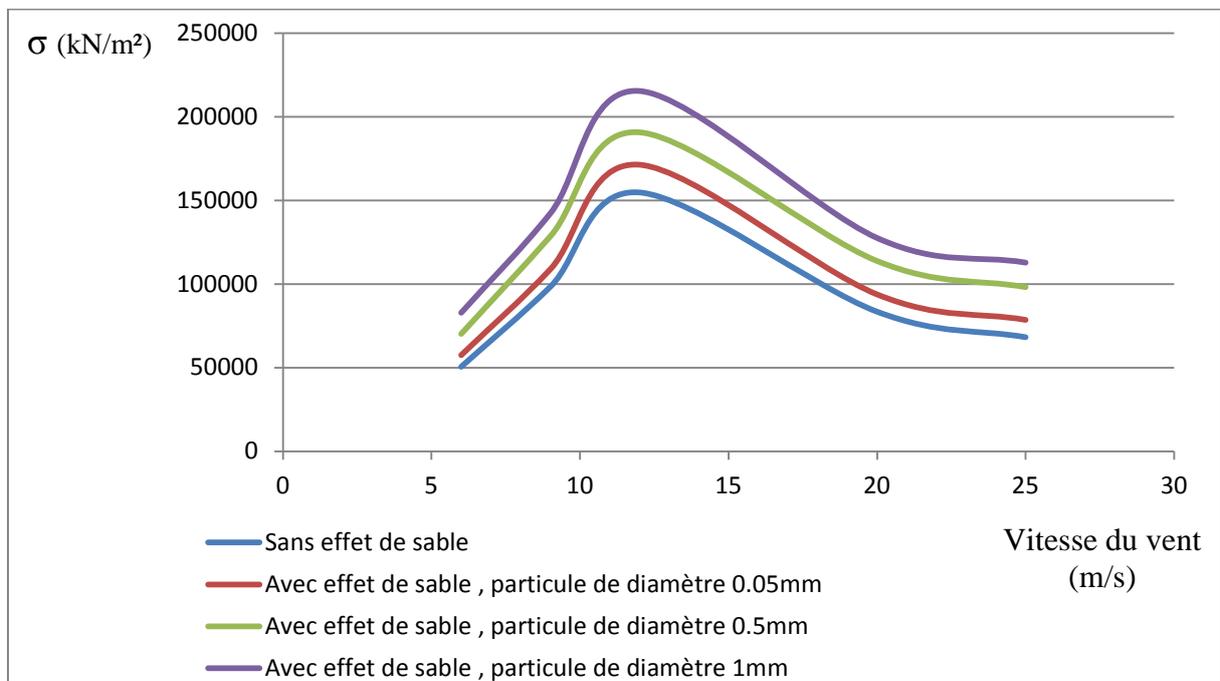


Fig.4.19.Courbe des contraintes en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.

• **Courbe des déformations :**

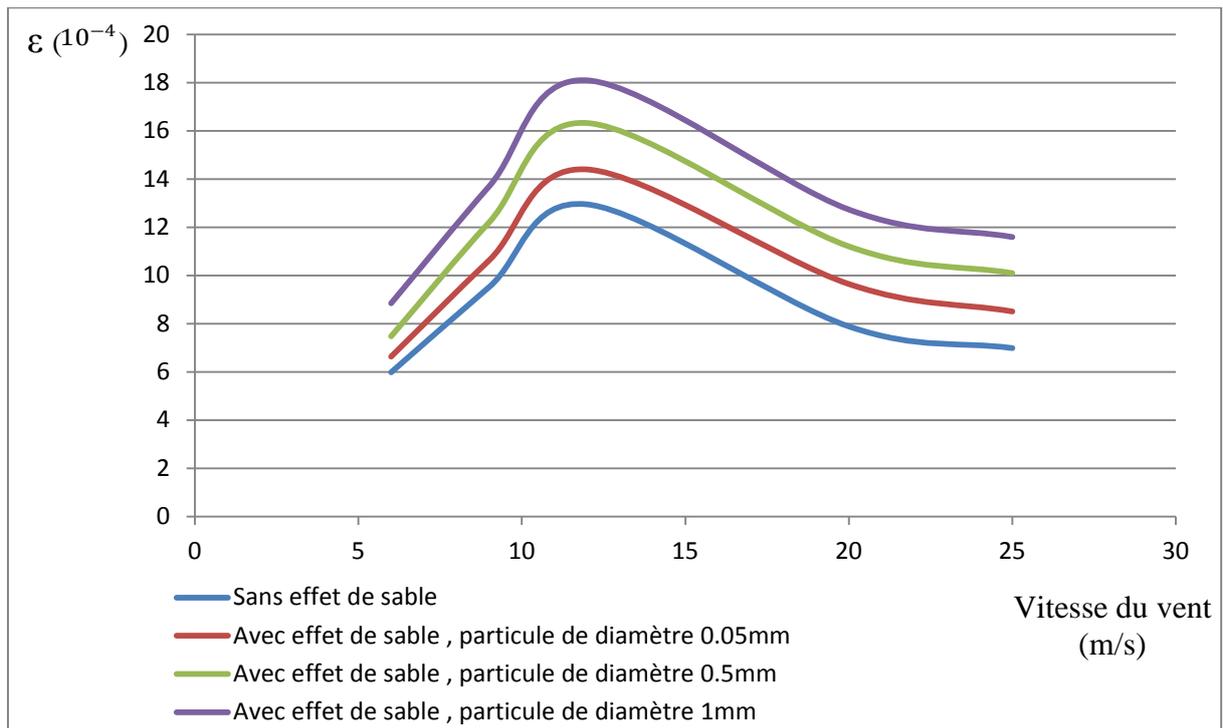


Fig.4.20.Courbe des déformations en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.

• **Courbe des déplacements :**

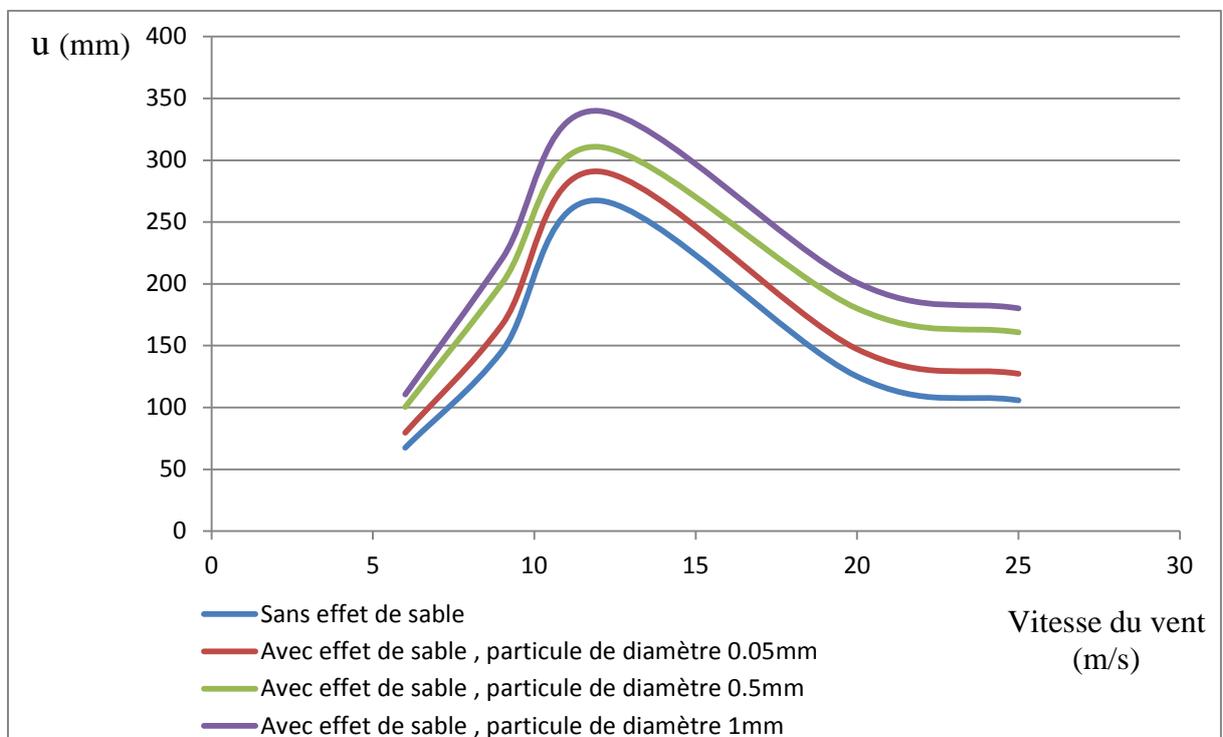


Fig.4.21.Courbe des déplacements en fonction de vitesse du vent, pour différents diamètre des particules de sable et avec un débit de 5kg/s.

IV.3.4. Discussion :

On remarque que toutes les caractéristiques structurelles présentées sur les graphes admettent un maximum pour $U=12-13\text{m/s}$, cela revient aux formules utilisés pour les calculs des différents chargements appliqués aux pales (la poussée et le couple aérodynamique) représentés par les équations (2.17, 2.22 et 2.23), ces formules contiennent les deux coefficients C_p et C_T qui jouent le rôle de coefficients de sécurité, ils tendent à minimiser les charges appliqués à l'éolienne lorsque la vitesse du vent continue à augmenter pour assurer que la contrainte maximale ne dépassera pas la limite élastique du matériau utilisé.

Les particules portées par le vent, qui se déplacent avec une même vitesse et avec un débit de sable important peuvent créer une charge uniforme sur un certain corps lors de l'impact, c'est à dire que l'impact particules/pales va provoquer une force supplémentaire appliquée à l'éolienne, ce qui explique l'augmentation brusque des caractéristiques structurelles pour les vitesses du vent de 6 à 12m/s. Cette force dépend de l'énergie cinétique des particules incidentes, et puisque les particules de grandes tailles ont des énergies cinétiques plus importantes donc l'effet sera plus important pour des particules de grands diamètres.

Les résultats des simulations obtenus indiquent que la pale n'est pas soumise à des contraintes qui dépassent la limite du matériau.

IV.4. Effet d'érosion :

IV.4.1.Introduction :

Cette partie présente les résultats d'une étude qui a pour but d'examiner la détérioration de surface des pales causée par l'impact des particules de sable sur les pales, c'est ce qu'on appelle l'érosion.

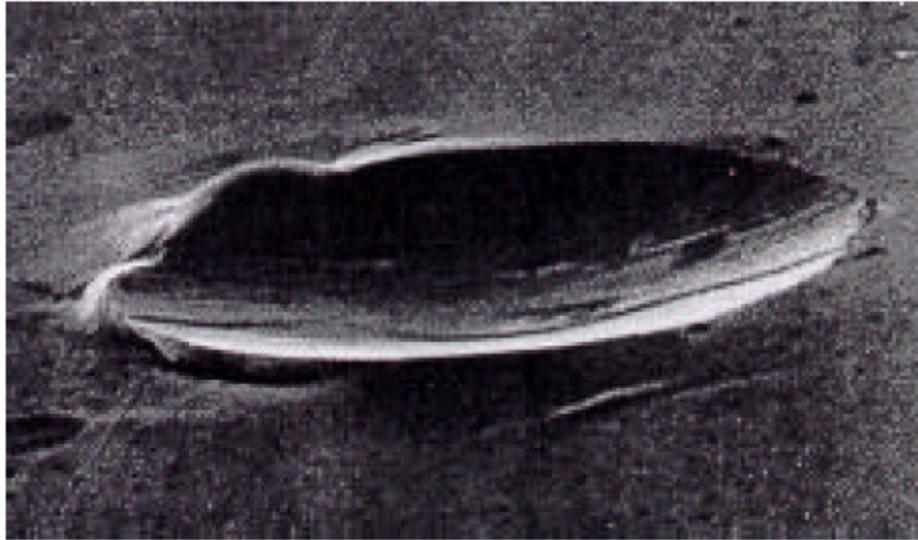


Fig.4.22.Erosion causé par particule sur un métal.

Les matériaux utilisés pour la fabrication de l'éolienne ont progressé rapidement au-delà des alliages ferreux traditionnels. Les chercheurs ont développé des couches spéciales pour minimiser l'effet d'érosion sur les surfaces extérieures.

Les essais expérimentaux montrent que l'érosion et la rugosité de surface augmentent avec l'angle d'incidence des particules et la taille de celles-ci.

IV.4. 2. L'expression et l'unité d'érosion :

Pour pouvoir déterminer le taux d'érosion E , défini comme étant la masse de substrat enlevée (m_v) divisé par la masse de sable réellement utilisée pour l'érosion ($m_{\text{sab,utile}}$), il faut pouvoir mesurer ces deux quantités de manière reproductible et avec suffisamment de précision :

$$E = \frac{m_v}{m_{\text{sab,utile}}}$$

L'unité d'érosion est mg/g (milligramme par gramme).

IV.4. 3. L'angle d'incidence :

L'angle d'incidence est défini comme étant l'angle formé entre la trajectoire de particule incidente et la normale :

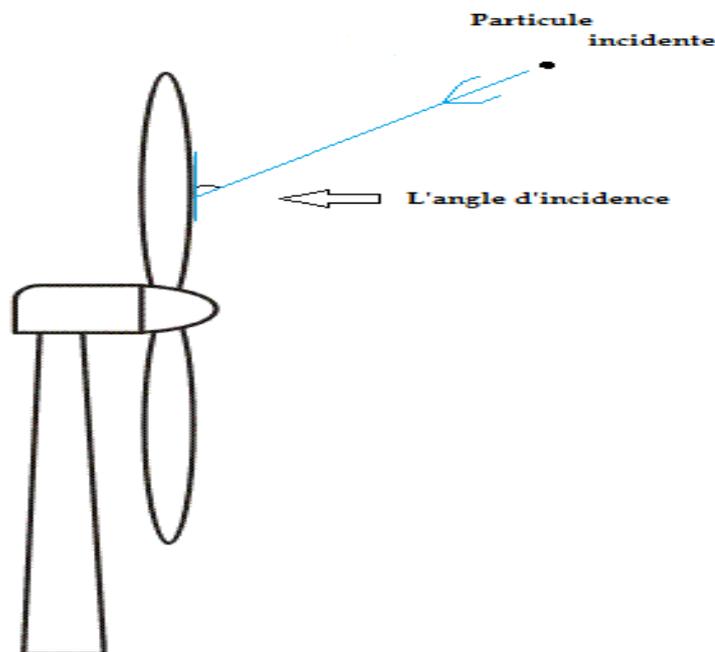


Fig.4.23.Schéma illustre l'angle d'incidence.

IV.4. 4. Paramètres affectant le taux d'érosion :

On va étudier dans cette partie les paramètres affectant l'érosion en effectuant des simulations numériques. On envoie des particules des différents diamètres sur la pale en utilisant plusieurs angles d'incidence afin d'avoir le taux d'érosion pour chaque cas, puis on change la vitesse de particule et on refait l'expérience. On obtiendra les résultats suivants :

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour $U = 6\text{m/s}$:

Tableau.4.8. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 6m/s

α (°) \ D (mm)	0	15	30	45	60	90
0.05	0	1.2	2.65	3.8	5.2	6.43
0.5	0	2.8	4.7	6.57	7.71	8.5
1	0	5.07	7.13	8.5	9.8	11.08

Présentation graphique des résultats :

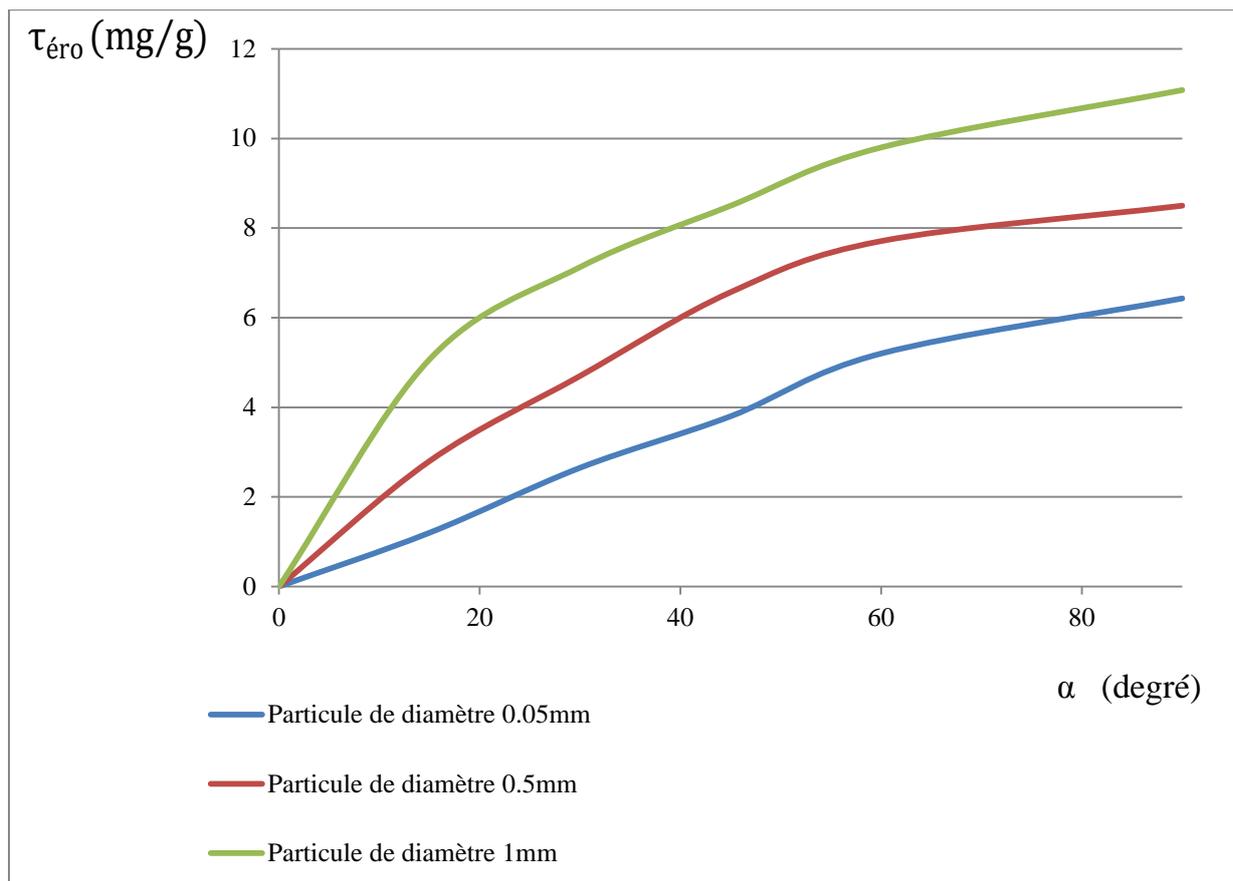


Fig.4.24. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 6m/s.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Pour U = 9 m/s :

Tableau.4.9. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 9m/s

α (°) \ D (mm)	0	15	30	45	60	90
0.05	0	3.48	6.6	8.42	10.02	11.71
0.5	0	4.86	8.34	10.63	12.9	14.82
1	0	6.32	10.2	13.8	15.87	18.01

Présentation graphique des résultats :

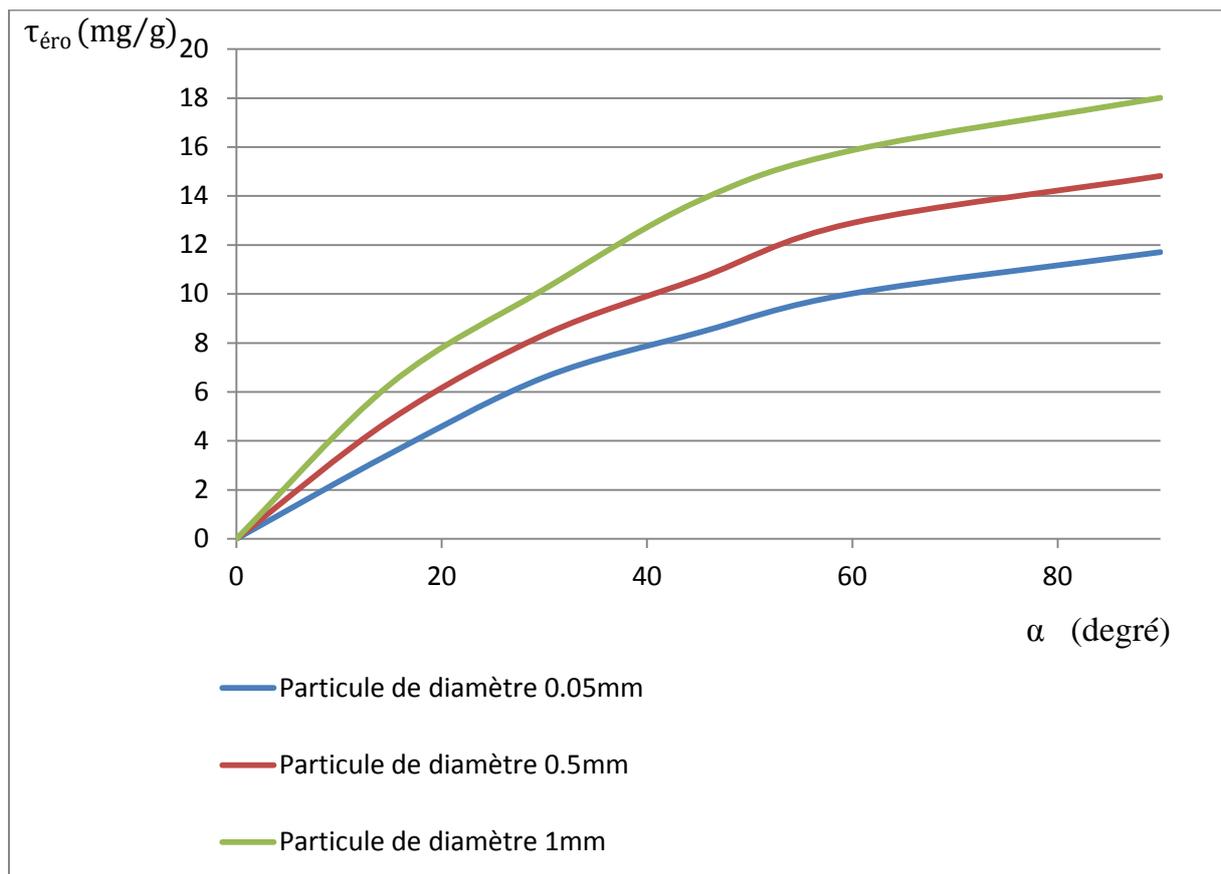


Fig.4.25. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 9m/s.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Pour U = 12m/s

Tableau.4.10. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 12m/s

α (°) D (mm)	0	15	30	45	60	90
0.05	0	4.75	8.24	10.76	12.23	13.97
0.5	0	7.24	11.4	14.45	16.87	19.6
1	0	9.21	13.8	17.91	20.57	22.8

Présentation graphique des résultats :

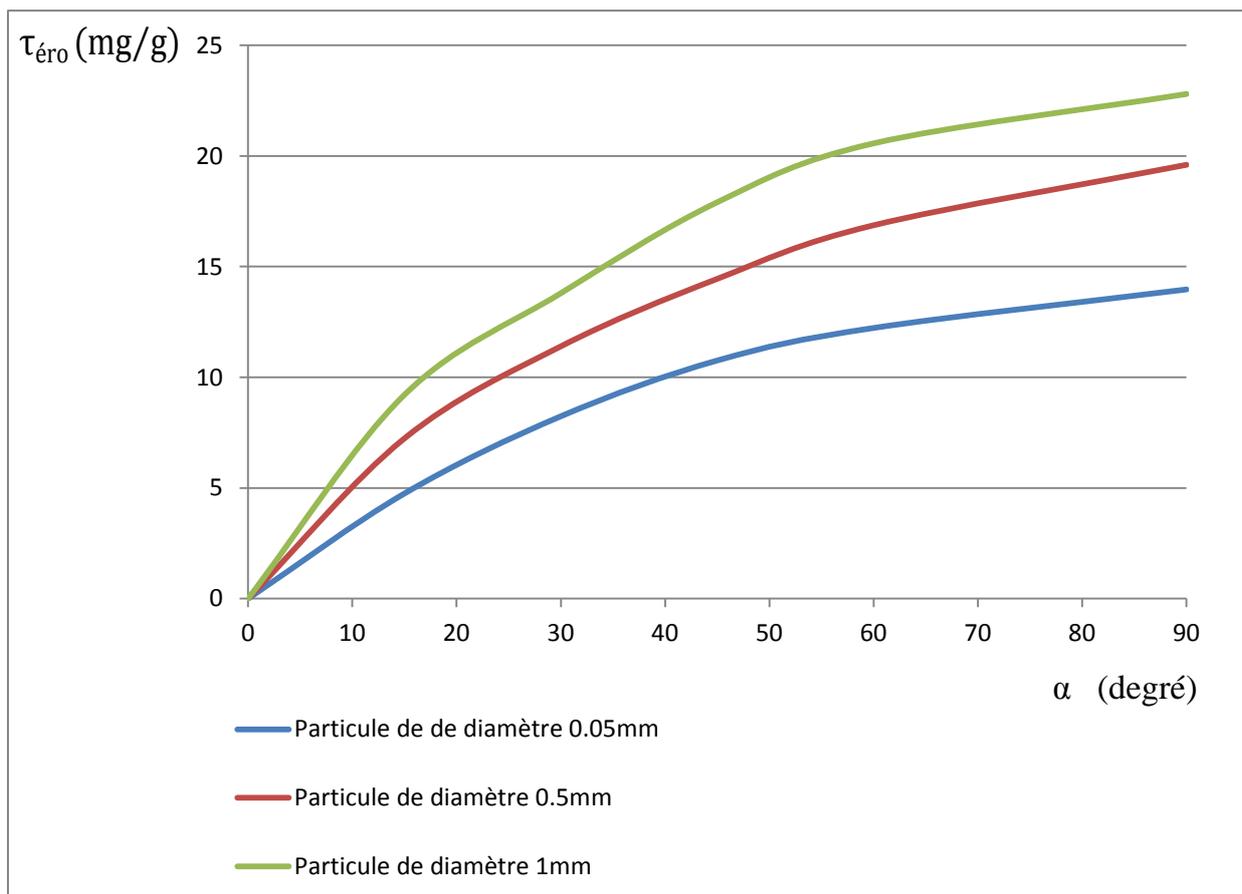


Fig.4.26. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 12m/s.

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

➤ Pour U = 20m/s :

Tableau.4.11. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence et les diamètres de particule à 20m/s.

α (°) \ D (mm)	0	15	30	45	60	90
0.05	0	5.49	8.61	12.35	16.87	20.33
0.5	0	7.97	13.58	17.1	21.4	24.75
1	0	10.65	16.92	22.07	26.69	30.1

Présentation graphique des résultats :

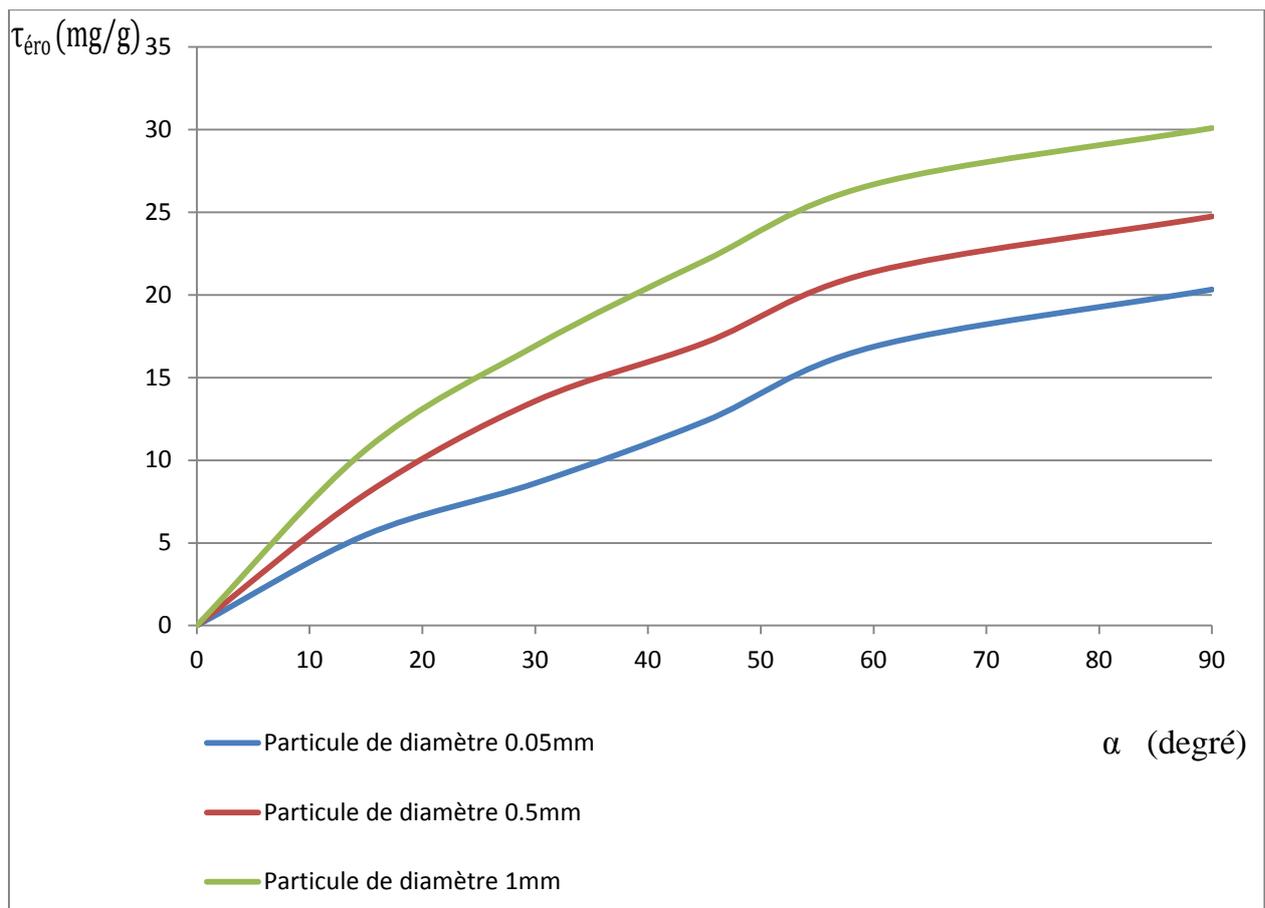


Fig.4.27. Le taux d'érosion en fonction de l'angle d'incidence pour les différents diamètres de particule à une vitesse de 20m/s

IV.4.6. Discussion :

1. La première remarque : le taux d'érosion augmente lorsque l'angle d'impact est grand, et que le max est atteint à 90° .

Explication :

La vitesse V de particule incidente se compose en deux :

V_c : La vitesse verticale à la surface des pales (normale).

V_s : La vitesse tangente à la surface.

α : L'angle d'incidence (impact)

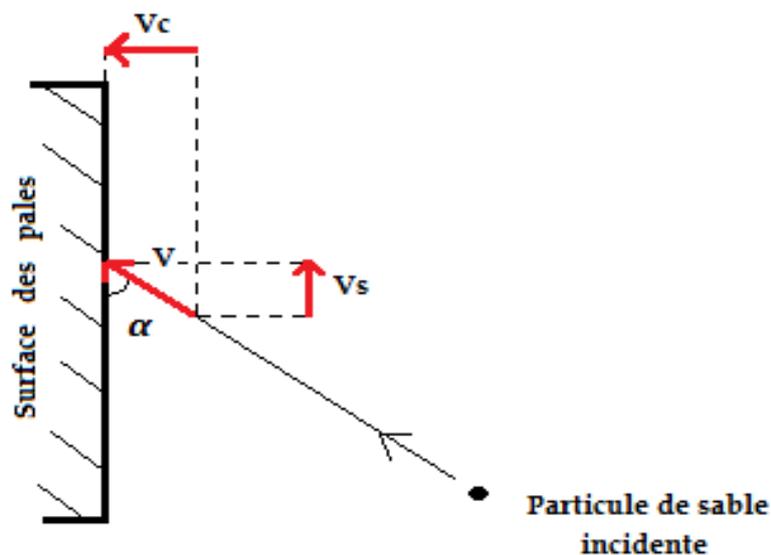


Fig.4.28.Schéma illustre les différentes composantes de vitesse à l'impact.

La vitesse tangentielle V_s n'a aucune influence sur l'intensité de l'impact, ce qui signifie que l'impact dépend essentiellement sur l'énergie cinétique de V_c :

$$E_{Vc} = \frac{1}{2} m Vc^2 \quad \text{et} \quad Vc = V \sin\alpha$$

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

m : La masse de particule de sable

Donc :
$$E_{Vc} = \frac{1}{2} m V^2 \sin^2 \alpha$$

Lorsque $\alpha = 90^\circ$, E_{Vc} est maximale, ce qui revient à dire que l'érosion est maximale.

2. La deuxième remarque : le taux d'érosion augmente avec la vitesse de particule incidente.

Explication :

De même manière, lorsque V_c est grand, l'énergie cinétique E_{Vc} est grande aussi, ce qui conduit à un impact important et un taux d'érosion plus grand.

3. La troisième remarque : le taux d'érosion est plus important lorsque le diamètre de la particule incidente est grand.

Explication :

L'énergie cinétique de vitesse V_c est : $E_{Vc} = \frac{1}{2} m V_c^2$ et $m = \rho V$

La particule incidente est similaire à une sphère : $V = \frac{4}{3} \pi D^3$

D : diamètre de particule incidente.

$$\text{Donc : } E_{Vc} = \frac{2}{3} \pi \rho V_c^2 D^3$$

Cette formule finale montre que l'énergie cinétique E_{Vc} et le diamètre D sont proportionnels, ce qui conduit à dire que l'érosion est plus importante lorsque le diamètre de particule est grand.

CONCLUSION

CONCLUSION

Dans le cadre de sa politique énergétique qui se penche, dernièrement, beaucoup plus vers les énergies renouvelables, l'Algérie lança récemment un projet ambitieux de construction d'une ferme éolienne à Kaberten-Adrar comportant 12 turbines éoliennes, avec une capacité globale qui dépasse les 10 MW. Cependant, les vents de sable et les niveaux de température extrêmement élevés, qui caractérisent justement ces régions, ont une influence grave sur le fonctionnement des éoliennes.

Pour ce faire, ce travail est consacré pour l'étude de l'impact de vent-de-sable sur le fonctionnement d'aérogénérateurs et leurs performances aérodynamiques et qui a pour but de montrer les effets indésirables de ce phénomène afin de bien gérer ce projet réalisé à Adrar.

Au départ on a fourni toutes les caractéristiques structurelles de l'éolienne, puis on a entamé l'étude aérodynamique qui nous a permis de déterminer toutes les forces qui s'exercent sur l'éolienne, la vitesse de rotation, le couple aérodynamique, et le couple utile, pour les différentes vitesses du vent. Les calculs effectués montrent qu'il y a des pertes de puissance sur le niveau des éoliennes.

Afin d'exécuter la résolution par la simulation numérique, on a effectué une étude consacrée aux calculs de résistance des matériaux et l'étude technologique des différents organes constitutifs.

On a effectué la simulation numérique sur les pales, dans les deux cas avec et sans effet de sable et pour des différentes vitesses du vent, et différents diamètres des particules incidentes. A partir de là, on a déterminé les distributions des contraintes, des déplacements et des déformations des pales pour les différents cas, cela nous a permis de constater que ces paramètres augmentent dans le cas de l'impact de sable et que leurs valeurs dépendent de la taille des particules et la vitesse de celles-ci.

Par la suite, On a étudié un des plus indésirables conséquences affectant la vie de l'éolienne, c'est l'effet d'érosion qui attaque la surface extérieure des pales, et toujours à l'aide des

CONCLUSION

simulations numériques on a pu estimer le taux d'érosion en fonction des différents paramètres. On a conclu que ce phénomène dépend essentiellement de:

- La vitesse des particules de sable incidente (vitesse du vent).
- La taille des particules de sable.
- L'angle d'incidence (l'angle de l'impact).

Comme perspectives des travaux futurs, le développement des matériaux utilisés pour la fabrication des éoliennes est suggéré, on peut aussi développer des couches spéciales pour les organes extérieurs de l'éolienne afin de les protéger de l'effet d'érosion pour assurer une longue durée de vie à ces éléments.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D A. Spera: “Wind Turbine Technology Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering Second Edition”. Asme, New York 2009.
- [2] M. Rapin, J-M. Noël: “Energie Eolienne/Principes Études De Ca”. Edition Dunod 2010
- [3] Blazek J., Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications, Fifth edition *Alstom Power Ltd., Baden-Daettwil, Switzerland, (2001),440.*
- [4] E.Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005.
- [5] The World Wind Energy Association, Half-year Report 2011.
- [6] C.Boris et G. Christophe « Energie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspective suel’avenir <http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole.html>.
- [7] C. Benoudjit « étude pour la conception d’un banc d’essais pour énergie éolienne » : thèse de magistère de l’université de Batna, juin 2004.
- [8] Gradshteyn I. S. and Ryzhik I. M., Tables of integrals, series, and products, Seventh edition, *Academic Press, New York, (2007), 1200.*
- [9] R. Cardenas, R. Pena, G. Tobar, J. Clare, P. Wheeler, and G. Asher, “Stability analysis of a wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator fed by a matrix converter”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4194–4206, October 2009.
- [10] Annual report 2010, disponible à partir de : [www. Gwec.net](http://www.Gwec.net), 2010.
- [11] A. Ahmidi “Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques”, Thèse de doctorat en génie électrique de l’Ecole Centrale de Lille, pp. 1-200, 2010.
- [12] Baromètre Eolien 2009, EurObserv’ER, *Revue Systèmes Solaires*, pp.43-73, mars 2010.
- [13] S. M. Muyeen, “Wind Power”, ISBN 978-953-7619-81-7, Intech, 2010.
- [14] Site internet du Centre du Développement et de la Recherche des Energies Renouvelables (CDER) disponible à partir de : <http://portail.cder.dz/spip.php? article1014>, 2011.
- [15] L. Hamane, « Les ressources éoliennes de l’Algérie », *Bulletin des Energies Renouvelables*, no. 3, Juin 2003.
- [16] 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.
- [17] S El Aimani, « 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). [10] R. Swisher, C. Real d.

[18] 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 No36 mars 2004, pp. 1-14.

[19] B. Milton, " Le Génie Electrique dans le Vent, Etat de L'art et Recherches dans le Domaine de la Génération Eolienne " JCGE 03 Saint Nazaire, 2003.

[20] H. De Battista, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, "Dynamicsliding mode power control of wind driven induction generators," IEEE Trans.Energy Convers., vol. 15, no. 4, pp. 451–457, Dec. 2000.

[21] M. Rapin, J.M. Noël, " Energie Eolienne, principe - Etude de cas", Dunod, ISBN : 978-2-10-050801-3, 2010.

[22] http://www.thewindpower.net/turbine_fr_42_gamesa_g52-850.php, 27 avril 2012.

[23] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.

[24] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur, D3960, 2004.

[25] B. Paluch, « Introduction à l'énergie éolienne », Revue REE, no. 5, pp. 35-50, Mai 2005,

[26] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", Revue J3Ea, vol. 5, Hors Série 1, EDP Science, 2006.

[27] F. Messai, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable.".Thèse de Magister Institut d'électrotechnique Université mentouri constantine 2009.

[28] www.cd3wd.com/

[29] M.JOURIEH- Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne à fin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 20 décembre 2007.

[30] Technique de l'ingénieur D 3 960. Jean-Louis COUDERT Ingénieur des Hautes Études Industrielles (HEI). Ingénieur au Service Études Machines Tournantes 2002.

[31] J.FMANWELL, J.G Mc GOAN, A.LROGERS wind energy explained -theory, design And application, Amherst, USA.

[32] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'université de Heneri Poincaré, Nancy I, 11-12-2006.

[33] A.Mirecki, "Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance", Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de

Toulouse, 2005.

[34] <http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>

[35] www.economie.gouv.fr/

ANNEXE

A. Théorème d'Ostrogradski :

Soit Ω un volume simplement borné par une surface fermée $d\Omega$ et soit f un champ de vecteurs continûment dérivable dans Ω et sur $d\Omega$. Si n est le vecteur normal à l'élément de surface dS de $d\Omega$ orienté vers l'extérieur, alors :

$$\oint_{d\Omega} f n \, dS = \int_{\Omega} \nabla f \, d\Omega$$

B. Propriétés mécaniques de l'acier allié inoxydable :

Matériau	Module d'élasticité N/m ²	Coefficient de poisson S O	Limite de traction N/m ²	Limite d'élasticité N/m ²	Module de cisaillement N/m ²
Acier inoxydable	2.10 10 ¹¹	0.28	0.723 10 ⁹	0.620 10 ⁹	7.9 10 ¹⁰

C. La masse volumique de l'air à une température T :

Pour $T_0 = 273,15$ K (0 °C) égale à $\rho_0 = 1,293$ kg/m³. (Conditions normales de température et de pression)

Pour une température T :

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{T}$$

Exemple : Si la température moyenne au Sahara vaut 45 °C alors :

$$\rho = 1.110 \text{ kg/m}^3$$