

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE ACADEMIQUE**

*Présenté par*  
**Hemdane Ahmed Abderrahmane**  
**Si Tayeb Zohra**

Thème

# Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne

*Mémoire soutenu publiquement le 27 septembre 2018 devant le jury composé de :*

**Mr Birouche. Ch**

Maitre assistant classe «A», UMMTO **Président**

**Mr MEZZAI. N**

Maitre des Conférences classe «B», UMMTO, **Encadreur**

**Mr ZIANE. Dj**

Maitre des Conférences classe «B», UMMTO, **Co-encadreur**

**Mr Djoudi. H**

Maitre assistant classe «A», UMMTO, **Examineur**

# Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie en premier le bon DIEU qui ma facilité le chemin, et donner la persévérance pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements a mon encadreur Mr MEZZAI NABIL et mon Co-encadreur Mr ZIANE DJAMEL pour avoir accepté de m'encadrer, et pour leurs aide, gentillesse et pour le temps qu'ils m'ont consacré et leurs conseils ;

Je tiens aussi à remercier le président et les membres du jury qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger mon travail.

Je remercie également tous les enseignants du département de génie électrique qui m'ont donné de leurs savoir et m'ont soutenu tout au long de mon cursus

A toute personne qui a contribué de près ou de loin a l'accomplissement de ce modeste travail

# DEDICACES

**Ce travail est dédié**

**A mes chers parents**

En témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation

A mon cher père pour qui je dois mon éducation et mon instruction, sa présence en toute circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité

A ma chère mère pour sa sollicitude à mon égard, et qui m'a entouré avec sa tendresse, toujours prête à se sacrifier pour ses enfants

**A mes frères KAMEL, LYES et LAMINE**

**A mes sœurs AMEL, IMANE**

**A ma tante HOURIA**

**A ma belle sœur MERIEM**

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que dieu, vous protège et vous garde

**A la mémoire de mon très cher ami MOULOUD**

J'aurais tant aimé que tu sois présent ;

Que dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

**A tous les autres membres de ma famille**

Que je n'ai pas cité, mais qui n'en demeurent pas moins chers.

**A mes amis de toujours**

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

## ***Dédicaces***

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser  
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les  
Protège pour leur soutien moral et financier, pour  
Leur encouragement et surtout les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes frères et sœurs*

*A ma tante Tassadit*

*A Mes nièces et neveux Meryem, Aymen , Sidou ,Nabil et Rajaa*

*Aux chers amis (es)*

*A la chère défunte amie et sœur Kahina que dieu le tout miséricordieux*

*l'accueil en son vaste paradis*

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment*

*A tous*

*Zohra*

# Sommaire

Liste des Figures

Liste des tableaux

La liste des symboles et abréviations,

**Introduction général.....1**

**Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes**

<b>I.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2</b>	<b>Les différentes sources d'énergies renouvelables.....</b>	<b>3</b>
I.2.1	L'énergies solaire photovoltaïque.....	3
I.2.2	Le solaire thermique a basse température .....	4
I.2.3	Le solaire thermique a haute température.....	5
I.2.4	La Biomasse .....	6
I.2.5	L'énergie hydraulique – Hydroélectricité.....	6
<b>I.3</b>	<b>L'énergie éolienne .....</b>	<b>7</b>
I.3.1	Définition de l'énergie éolienne .....	7
I.3.2	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	8
I.3.2.1	Avantages.....	8
I.3.2.2	Inconvénients.....	10
<b>I.4</b>	<b>Les différents composants d'une éolienne.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5</b>	<b>Les différents types d'éoliennes.....</b>	<b>12</b>
I.5.1	Les éoliennes à axe vertical.....	12
I.5.2	Les éoliennes à axe horizontal.....	13
<b>I.6</b>	<b>Puissance récupérable par une éolienne.....</b>	<b>14</b>
<b>I.7</b>	<b>Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....</b>	<b>15</b>
<b>I.8</b>	<b>Machines électriques dans les aérogénérateurs.....</b>	<b>16</b>
I.8.1	Machine synchrone à rotor bobiné.....	16
I.8.2	Machine synchrone à aimants permanents.....	16
A.	Structure avec redresseur à diodes.....	16
B.	Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	17
C.	Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont.....	18
I.8.3	Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	18
I.8.4	Machine asynchrone à double alimentation.....	18
<b>I.9</b>	<b>Le système de stockage.....</b>	<b>19</b>

<b>I.10</b>	<b>Les convertisseurs statiques.....</b>	<b>20</b>
<b>I.11</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>20</b>

**Chapitre II: Modélisation de chaine de conversion d'énergie éolienne**

<b>II.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2</b>	<b>Structure de la chaine de conversion éolienne.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3</b>	<b>Modélisation de la partie mécanique.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.1</b>	<b>Le vent : source aérodynamique.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3.2</b>	<b>Modélisation de la turbine.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.3</b>	<b>Le multiplicateur de vitesse.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.4</b>	<b>L'arbre de transmission.....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.5</b>	<b>Point de fonctionnement à puissance maximale.....</b>	<b>23</b>
<b>II.4</b>	<b>Modélisation de la partie Electrique.....</b>	<b>24</b>
<b>II.4.1</b>	<b>Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)...</b>	<b>24</b>
<b>II.5</b>	<b>Redresseur a diode.....</b>	<b>27</b>
<b>II.6</b>	<b>Modélisation du bus continu.....</b>	<b>28</b>
<b>II.7</b>	<b>Modélisation de la batterie.....</b>	<b>28</b>
<b>II.8</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>29</b>

**Chapitre III : Gestion de puissance de la chaine de conversion d'énergie éolienne**

<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>III.2</b>	<b>Paramètres de la turbine éolienne.....</b>	<b>30</b>
<b>III.3</b>	<b>Optimisation de la puissance de la turbine.....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.1</b>	<b>La méthode classique.....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.2</b>	<b>La méthode de perturbation et observation (P&amp;O).....</b>	<b>32</b>
<b>III.3.3</b>	<b>La méthode d'asservissement du signal de puissance (PSF).....</b>	<b>33</b>
<b>III.4</b>	<b>Description du système étudié.....</b>	<b>37</b>
<b>III.4.1</b>	<b>Principe de fonctionnement de la gestion de puissance .....</b>	<b>38</b>
<b>III.4.2</b>	<b>Simulation de système éolien.....</b>	<b>38</b>
<b>III.4.3</b>	<b>Résultats de simulation.....</b>	<b>39</b>
<b>III.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>43</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>44</b>

- Les références biobibliographies

# Liste des figures

**Listes des figures :**

**Chapitre I :**

<b>Figure I.1 :</b> Description d'une cellule photovoltaïque.....	<b>4</b>
<b>Figure I.2 :</b> Chauffe-eau solaire.....	<b>5</b>
<b>Figure I.3:</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	<b>7</b>
<b>Figure. I.4 :</b> Composition d'une éolienne.....	<b>11</b>
<b>Figure I.5 :</b> éolienne a axe verticale (darrieus).....	<b>12</b>
<b>Figure I.6 :</b> Eoliennes à axe horizontal.....	<b>13</b>
<b>Figure I.7 :</b> Types d'éoliennes à axe horizontal: .....	<b>14</b>
<b>Figure I.8 :</b> Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée .....	<b>15</b>
<b>Figure I.9 :</b> Caractéristique puissance/vitesse d'une éolienne.....	<b>15</b>
<b>Figure I.10:</b> Machine synchrone avec redresseur à diodes.....	<b>17</b>
<b>Figure I.11:</b> Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur...	<b>17</b>
<b>Figure I.12 :</b> Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.....	<b>18</b>
<b>Figure I.13 :</b> Batteries de stockage.....	<b>19</b>

**Chapitre II :**

<b>Figure II.1 :</b> Les différents constituants de la chaine de conversion éolienne.....	<b>21</b>
<b>Figure II.2 :</b> modèle d'une turbine éolienne.....	<b>22</b>
<b>Figure II.3 :</b> Entrées-sorties du modèle de la voile.....	<b>22</b>
<b>Figure II.4:</b> Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent. ....	<b>24</b>
<b>Figure II.5 :</b> schéma de machine synchrone.....	<b>25</b>
<b>Figure II.6 :</b> Redresseur à diodes.....	<b>27</b>
<b>Figure II.18 :</b> modèle R-C de la batterie.....	<b>28</b>

**Chapitre III :**

<b>Figure III.1 :</b> Caractéristique $C_p(\lambda)$ .....	<b>31</b>
<b>Figure III.2 :</b> Organigramme de la technique P&O.....	<b>33</b>
<b>Figure III.3 :</b> Asservissement du signal de puissance.....	<b>34</b>
<b>Figure III.4 :</b> Schéma de la turbine sous Matlab/Simulink.....	<b>34</b>
<b>Figure III.5 :</b> Profil de la vitesse du vent.....	<b>35</b>
<b>Figure III.6 :</b> Vitesse mécanique de la turbine.....	<b>35</b>
<b>Figure III.7 :</b> Puissance de la turbine.....	<b>36</b>
<b>Figure III.8:</b> Coefficient de puissance $C_p$ .....	<b>36</b>
<b>Figure III.9:</b> Vitesse spécifique $\lambda$ .....	<b>37</b>
<b>Figure III.10 :</b> Structure du système étudié.....	<b>37</b>
<b>Figure III.11 :</b> Schéma Matlab/Simulink du système éolien.....	<b>39</b>
<b>Figure III.12 :</b> La vitesse du vent.....	<b>39</b>
<b>Figure III.13:</b> Vitesse d'entraînement de la génératrice.....	<b>40</b>
<b>Figure III.14:</b> Tensions statoriques $V_{abc}$ .....	<b>40</b>
<b>Figure III.15:</b> Courants statoriques $I_{abc}$ .....	<b>41</b>
<b>Figure II.16:</b> Courant redressé .....	<b>41</b>
<b>Figure III.17:</b> Tension de la batterie .....	<b>42</b>
<b>Figure III.18:</b> Courant de la batterie .....	<b>42</b>
<b>Figure III.19:</b> Courant de dissipation .....	<b>43</b>



# Liste des tableaux

**Liste des tableaux**

**Tableau III.1** : Paramètres de la turbine.....**30**

**Tableau III.2** : Paramètres de la machine (MSAP).....**38**

**Liste des symboles et abréviations**

$V_{vent}$  : La vitesse du vent ;

$V_d$  : vitesse du vent au démarrage

$V_n$  : vitesse du vent nominale

$V_m$  : vitesse maximale du vent

$v$  : la vitesse moyenne du vent ;

$S$  : est la section de la turbine ( $S = \pi R^2$ ) ;

$R$  : Le rayon des pales de l'éolienne

$\rho$  : représente la densité de l'air (dans les conditions normales  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ ) ;

$G$  : est le gain du multiplicateur ;

$T_{em}$  : le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone ;

$T_t$  : le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;

$\Omega$  : est la vitesse mécanique de la génératrice ;

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine ;

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ;

$f$  : Coefficient de frottement dynamique ;

$C_p$  : Le coefficient de puissance

$\lambda_{opt}$  : La vitesse spécifique optimale de la turbine ;

$v_{a,b,c}$  : Les tensions de phase de la machine ;

$i_{a,b,c}$  : Les courants de phase de la machine ;

$L_c$  : L'inductance cyclique ;

$a, b, c$  : Indice correspondants aux trois phases a, b, c

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique ;

$E_{a,b,c}$  : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator

$p$  : Le nombre de paire de pôle,

$\omega$  : La vitesse du rotor avec ( $\omega = p \cdot \Omega$ ).

max: Valeur maximale ;

(M.P.P.T): Maximum Power Point Tracking

(MADA) : machine synchrone à double alimentation

(MSAP) : machine synchrone à aimant permanent

CC : courant continu

CA : courant alternatif

s :Indice du stator;

d,q: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature;

$\Phi_f$ : Flux induit par les aimants permanents ;

$I_{dc}$  : Le courant qui traverse le condensateur ;

$C_{bat}$  : la capacité (Ah) nominale de la batterie ;

$Q_{bat}$  : la quantité de charge (C) manquante par rapport à  $C_{bat}$  ;

Liste des symboles  
Et abréviations

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays asiatiques.

Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables. Plusieurs sources d'énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche, dont le but est de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels : La nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, et l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables.

Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse du vent d'une autre part.

Le recours à des structures éoliennes bien étudiées comme par exemple, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes de conversion éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes, à cause de la possibilité d'extraction de l'énergie optimale pour différentes vitesses de vent, de la réduction des contraintes mécaniques par l'élimination du multiplicateur, ce qui améliore la fiabilité du système, et la réduction des frais d'entretien.

La machine synchrone à aimants permanents est caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible, et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevées, un rendement important, et une meilleure

contrôlabilité; ce qui rend cette machine comme un vrai concurrent de la génératrice asynchrone.

Le but de ce travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents basé sur une structure proposée, et des stratégies de contrôle permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, de réguler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances transmises au réseau. Tous les modèles développés au cours de cette étude sont simulés par le logiciel Matlab-simulink.

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Le premier chapitre représentera un état de l'art sur les différentes sources d'énergies renouvelables existantes et quelques méthodes de recherche du point de puissance maximal; nous avons également présenté les différentes structures des systèmes éoliens en se focalisant pour notre travail sur le système éolien avec des batteries de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation d'un système éolien qui a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. On a aussi expliqué le principe de conversion éolien.

Le dernier chapitre sera consacré pour la simulation du système éolien et la gestion de puissance. La commande de puissance maximale (MPPT) à savoir la classique sera établie.

# Chapitre I

## Généralités sur les systèmes éoliens

## **I.1 Introduction :**

Les ressources d'énergie 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 dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire tout 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 souvent le choix le plus économique et technologique idéal pour les régions ou les 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).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

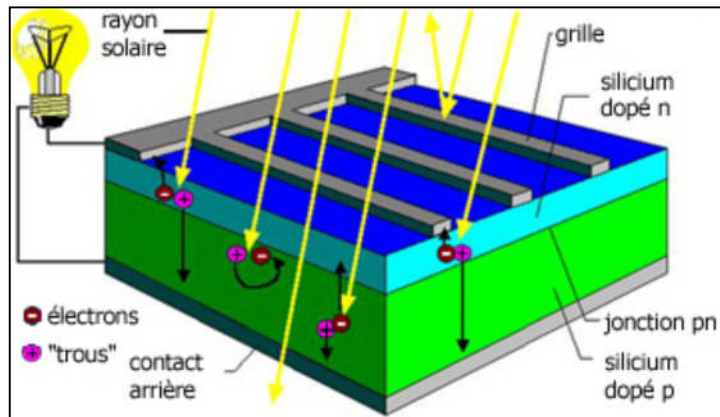
## **I.2 Les différentes sources d'énergies renouvelables :**

Les énergies renouvelables permettent de produire soit de la chaleur seule : eau Chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois, énergie solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

### **I.2.1 L'énergies solaire photovoltaïque : [1-2]**

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques (PV), convertissent la lumière solaire directement en électricité. PV tire son nom du processus de conversion de la lumière (photons) à l'électricité (tension), qui est appelé l'effet photovoltaïque. Ce dernier a été découvert en 1954, lorsque les chercheurs de Bell Téléphone découvrent que le silicium (un élément trouvé dans le sable) à créer une charge électrique lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil. Les cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs à base de silicium, de sulfure de cadmium et de tellure de cadmium. Il y a en effet de plaques fines (couche inférieure et couche supérieure) pour un contact étroit. La couche supérieure est

constituée de silicium et d'autres éléments possédant plus d'électrons qu'une couche de silicium pure. La couche inférieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant moins d'électrons qu'une couche de silicium pure.



**Figure I.1 :** Description d'une cellule photovoltaïque.

Aujourd'hui, des milliers de personnes alimentent leurs foyers et les entreprises avec des systèmes photovoltaïques individuels, des sociétés de services publics utilisent également la technologie photovoltaïque pour les grandes centrales électriques. Les panneaux solaires utilisés pour alimenter les maisons et les entreprises sont généralement fabriqués à partir de cellules solaires combinées en modules qui détiennent environ 40 cellules. Une maison typique utilise environ 10 à 20 panneaux solaires pour son alimentation. Les panneaux sont montés à un angle fixe faisant face au sud, où ils peuvent être montés sur un dispositif.

## I.2.2 Le solaire thermique à basse température :

L'histoire des capteurs thermiques à basse température met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Alors qu'à partir de 1910 pour les premiers chauffe-eaux solaires sont apparus en Californie.

Comme beaucoup de filières d'énergies renouvelables, le solaire thermique a connu une phase de croissance importante entre 1973 et 1985 en réaction au choc pétrolier. Mais ce développement rapide, avec des technologies ou des installateurs déficients, a entraîné de nombreuses contre-performances. Depuis la fin des années 90, quelques pays ont relancé des programmes de soutien au développement du solaire thermique : l'Autriche, l'Allemagne, la Chine et plus récemment l'Espagne.

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un plancher solaire direct".

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serres, murs capteurs, murs Trombe...).[3]

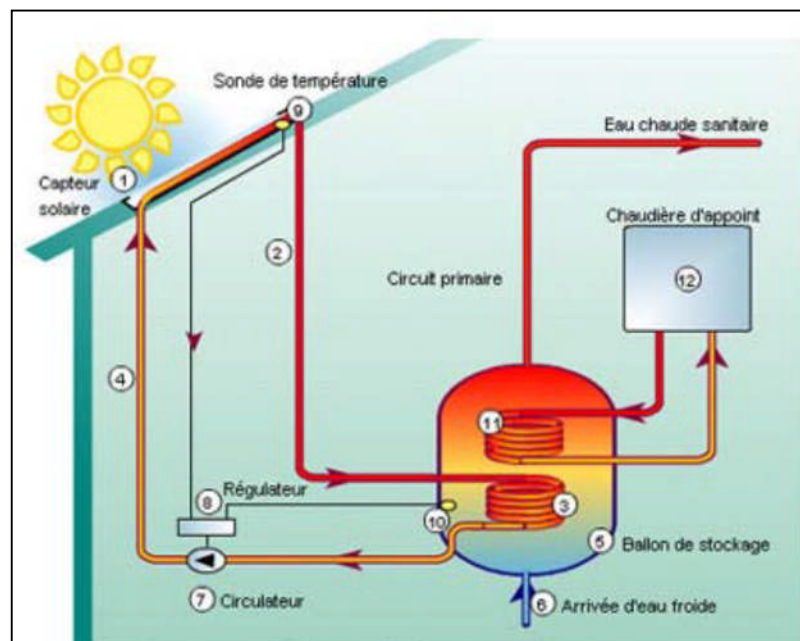


Figure I.2 :Chauffe-eau solaire [3]

### I.2.3 Le solaire thermique a haute température :

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir des températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [4].

## I.2.4 La Biomasse : [5]

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'Homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de produire de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses.

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres. Il y a trois types d'énergie biomasse :

- **Bio énergie** : c'est la plus ancienne source d'énergie utilisée par l'Homme. Et bien que peu utilisée en Europe aujourd'hui, elle reste la première source d'énergie pour plusieurs milliards de personnes dans le monde (cuisine et chauffage).
- **Le biogaz** : est produit à partir de déchets biodégradables. Il ressemble au gaz naturel, mais n'est pas une énergie fossile
- **Les biocarburants**: sont fabriqués à partir de produits de l'agriculture (blé, colza, maïs, etc.). Ils peuvent être utilisés en remplacement de l'essence, du fioul ou du gasoil, ou mélangés en petites quantités dans ces carburants.

## I.2.5 L'énergie hydraulique – Hydroélectricité :

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ».

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [6]. Certains pays (dont la France) sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage.

En Europe, en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13000 MW.

### I.3 L'énergie éolienne :

Le terme « Énergie éolienne » décrit le processus par lequel le vent est utilisé pour produire de l'énergie mécanique ou électrique. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette puissance mécanique peut être utilisée pour des tâches spécifiques (par exemple, moulin à grain ou pomper de l'eau), ou un générateur peut convertir cette énergie mécanique en électricité pour alimenter les maisons, les entreprises, les écoles, et autres. Actuellement, des recherches approfondies sur l'énergie éolienne est en cours dans divers pays du monde, y compris les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark, le Japon, la Corée du Sud, le Canada, l'Australie et l'Inde. Il existe plusieurs organismes de recherche de l'énergie éolienne dans le monde, comme le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), National Renewable Energy Laboratory (NREL), et American Wind Energy Association (AWEA). Selon un rapport GWEC [7], environ 12% de la demande totale d'électricité du monde peut être alimentée par l'énergie éolienne d'ici 2020. Ce chiffre indique l'importance de la recherche de l'énergie éolienne ces jours-ci.

#### I.3.1 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé 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.

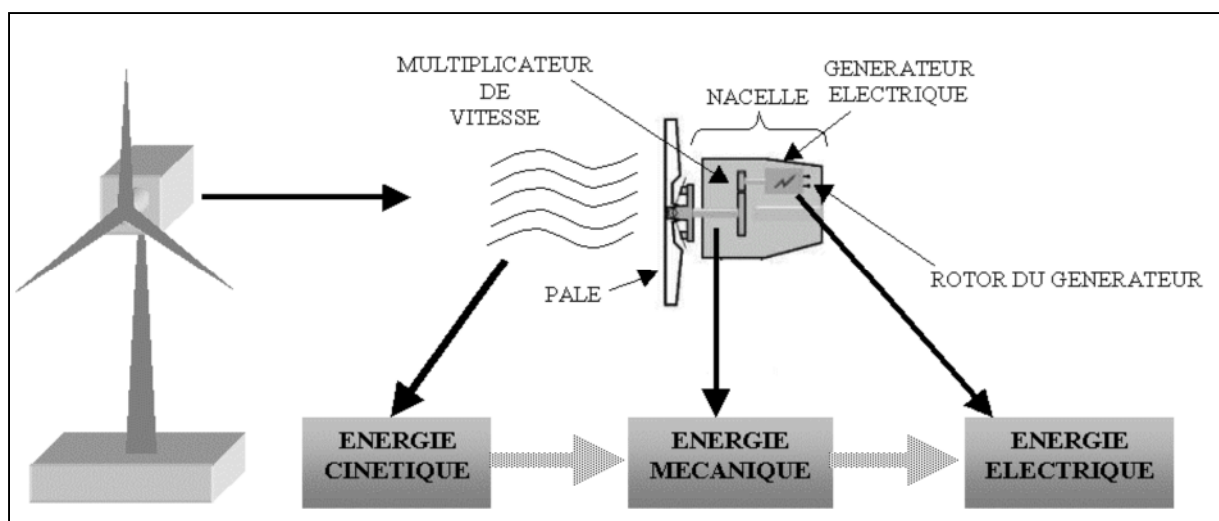


Figure I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [8].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

### **I.3.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

#### **I.3.2.1 Avantages :**

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'Homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [09]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [09]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on

peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [09].

« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [09].
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supprime une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Nox [09]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [09].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [09].
- 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 [09].
- 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.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [09].
- 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.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [09].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [10].

- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [10].

### I.3.2.2 Inconvénients :

L'énergie éolienne possède aussi des inconvénients qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [09].
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [09].
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [09], [11]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [09].
- La qualité de la puissance électrique : 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 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 la suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [09].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [09].

## I.4 Les différents composants d'une éolienne :

Les éoliennes sont constituées le plus généralement d'une hélice, d'une nacelle et d'une tour :

◆ L'hélice est composée de pales qui transforment l'énergie présente dans le vent en un mouvement rotatif qu'elles transmettent à l'alternateur couplé à l'hélice ; pour cela, les pales se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. La théorie (théorème de Betz) montre que, pour récolter une puissance de rotation maximum, l'hélice doit réduire de trois fois la vitesse du vent, et non pas l'arrêter. L'énergie récoltée dépend du cube de la vitesse et de la surface balayée par l'hélice, donc du carré de son diamètre. La densité intervient également: de l'air humide ou froid et une haute pression atmosphérique (basse altitude) seront des facteurs favorables.

◆ La nacelle abrite l'alternateur ainsi que d'autres systèmes comme la boîte de vitesse et les commandes des pales.

◆ La tour quant à elle, doit soutenir le poids de l'appareil et résister aux vibrations pendant toute sa durée de vie. Elle est généralement construite en acier, creuse et renferme une échelle qui permet l'accès à la nacelle pour d'éventuels entretiens. Toutefois il existe aussi certaines tours construites sous forme de pylônes en treillis.

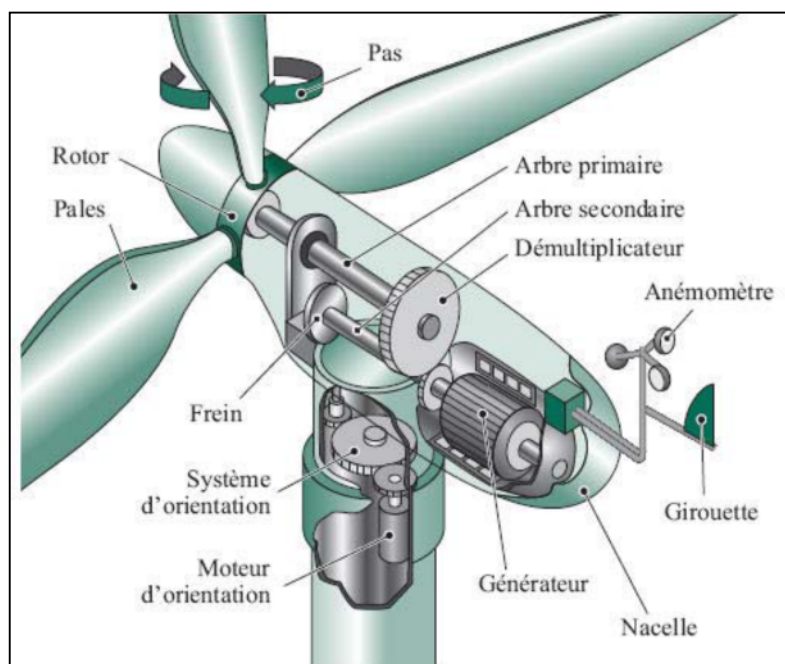


Figure. I.4 : Composition d'une éolienne.

## I.5. Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes: Les aérogénérateurs à axe vertical et ceux à axe horizontal.

### I.5.1 Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [8].

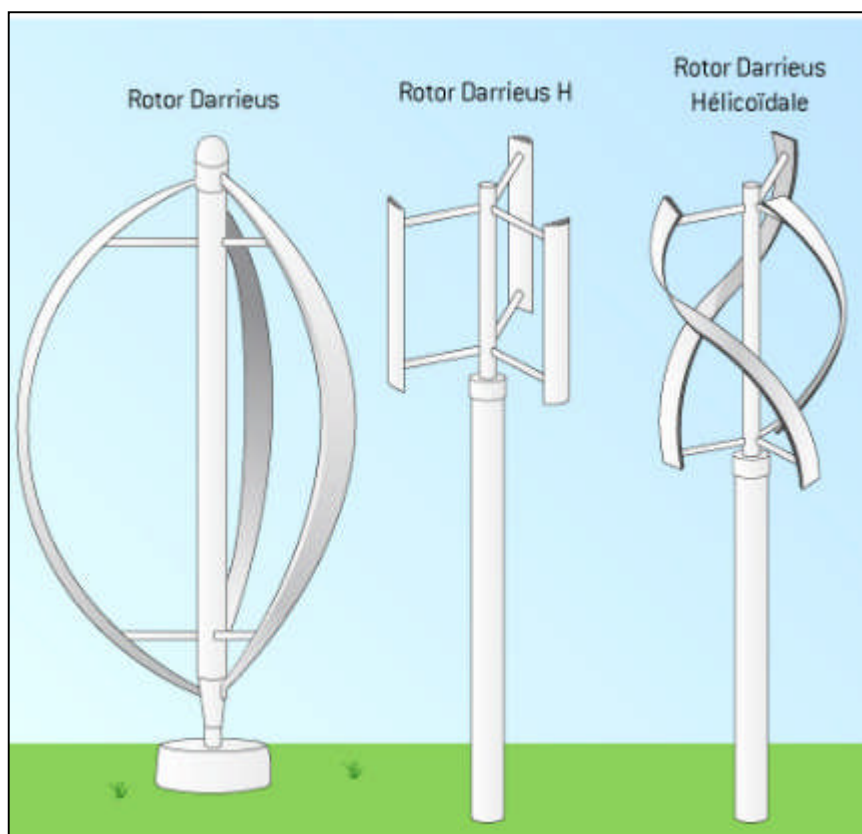


Figure I.5 : éolienne a axe verticale (Darrieus)

### I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal :

Beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales. Elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [12].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne.



**Figure I.6 :** Eoliennes à axe horizontal

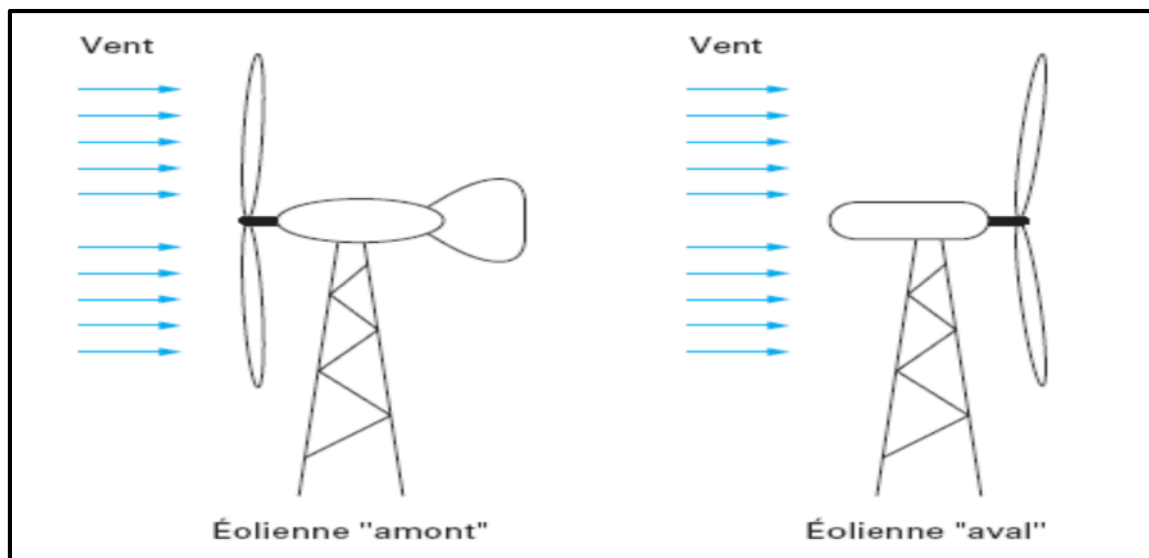
Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- 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.

Il existe deux types de configuration d'éolienne à axe horizontal (Figure I.7) :

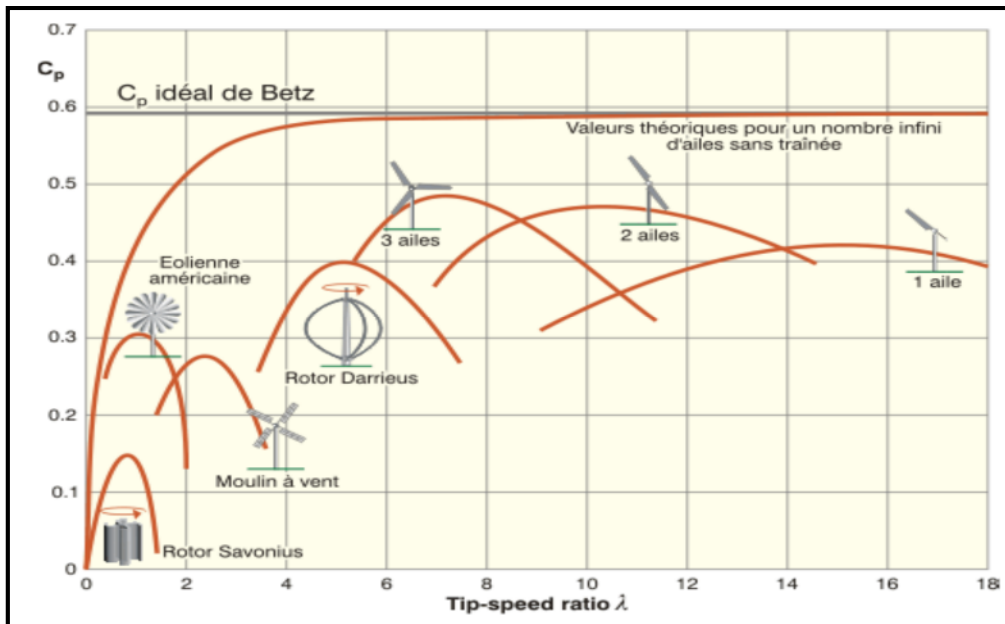
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible et auto orientable. L'effet de masque est plus important dans ce type de configuration.
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique. La disposition turbine en amont est la plus utilisée pour les grandes puissances du fait que la stabilité est meilleure, et les efforts de manœuvre sont moins importants [13].



**Figure I.7:** Types d'éoliennes à axe horizontal

## I.6 Puissance récupérable par une éolienne :

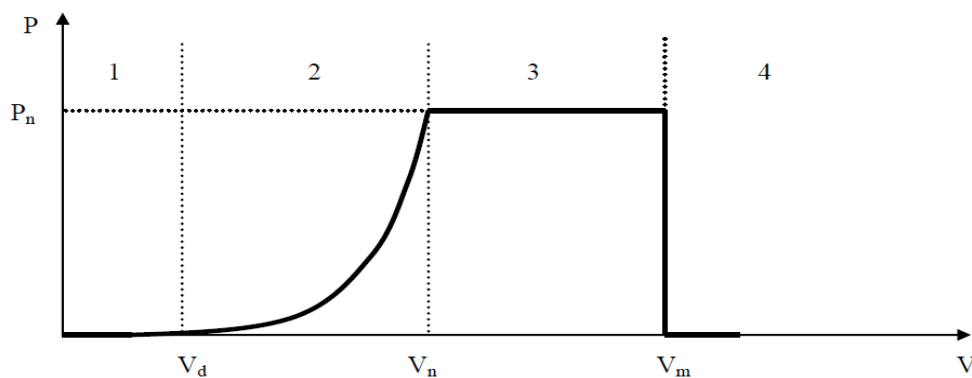
La figure (I.8) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal pour différents types d'éoliennes [14]. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.



**Figure I.8 :** Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [15].

**I.7 Régulation mécanique de la puissance d’une éolienne :**

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d’une vitesse de vent nominale  $V_n$  (Figure I.9)[16]. Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques, de sorte que la puissance récupérée ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle elle a été conçue. Il y a d’autres grandeurs dimensionnant:  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l’éolienne commence à fournir de l’énergie et  $V_m$  la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l’éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.



**Figure I.9 :** Caractéristique puissance/vitesse d’une éolienne [14].

Les vitesses  $V_d$ ,  $V_n$  et  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone 1, où  $P = 0$  (l'éolienne est à l'arrêt) ;
- La zone 2, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre est proportionnelle à la vitesse du vent;
- La zone 3, la puissance est maintenue constante ( $P = P_n$ ) quelque soit la vitesse du vent ;
- La zone 4, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie [14, 17,18];

## **I.8 Machines électriques dans les aérogénérateurs :**

### **I.8.1 Machine synchrone à rotor bobiné :**

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [18].

### **I.8.2 Machine synchrone à aimants permanents :**

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous [19].

### **A. Structure avec redresseur à diodes :**

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I.10) [19]. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal.

Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée [18].

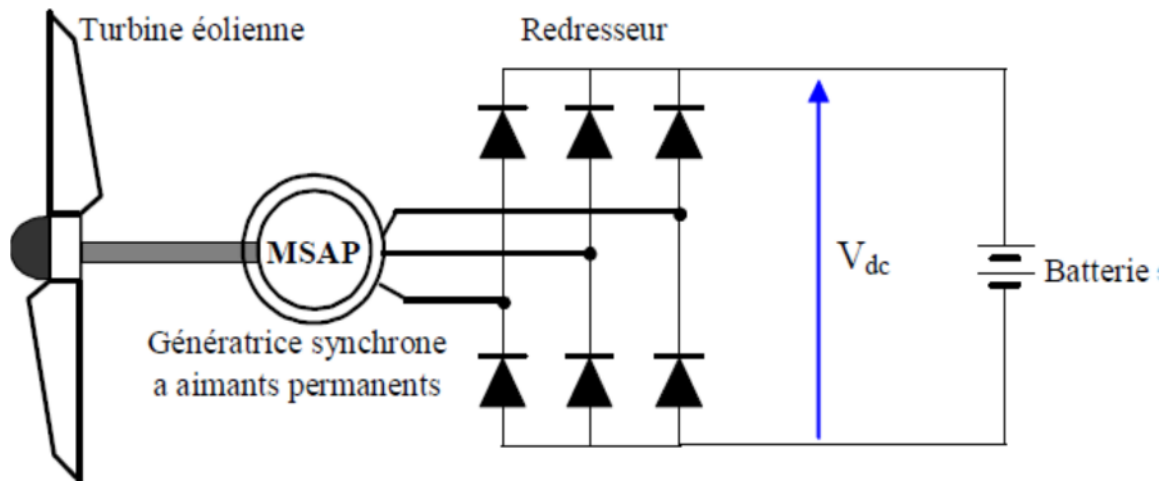


Figure I.10: Machine synchrone avec redresseur à diodes

### B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur :

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes figure (I.11) [18,20].

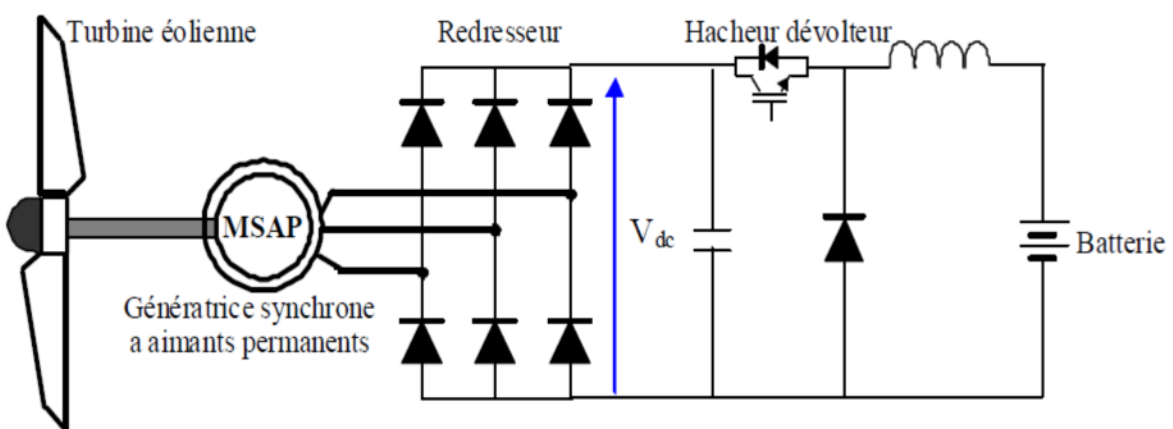


Figure I.11: Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur [19]

### C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont :

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées, figure (I.12) [18].

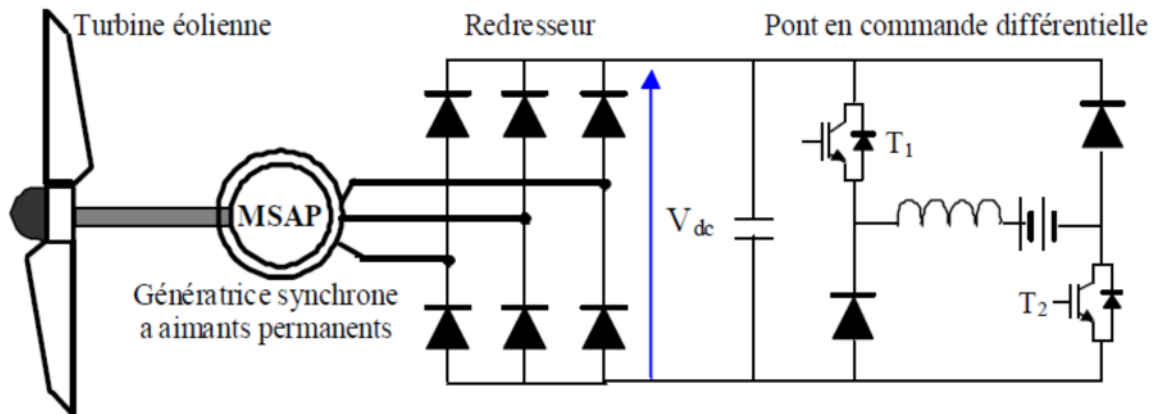


Figure I.12 : Machine synchronisée avec convertisseur à diodes et hacheur en pont [19]

### I.8.3 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence [21].

Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice [19].

### I.8.4 Machine asynchrone à double alimentation :

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [19].

## I.9 système de stockage :

Il existe deux types de stockage :

- Le stockage à long terme (ex : batteries) ;



**Figure I.13 :** Batteries de stockage

- Le stockage à court terme (volants d'inertie) ;

Dans notre étude nous allons porter un intérêt au stockage électrochimique (batteries) :

### ➤ **Batteries :**

Dans les batteries, l'énergie est stockée sous forme électrochimique. Elles sont composées de deux électrodes séparées par un électrolyte et des interfaces dans lesquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons. Les ions ainsi générés circulent dans l'électrolyte. Les systèmes de batteries sont constitués d'un ensemble de modules de batteries à basse tension/puissance qui se connectent en parallèle ou en série pour obtenir les caractéristiques électriques désirées. Elles représentent les systèmes de stockage qui ont la plus grande capacité de stockage d'énergie électrique. Les batteries se chargent quand elles subissent une réaction chimique interne sous un potentiel appliqué à leurs bornes. Elles se déchargent, pour la réaction chimique inverse. La batterie au plomb acide est la plus utilisée, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont beaucoup plus utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale [22].

### **I.10 Les convertisseurs statiques :**

Dans un système électrique à énergie renouvelable des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans les systèmes à énergies renouvelable, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs réalisent la conversion CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement: autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources [23].

### **I.11 Conclusion :**

Une brève description des systèmes d'énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre et les principales notions liées à la technologie utilisée dans les éoliennes ont été données.

Le dimensionnement et le fonctionnement des composantes du système éolien doivent tenir compte des variations de la charge. La modélisation du système éolien sera l'objectif des chapitres suivants.

## Chapitre II

# Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

## 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.[16]

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion éolienne.

## II.2 Structure de la chaîne de conversion éolienne :

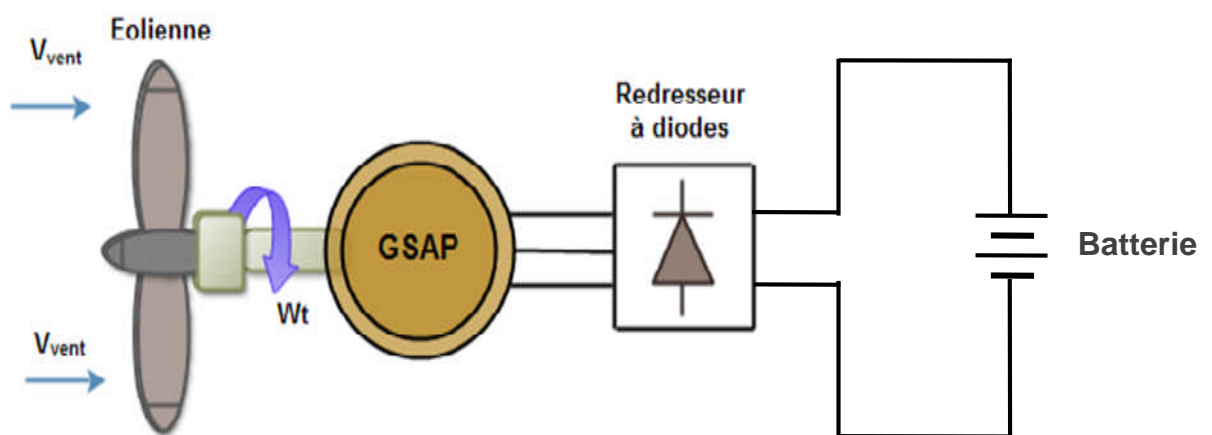


Figure II.1 : Les différents constituants de la chaîne de conversion éolienne

## II.3 Modélisation de la partie mécanique :

### II.3.1 le vent : source aérodynamique :

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. C'est donc une variable importante à modéliser, la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle [24]. Elle est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [25].

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

### II.3.2 Modélisation de la turbine :

On choisit un modèle reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on utilisera une courbe du coefficient de puissance en fonction du rapport de la vitesse en bout des pales ( $C_p(\lambda)$ ) [26] (figure II.2).

Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple (II.2) associée à la caractéristique  $C_p(\lambda)$ .

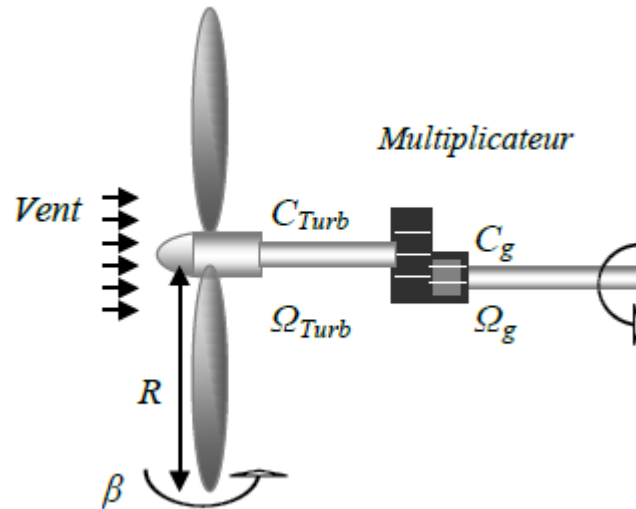


Figure II.2 : modèle d'une turbine éolienne

Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [27,28]:

$$T_t = \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * \frac{v^3}{\Omega_t} \tag{II.2}$$

Où S: est la section de la turbine ( $S = \pi R^2$ ),  $\rho$ : représente la densité de l'air (dans les conditions normales  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ ), v: la vitesse moyenne du vent [29].

La figure suivante représente les entrées-sorties du modèle de la voilure :

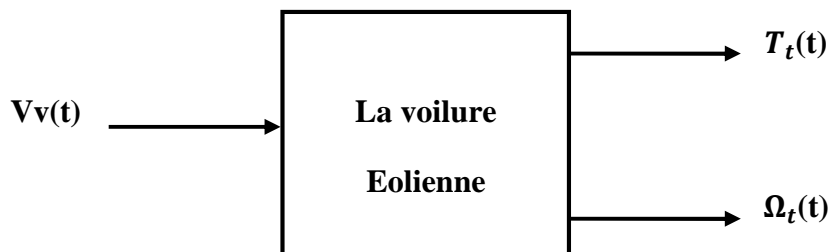


Figure II.3 : Entrées-sorties du modèle de la voilure

### II.3.3 Le multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [25], [29] :

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (\text{II.3})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- G : est le gain du multiplicateur ;
- $T_{em}$  : est le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone ;
- $T_t$  : est le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;
- $\Omega$  : est la vitesse mécanique de la génératrice ;
- $\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine.

### II.3.4 L'arbre de transmission :

Le modèle mécanique utilisé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [29], telle que :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_{em} - T_t \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ;
- f : Coefficient de frottement dynamique ;

### II.3.5 Point de fonctionnement à puissance maximale :

Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale d'une éolienne.

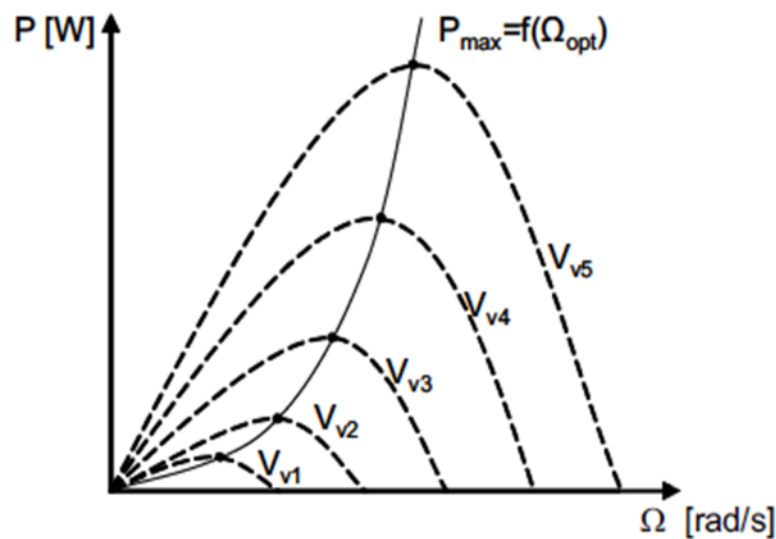
Le schéma de la figure (II.4) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne : Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent  $V_{vdonnée}$ .

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale défini par l'équation :

$$T_{em} = K * \Omega^2 \quad (II.6)$$

Avec :

$$K = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} * \frac{\rho}{2} * \pi * \frac{R^5}{G^3} \quad (II.7)$$



**Figure II.4:** Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent

## II.4 Modélisation de la partie électrique :

### II.4.1 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP):

Dans le cadre de notre étude, nous disposons d'une éolienne basée sur la machine synchrone à aimants permanents.

Il s'agit d'une machine multi pôle. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [30].

- La non saturation du circuit magnétique.

- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc lisse du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position.
- La force magnéto motrice induite est à répartition sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

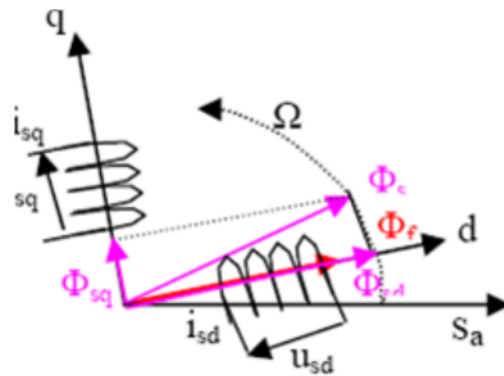


Figure II.5 : Schéma de machine synchrone

### ➤ Equations des tensions et du couple :

La machine étudiée est une machine synchrone à aimants permanents à rotor lisse, dont les aimants sont disposés sur la surface du rotor. Le neutre est isolé et la somme instantanée des courants de phase est nulle.

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Où :

$v_{a,b,c}$  : Les tensions de phase de la machine ;

$i_{a,b,c}$  : Les courants de phase de la machine ;

$L_c$  : L'inductance cyclique ;

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique ;

$E_{a,b,c}$  : Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_{em} = \frac{p}{\omega} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \quad (\text{II.9})$$

Où :

$p$  : Le nombre de paire de pôle,

$\omega$  : La vitesse du rotor avec ( $\omega = p \cdot \Omega$ ).

La résolution de l'équation matricielle de la machine ainsi obtenue est trop complexe; Ainsi, pour simplifier cette équation, on fait appel à des transformations, l'utilisation de ces composantes permet une économie considérable du temps de calcul [30].

### ➤ Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP [31]:

En reportant la transformation de PARK, dans le système d'équation (II.8), on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

L'expression des f.é.m est donnée par:

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

L'expression du couple :

$$T_{em} = \frac{P}{\omega} \left( E_d i_d + E_q i_q \right) \quad (\text{II.12})$$

Le système d'équation (II.10) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_c \frac{di_d}{dt} - L_c i_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_c \frac{di_q}{dt} - (L_c i_d + \phi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

L'expression du couple se réduit à [31] :

$$T_{em} = \frac{P}{\omega} (E_q i_d) = p \phi_f i_q \quad (\text{II.14})$$

## II.5 Redresseur à diode :

D'après la figure (II.6), lorsque la diode D1 conduit, l'une des diodes D5 ou D4 conduit également. Il en vient que D1 conduit lorsque V1 est supérieur à V2 et V3.

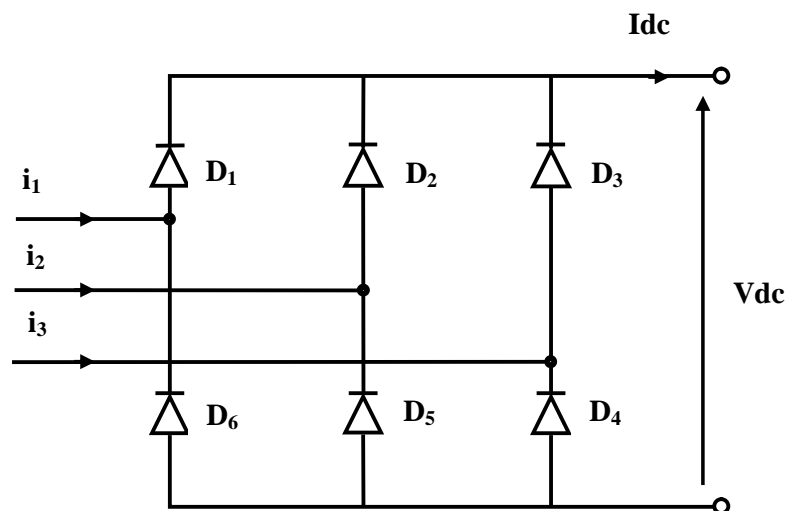


Figure II.6 : Redresseur à diodes [32].

## II.6 Modélisation du bus continu :

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but de filtrer la tension.

Le condensateur du bus continu est modélisé par l'équation suivante [31] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} * I_{dc} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$I_{dc}$  : Le courant qui traverse le condensateur.

## II.7 Modélisation de la batterie [32]

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, nous utiliserons pour notre étude, le modèle R-C dit aussi model simple, qui ne nécessite pas d'identifications expérimentales de paramètres empiriques nécessaires à l'emploi des autres modèles couramment utilisés, et qui permet également le choix d'un simulateur à pas fixe dont le pas de calcul est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le model R-C comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie  $C_{bat}$  et une résistance interne  $R_s$ .

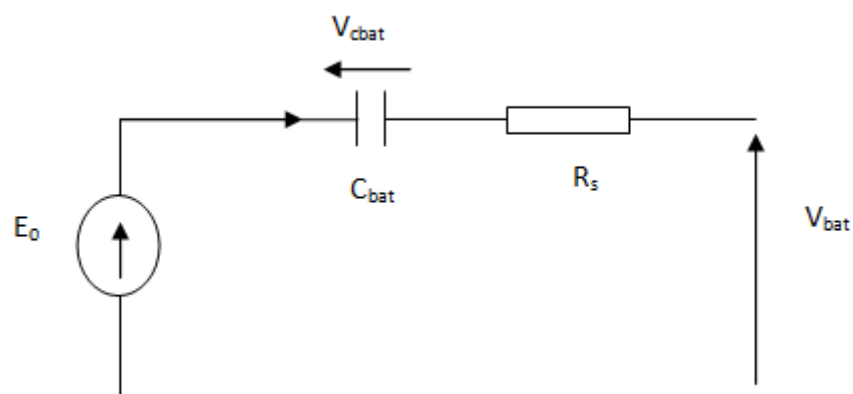


Figure II.18 : Modèle R-C de la batterie [32]

Donc on a :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{bat} \quad (\text{II.16})$$

$$u = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (\text{II.17})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_{bat}}{C_{bat}} \quad (\text{II.18})$$

Tel que :

$$Q_{bat} = I_{bat} t_{bat} \quad (\text{II.19})$$

$$C_{bat} = \frac{Q_{bat}}{v_{bat}} \quad (\text{II.20})$$

$C_{bat}$  : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

$Q_{bat}$  : la quantité de charge (C) manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

## **II.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les deux parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine à aimant permanent, fonctionnement en génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

## Chapitre III

# Gestion de puissance de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

### **III.1 Introduction :**

Dans n'importe quel système éolien avec batterie de stockage, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge de stockage d'autre part (protection contre les surcharges et les décharges profondes), afin de préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

A cet effet, l'algorithme de gestion est chargé de réguler l'énergie provenant du système éolien. Pour se faire, ce dernier est implanté sous Matlab/Simulink puis simulé. Mais aussi de traiter les différents cas possibles auxquels nous sommes appelés à être confrontés.

### **III.2 Paramètres de la turbine éolienne :**

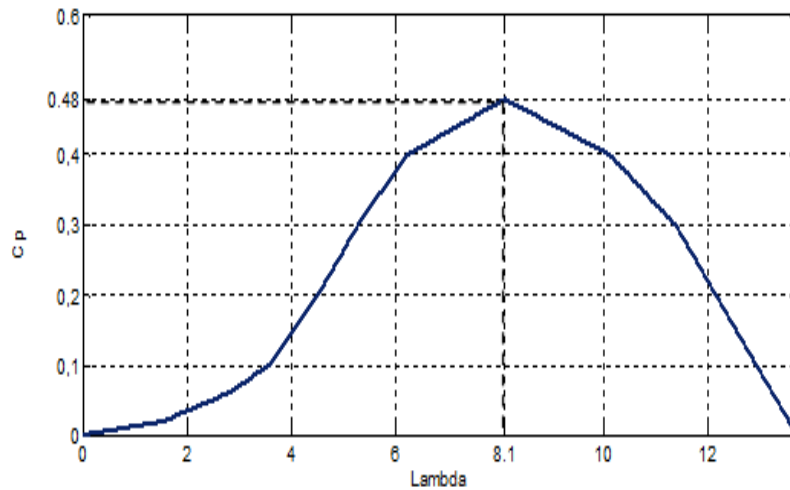
La puissance  $P_v$ , issue de l'énergie cinétique d'un vent incident d'une vitesse  $V_v$ , traversant une surface  $S$ .

Soient les données suivantes :

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Puissance de la turbine	1000W
Nombre de pâles	3
Vitesse maximum	12.5 m/s
Vitesse de démarrage	3.4m/s
Rayon des pâles	1.05 m
Gain du multiplicateur de vitesse	1
Masse volumique de l'air	1.225 kg/m <sup>3</sup>

**Tableau III.1 : Paramètres de la turbine [33]**

La figure suivante présente la caractéristique du coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction de rapport de la vitesse au bout des pales ( $\lambda$ ).



**Figure III.1 :** Caractéristique  $C_p(\lambda)$

A partir de la caractéristique  $C_p(\lambda)$ , on obtient les valeurs suivantes :

$$C_{p_{\max}} = 0.48.$$

$$\lambda_{\text{opt}} = 8.1.$$

### III.3 Optimisation de la puissance de la turbine :

Pour l'optimisation de la puissance, il existe plusieurs techniques MPPT, à savoir : la classique, perturbation et observation (P&O) et asservissement du signal de puissance (PSF).

#### III.3.1 La méthode classique :

MPPT classique consiste en une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter (figure III.1). De cette courbe on déduit  $C_{p_{\max}} = 0.48$  et  $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ .

Dans l'objectif de vérifier la validité du modèle de la turbine en tenant compte d'un algorithme MPPT, nous simulons le fonctionnement de la turbine avec un profil représenté à la figure (III.5).

Une commande en couple est appliquée pour garantir un fonctionnement à puissance maximale de l'éolienne. La figure (III.4) montre le schéma du bloc de simulation réalisé sous Matlab/Simulink, Ce schéma nous permet de visualiser les différentes caractéristiques de la turbine.

L'algorithme MPPT de la commande en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence [34]. Selon les équations (II.6 et II.7) on peut écrire :

$$T_{em-opt} = K_{opt} \cdot \Omega^2 \quad (III.1)$$

$$\text{Avec : } K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} \quad (III.2)$$

### **III.3.2 La méthode de perturbation et observation (P&O) :**

Le principe de la commande MPPT dite P&O se résume dans deux instructions l'une est de perturber la vitesse de l'éolienne  $\Omega(t)$  avec de petite fourchette autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de la puissance  $P(t)$ . Ainsi, comme l'illustre la figure (III.2) nous pouvons déduire que si une incrémentation positive de la vitesse  $\Omega(t)$  engendre un accroissement de la puissance  $P(t)$  cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point optimal. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le point optimal. En résumé, si suite à une perturbation de vitesse la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau point optimal [35].

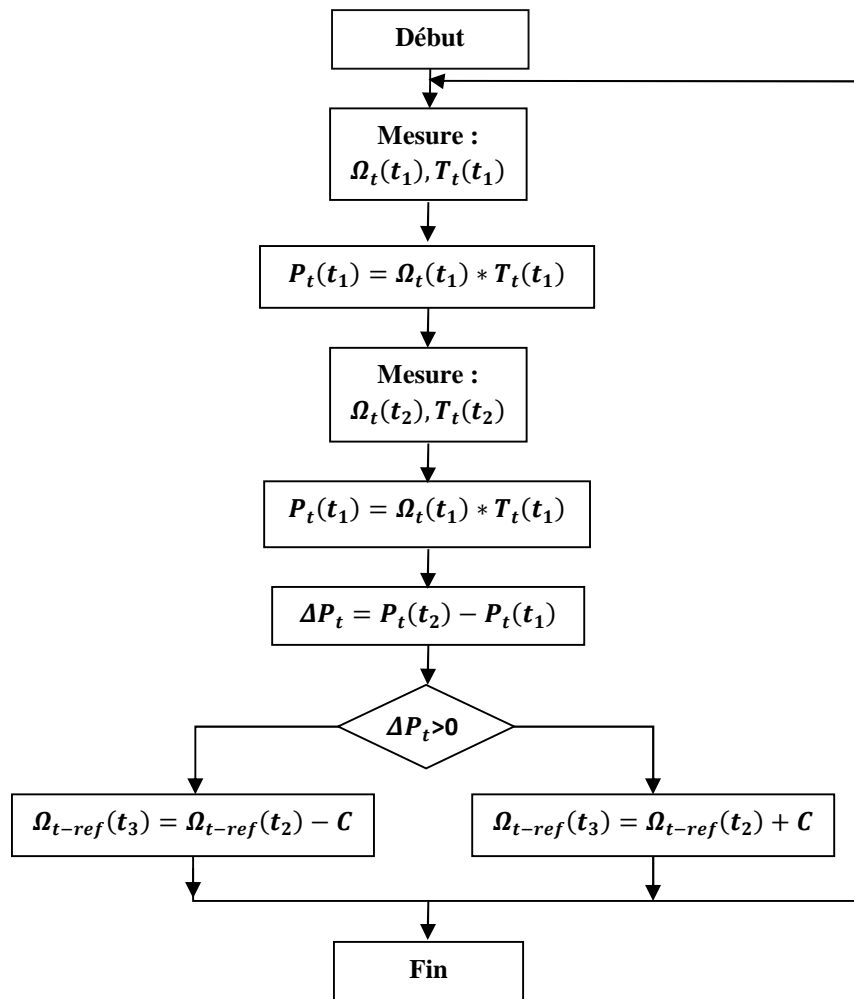


Figure III.2 : Organigramme de la technique P&O

### III.3.3 La méthode d'asservissement du signal de puissance (PSF) :

Dans le control PSF, il est nécessaire d'avoir la connaissance de la courbe de puissance maximale de l'éolienne, et de suivre cette courbe par le biais de ses mécanismes de control. Les courbes de puissance maximale doivent être obtenues par le biais de simulation ou de off-line. Dans cette méthode, la puissance de référence est générée soit en utilisant une courbe de puissance maximale enregistrée ou en utilisant l'équation de puissance mécanique de l'éolienne lorsque la vitesse du vent ou la vitesse du rotor est utilisée comme entrée [35]

La figure (III.3) montre le schéma de principe d'un système éolien avec PSF contrôleur pour d'extraction d'énergie maximale.

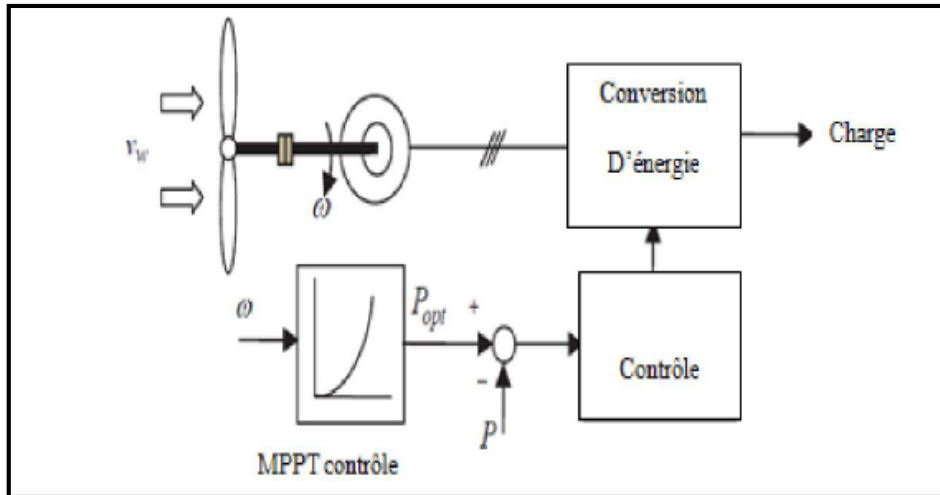


Figure III.3 : Asservissement du signal de puissance.

Pour l'optimisation de la puissance nous avons adopté la techniques MPPT classique.

Le schéma bloc réalisé pour la simulation du modèle de la turbine éolienne avec la technique MPPT classique sous Matlab/simulink est donné par la figure (III.4).

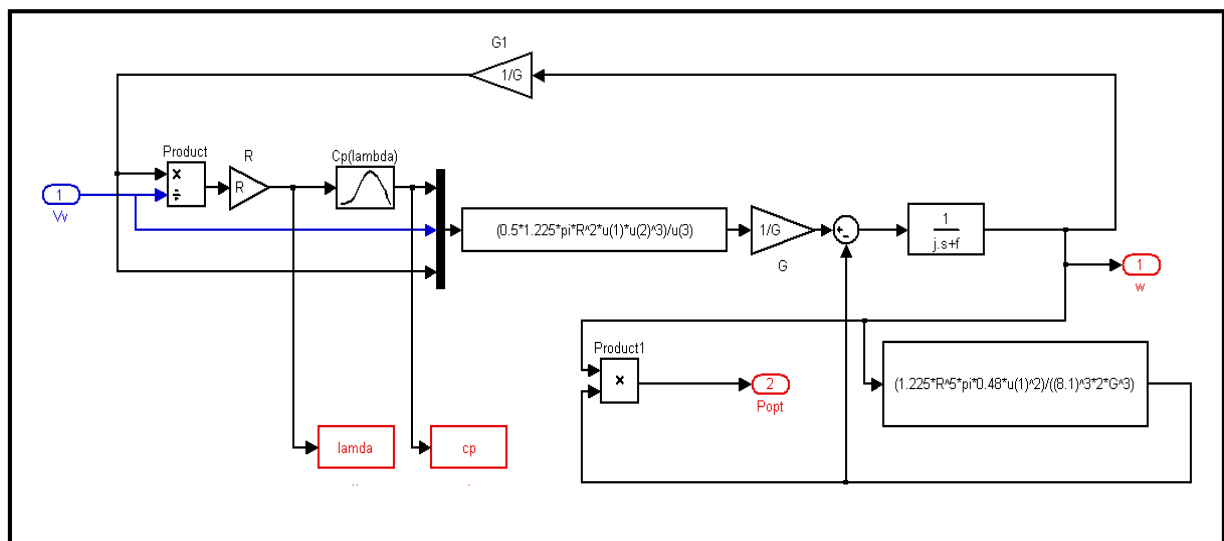
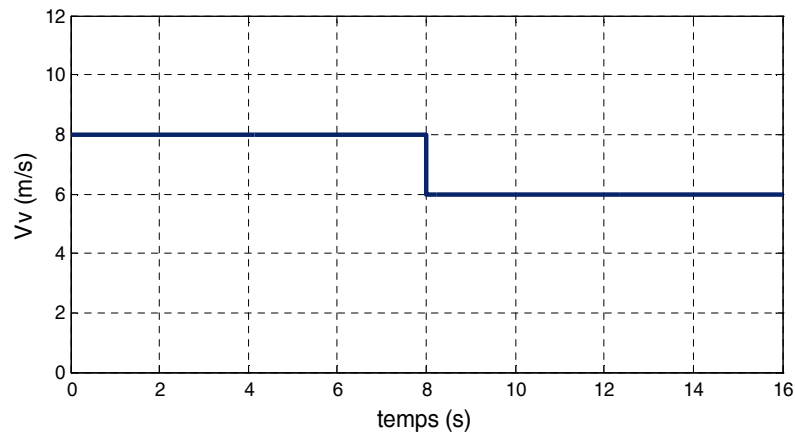


Figure III.4 : Schéma de la turbine sous Matlab/Simulink

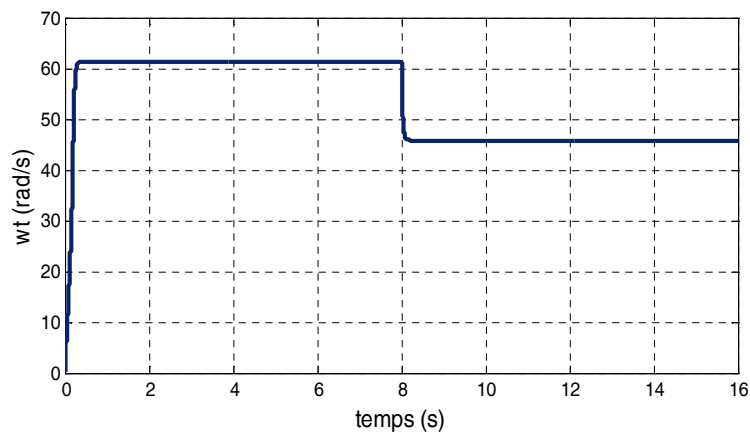
➤ **Résultats de simulation :**

On applique à la turbine un échelon de vitesse de vent qui varié de 8 à 6m/s. La figure (III.5) représente le profil du vent utilisé lors de la simulation :

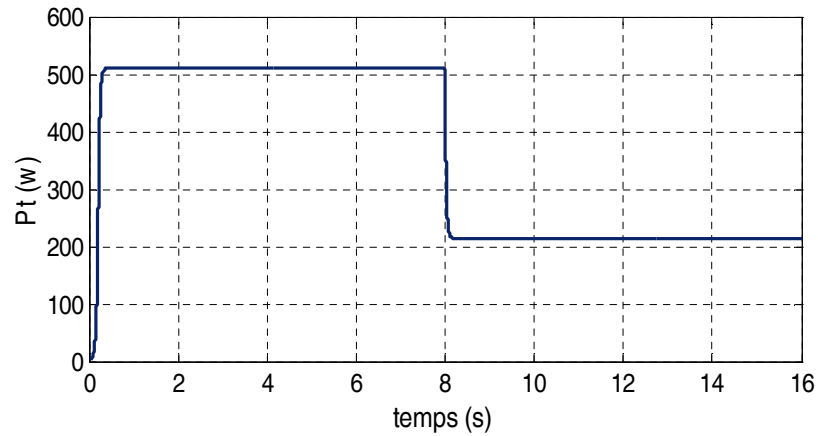


**Figure III.5 :** Profil de la vitesse du vent

Les figures (III.6), (III.7) représentent la vitesse mécanique de la turbine ( $w_t$ ) et la puissance de la turbine ( $P_t$ ) en fonction du temps. Nous remarquons bien que les deux grandeurs sont proportionnelles à la variation de la vitesse du vent.

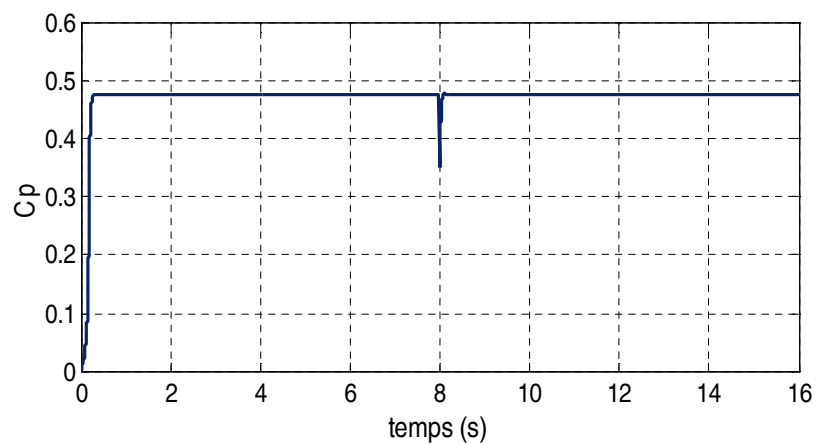


**Figure III.6 :** Vitesse mécanique de la turbine



**Figure III.7 :** Puissance de la turbine

Les figures (III.8), (III.9) représentent l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  et la vitesse spécifique  $\lambda$  en fonction du temps.  $C_p$  et  $\lambda$  sont maintenues constant à leurs valeurs maximales et optimales respectivement, et indépendamment de la vitesse variable du vent.



**Figure III.8:** Coefficient de puissance  $C_p$

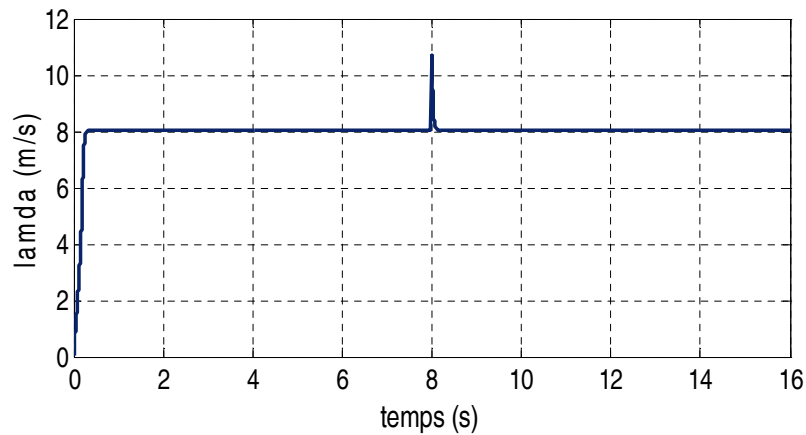


Figure III.9: Vitesse spécifique  $\lambda$

### III.4 Description du système étudié :

Le système éolien étudié est constitué d'une turbine éolienne à axe horizontal qui entraîne une génératrice synchrone à aimants permanents. La génératrice débite sur un redresseur PD3 à diode. Ce système éolien est muni d'une charge électronique qui dissipe le sur plus d'énergie branchée à la sortie de la génératrice et des batteries de stockage de 24 v.

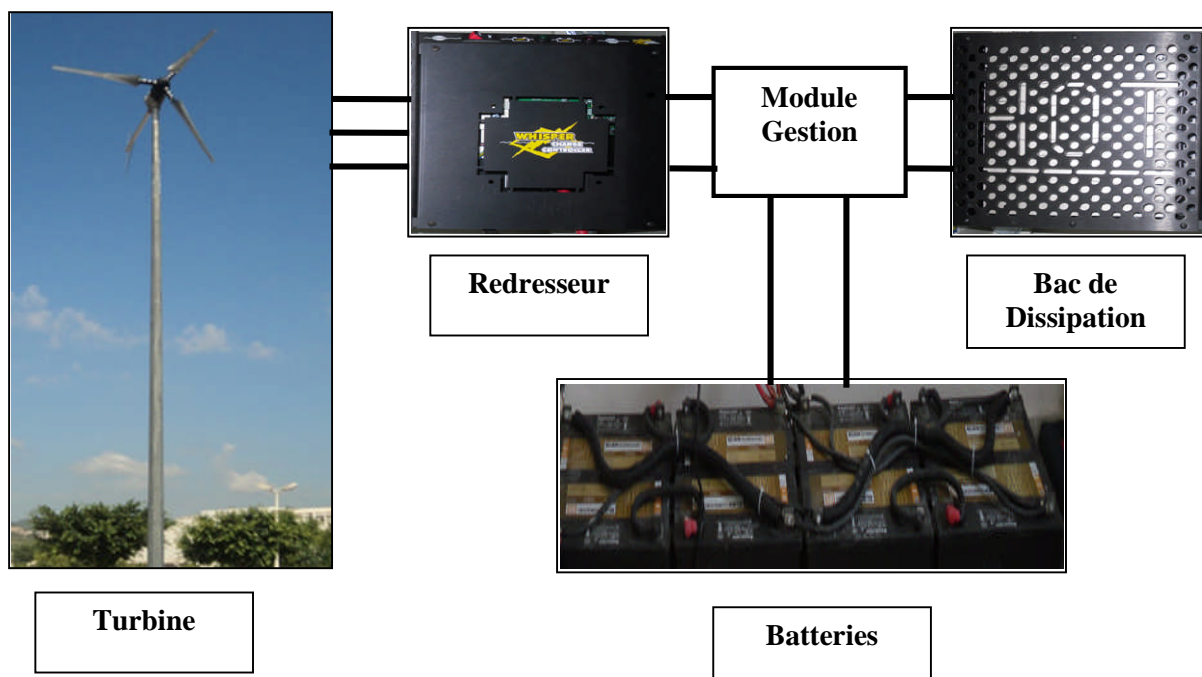


Figure III.10 : Structure du système étudié.

### III.4.1 Principe de fonctionnement de la gestion de puissance :

Dans un système éolien, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge et décharge des batteries d'autre part.

Le module de gestion sera chargé de gérer l'énergie provenant de la génératrice et du stockage suivant l'état de charge de la batterie.

### III.4.2 Simulation de système éolien :

Dans cette partie, nous simulons le fonctionnement du système éolien étudié sans maximisation de puissance, la génératrice synchrone à aimants permanents est entraînée à sa vitesse de synchronisme (62,8319 rad/s) jusqu'à 7h, puis on réduit la vitesse de 20% (55,2655 rad/s) entre 7h et 15h et entre 15h et 20h, la vitesse reprend sa valeur initiale. L'objectif de cette partie est de vérifier la validité du modèle analytique de la machine introduit précédemment au paragraphe II.4 et le bon fonctionnement du système globale. Pour se faire, le modèle analytique de la machine, à été implanté sous Matlab/Simulink et utilisé pour étudier le fonctionnement en régime génératrice.

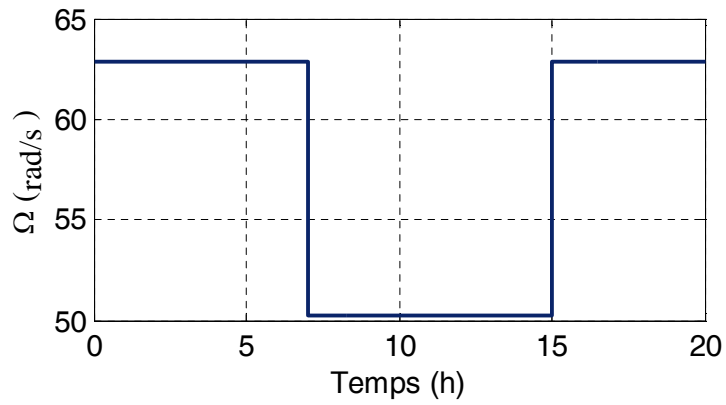
Le tableau suivant présente les paramètres de la génératrice synchrone à aimant permanent étudié :

Paramètres	Valeurs
Resistance	0.49 $\Omega$
Inductance	1.6 mH
Flux	0.148 Wb
Nombre de paire de pole	5

**Tableau III.2 :** Paramètres de la machine (MSAP) [33]

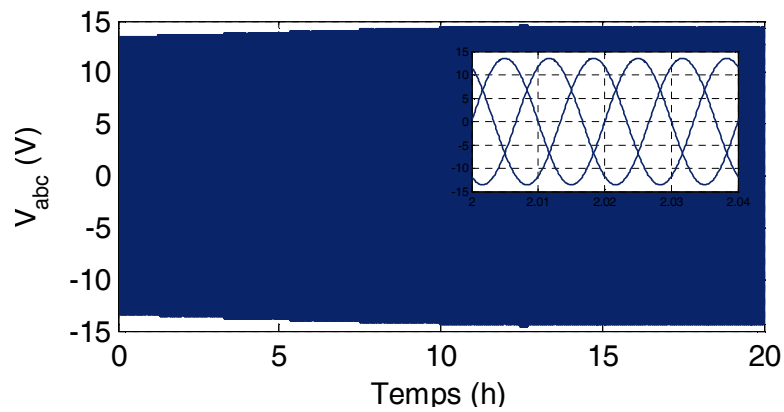


La figure (III.12) montre l'allure du profil variable entre 6.5 et 8 m/s de la vitesse du vent variable avec lequel nous avons alimenté la turbine.

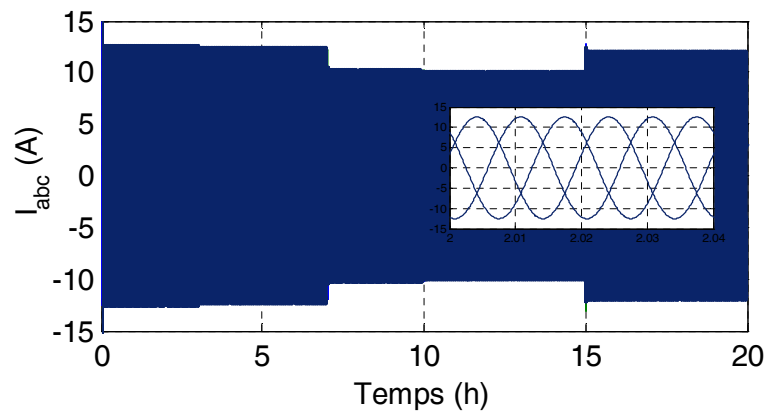


**Figure III.13:** Vitesse d'entraînement de la génératrice

La figure (III.13) montre l'allure du profil de la vitesse mécanique avec lequel nous avons entraîné la génératrice synchrone à aimants permanents.

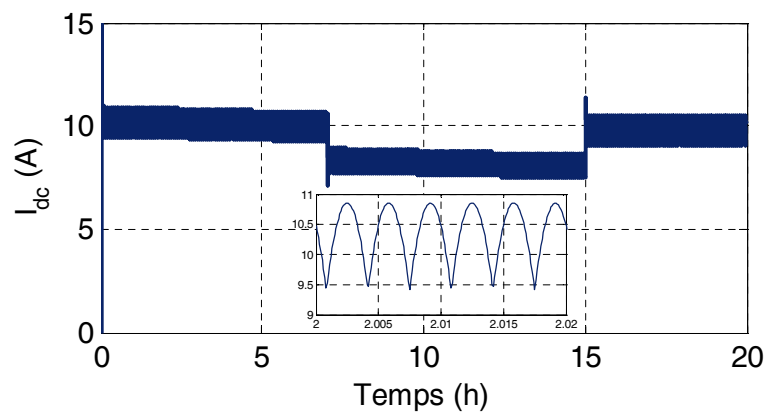


**Figure III.14:** Tensions statoriques  $V_{abc}$



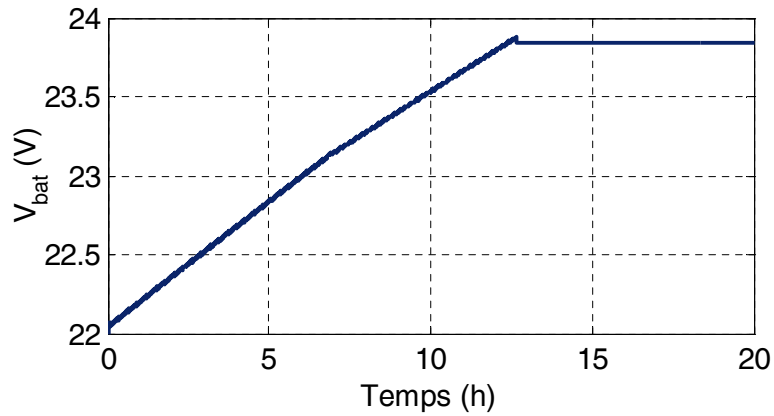
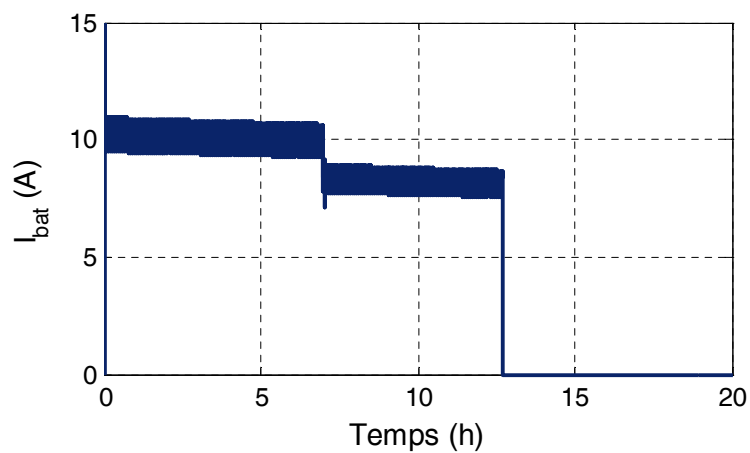
**Figure III.15:** Courants statoriques Iabc

Les figures (III.14), (III.15) montrent respectivement les allures des tensions et courants statoriques qui sont de forme sinusoïdale. On remarque une variation brusque du courant statorique suite à la variation de la vitesse d'entraînement par contre l'amplitude des tensions suit dans son évolution la valeur de la tension des batteries.

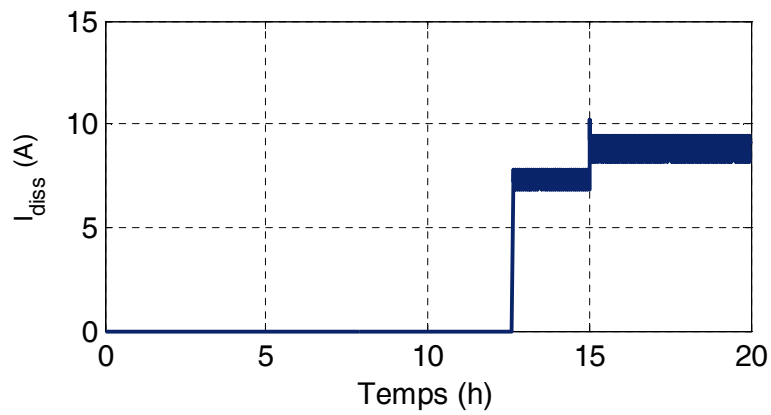


**Figure II.16:** Courant redressé

La figure (III.16) montre l'allure du courant redressé qui suit dans son évolution l'amplitude des courant statorique.

**Figure III.17:** Tension de la batterie**Figure III.18:** Courant de la batterie

Les figures (III.17), (III.18) montrent respectivement les allures de la tension et du courant des batteries. Nous constatons que le courant des batteries prend la valeur du courant redressé lors de la phase de charge des batteries, une fois ces dernières sont complètement chargées ce courant devient nul. La tension des batteries augmente lors de la phase de la charge et constante une fois elles sont totalement chargées.



**Figure III.19:** Courant de dissipation

La figure (III.19) montre l'allure du courant de dissipation qui est nul lors de la phase de la charge des batteries, une fois ces dernières sont complètement chargées ce courant prend la valeur du courant redressé.

### III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, les paramètres de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne sont présentés. Nous avons étudié la méthode de maximisation de cette chaîne (la classique).

Nous avons présenté aussi une gestion de puissance pour un système éolien autonome avec stockage pour une variation de la vitesse du vent.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale :**

L'objectif de ce travail est l'étude, la modélisation et la simulation d'une chaîne éolienne de production d'énergie électrique. Une optimisation de cette source d'énergie renouvelable est présentée en utilisant l'algorithme de commande MPPT pour une utilisation maximale de l'énergie afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs dans les sites isolés.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. 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. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes utilisés et leur classification.

On peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certain cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Elle est composée d'une turbine éolienne à axe horizontal, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone à aimants permanents, des batteries de stockage

Le travail présenté dans le dernier chapitre, avait pour but l'étude de quelques méthodes de maximisation d'une chaîne de conversion éolienne, en traquant le maximum de puissance qu'on peut extraire de la turbine. Cette éolienne est basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur une charge à travers une interface d'électronique de puissance.

La simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne selon une structure choisie a été réalisée.

Nous avons vu aussi une méthodologie de développement de la loi de gestion de puissance pour un système éolien avec stockage pour une variation de la vitesse du vent.

Comme perspective, il serait intéressant d'intégrer les différentes technique MPPT et de faire la comparaison entre elles.

# Référence bibliographique

**Référence bibliographique**

[1] NGUYEN, Tat-Bao-Thien, LIAO, Teh-Lu, et YAN, Jun-Juh. Adaptive sliding mode control of chaos in permanent magnet synchronous motor via fuzzy neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014.

[2] MESSADI, M., MELLIT, A., KEMIH, K., et al. CGPC Control of Chaos in a Permanent Magnet Synchronous Motor Using the Gradient Conjugate and the Genetic Algorithm. 2014.

[3] LUO, Shaohua. Adaptive fuzzy dynamic surface control for the chaotic permanent magnet synchronous motor using Nussbaum gain. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2014, vol. 24, no 3, p. 033135. (tese)

[4] Solar Power Towers. <http://www.wipp.ws/science/energy/powertower.htm> (memoir 24)

[5] ZHENG, Henghuo, CHEN, Qiang, et TANG, Xiaoqing. Composite chattering-free sliding mode control of chaotic permanent magnet synchronous motors. In : *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on*. IEEE, 2015. p. 1588-1592.

[6] Systèmes solaires n°140. 2000. EurObserv'ER.

[7] HEMATI, Neyram. Strange attractors in brushless DC motors. *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, IEEE Transactions on, 1994, vol. 41, no 1, p. 40- 45.

[8] J. Martin, "Energies éoliennes", *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique*, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

[09] **HARITZA CAMBLONG** «*Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable* » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[10] **ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE** «*perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006* » septembre 2006.

[11] **TOUAL BELKACEM** «*Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice*

[12] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne  
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>

[13] K. Ferkous « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magistère de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.

[14] O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan, France, 2002

[15] E.Hau-wind turbine, Springer, 2000

[16] F. Poitiers « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, 2003.

[17] S. Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.

[18] A. Mirecki « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2005.

[19] K. Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia (Algérie), et l'Université Lille 1 (France), 2010.

[20] A. Schmidhofer, H. Weiss « Optimisation of Power Electronics for small stand alone wind power stations », 10th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

[21] S. El Aimani, B. Francois, B. Robyns « Modélisation de générateurs éoliens à vitesse variable connectés à un bus continu commun », FIER'2002, Tétouan-Maroc.

[22] H.G. Arantzamendi « Etude des structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micros réseaux », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.

[23] Z. Roumila « Commande d'un système d'énergie hybride (Photovoltaïque - éolien-diesel) », Mémoire de Magister de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.

[24] Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.

[25] S. Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents

Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.

[26] L. Zhang, C. Watthanasarn et W. Shepherd « Application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator », Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'97), 23rd International Conference on volume 2, 9-14 Nov, 1997, pp. 906-911.

[27] B. Robyns, M. Nasser « Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage », Electrotechnique du Futur EF'2001, Nancy, France, 14-15 Nov 2001, pp. 77-82.

[28] K. Idjdarene, D. Rekioua, D. Aouzellag « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome », 3rd Conference on Electrical Engineering, Batna, Algeria, 04-06 October 2004, pp. 294-297.

[29] S. El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences Technologies de Lille, France, 2004.

[30] T. Rekioua « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy (France), 1991.

[31] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009

[32] Mezzai.S et Tadjine.K « étude d'un système hybride (éolien-photovoltaïque), mémoire de fin d'étude de l'université de Bejaïa ,Algérie ,2015

[33] S. Aissou, D. Rekioua, N. Mezzai, T. Rekioua, S. Bacha « Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage ».Energy Conversion and Management 89 (2015),pp. 615–625.

[34] R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski « Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine », Mathematics and Computers in Simulation 91 (2013) 29–40.

[35] D. Rekioua, E. Matagne « Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control », Edition Springer, 2012.