

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Scientifique

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences et de la Technologie

N° d'ordre :

N° de série :

**Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
Master**

**Domaine :** Science et Technologie

**Filière :** Électrotechnique

**Spécialité :** Énergies Renouvelables

**THEME :**

**ETUDE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION  
D'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

**Présentés par :**

**SAÏD SAGGUER**

Soutenu le 19 /09 / 2017

**Devant le jury:**

<b>Président :</b>	<b>F. AKERMI</b>	<b>M.A.A Université De Ghardaia</b>
<b>Encadreur :</b>	<b>K. FERKOUS</b>	<b>M.A.A Université De Ghardaia</b>
<b>Examineur :</b>	<b>A. DJELLOULI</b>	<b>M.A.A Université De Ghardaia</b>
<b>Examineur :</b>	<b>K. BEN YELLOUL</b>	<b>M.R.A URAER De Ghardaia</b>

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016/2017**

# *Remerciements & Dédicaces*

*Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers Dieu de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'étude.*

*Je tiens à remercier Mr. ferkous khaled pour avoir accepté de m'encadrer, je lui exprime par la présente toute ma gratitude pour la confiance qu'il m'a prodigué, pour ses encouragements continus, pour le suivi de près de mon travail et pour ses qualités humaines.*

*Mes remerciements vont de même aux autres membres de jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir cette thèse. Il s'agit, en l'occurrence de Messieurs:*

*Faouzi. AKERMI      M.A.A Université De Ghardaia  
Abdelkader. Djellouli      M.A.A Université De Ghardaia  
Kamel. Ben Yelloul      M.R.A Uraer De Ghardaia*

*Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études.*

*Je tiens à remercier vivement tous mes collègues de la promotion 2015/2016 option énergies renouvelables pour leurs amitiés et collaborations, et particulièrement Mrs: Zerbaní. Abdallah , Zehouani. Belkheir*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à :*

*Mes Chers Parent*

*Mes Chers Frères Et Sœurs*

*Ma Chère Epouse Et Mes Enfants*

*( farah, isra, niha, ibtiha, mehdi)*

## Résumé

Le travail traité dans cette mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude de systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisant une génératrice asynchrone GAS travaillant en mode isolé (non connectée au réseau).

Les résultats des différentes simulations sous MATLAB ont été analysés (influence des paramètres d'auto-amorçage et du type de charge) pour permis d'aboutir à d'intéressantes conclusions pour le bon fonctionnement de la chaîne énergétique.

Nous avons finalisé ce travail par une modélisation de la turbine éolienne associée à la génératrice asynchrone à cage et une simulation de l'ensemble sous *SIMULINK* ;

### Mots clés :

Éolienne - Génératrice Asynchrone - Modélisation – Simulation - Matlab/Simulink.

## Abstract

In our memory, we are essentially interested by the modeling and the simulation of a small wind power station using in isolated mode.

The simulations of the generator under MATLAB software are analyzed (effect of the parameters of self-excitation and the type of load).

We conclude this work by the modeling and the simulation of the wind turbine and asynchronous generator under *SIMULINK*.

### Key words:

Wind Power – Asynchronous – Modeling – simulation -Wind Turbine.

## ملخص

الأعمال المنجزة في المذكورة تتعلق أساسا على النمذجة والمحاكاة لسلسلة توليد الكهرباء بالطاقة الهوائية و التي تعتمد على مبدأ مولدة متزامنة من اجل استعمالها في المناطق النائية

وكانت التحليلات لنتائج المحاكاة المختلفة في الماتلاب تعطي التصاريح التي تؤدي إلى استنتاجات مثيرة للاهتمام لحسن سير العمل في سلسلة الطاقة.

ولتأكيد النتائج المحصل عليها باستعمال برنامج الماتلاب قمنا بإنشاء نموذج للنظام ( توربين هوائي+مولد لاتزامني ) باستعمال برنامج السيميلينك.

**الكلمات المفتاحية:**

التوربين الهوائي - مولد لاتزامني - إنشاء نموذج - المحاكاة - ماتلاب/سيميلينك

## Liste des symboles

$P_{vent}$	puissance du vent.
$P_{turbine}$	Puissance produit par la turbine.
$C_p$	Coefficient de puissance.
$\Omega_{Turbine}$	vitesse mécanique de la turbine.
$\rho$	masse volumique de l'aire.
$C_{aer}$	Couple produit par l'aérogénérateur.
$\lambda$	Rapport de vitesse.
$E_C$	énergie cinétique du vent.
$F$	La fonction de répartition du vent.
$F(v)$	La fonction de répartition.
$f(v)$	La densité de probabilité.
$k$	Paramètre de forme caractérise la répartition du vent.
$c$	Paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent.
$MPPT$	Maximum Power Point Tracking.
$P_{ele}$	Puissance électrique produit par l'éolienne.
$f$	Le coefficient de frottement du rotor de la génératrice.
$C_m$	Le couple d'entraînement de la génératrice électrique.
$\Omega_m$	La vitesse du rotor de la génératrice.
$\beta$	L'angle de calage.
$R$	La longueur de la pale.
$V_1$	La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.
$V$	la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne.
$V_2$	la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

<i>GAS</i>	Génératrice asynchrone.
<i>g</i>	glissement.
<i>ns, nr</i>	vitesses de rotation rotorique et statorique en tr/min.
<i>Cem</i>	couple électromagnétique de la génératrice.

---

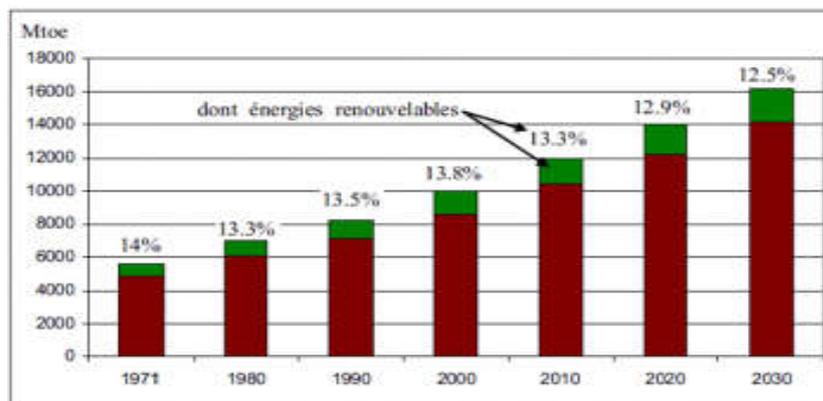
## **Sommaire**

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les Systèmes Eoliens.....</b>	<b>7</b>
<b>I.1.Introduction .....</b>	<b>8</b>
<b>I.2. Production D'énergie Electrique à Partir Des EnR.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3. Principes Et Eléments Constitutifs D'une Eolienne.....</b>	<b>9</b>
I.3.1.Définition De L'énergie Éolienne .....	9
I.3.2.Historique De L'éolien.....	10
I.3.3. Les enjeux des éoliennes.....	11
I.3.4.Évolution Des Coûts De Production.....	13
I.3.5.Constitution D'une Eolienne « Classique ».....	15
I.3.6.Modes D'installation Et Différents Types D'éoliennes.....	16
I.3.7. Systèmes De Régulation De Vitesse D'une Éolienne.....	19
<b>I.4.Caractérisation Du Vent .....</b>	<b>20</b>
I.4.1.Répartition instantanée de la vitesse du vent.....	20
I.4.2.Répartition Régional de la vitesse du vent.....	22
I.4.3.L'histogramme des vitesses de vent.....	24
I.4.4.Distribution de Weibull.....	24
I.4.5.Influence de la hauteur.....	25
<b>I.5. Production Optimale D'énergie (MPPT).....</b>	<b>26</b>
<b>I.6. Facteurs influant sur le rendement énergétique .....</b>	<b>27</b>
<b>I.7. Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>Chapitre II : Modélisation Mathématique de la Turbine Eolienn....</b>	<b>30</b>
<b>II.1.Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>II.2.Notions Théoriques Sur L'aérogénérateur .....</b>	<b>31</b>
II.2.1.Puissance disponible .....	31
II.2.2.Puissance récupérée.....	32
II.2.3.Coefficient De Puissance $C_p$ .....	33

II.2.4.Couple Produit Par L'éolienne.....	33
II.2.5.Vitesse Spécifique De L'éolienne.....	34
II.2.6. Limite De Betz .....	34
<b>II.3.Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>Chapitre III : Simulation de la Turbine Eolienne.....</b>	<b>40</b>
<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>III.2.Présentation de l'environnement <i>Simulink</i>.....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.Modèle d'éolienne avecMachine Asynchrone.....</b>	<b>42</b>
III.3.1.Partie Aérodynamique (le Vent).....	43
III.3.2.Partie Mécanique.....	44
III.3.2.1.Modèle de la Turbine.....	44
III.3.2.2.Modèle du Multiplicateur.....	47
III.3.2.3.Modèle de l'arbre.....	47
III.3.3.Partie Electrique .....	49
<b>III.4.Résultats de Simulation.....</b>	<b>52</b>
<b>III.5.Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>58</b>
<b>References.....</b>	<b>59</b>

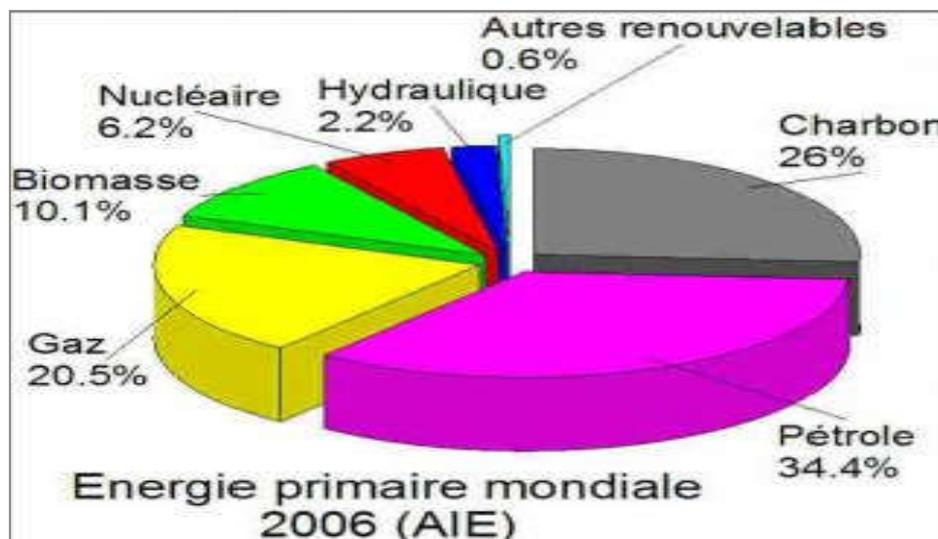
## Introduction Générale

Pour vivre, l'homme a toujours eu besoin d'énergies. Mais depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, il puise dans des ressources non renouvelables qui s'épuisent tous les jours un peu plus. L'énergie la plus usitée dans le monde est d'origine fossile, comme le charbon, le pétrole ou le gaz... Cependant, ces réserves ne se trouvant pas en quantité suffisante sur la terre pour les besoins énergétiques des générations futures, il faut découvrir des nouvelles sources. En effet, la Figure ci-dessous montre que la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.[1]



### Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [1]

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La Figure ci-dessous montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. [1]



la répartition d'énergie primaire dans le monde [1]

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Ainsi, au fil des années et des sommets écologiques, les énergies dites « propres » ont été mises en valeur. Il s'agit d'énergies fournies par le soleil ou qui en découlent, comme le vent, les chutes d'eau, les végétaux, les marées. Ces types d'énergies résolvent la problématique expliquée précédemment. C'est ce qu'on appelle des énergies renouvelables. Dans ce travail, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. Le but sera de recenser les solutions actuelles dans l'optique d'optimiser le compromis coût/performance au niveau système, c'est à dire en optimisant l'architecture (choix de convertisseur, minimisation des appareils de mesure,...).[1]



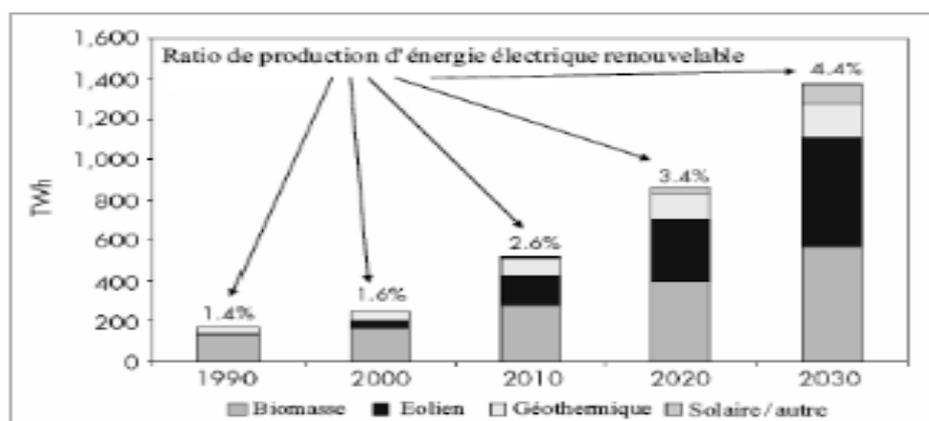
## I.1. Introduction

Les sources renouvelables d'énergie, 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.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). [12]

## I.2. Production D'énergie Electrique A Partir Des Energies Renouvelables

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique. La Figure (I-1) donne la vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir.



**figure (I-1): Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [1]**

### I.3. Principes et Eléments Constitutifs D'une Eolienne

#### I.3.1. Définition de L'énergie Eolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique .[23]

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. [2]

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile).
- pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin (figure (I-2)).



Figure. (I-2) : Éolienne de pompage [2]

Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif Figure (I-3). Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

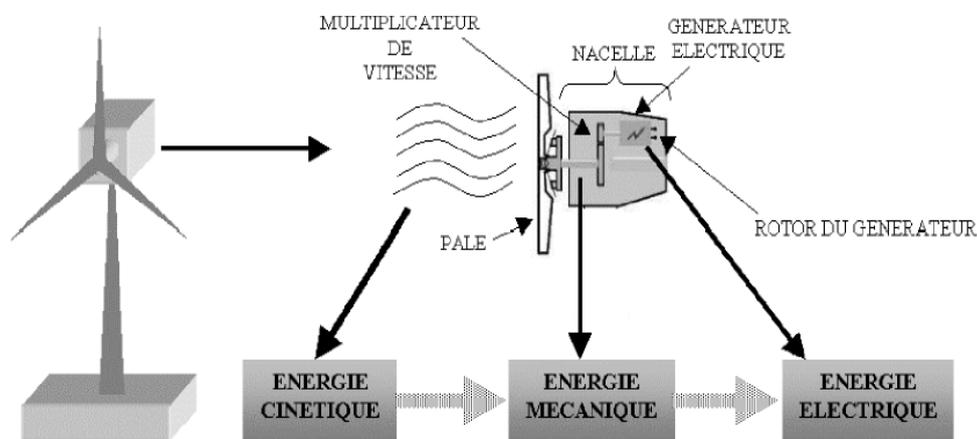


Figure (I-3) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [2]

### I.3.2. Historique de L'éolien

Très tôt, dans l'histoire des techniques le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC) [3].

Les premières éoliennes apparaissent au XIXe siècle aux États-Unis et sont utilisées pour le pompage de l'eau.

**En 1887-1888**, aux États-Unis, Charles F. Brush construit la première éolienne qui produit de l'électricité figure (I-4).

Cette éolienne d'une puissance de 12kW a permis de charger des batteries pour alimenter sa maison en électricité pendant 20 ans.

**En 1891**, le danois Poul La Cour (1846–1908) met en place une éolienne plus efficace permettant de produire 25 kW grâce à des rotors à 4 pales figure (I-5). Il met en évidence que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales apportent un meilleur rendement.

Cette éolienne sera la première utilisée à l'échelle industrielle.

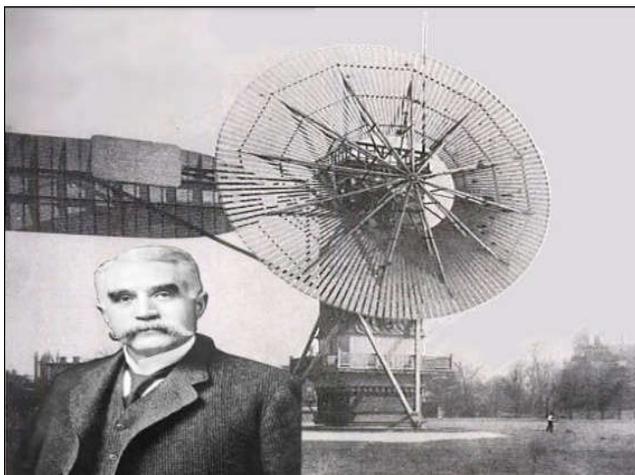


figure (I-4) éolienne de Charles F. Brush en 1887



figure (I-5) éolienne de Paul La Cour en 1891[5]

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité, la crise énergétique de 1973. Enfin plus récemment, les accords de Kyoto devraient être le moteur principal du développement des éoliennes [5].

### I.3.3. LES ENJEUX DES EOLIENNES

#### I.3.3.1. Situation actuelle

Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5 % par rapport à leur niveau de 1990, et ce au cours de la période allant de 2008 à 2012 [17]. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone. Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

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

Aujourd'hui la part des énergies renouvelables est faible dans la production d'électricité mondiale. On peut en conclure que le potentiel des filières énergétiques renouvelables est sous-exploité. Cependant, les améliorations technologiques ont favorisé l'installation de l'énergie éolienne qui n'a pas cessé d'augmenter ces dernières années suivant une évolution exponentielle avec un taux de croissance de 25 % en 2003. figure(I-6) [6].

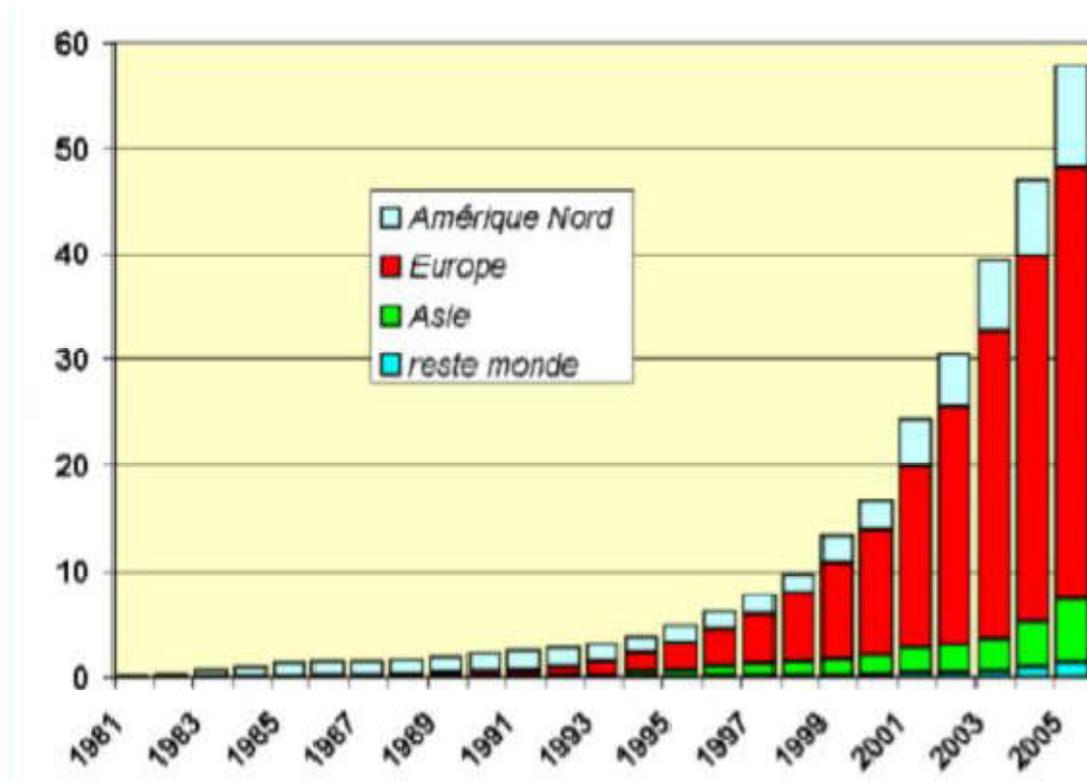


Figure (I-6): Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde en GW [3].

La filière éolienne s'est largement développée en Europe faisant figure (I-7). Cette production assure la consommation électrique de 10 millions de personnes. Par ailleurs, 90 % des fabricants d'éoliennes de moyenne et grande puissance sont des Européens.

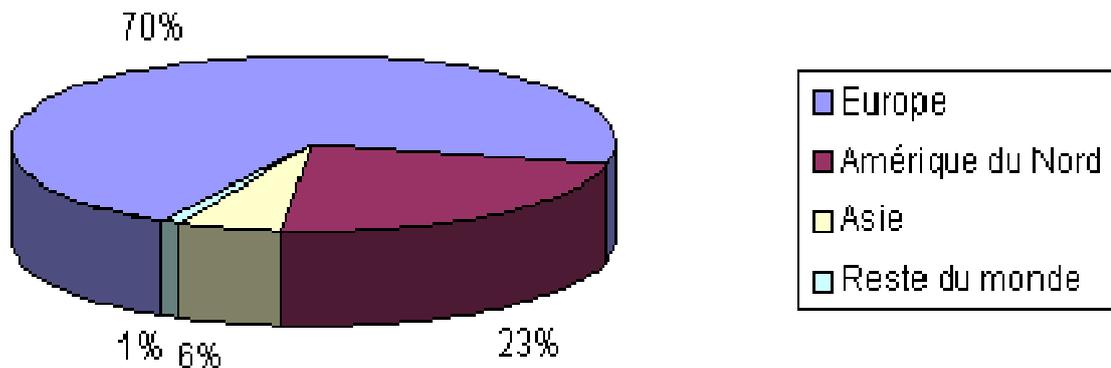


figure (I-7): Répartition de la puissance éolienne mondiale [6]

La répartition de l'énergie éolienne en Europe montre une certaine disparité entre les pays. L'Allemagne est le leader sur le marché européen malgré un ralentissement de ses installations en 2003. L'Espagne, en deuxième position, continue d'installer intensivement des parcs éoliens comme il indique dans la figure (I-8). Le Danemark est en troisième position avec le développement de l'offshore et renouvelle les éoliennes de plus de 10 ans.

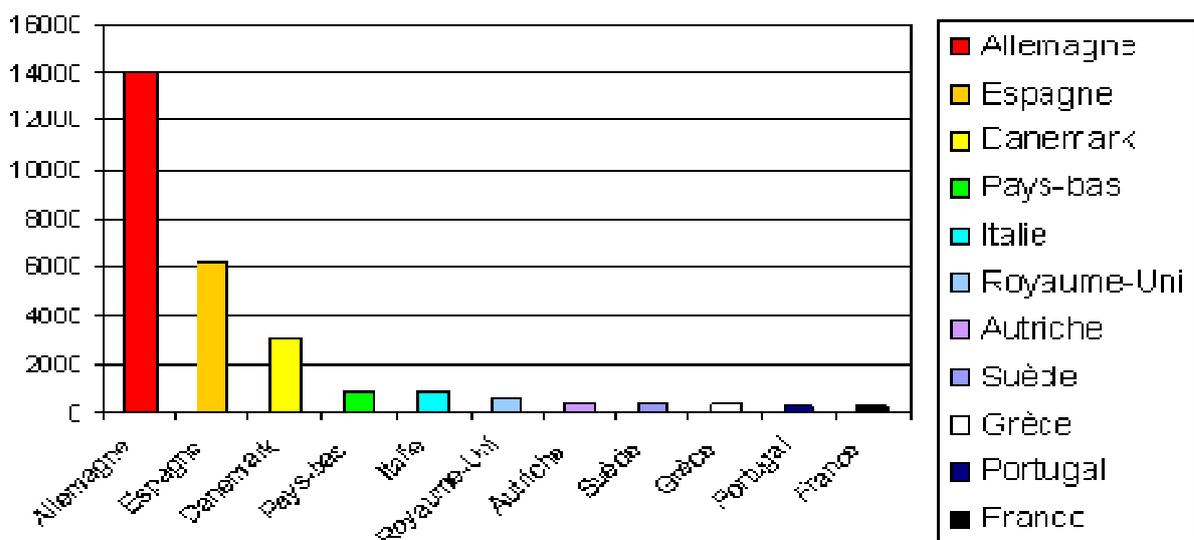
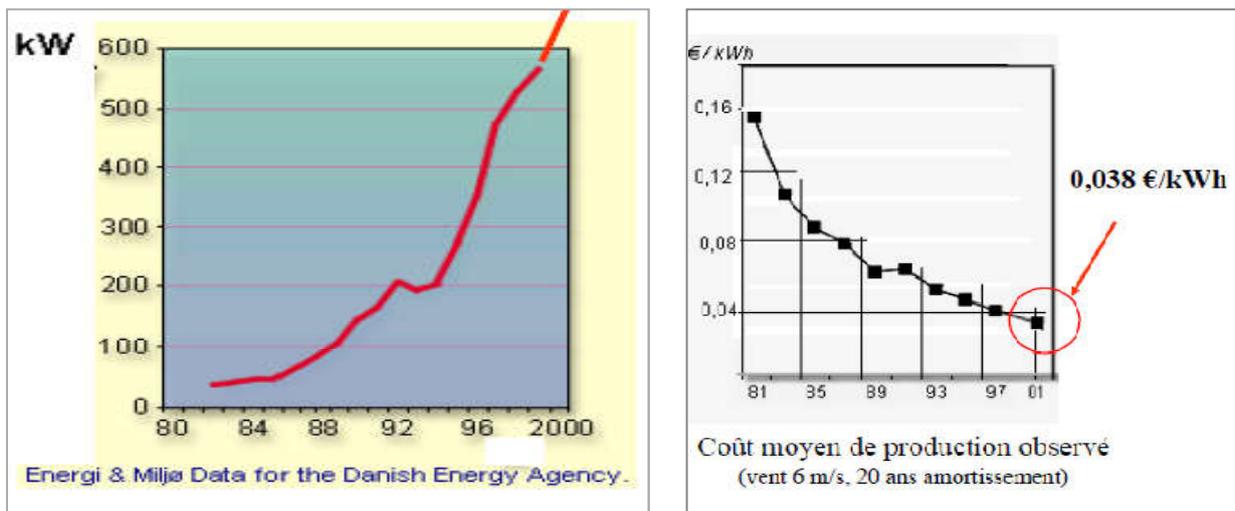


figure (I-8): répartition de l'énergie éolienne en Europe [15]

### I.3.4. Évolution Des Coûts De Production

Le coût et la rentabilité d'un projet éolien prennent en compte aussi bien l'achat de l'éolienne, que l'installation de l'éolienne, l'entretien de celle-ci et la vente des kWh. Une éolienne coûte chère. Il reste encore à réaliser des progrès économiques pour assurer le développement de l'éolien. On estime que le coût d'installation d'un kW est d'environ 1000 euros. Les progrès technologiques et la production accrue d'éoliennes ces dernières années permettent de diminuer ce chiffre régulièrement. Le prix de revient du kWh dépend du coût de l'installation de l'éolienne ainsi que de la quantité d'électricité produite par an. Ce prix varie en fonction du site et diminue avec les avancées technologiques. [6]



la figure (I-9) : Evolution des puissances unitaires et des coûts de production[3]

Le coût global d'investissement dans une ou plusieurs éoliennes intègre :

- les études et le dimensionnement de l'installation ;
- l'obtention des autorisations éventuellement nécessaires pour construire et raccorder au réseau électrique ;
- l'achat du générateur et de sa tour ;
- l'achat des équipements électriques annexes permettant de relier en toute sécurité l'éolienne et le réseau électrique qu'elle alimente ;
- la mise en place et mise en service de l'ensemble du système.

Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs sont fournis dans le tableau suivant.

Société	Type	Prix (Euro)	Composants
AOC	AOC 15/50 50Hz	70110	Turbine, Mât (24m)
Auroville Energy Products	AWS 1500	5572	Turbine, Mât (18, 21 ou 23m), Batterie, Inverter
	AEP 5000	18161	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
	AEP 10 000	30122	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
Bergey Windpower Company	XL1	2657	Turbine, Mât (20m)
	BWC 1500	4428	Turbine
Eoltec	Sirocco 5,5-6	12000	Turbine
	Windrunner E10-25	30000	Turbine
Fortis Windenergy	Espada 800	4126	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Passaat 1400	4747	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Montana 5000	12840	Turbine, Mât (18m), controller
	Alize 10 000	47900	Turbine, Mât (18-36m), controller
Furhländer	FL 30	76000	Turbine, Mât (18-27m)
	FL 100	165000	Turbine, Mât (35m)
	FL 250	269000	Turbine, Mât (41,5-50m)
Gual	Statoeolien GSE 4	16000	Tout compris
Kestrel Wind Turbines	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
Provenenergy	WT600	4555,2	Turbine, Mât (12m)
	WT2500	9767,4	Turbine, Mât (11m)
	WT6000	16738,9	Turbine, Mât (15m)
	WT15000	33434	Turbine, Mât (15m)

Table (I-1) : Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs [15]

### I.3.5. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [15] :

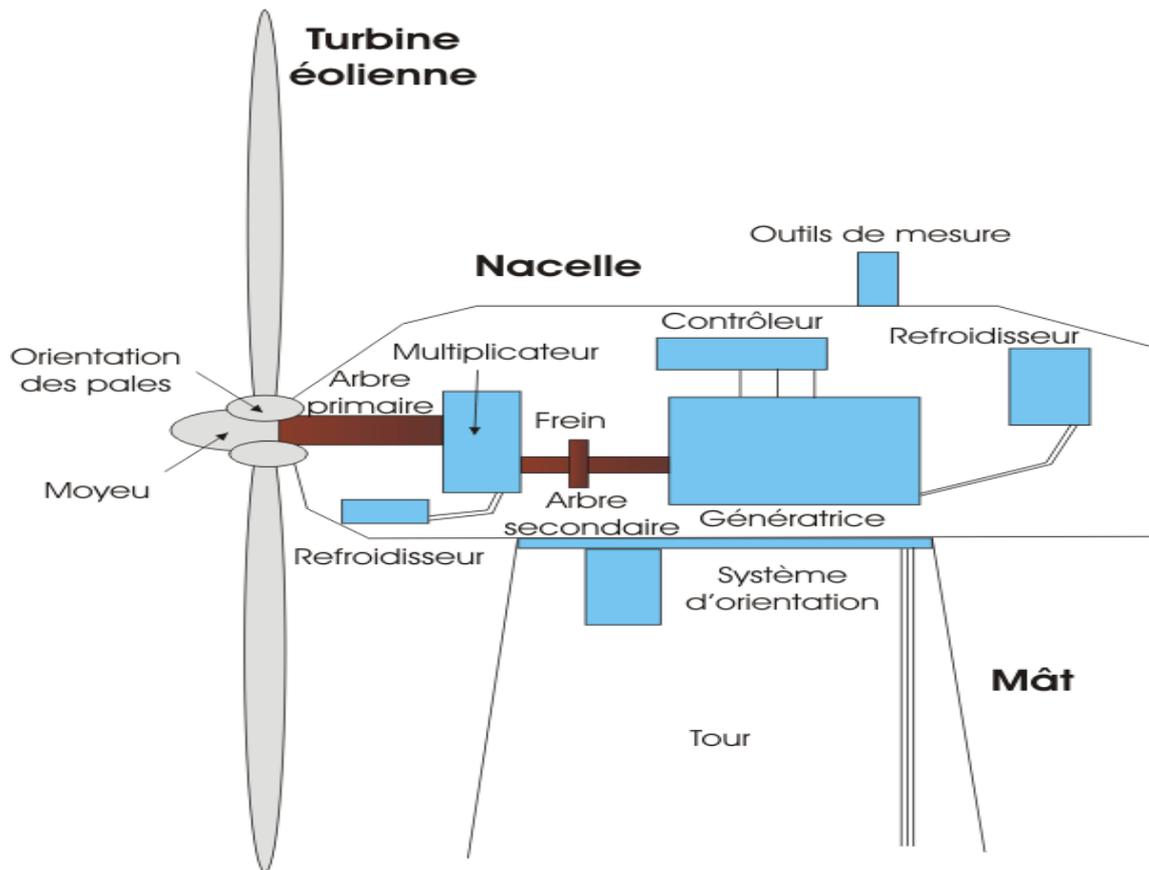


Figure (I-10): Principaux composants d'une éolienne [15].

- **Le mât**: est généralement un tube en acier ou une tour en treillis. Il supporte le rotor et la nacelle. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition au vent souhaité. plus la hauteur du mât augmente plus la vitesse du vent et le coût de la structure augmentent. Généralement on choisit un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre des pales. La hauteur d'une éolienne varie entre 40 et 80 mètres. [6]

- **La nacelle:** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- **Le rotor:** Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre des pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire.
- Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées [7].

### I.3.6. Modes D'installation Et Différents Types D'éoliennes

L'installation d'éoliennes en mer, appelées offshore, bien qu'elle soit plus coûteuse qu'à terre, a l'avantage de préserver le paysage terrestre à la condition qu'elles soient éloignées côtes.

Il existe deux types d'éoliennes : certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres avec un axe vertical, perpendiculaire au sol.

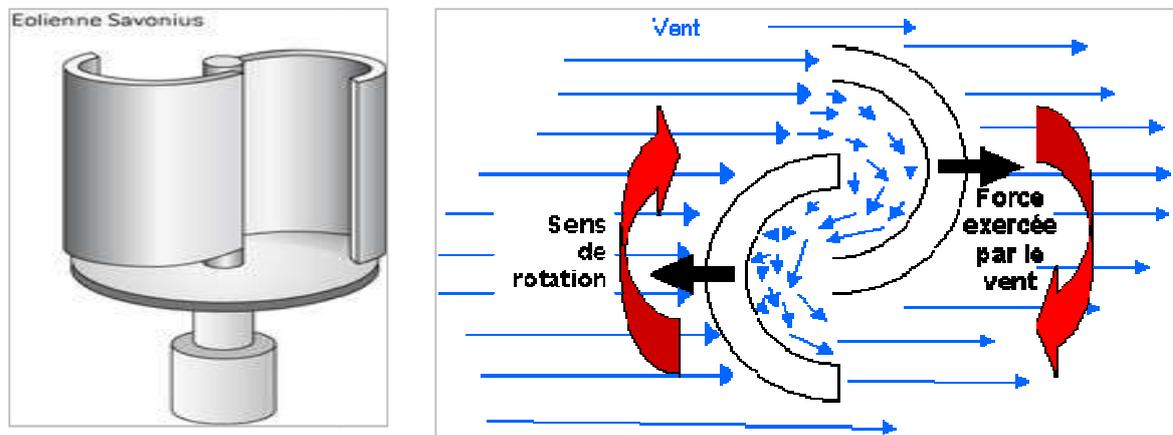
#### I.3.6.1 Eolienne à Axe Vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [11].

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues sont :

- **L'éolienne Savonius** comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre figure (I-11 ). elle utilise essentiellement la traînée pour tourner



figure(I-11) : Schéma de principe du rotor de Savonius [15]

- **L'éolienne de Darrius** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables figure(I-12 ). La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.[6]



figure(I-12) : L'éolienne de Darrius[6]

### I.3.6.2 Eolienne à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement figure (I-13). Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important



figure (I-13): Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent [22]  
(Source : <http://www.diebreinstoffzelle.de/alternativen/wind/index.shtml>)

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal figure (I-14) :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

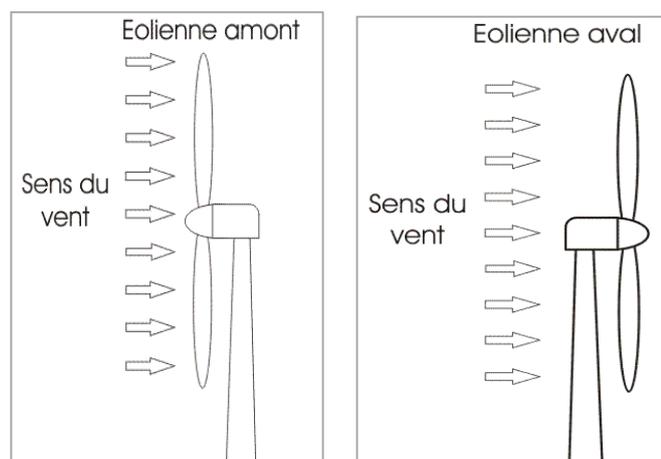


figure (I-14): Types d'éoliennes à axe horizontal [15]

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. [6]

### I.3.7. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse.

#### (a) - Système à décrochage aérodynamique "Pitch"

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment Fig(I-15). C'est à dire il faut que varient l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

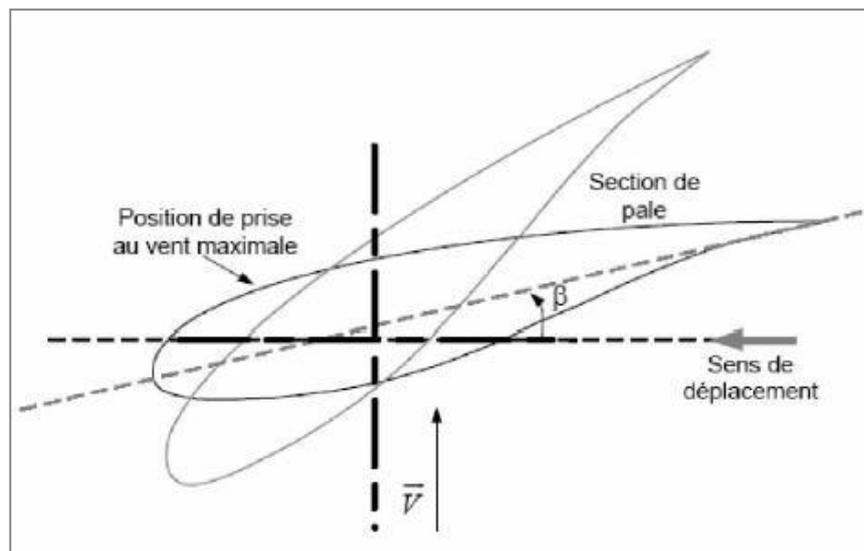


Figure (I-15): la variation de l'angle de calage d'une pales [15]

#### (b) Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des

décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique Fig(I-16).

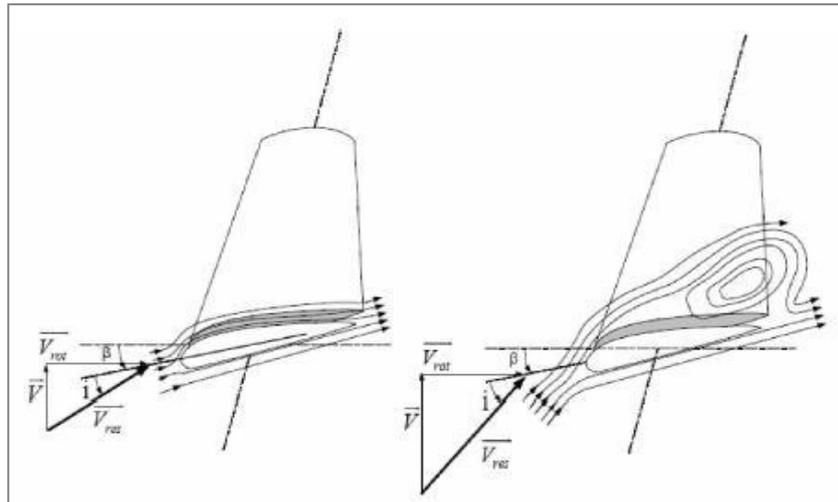


Figure (I-16): Flux d'air sur un profil de pale " stall "[15]

### (c) Système à Décrochage Aérodynamique "Active Stall"

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « Stall » et de la régulation « Pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

## I.4. Caractérisation du Vent

### I.4.1. L'origine du vent

Les premiers savants à avoir pu expliquer l'origine du vent sont Evangelista Torricelli (1608-1647) et Blaise Pascal (1623-1662). Le premier mit en évidence la pression atmosphérique de l'air grâce à son baromètre tandis que le second décrivit le vent comme de l'air en mouvement, un courant d'air plus ou moins puissant, et il expliqua aussi la diminution de pression avec l'altitude. [8]

Le soleil réchauffe inégalement l'air à la surface de la terre. Il chauffe l'air et l'eau, et la chaleur produite est ensuite diffusée dans l'air. Cela entraîne l'apparition de zones de haute pression (air chaud) et de basse pression (air froid). En effet, l'air chaud s'élève, ce qui génère des zones de basse pression au niveau du sol et au-dessus, une zone de haute pression dans l'atmosphère, l'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Le vent est cet air en mouvement.

### I.4.2. la direction du vent

Depuis la Grèce Antique, on peut déterminer la direction du vent grâce à une girouette Figure (I-17). Si la girouette indique le Nord, cela signifie que le vent va du Nord vers le Sud. On parle alors de vent du Nord.

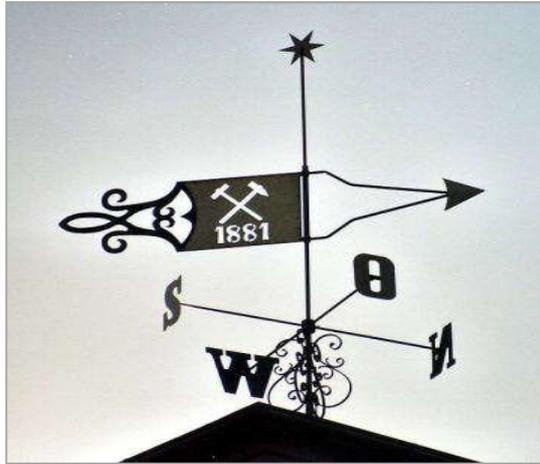


Figure (I-17): une girouette [8]

### I.4.3. Mesurer la vitesse du vent

Pour mesurer la vitesse du vent, on utilise un anémomètre Figure (I-18). Il s'agit d'un petit instrument composé de coupelles tournant autour d'un axe grâce à la force du vent. La vitesse de rotation des coupelles permet de déterminer la vitesse du vent grâce à une formule mathématique qui dépend de différents paramètres. Ainsi, nous avons :  $V(\text{vent})=2\pi F(N) R.N$

où  $R$ : le rayon moyen des bras (de l'axe de rotation jusqu'au centre des coupelles),

$N$  : le nombre de tours par seconde [1/s]

$F(N)$  : une fonction d'étalonnage.



Figure (I-18): anémomètre [8]

Le choix géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps. La figure ci-dessous montrent les variations des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.

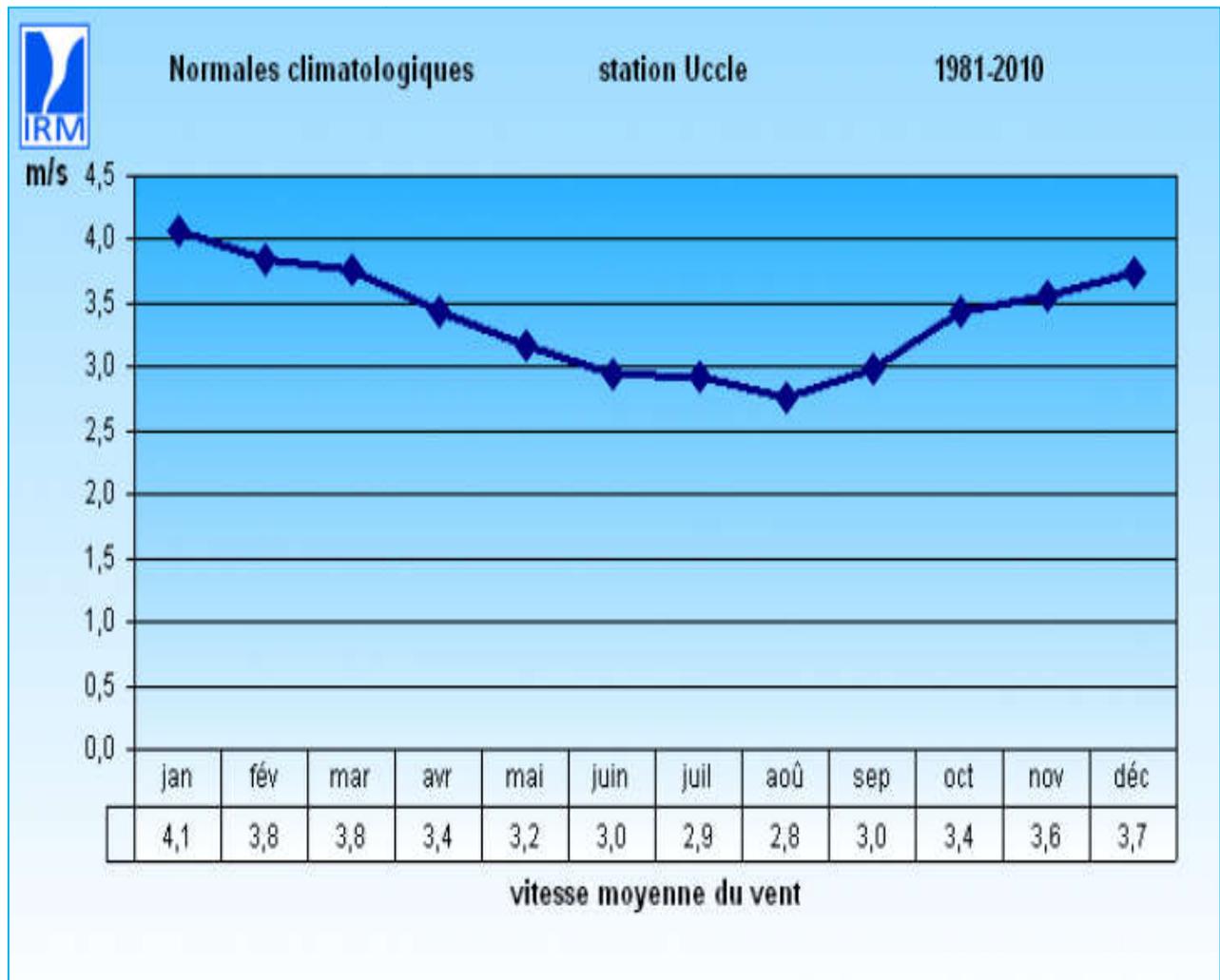


Figure (I-19): Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an [8]

#### I.4.4. Répartition régionale de la vitesse du vent

Avant d'implanter une ou plusieurs éoliennes, l'observation du potentiel éolien, c'est-à-dire l'histoire des vents du site, depuis au moins une décennie, est fondamentale. De plus, pour avoir une idée des variations durant l'année, une étude de la répartition du vent est réalisée sur place pendant cette période. En général, un lieu en hauteur et éloigné des habitations est privilégié pour la mise en place de l'éolienne car son efficacité dépend grandement de son emplacement.

la mise en place de l'éolienne car son efficacité dépend grandement de son emplacement. La Fig(I-20) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire du CDER. [9]

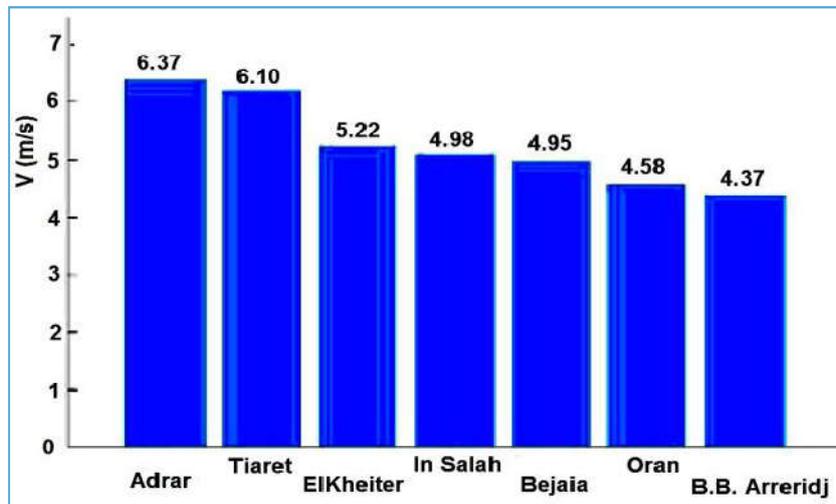


Figure (I-20) : les régions ventées en Algérie [12]

D'après les données du CDER, la Figure (I-21) indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

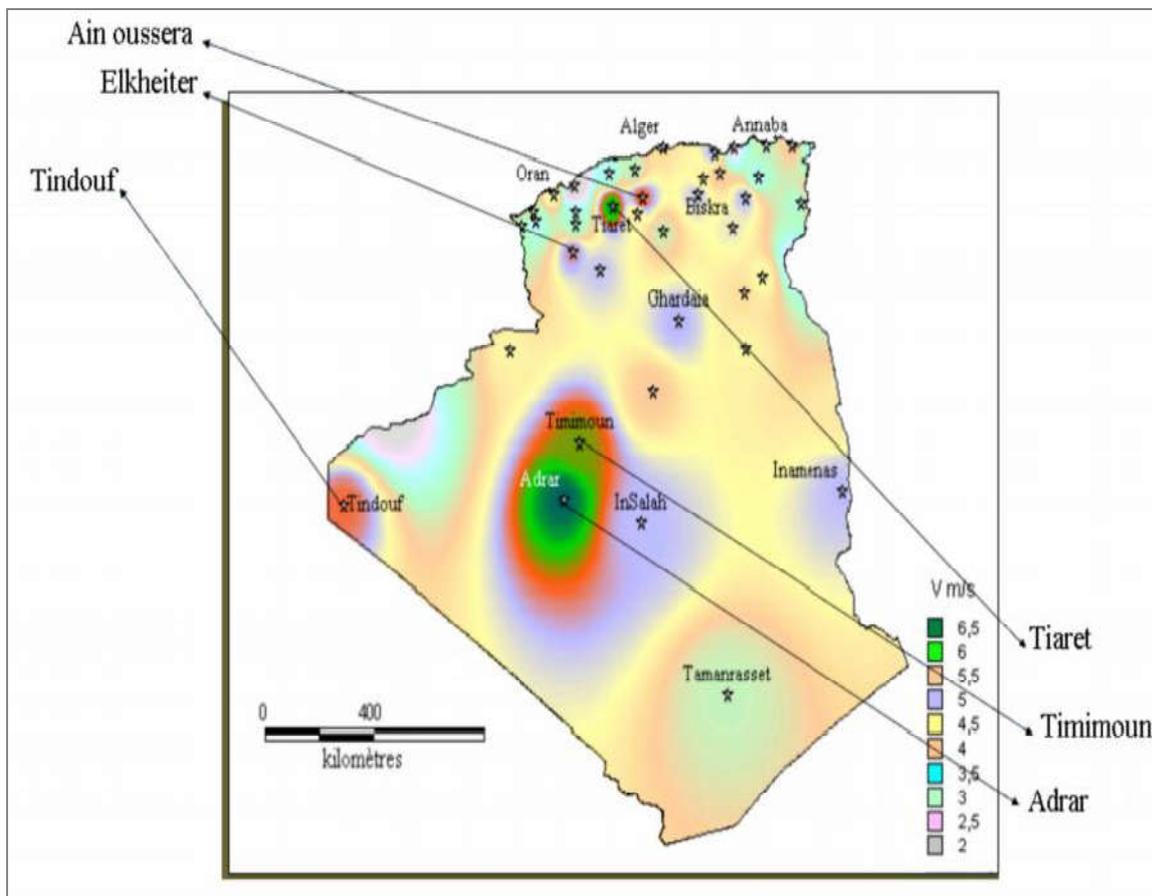
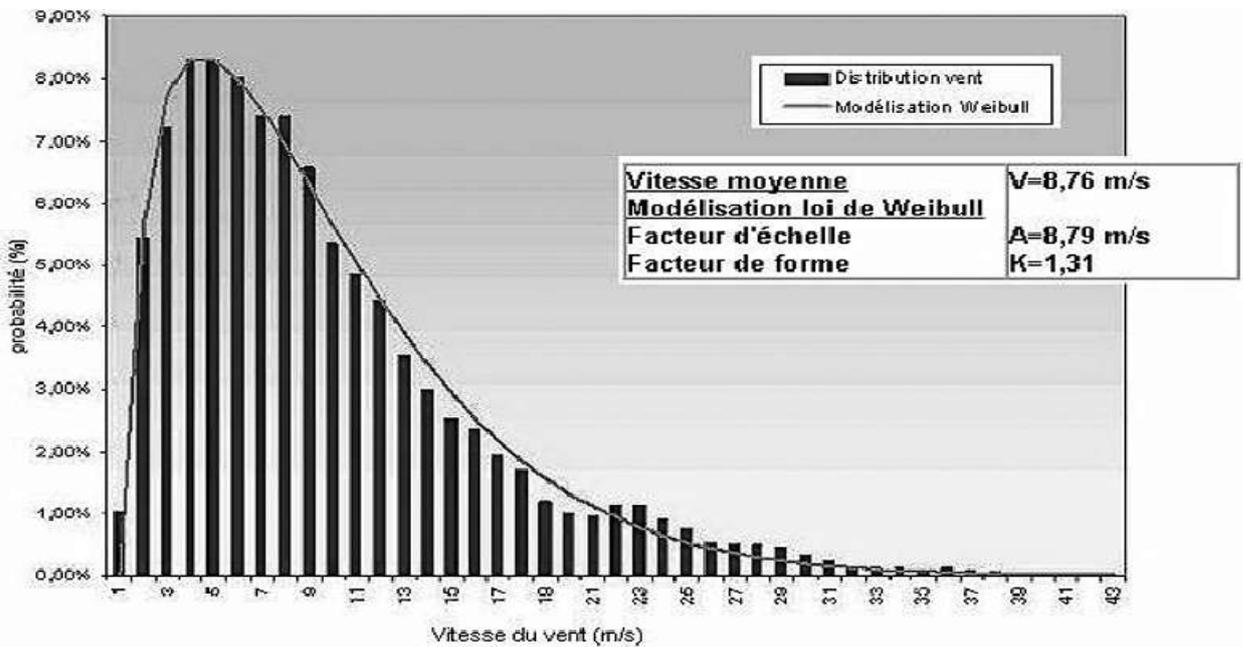


Figure (I-21): Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [12].

**I.4.5. Distribution de Weibull**

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull comme celle que vous voyez sur l'image ci-dessous C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du vent. Ce modèle permet d'optimiser la conception des éoliennes pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité. [16]

Le coefficient de Weibull traduit la distribution des vitesses du vent et est déterminé par la courbe de distribution Weibull .Figure (I-22)



**Figure (I-22): Répartition de la vitesse du vent [17]**

Fonction de probabilité de densité de Weibull :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \tag{1.1}$$

Avec :

- k le facteur de forme de la courbe (sans dimension)
- c le facteur d'échelle de la courbe en m/s.
- V vitesse du vent « instantanée »

Ainsi, la distribution de Weibull peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent

### I.4.6. Influence de la hauteur

Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans). En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. L'expression ci-dessous donne la méthode de ce calcul.

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{h_{mes}}{\alpha}\right)} \quad (1.2)$$

avec

$\alpha$  : valeur de rugosité qui dépend du caractère des obstacles dans l'environnement proche, les valeurs de cette rugosité sont données par le Tableau (I-2).

$H$  : représente la hauteur du mat

$h_{mes}$  : représente la hauteur des appareils de mesure.

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.003
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

**Table (I-2) : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [1].**

Le tableau ci-dessous présente l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité).

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s
40 m	5,3 m/s

Table (I-3) : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [10].

### I.5. Production Optimale d'énergie

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale  $P_n$  obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_n$ , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $v_c$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale  $V_n$ , on spécifie aussi :

- ✓ la vitesse de démarrage  $V_D$ , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
- ✓ la vitesse maximale du vent  $V_M$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement. [11]

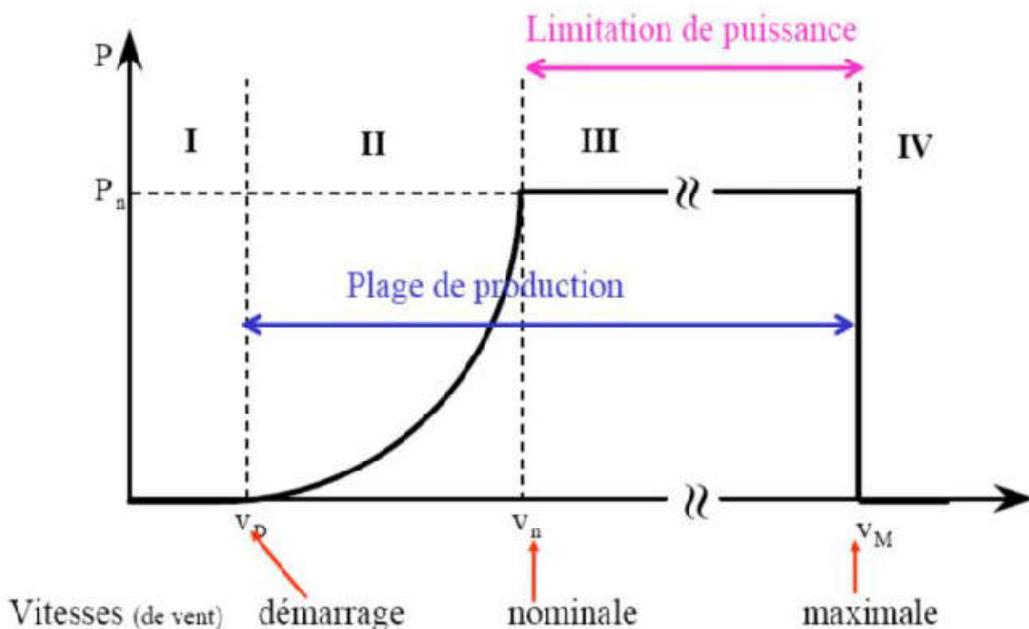


Figure (I-23): Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [3].

Les vitesses  $V_N$ ,  $V_D$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent Figure (I-23) :

- ❖ la **zone I**, où  $P = 0$ , dans le régime de régulation de vitesse, la turbine ne fonctionne pas.
- ❖ la **zone II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ .
- ❖ la **zone III**, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ . (la zone II, et la zone III phénomène de décrochage aérodynamique).
- ❖ la **zone IV**, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

### I.6. Facteurs influant sur le rendement énergétique

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

#### I.6.1. La Surface Balayée Par Le Rotor

La surface de disque balayée par le rotor (ainsi que la vitesse du vent, évidemment) détermine la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année. La figure (I-24) peut vous donner une idée des diamètres généraux du rotor, valables pour les différentes tailles d'éoliennes.[3]

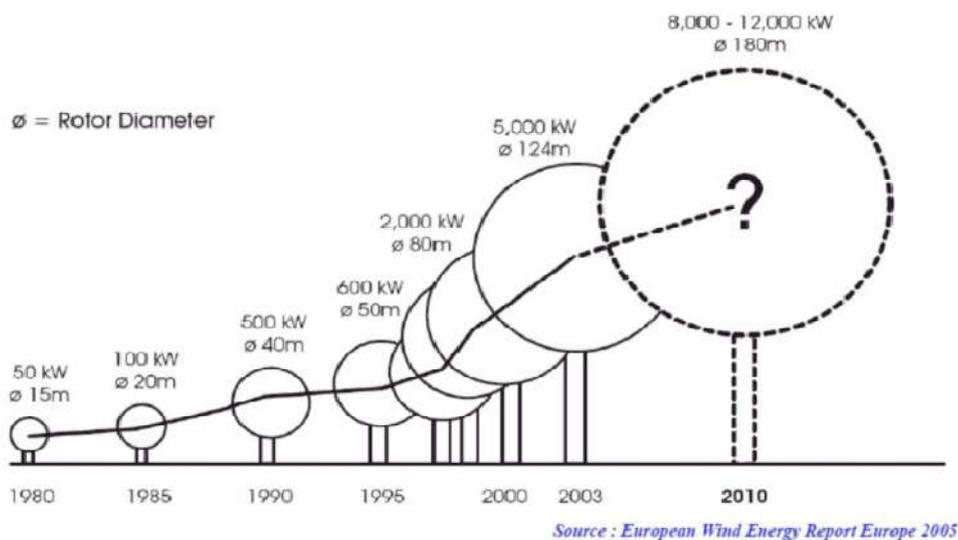


Figure (I- 24): Puissances selon les tailles des éoliennes .[3]

### I.6.2. La Densité De l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à.-d. la masse de l'air par unité de volume. Ou autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

- A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité augmente un peu lorsque l'humidité de l'air augmente.
- De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne. [9]

### I.6.3. La Vitesse Du Vent

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent. L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de  $2 \times 2 \times 2 = 8$  fois.

- En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air à travers le rotor par seconde, chaque disque transportant quatre fois plus d'énergie
- On peut clairement voir comment évolue la puissance produite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent .figure (I-25)

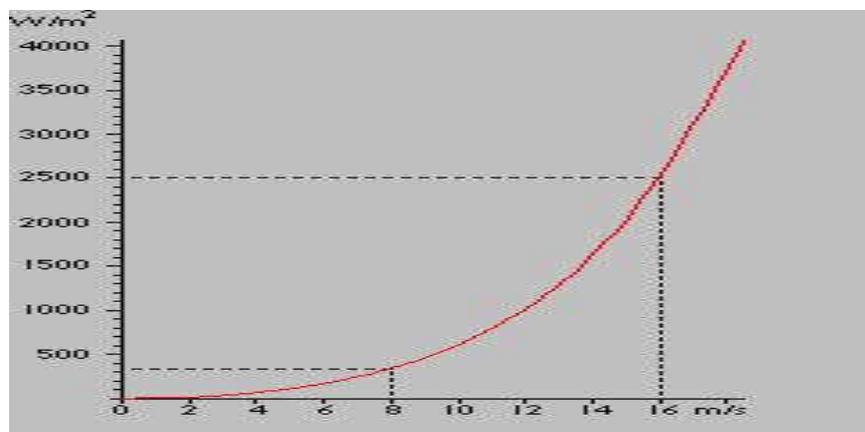


Figure (I-25): la puissance produite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent . [18]

**I.7. Conclusion**

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptée. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimant permanent.[12]



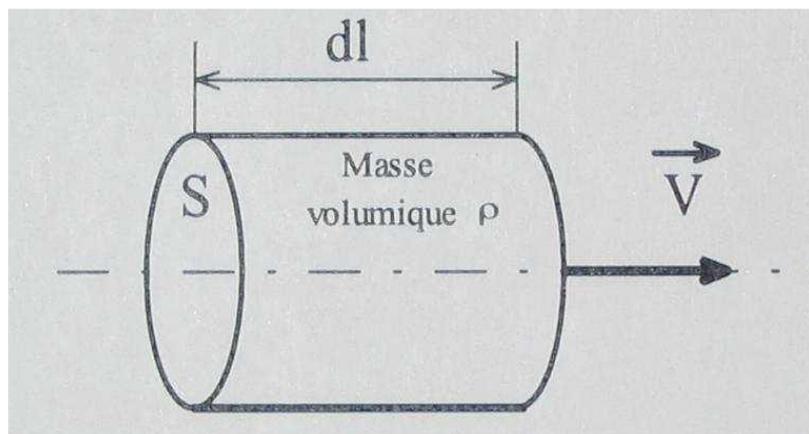
## II.1.Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance et de couple, et la limite de BETZ.[19]

## II.2. Notions Théoriques sur L'aérogénérateur

### II.2.1.L'énergie disponible

On considère une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $V$  conformément à la figure suivante :



figure(II-1): colonne d'air [13]

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est donc :

$$dW_c = 1/2 dm \mathbf{V}^2 \text{ avec } dm = \rho S dl \quad (2.1)$$

Or nous savons que  $dl = Vdt$  car  $V = dl / dt$  d'où :

$$dW_c = 1/2 \rho S \mathbf{V}^3 dt \quad (2.2)$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_d = \frac{dW_c}{dt} = 1/2 \rho S V^3 \quad (2.3)$$

La puissance disponible maximale s'obtient lorsque l'énergie cinétique de rotation de l'air après passage au niveau de l'éolienne est faible, c'est-à-dire pour une forte vitesse angulaire de rotation  $\omega$  et un faible couple sur l'arbre.

**Remarque :** Nous rappelons que la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  se définit par

$\omega = 2 \pi n$  avec  $n$  le nombre de tours par seconde.

### II.2.2.L'énergie récupérable

On définit un coefficient de performance  $C_p$  propre à chaque éolienne, comparable au rendement d'un moteur thermique, qui dépend directement des caractéristiques de l'éolienne.

Ainsi ce coefficient de performance varie avec le vent, comme le montre le graphique ci-contre, correspondant à l'éolienne haute performance NORDEX S77/1500kW dont les caractéristiques sont :

- diamètre de rotor : 77m avec 3 pales,
- vitesse de rotation : 9,6 à 17,3 t/min,
- puissance nominale : 1500kW(pour un vent de 13m/s),
- poids 88 000 Kg (sans la tour).

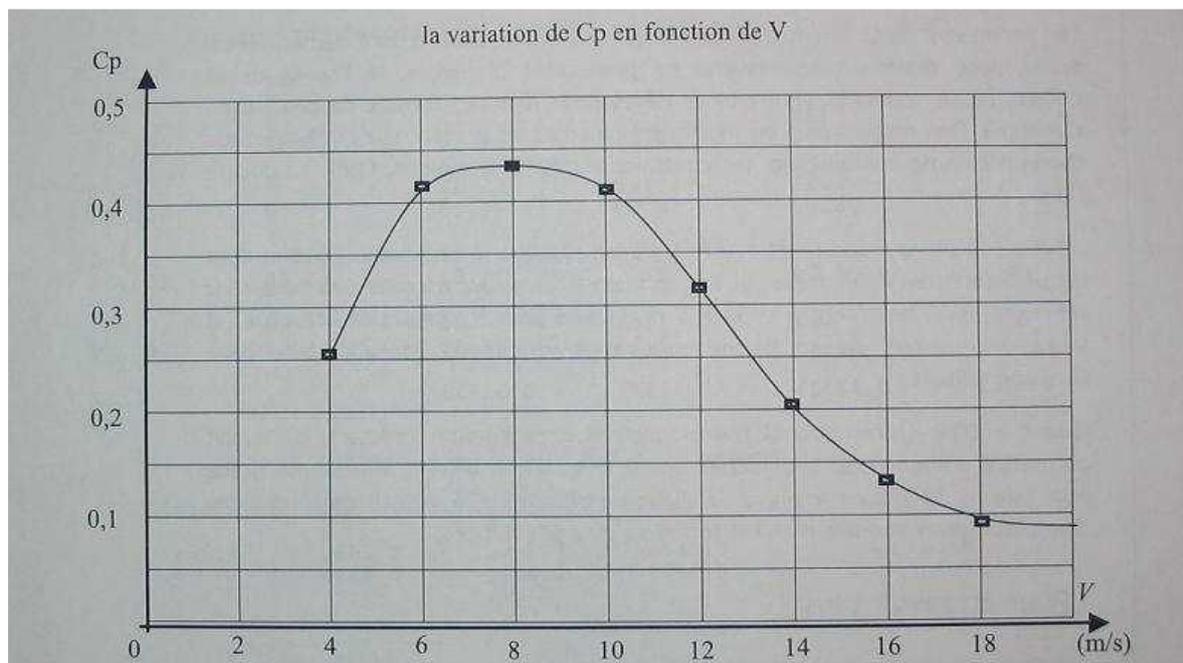


figure (II-2) : la variation de  $C_p$  en fonction de  $V$ [13]

La puissance récupérable  $P_r$  sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p P_d \quad (2.4)$$

Où  $P_d$  est la puissance disponible.

### II.2.3. Le coefficient de puissance $C_p$

Il est défini par le rapport de la puissance  $P_m$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence:

$$C_p = P_m / (0.5 \rho S V^3) \quad (2.5)$$

(La valeur maximale du  $C_p$  définie par BETZ, est égale à 0.592.)

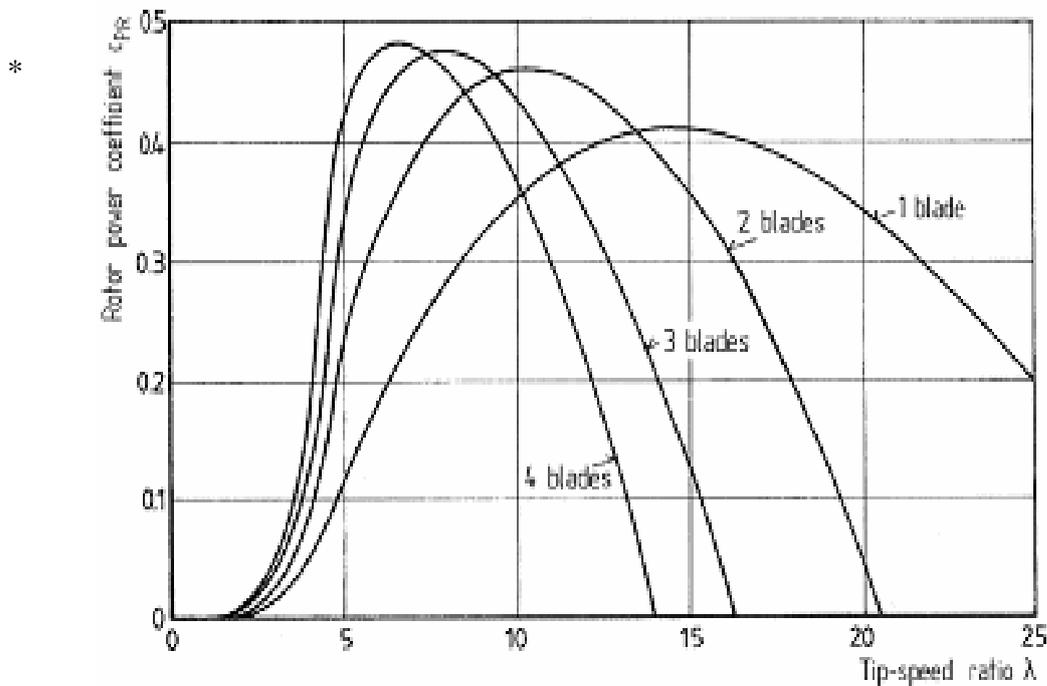


Figure (II-3): Coefficient de puissance [22]

### II.2.4. Couple Produit par L'éolienne

Il est défini par le rapport de la puissance  $P_m$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la vitesse de rotation de la machine éolienne  $\Omega$

$$C_c = \Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{\Omega} \quad (2.6)$$

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]

### II.2.5.Vitesse Spécifique de L'éolienne

Ce paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou vitesse en bout de pale)  $U=\Omega R$  (avec  $\Omega$  la vitesse de rotation de la machine éolienne et R lerayon d'extrémité de la pale); ce **paramètre de rapidité** ou **vitesse spécifique** noté  $\lambda$  est le rapport de la vitesse  $U$  à la vitesse  $V$  du vent:

$$\lambda = \frac{U}{V_{vent}} = \frac{R\Omega}{V_{vent}} \quad (2.7)$$

### II.2.6.La limite de Betz

Est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne

Ce résultat fut découvert par l'allemand Albert Betz en 1919 et fut publié dans son livre *Wind Energie* en 1926. Cette loi s'applique à tous types d'éoliennes à pales, que l'on désigne par le nom générique de capteur éolien.

Betz calcule que :

- la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne ;
- cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

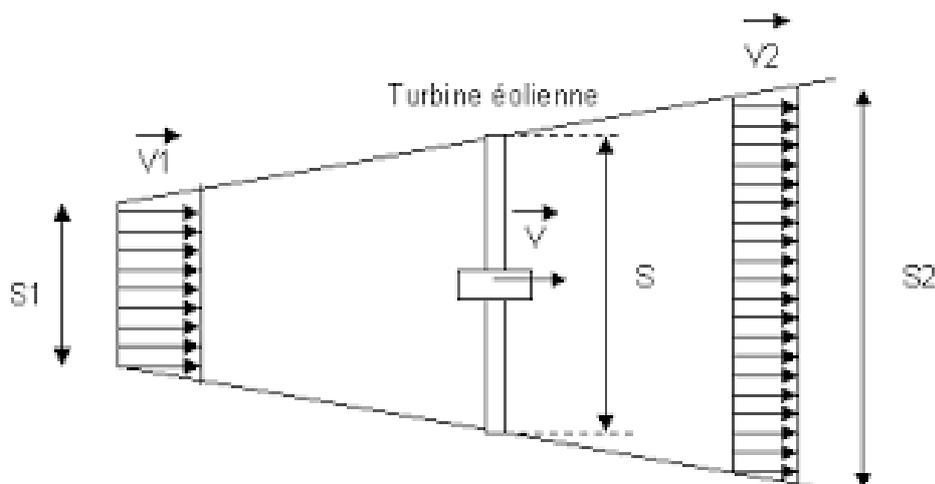


figure (II-4) :Tube de courant autour d'une éolienne[15]

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant *Figure(II-4)*.

Avec:

$V_1$  : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

$V$  : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

$V_2$  : la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

Où :

$V_1 > V > V_2$  Sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3 \quad (2.8)$$

On peut retrouver le ( $C_p$ ) max en faisant une étude des puissances, sachant que :

- la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation d'énergie cinétique du vent :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (2.9)$$

- d'autre part, l'effort qui s'exerce sur l'éolienne crée une puissance  $P_m$  ; le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.10)$$

Alors :

$$P_m = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.11)$$

$P_m$  : correspond à la puissance absorbée par le rotor, soit la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur.

On peut déterminer la vitesse  $V_2$  pour laquelle la puissance est maximale :

$P_m = \Delta E_c$  soit :

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (2.12)$$

Par simplification :

$$V \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot (V_2 - V_1) \cdot (V_2 + V_1) \quad (2.13)$$

Alors :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.14)$$

En reportant l'expression de V (2-14) dans l'expression (2-11) :

$$P_m = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.15)$$

La puissance est maximale, pour  $V_2$  telle que :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0$$

$$\text{Ce qui donne : } -3 \cdot V_2^2 - 2V_1 \cdot V_2 + V_1^2 = 0$$

On résout alors cette équation du second degré, d'inconnue  $V_2$ . On obtient deux solutions : l'une est négative donc impossible et l'autre correspondant à

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (2.16)$$

$$\text{La puissance est maximale pour : } V_2 = \frac{V_1}{3}$$

En reportant (2-14) et (2-16) dans l'expression (2-11) la puissance maximale  $\max P$  devient :

$$P_{max} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right) \quad (2.17)$$

On déduit le coefficient de puissance maximal  $C_{Pmax}$  pour une éolienne.

$$P_{max} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{1}{2} \cdot C_{Pmax} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

On trouve alors :

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (2.18)$$

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent :

$$C_P = \frac{P_{\text{Rotor}}}{P_{\text{vent}}}$$

En tenant compte de la limite de Betz,  $C_{p_{\text{max}}}$  vaut donc :

$$C_{p_{\text{max}}} = \frac{P_{\text{Rotor}}}{P_{\text{vent}}} = \frac{P_{\text{Rotor}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3} = \frac{16}{27}$$

La puissance maximale du rotor sera égale à :

$$P_{\text{MaxRotor}} = \underbrace{\frac{16}{27}}_{C_{P_{\text{Max}}}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3}_{P_{\text{Vent}}} \quad (2.19)$$

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure II-5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II-5) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [8]

On peut conclure cette section en faisant une description des différentes courbes caractéristiques de rendement aérodynamique pour chaque grand modèle d'éolienne. De manière générale, on voit que les éoliennes basées sur la portance, c'est-à-dire les éoliennes à axe horizontal ou à axe vertical de type Darrieus, ont un rendement aérodynamique supérieur aux éoliennes basées sur la traînée (typiquement, le rotor Savonius). L'influence du nombre de pales sur le rendement est aussi représentée. Si la vitesse de rotation diminue, il faut un couple aérodynamique plus important pour une même puissance mécanique. C'est pourquoi les éoliennes qui cherchent à produire du travail mécanique, notamment pour des applications de pompage, ont un nombre de pales important (illustré ci-dessous par l'éolienne américaine). Actuellement, les éoliennes de type Darrieus ont un rendement un peu supérieur à celui présenté dans le graphe ci-dessous [8]

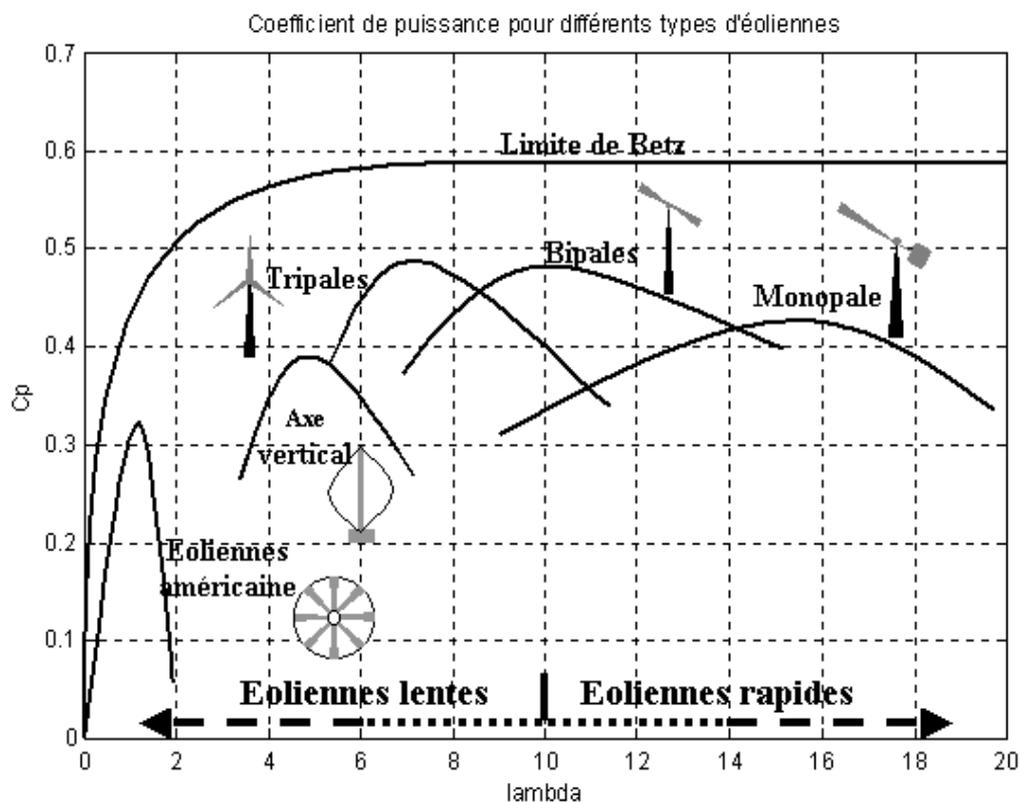


Figure (II-5) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [8]

coefficient de puissance tient compte de la limite de Betz, c'est en fait un coefficient qui définit le rendement de l'éolienne. Il est très variable d'un dispositif à l'autre, et varie en fonction du vent et de la vitesse instantanée de l'éolienne. On le définit généralement par une courbe  $C_p$  fonction de  $\lambda$  de forme parabolique maxi pour un  $\lambda$  bien particulière . [15]

**II.3.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons déduit les caractéristiques principales de la turbine éolienne après une étude aérodynamique. Nous avons détaillé présenté la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales utilisées et l'angle de calage de celle-ci, ainsi l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur.[20]



### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation d'une éolienne à axe horizontal tripales. Nous allons élaborer le modèle de la turbine et de la génératrice asynchrone a cage sous environnement *SIMULINK*, sans aborder la stratégie de la commande, afin d'étudier la variation de la puissance écoulee entre la turbine et la génératrice.[15]

### III.2. Présentation De L'environnement Simulink

Simulink est un logiciel qui permet de modéliser, simuler et analyser des systèmes dynamiques (système dont les sorties et les états évoluent au cours du temps). Ce logiciel a été produit par la société « *The MathWorks Inc* » [16]. C'est un outil totalement intégré au noyau de calcul de Matlab qui procure un environnement de modélisation basé sur des schémas-blocs. Il possède aussi un environnement de simulation dynamique, principalement destiné aux systèmes qui peuvent être décrits à l'aide d'équations différentielles. Simulink possède une interface graphique qui facilite l'analyse de systèmes dans le domaine temporel et fréquentiel.

Cette approche est en effet facilitée dans le sens où les systèmes ne sont plus décrits par des lignes de codes Matlab mais simplement définis par des schémas-blocs dont tous les éléments sont prédéfinis dans des bibliothèques de blocs élémentaires qu'il suffit d'assembler. Le schéma bloc de la figure (III-1) illustre la représentation d'un tel système.[15]

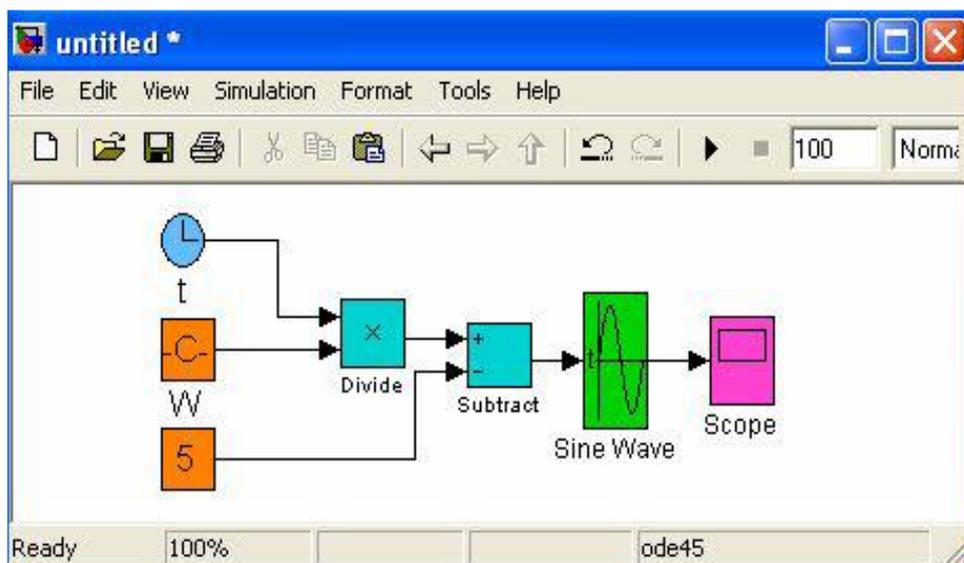


Figure (III-1) : Représentation d'un système hybride sur Simulink[15]

y envoyer des données de sortie. L'échange de données entre Simulink et l'espace de travail Matlab peut se faire à l'aide de variables communes ou par l'intermédiaire de fichiers MAT.

Au niveau de modélisation, Simulink met à disposition :

- Un éditeur graphique, dans lequel les blocs sont disposés et reliés entre eux avec des fils de connexion Figure (3-1) ;
- Des bibliothèques de blocs paramétrables .

NB : Simulink permet l'édition de gros programmes de simulation, car il ne définit pas de limite de taille de modèle, ni de limite de niveau de hiérarchie.

Au niveau de simulation, Simulink permet :

- La simulation de systèmes en temps continu (dont on connaît la valeur à chaque instant) ; discret (mono ou multi-cadencé, par opposition à continu) ou hybride ;
- La simulation de systèmes linéaires (défini sous forme matricielle) et non-linéaires ;
- La simulation dynamique avec des algorithmes puissants (Gears, Adams, Runge-Kutta,..).

Au niveau de l'analyse, Simulink permet :

- La simulation interactive, il est possible d'utiliser Simulink comme interface utilisateur et de modifier les paramètres des blocs en cours de simulation ;
- Une mise au point aisée, notamment grâce aux scopes qui permettent une visualisation dynamique des résultats en cours de simulation.

### III.3. Modèle d'éolienne avec Machine Asynchrone

La figure suivante montre les trois parties à modéliser :

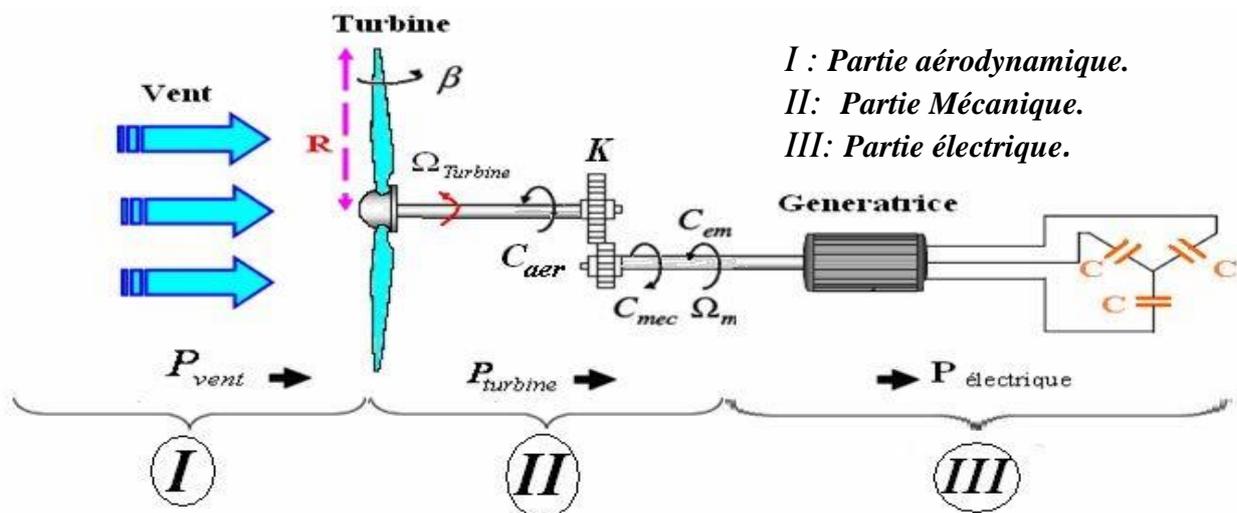


Figure (III-2) : Configuration d'une éolienne [15].

### III.3.1.Partie Aérodynamique (le Vent)

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

L'un des principes retenus consiste à générer une série temporelle de la vitesse du vent à partir d'un bruit en entrée. Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes : [15]

- une composante turbulente du vent  $v_T(t)$  est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- une composante lente  $V_{moy}$  ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

$$v(t) = v_o + v_T(t) \quad (3-1)$$

L'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passebas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée par:

$$H_f = \frac{1}{1+\tau.s} \quad (3-2)$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ( $\tau = 4s$ ) [15].

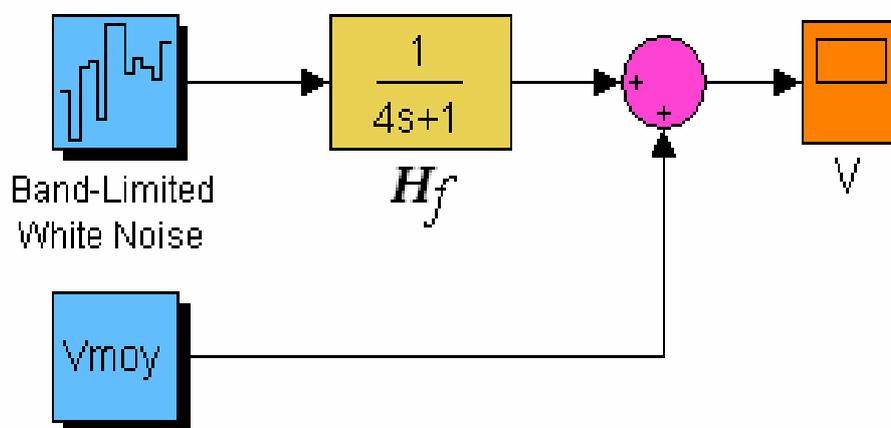


Figure (III-3) : Synoptique de reconstruction du vent

### III.3.2.Partie Mécanique

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice : la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables; le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr / mn).

#### III.3.2.1. Modèle de la Turbine

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (3-3)$$

Où :

-  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  : masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

-  $V$  est la vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coef de puissance  $C_p$ ) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (3-4)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il

dépend de la caractéristique de la turbine. La (Fig 5-4) représente la variation de ce coefficient en

fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ . Le rapport de vitesse est

$$\lambda = \frac{R\Omega_{turbine}}{V} \quad (3-5)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_{aer} = \frac{P_{turb}}{\Omega_T} \quad (3-6)$$

$$1) C_p(\lambda, \beta) = [0,5 - 0,167 \cdot (\beta - 2)] \cdot \text{Sin} \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

$$2) C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \left( \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,0035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left( \frac{0,0035}{(\lambda + 0,08\beta) \cdot (\beta^3 + 1)} \right)} + c_6 \cdot \lambda$$

Où :  $C_1=0,5109$  ,  $C_2=116$  ,  $C_3=0,4$  ,  $C_4=5$  ,  $C_5=21$  ,  $C_6=0,0068$

$$3) C_p = 0,22.\left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4\beta - 5\right).e^{\frac{-12,5}{\lambda'}} \text{ et } \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda+0,08.\beta} - \frac{0,0035}{\beta^3+1}$$

$$4) C_p(\lambda) = 7,9563310^{-5}.\lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4}.\lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3}.\lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3}.\lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2}.\lambda + 0,001$$

Avec :

$\beta$ : Angle de calage -  $R$  : longueur de la pale -  $\Omega_{Turbine}$ : vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance  $C_p$  est donné dans la référence [20] par la relation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = [0,5-0,167.(\beta-2)].\text{Sin}\left[\frac{\pi.(\lambda+0,1)}{18.5-0,3(\beta-2)}\right] - 0,00184.(\lambda-3).(\beta-2) \quad (3-7)$$

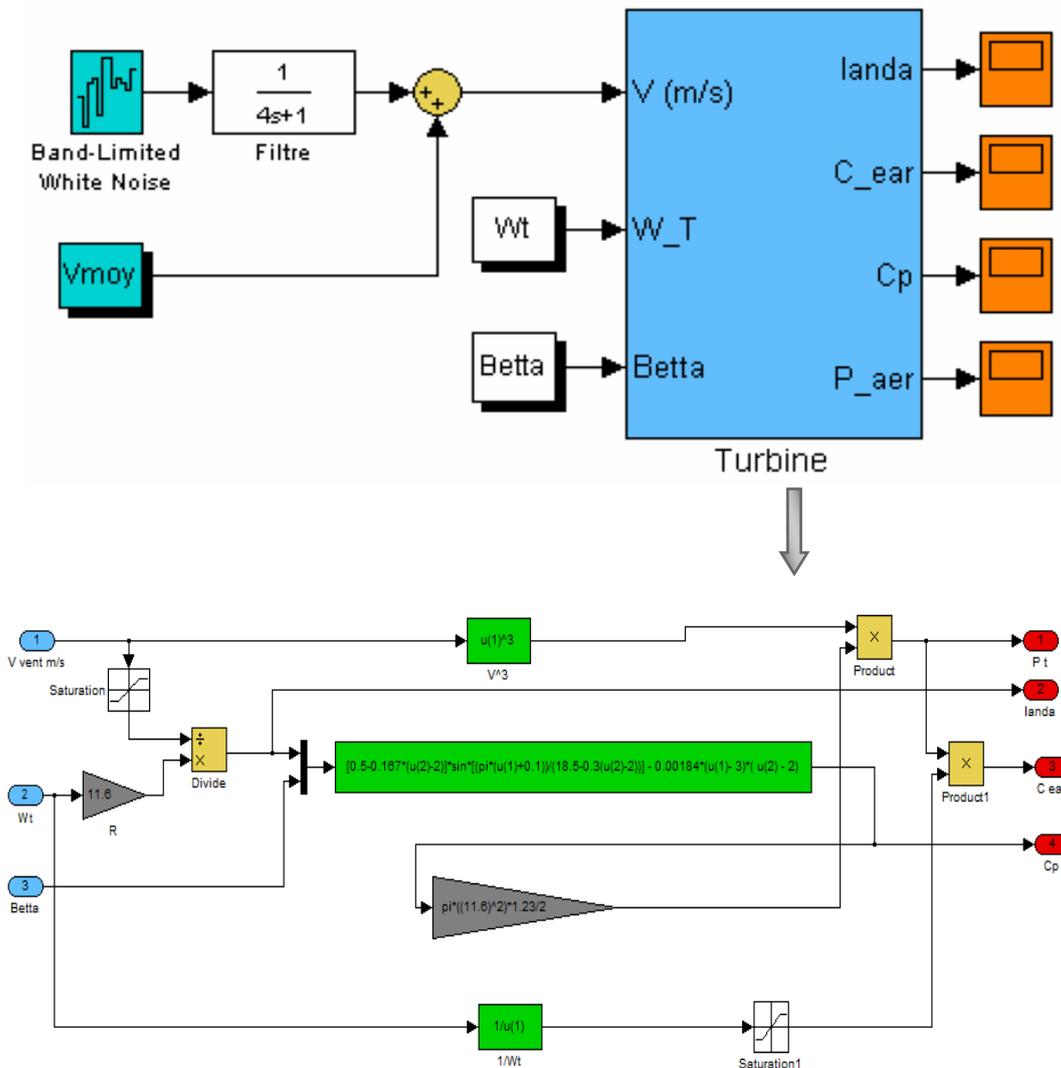


Figure (III-4) : Modèle de la turbine à vent développé sous Matlab / Simulink.

La (Fig.III-5) illustre les courbes de  $C_p(\lambda)$  pour plusieurs valeurs de  $\beta$  (deg) obtenues par la relation (3-7).

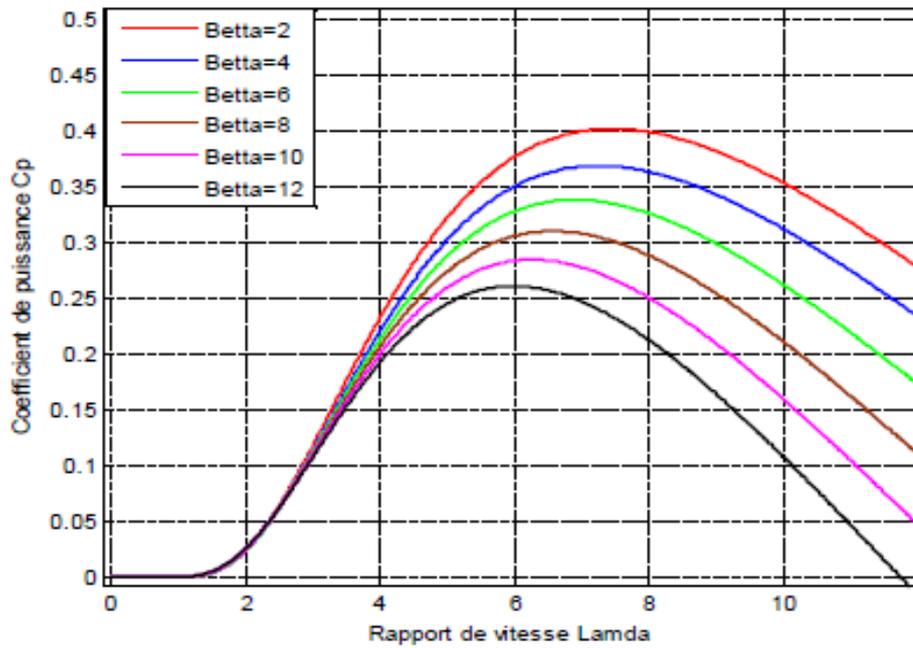


Figure (III-5): Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$ [15]

Sur la (fig.III-5), plusieurs courbes sont représentées mais nous nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ( $\lambda = 7.38$ ,  $C_p = 0,402$ ,  $\beta = 2^\circ$ ) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance  $C_p$  et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. On peut déterminer la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation,  $WT$  pour un vent,  $V$  donné.[21]

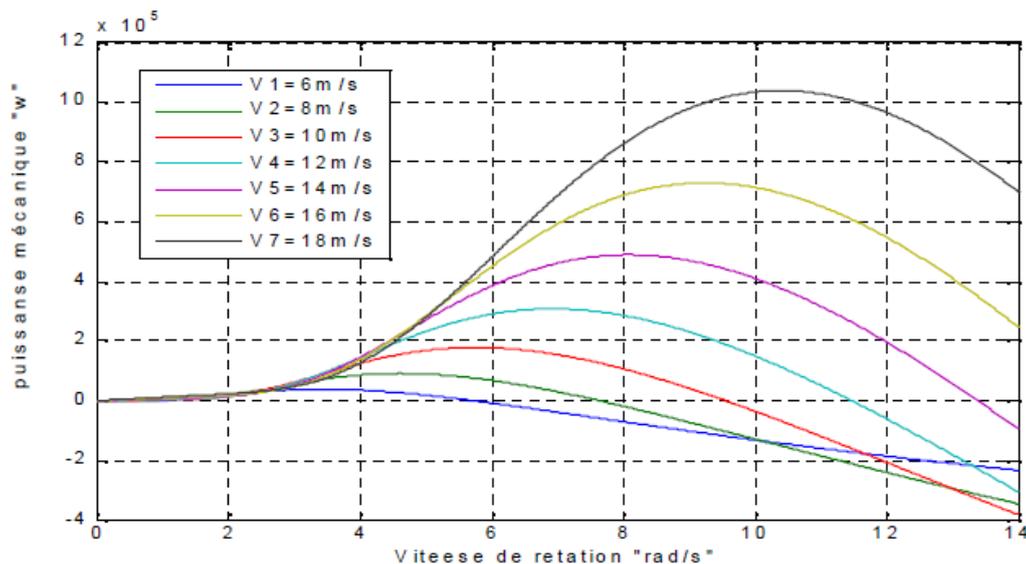


Figure (III-6): Caractéristique de puissance mécanique en fonction de la vitesse relative[21]

### III.3.2.2. Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

$$C_{mec} = \frac{1}{K} C_{aer} \quad (3-8)$$

Où:

$K$  = Rapport de multiplication.

$C_{mec}$  = Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi

$$\Omega_{mec} = k \cdot \Omega_t \quad (3-9)$$

Où :

$\Omega_{mec}$  = vitesse du générateur (rad/s mécanique)

### III.3.2.3. Modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$j \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f \cdot \Omega_{mec} \quad (3-10)$$

Où :

$j$  = inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m<sup>2</sup>).

$f$  = coefficient de frottement visqueux.

$C_T = (C_{em} + C_{mec})$  = couple totale de l'éolienne (N.m).

$C_{em}$  = couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple  $C_{em}$  a un signe négatif.

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine :

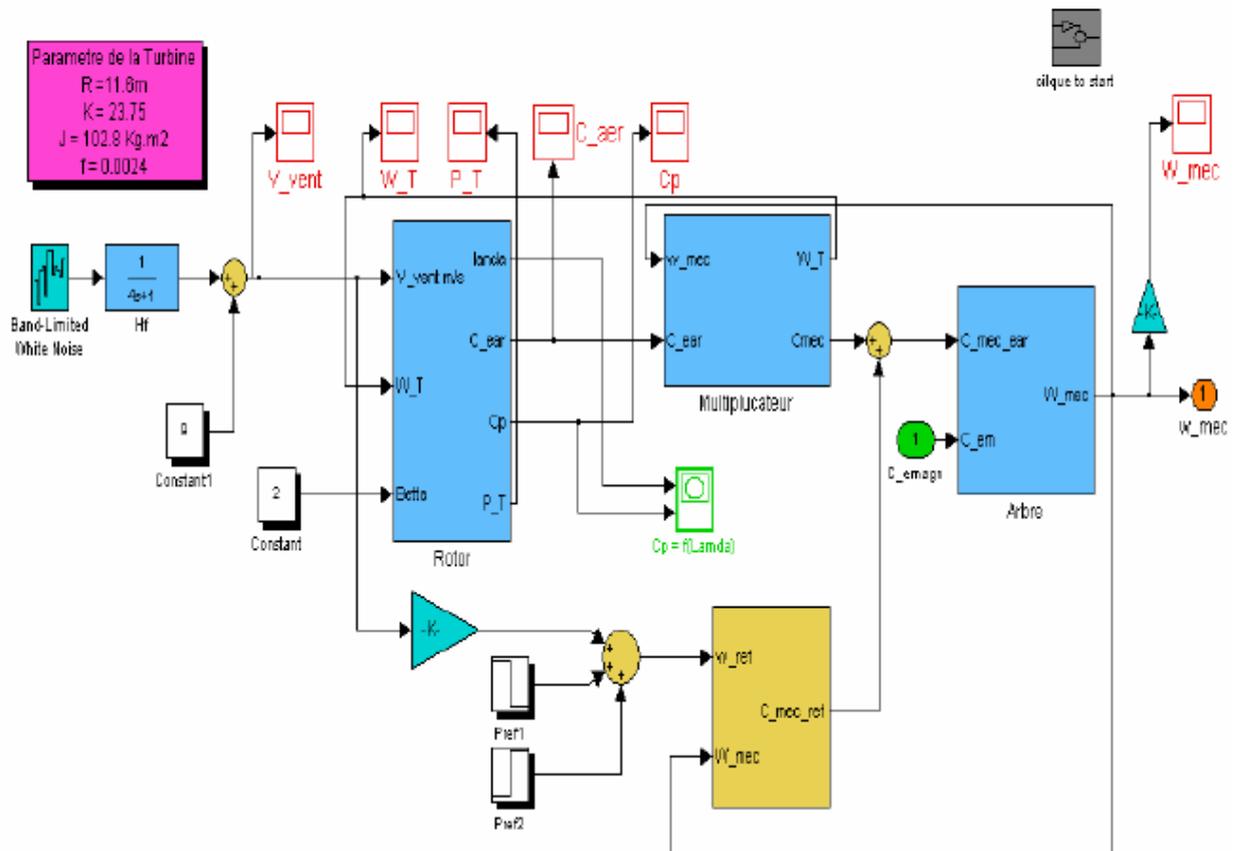
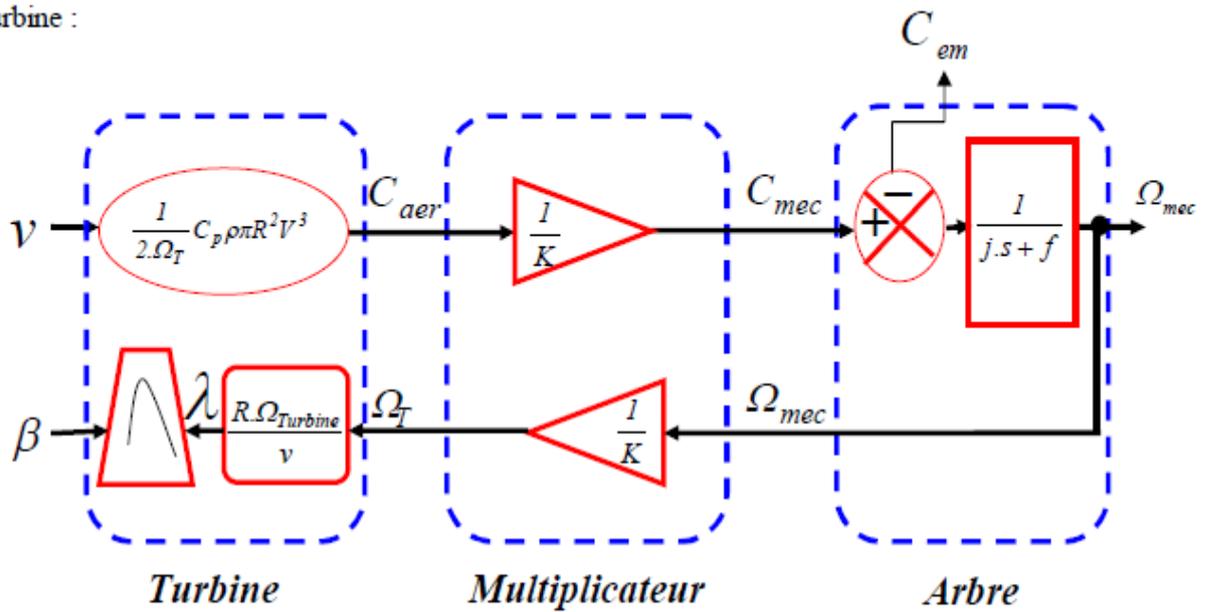


Figure (III-7) : Modèle de la partie mécanique développé sous Matlab / Simulink.

### III.3.3.Partie Électrique

Le schéma bloc de la génératrice asynchrone auto-excitée qui n'est que l'image des équations déjà exposées est illustré (Fig. III-8) :

- Les **entrées** sont les courants statoriques et rotoriques (à t=0), les tensions statoriques (à t=0) qui représentent le champ rémanent et la vitesse mécanique.
- Les **sorties** sont les courants statoriques et rotoriques, les tensions statoriques et le couple électromagnétique.

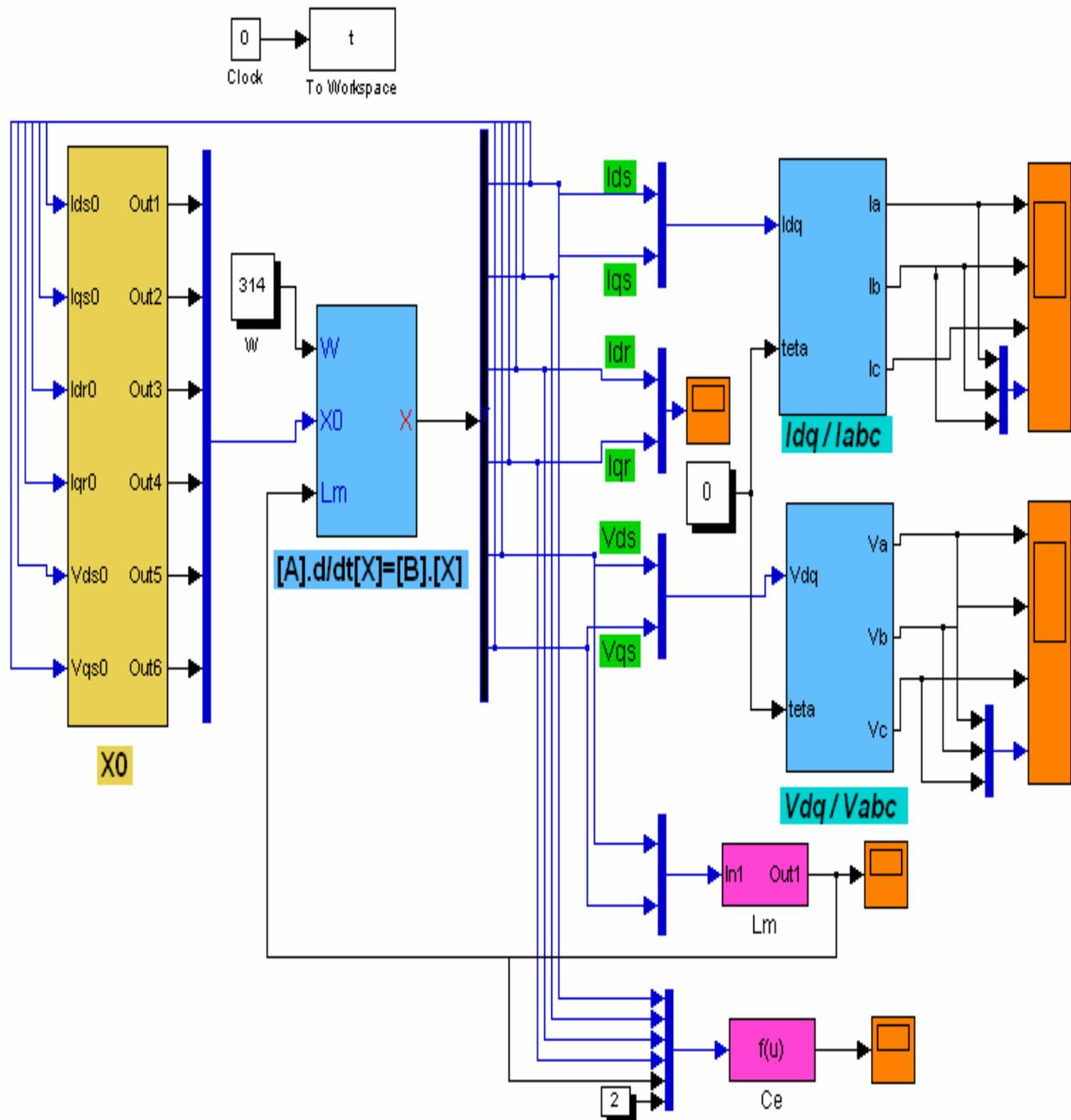


Figure (III-8) : Modèle de la Génératrice développé sous Matlab / Simulink.

Le modèle de tout le système composé de la génératrice asynchrone, de la turbine à vent ainsi que du multiplicateur de vitesse, tel que développé sous *Matlab-Simulink*, est le suivant (fig.III-9)

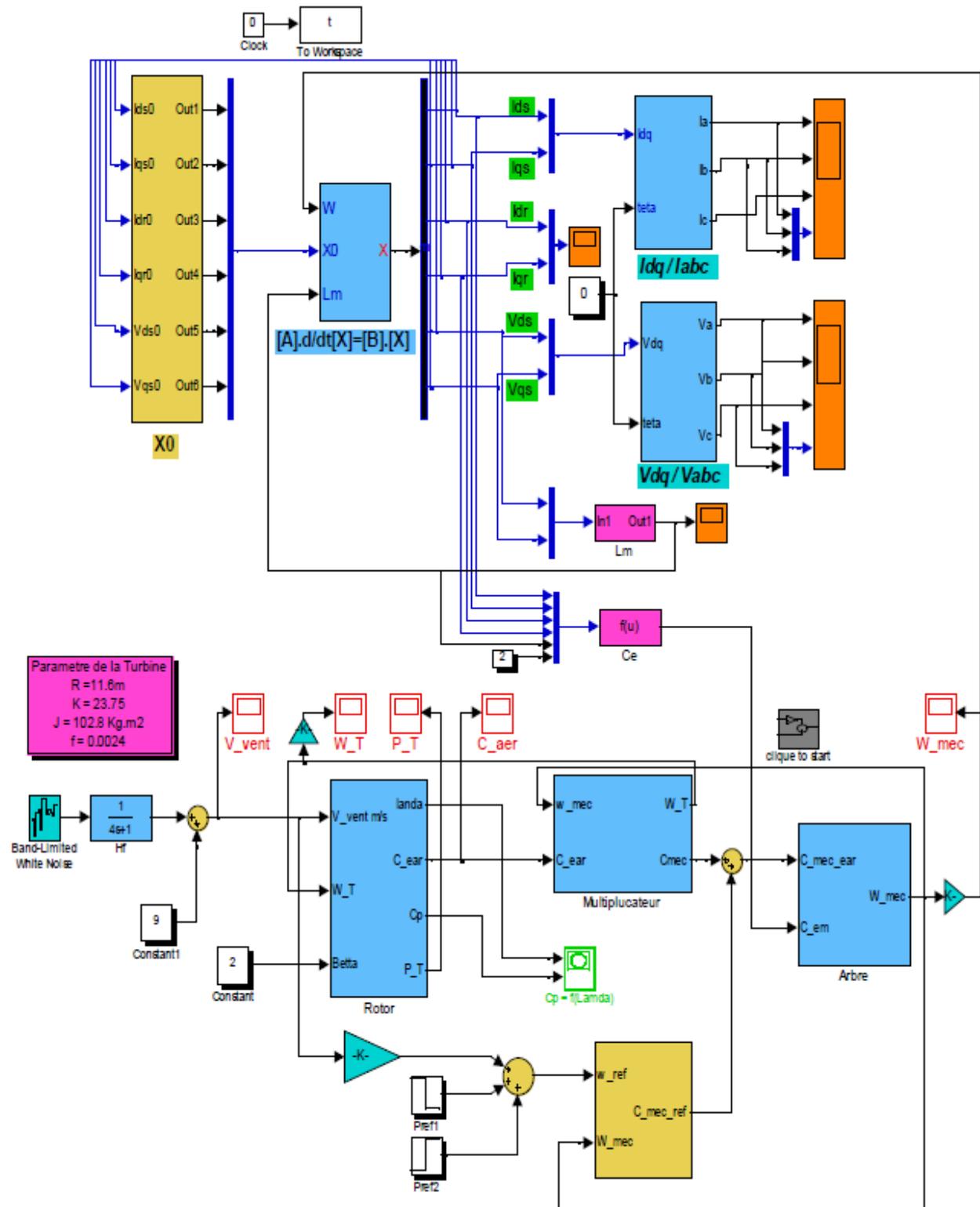


Figure (III-9) : Schéma de simulation développé sous *Matlab-Simulink* du système éolien composé de la machine asynchrone et de la turbine à vent.

Les paramètres de tout le système sont rassemblés dans les tableaux III-1.

<b>Données de la turbine à vent</b>	
Diamètre du rotor	23.2 m
Nombre de pales	3
Densité de l'air	1.23 Kg/m <sup>3</sup>
Vitesse moyenne du vent	9 m/s
Angle de calage	2°
Valeur de la constante de temps	4 s

<b>Données du multiplicateur</b>	
Rapport de vitesse	23.75
Moment d'inertie	102.8 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux	0.0024

<b>Données du générateur asynchrone</b>	
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	4.5 Kg.m <sup>2</sup>
Résistance du stator	R <sub>s</sub> =1.66Ω
Résistance du rotor	R <sub>r</sub> =2.74Ω
Inductance de fuites (stator- rotor)	$l = 11.4\mu\text{H}; (L_s = l + L_m)$ $(L_r = l + L_m)$
Inductance de magnétisation	
$L_m = -((1.56) \times (e^{-11}) \times (v^4)) + ((2.44) \times (e^{-8}) \times (v^3)) - ((1.19) \times (e^5) \times (v^2)) + ((1.42) \times (e^{-3}) \times v) + 0.245$	

*Tab III-1 : Les paramètres du système éolien [15].*

### III.4. Résultats de Simulation

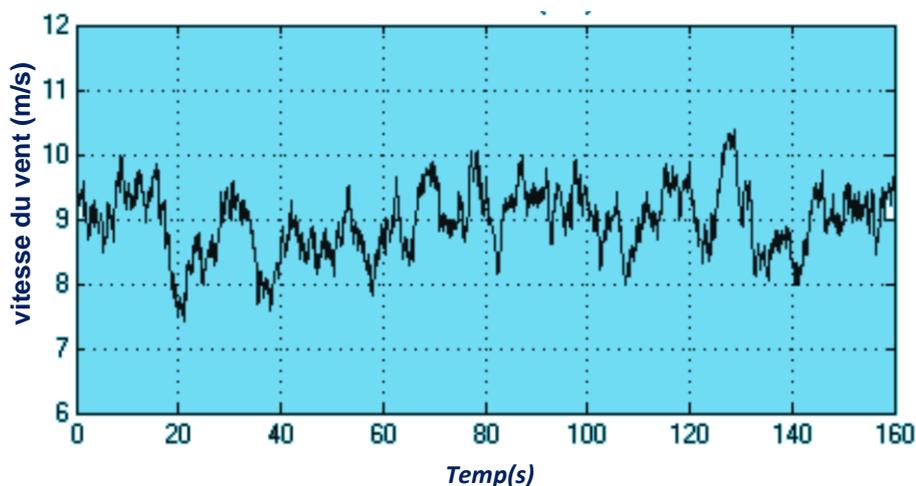


Figure (III-10) : Variation de la vitesse du vent.

La figure (III.10) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, et comme on a supposé que la vitesse du vent est constante de valeur  $9 \text{ m/s}$ , on a délivré un signal invariant et constant à la valeur précitée.

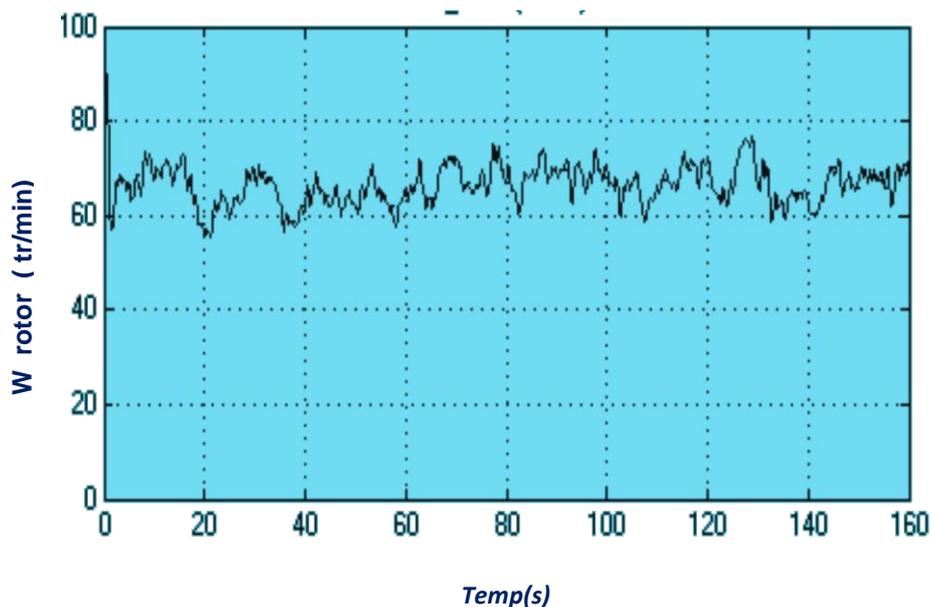
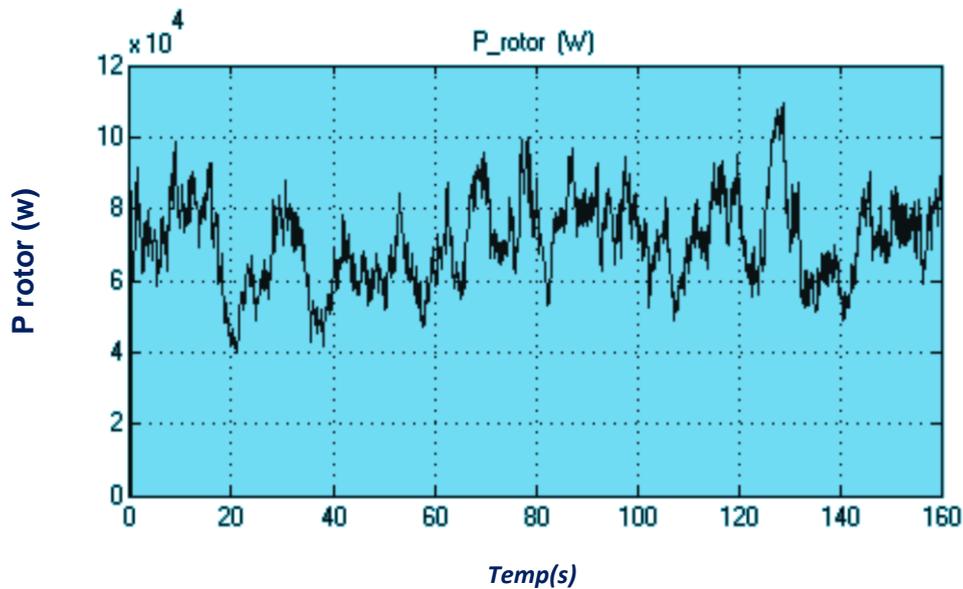


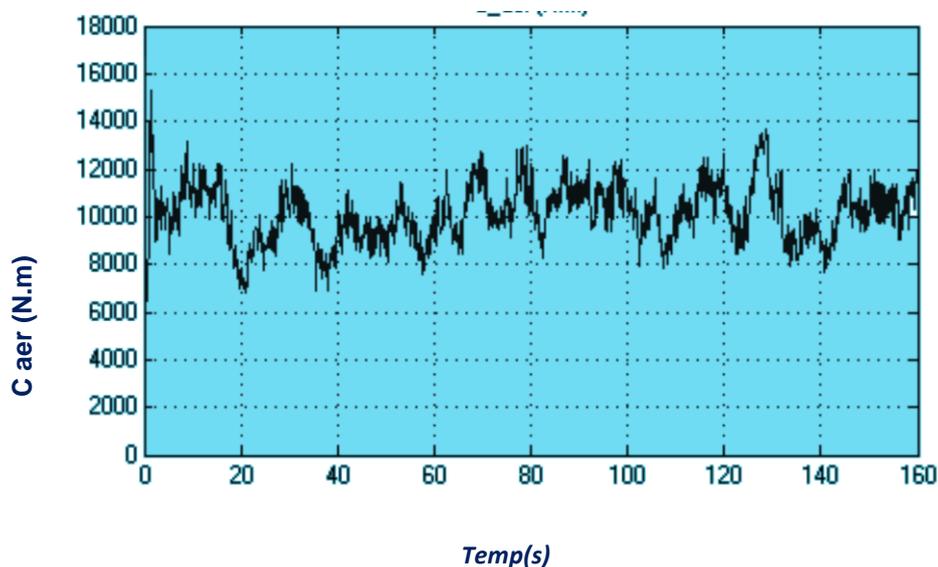
Figure (III-11) : Variation de la vitesse angulaire du rotor.

La figure (III.11) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable ; l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $w=70\text{tr/min}$ ) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la vitesse de rotation de la turbine ce qui altère la fréquence de la tension et du courant produite par la génératrice.



*Figure (III-12) : Variation de la puissance aérodynamique maximum récupérée*

La figure (III.12) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $P_m=6 \times 10^4 \text{ watt}$ ) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la puissance mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.



*Figure (III-13) : Variation du couple aérodynamique*

La figure (III.13) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $C_{eol}=8 \text{ kN.m}$ ) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur le couple mécanique de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système

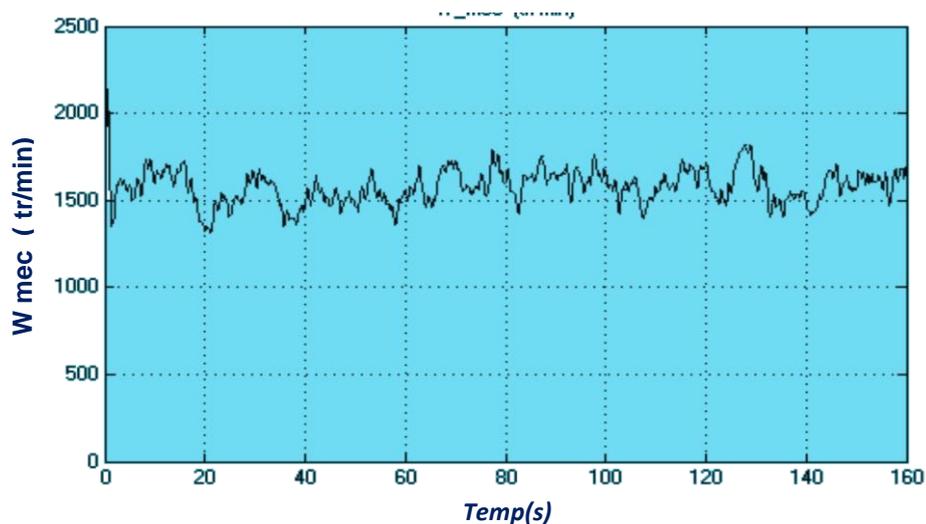


Figure (III-14) : Courbes de la vitesse angulaire de la génératrice

La figure (III.14) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable ; l'allure de la courbe prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $w=1500\text{tr/min}$ ) ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la vitesse de rotation de la turbine .

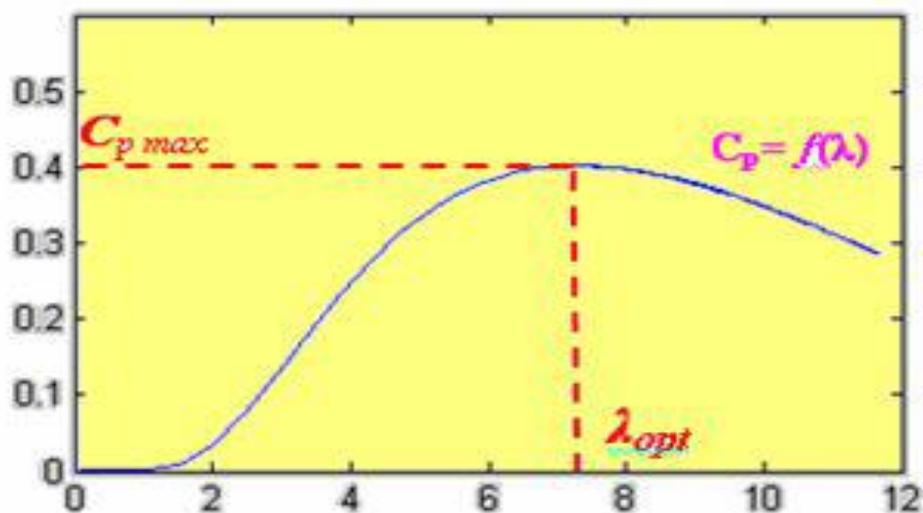
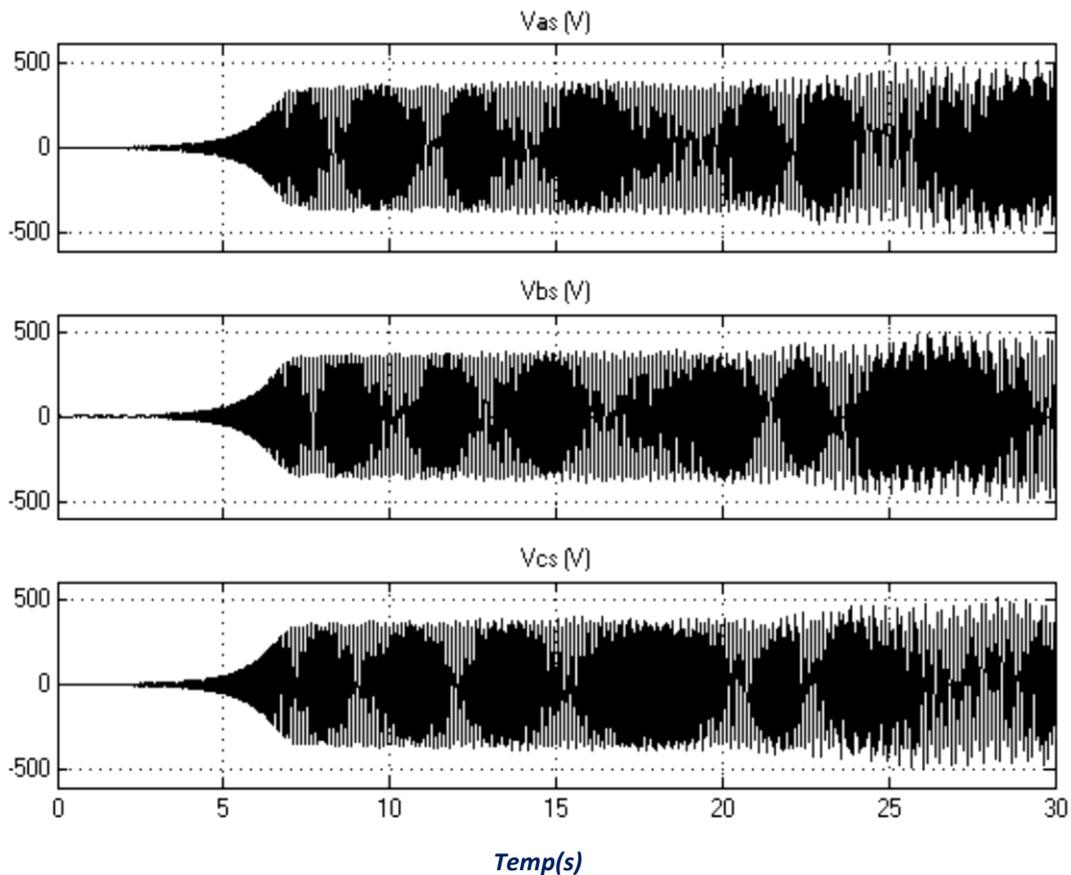


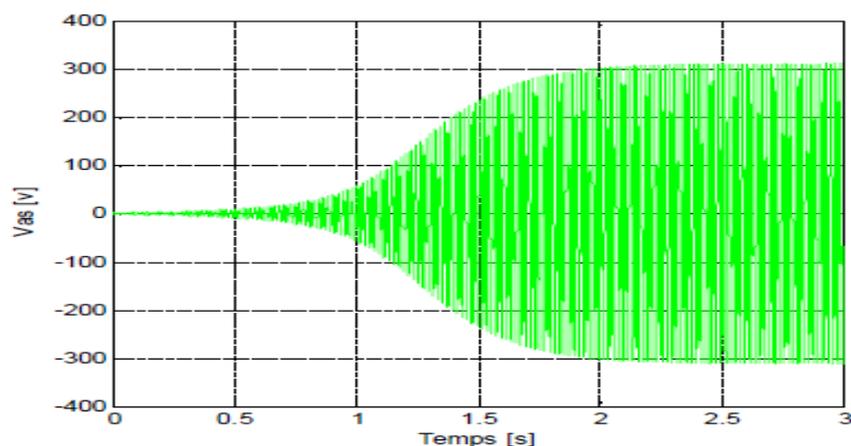
Figure (III-15) : Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$

La figure (III.15) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  , le coefficient  $C_p$  prend toujours une forme de cloche qui correspond à celle d'une éolienne tripale à axe horizontale.



**Figure (III-16) : Courbes des tensions statoriques**

La figure (III.16) représente l'évolution des tensions des phases  $v_a, v_b, v_c$  de la GAS, en fonction du temps, les tensions entrent dans un régime uniforme et stable à la valeur ( $v_a=v_b=v_c=40V$ ) après un régime transitoire perturbé de démarrage qui dure  $0.05s$



**Figure (III-17): Simulation MATLAB de la tension**

Nous avons vérifié la validité de ces résultats en les plaçant dans le programme *MATLAB* utilisé précédemment pour simuler les différents paramètres de sortie tel que la tension, La figures suivante (Fig III-17) représente les résultats obtenus par cette simulation.

### III.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire les étapes de modélisation d'une turbine éolienne. Dans un premier temps, nous avons établi un modèle permettant de reproduire des variations de la vitesse du vent en se basant sur un échantillonnage de la densité spectrale de puissance de vitesses mesurées sur un site. Ces variations de vent sont ensuite appliquées à un modèle de turbine utilisant les équations de base donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale. La vitesse de rotation de l'éolienne, calculée en fonction de l'inertie et du coefficient de frottements visqueux, est alors imposée comme référence. Les résultats ont montré une bonne corrélation entre l'environnement *Matlab* et *Sumulink*.



### Conclusion Générale

L'objectif de cette mémoire était l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance. et de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer une bonne chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Nous avons consacré un premier chapitre à des généralités sur les lois et les technologies gouvernant les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Dans le second et Le troisième chapitre nous avons réalisé la modélisation de tout l'aérogénérateur utilisant une génératrice à cage. Ce modèle de simulation a été développé sous environnement *SUMULINK* à partir de données bibliographiques [15]. Les résultats de simulation obtenus à l'aide des deux logiciels (Matlab/Simulink) nous ont permis, en plus de la validation des différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel)...etc.
- Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.
- Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.

**REFERENCES**

- [1] **A. MIRECKI** « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [2] **S. CELLES** "Quelques maquettes sur le thème des énergies renouvelables"Lycée Raoul Dautry - 87000 Limoges, *Le Bup* n 900 Vol. 102 - Janvier 2008
- [3]**B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED**, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [4] **P. LECONTE, M. RAPIN ET E. SZECHENYI**, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [5] **M. BEN MEDJAHED**, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.
- [6] **HISTORIQUE DES EOLIENNES**  
<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>
- [7] **F. POITIERS**, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne :Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [8] Les énergies renouvelables de la préhistoire à nos jours  
[http://www.astrolabium.be/IMG/pdf/dossier\\_pe\\_da\\_e\\_nergies.pdf](http://www.astrolabium.be/IMG/pdf/dossier_pe_da_e_nergies.pdf)
- [9] **N. KASPADJI – MERZOUK ET M. MERZOUK**, "*Perspectives du Pompage Eolien en Algérie*", *Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger* 2008.
- [10] **T. GRIGNOUX, R. GIBERT, P. NEAU, C. BUTHION** « éoliennes en milieu urbain », agence Régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Il-de-france » actualisation janvier 2006 (p.salvi).
- [11] **S. FATIMA** "Commande d'un Convertisseur electromécanique : Application à un Système eolien " Thèse de Magister en Electrotechnique 2013

- [12] **R.REDJEM** « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne »,  
Memoire : pour obtenir le diplôme de magistère en Electrotechnique, Universite Mentouri De Constantine 2009
- [13] **IUT GTE TP EOLIENNE** *web.univ-pau.fr/~omari/TPeol.pdf*
- [14] **B. MULTON** « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [15] **K. FERKOUS** " etude d'une chaine de conversion d'energie eolienne"  
Memoire :pour obtenir le diplome de magister en physique  
Ecole doctorale « energies renouvelables » Constantine 2009
- [16] **A. BENNADJI** « Implémentation de modèles comportementaux d'amplificateurs de puissance dans des environnements de simulation système et co-simulation circuit système »  
Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges 14 avril 2006.
- [17] **M. RAPIN,JEAN-MARC NOËL** " ENERGIE EOLINNE " Principes • etudes de cas
- [18] **L. CHANG** " Systèmes de conversion de l'énergie éolienne " Université du Nouveau-Brunswick, NB
- [19] **M.MAYOUF** " Contribution A La Modélisation De L'aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents " mémoire de magister en electrotechnique -option:energies renouvelables,université de biskra
- [20] **K. BEDOUD<sup>a,b</sup>, R. LAKEL<sup>b</sup>, M. ALI-RACHEDI<sup>c</sup>, S. LEKHCHINE<sup>d</sup>, T.BAHID.**  
" Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Basée sur une machine asynchrone à double alimentation." *a. Unité de Recherche en Technologies Industrielles URTI/CSC, BP1037, Annaba, Algérie. b. Laboratoire d'Automatique et Signaux-Annaba, Université Badji Mokhtar, Annaba. c. Ecole Préparatoire aux Sciences et Techniques -Annaba- d. Département d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar. Annaba.*
- [21] **S.MAGHSEL** " contribution a la modelisation et la commande d'une turbine eolienne "  
mémoire de magister en génie électrique option : électrotechnique Université skikda
- site web :**
- [22] <http://www.diebrennstoffzelle.de/alternativen/wind/index.shtml>
- [23] <https://fr.wikipedia.org/wiki/eolienne>