

*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique*

# **MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique*

*Option : Energies Renouvelables*

## **THÈME**

**ETUDE D'UNE EOLIENNE EN  
FONCTIONNEMENT AUTONOME**

*Présenté par :*

*Adjeroud Mohamed amine*

*Boudjellaba Faouzi*

*Membres de jury :*

*Mr H.BEKKA*

*Mr A.AZIB*

*Promotrice : M<sup>me</sup> D. BEKIOUA*

*Co-promoteur : Mr N. MEZZAI*

**PROMOTION : 2015**



# REMERCIEMENTS

*Ce mémoire n'aurait été possible sans l'aide de dieu que nous Remercions de nous avoir donnée le courage, la volonté nécessaire et la Patience durant toutes ces années d'études et que grâce a lui ce travail a pu être réalisé*

*Nous tenons à remercier très vivement Madame D. Kekioua, Professeur à l'université de Bejaia, de nous avoir proposé le sujet, et de son aide précieux qu'elle a toujours bien voulu nous apporter*

*Comme nous exprimons nos remerciements à monsieur N. Mezzai Pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail, pour sa disponibilité ainsi de nous avoir fait bénéficier de ses compétences*

*Nous adressons notre vif remerciement aux membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# DÉDICACES

*Nous dédions ce modeste travail à :*

- *Nos parents.*
- *Nos frères et sœurs.*
- *Nos proches*
- *Tout Nos amis (e).*

# SOMMAIRE

## Nomenclature

<b>Introduction générale</b>	01
------------------------------	----

## Chapitre I : Etat d'art sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction	03
I.2 Historique	03
I.3 Constitution d'une éolienne	05
I.4 Les différents types d'éoliennes	06
I.4.1 Les éoliennes à axe vertical	06
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontale	07
I.4.2.1 Eoliennes à vitesse constante (Fix)	08
I.4.2.2 Eoliennes à vitesse variable	09
I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne	10
I.6 Puissance récupérable par une éolienne	11
I.7 Régulation mécanique de la puissance	12
I.8 Utilisation de l'énergie éolienne en site isolé	13
I.9 Machines électriques dans les aérogénérateurs	13
I.9.1 Machine synchrone	13
I.9.1.1 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	13
A. Structure avec redresseur à diodes	14
B. Structure avec redresseur à MLI	14
I.9.2 Machines asynchrones	15
I.9.2.1 Machines asynchrones a cage d'écureuil	15
I.9.2.2 Machines asynchrones a double alimentation (MADA)	16
I.10 Maximisation de puissance	16
I.10.1 La Méthode de perturbation et observation (P&O)	16
I.10.2 La Méthode de gradient	17

I.10.3 La Méthode de vitesse en bout de pales (Tip speed ratio)	19
I.10.4 La Méthode d'asservissement du signal de puissance (PSF)	20
I.10.3 La méthode de couple optimal (OTC)	21

## **Chapitre II : Modélisation des différents constituants de la chaîne éolienne**

Introduction	22
II.1 Modèle du vent	22
II.2 Modèle de la turbine	22
II.3 Modélisation de la l'arbre de la machine	24
II.4 Modèle de la machine synchrone a aimant permanent	24
II.5 Modélisation de redresseur à diodes	28
II.6 Modèle de la batterie	29
Conclusion	29

## **Chapitre III : Optimisation de la puissance de la turbine éolienne**

Introduction	30
III.1 Maximisation avec connaissance de la courbe caractéristique de la turbine	30
III.1.1 Résultats de simulation	32
III.1.2 Interprétation	34
III.3 Commande du générateur éolien	34
III.4 principe de la commande vectorielle	35
III.5 Résultats de simulation et interprétations	36
III.5.1 Méthode classique	36
III.5.2 Interprétations	41
III.6 Description du système de gestion de puissance	42
III.6.1 Résultats de simulation	43
III.6.2 Interprétations	46

## **Chapitre IV : Acquisition des données en temps réel**

Introduction	47
IV.1 Description de la carte d'acquisition	47
IV.2 Caractéristique de la carte	47
IV.3 Software de la carte	48
IV.4 Le concept d'instrument virtuel	48

IV.5 Les différentes étapes de création d'un projet sous LabView	49
IV.6 Acquisition des données et communication avec des instruments	54
IV.7 Acquisition d'un signal	54
IV.8 Système d'analyse et d'enregistrement d'un signal	55
IV.9 Bloc du système d'acquisition	56
IV.10 Unité d'acquisition des données	56
IV.10.1 Programme Labview	56
IV.11 Résultats expérimentaux sous Labview	57
IV.12 .1 Interprétations	59
Conclusion	60

**Chapitre I :**

<b>Figure I.1</b> Constitution d'une éolienne à axe horizontale	6
<b>Figure I.2</b> Eolienne à axe vertical de type Savonius	7
<b>Figure I.3</b> Eolienne à axe vertical de type Darrieus	7
<b>Figure I.4</b> les différentes éoliennes à axe horizontales	8
<b>Figure I.5</b> Les éoliennes Offshore	8
<b>Figure I.6</b> Les éolienne On shore	8
<b>Figure I.7</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent	10
<b>Figure I.8</b> Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée	12
<b>Figure I.9</b> Machine synchrone avec redresseur à diodes	14
<b>Figure I.10</b> Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	15
<b>Figure I.11</b> Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs	15
<b>Figure I.12</b> Organigramme de la technique de commande perturbation et observation	17
<b>Figure I.13</b> MPPT par la méthode gradient	18
<b>Figure I.14</b> Organigramme de MPPT avec la méthode de gradient	18
<b>Figure I.15</b> Commande de rapport de vitesse en bout des pales	20
<b>Figure I.16</b> Asservissement du signal de puissance	20

**Chapitre II :**

<b>Figure II.1</b> Entrées-Sorties du modèle de la turbine	22
<b>Figure II.2</b> Caractéristique de la turbine	23
<b>Figure II.3</b> Schéma bloc de la turbine	24
<b>Figure II.4</b> Représentation symbolique de la MSAP	25
<b>Figure II.5</b> Schéma bloc de la machine synchrone à aimant permanent	27
<b>Figure II.6</b> Schéma bloc du redresseur	28
<b>Figure II.7</b> Schéma équivalent de la batterie	29



**Chapitre III :**

<b>Figure III.1</b>	Couple de référence de la vitesse de rotation	31
<b>Figure III.2</b>	Couple vers le point optimal-Contrôle en couple	32
<b>Figure III.3</b>	L'échelon du vent appliqué	32
<b>Figure III.4</b>	Le coefficient de puissance $C_p$	33
<b>Figure III.5</b>	La vitesse spécifique ( $\lambda$ )	33
<b>Figure III.6</b>	La vitesse de la turbine	33
<b>Figure III.7</b>	La puissance de la turbine	34
<b>Figure III.8</b>	Schéma global avec la commande par hystérésis	35
<b>Figure III.9</b>	Principe de la commande par hystérésis	36
<b>Figure III.10</b>	Schéma global avec la méthode MPPT classique	36
<b>Figure III.11</b>	Le profil du vent appliqué	37
<b>Figure III.12</b>	Le coefficient de puissance $C_p$	37
<b>Figure III.13</b>	La vitesse spécifique $\lambda$	37
<b>Figure III.14</b>	La vitesse de la turbine	38
<b>Figure III.15</b>	Le couple de la turbine	38
<b>Figure III.16</b>	La puissance de la turbine	38
<b>Figure III.17</b>	Le courant statorique $I_{ds}$	39
<b>Figure III.18</b>	Le courant statorique $I_{qs}$	39
<b>Figure III.19</b>	Les courants de phases de la machines	39
<b>Figure III.20</b>	Le courant du bus continu	40
<b>Figure III.21</b>	Le courant de charge	40
<b>Figure III.22</b>	Le courant de la batterie	40
<b>Figure III.23</b>	La puissance du bus continu	41
<b>Figure III.24</b>	Structure du système de gestion de puissance	42
<b>Figure III.25</b>	L'échelon du vent appliqué	43
<b>Figure III.26</b>	La vitesse de la turbine	43
<b>Figure III.27</b>	La puissance de l'éolienne	44
<b>Figure III.28</b>	Le courant redressé	44
<b>Figure III.29</b>	la puissance éolienne et la puissance de charge	44
<b>Figure III.30</b>	le courant de la batterie	45
<b>Figure III.31</b>	la tension de la batterie	45
<b>Figure III.32</b>	Le soc de la batterie	45

---

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> Carte d'acquisition	48
<b>Figure IV.2</b> Ecran d'accueil de LabVIEW	49
<b>Figure IV.3</b> Diagramme et interface de Labview	50
<b>Figure IV.4</b> Palettes de commande	51
<b>Figure IV.5</b> La palette d'outils pour le choix de la fonctionnalité de la souris	52
<b>Figure IV.6</b> Etapes de la construction du diagramme	53
<b>Figure IV.7</b> Aide contextuelle	54
<b>Figure IV.8</b> Configuration d'une tâche avec l'Assistant DAQ	55
<b>Figure IV.9</b> Instrument de traitement	55
<b>Figure IV.10</b> Filtre de traitement	55
<b>Figure IV.11</b> Schéma bloc du système d'acquisition	56
<b>Figure IV.12</b> Schéma global de connexion du système étudié	57
<b>Figure IV.13</b> Le courant de l'éolienne	57
<b>Figure IV.14</b> la tension de l'éolienne	57
<b>Figure IV.15</b> Le courant de l'éolienne	58
<b>Figure IV.16</b> la tension de l'éolienne	58
<b>Figure IV.17</b> Le courant de l'éolienne	58
<b>Figure IV.18</b> la tension de l'éolienne	58
<b>Figure IV.19</b> La tension de la batterie	58
<b>Figure IV.20</b> Le courant de l'onduleur	59
<b>Figure IV.21</b> La tension de l'onduleur	59
<b>Figure IV.22</b> Fichier d'enregistrement sous Excel	60

- MPPT : Recherche point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).
- MLI : Modulation de la largeur d'impulsion.
- MS : Machine synchrone.
- MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.
- MADA : Machine asynchrone a double alimentation.
- SCEE : système de conversion de l'énergie éolienne
- FMM : La force magnétomotrice.
- MATLAB : The language of technical computing
- P&O : La méthode de MPPT Perturbation et Observation
- PO : Le point optimum
- PSF : La méthode d'asservissement du signal de puissance (Power Signal Feedback)
- TSR : Tip speed ratio
- OTC : Optimal torque control
- $C_p$  : Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine
- $C_{p_{max}}$  : Coefficient de puissance maximal
- G : Gain de multiplicateur de vitesse.
- $T_t$  : le couple statique fournie par l'éolienne [N.m]
- $T_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine [N.m]
- $T_{t_{ref}}$  : Couple référence de la turbine
- $T_{em_{opt}}$  : Le couple optimale
- $\rho$  : est la masse volumique de l'air.
- S : la surface balayée par la turbine.
- R : Rayon de l'éolienne [m]
- $\Omega_t$  Vitesse de la turbine éolienne.
- $V_v$  : la vitesse du vent.
- $\lambda$  : est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.
- $\lambda_{opt}$  : Rapport de vitesse optimale
- $\Omega$  : est la vitesse angulaire de rotation de la turbine.
- P : la puissance [W]

- $P_v$  : La puissance fournie par le vent [W]
- $P_t$  : La puissance de la turbine [W]
- $P_{max}$  : La puissance maximale [W]
- $P_{opt}$  La puissance optimale [W]
- $\omega$  : la vitesse angulaire [rad/sec].
- $P$  : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.
- $R_s$  : Résistance d'une phase d'enroulement statorique
- $C$  : le couple moteur [N.m].
- $D$  : le diamètre [mètre]
- $V_t$  : La tension thermique.
- $T_c$  : La température absolue.
- $I_{mpp}$  : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum ( $I_{opt}$ ).
- $V_{mpp}$  : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale ( $V_{opt}$ ).
- $E_{batt}$ : La force électromotrice de la batterie
- $R_{batt}$ : la résistance de la batterie
- $I_{batt}$  : Le courant de la batterie
  
- $J_m$  : inertie de la machine
- $f_m$  : coefficient de frottement de la machine
- $J_t$  : inertie de la turbine ;
- $f_t$  : frottement des pâles ;
- $C_{eol}$  : le couple statique fournie par l'éolienne.
- $V_a, V_b, V_c$  : Tensions de phases statorique [V]
- $V_{sab}, V_{sbc}, V_{sca}$  : Les tensions d'entrées de redresseur [V]
- $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  : Les courants d'entrés de redresseur
- $I_a, I_b, I_c$  : Courants de phases statoriques.
- $R$  : Résistances de chaque phase.
- $L$  : Inductance propre de chaque phase.
- $\Phi_{abc}$  : Flux statoriques.
- $M$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
- $\Phi_f(abc)$  : Flux magnétiques produits par les aimants permanents rotoriques à travers les enroulements du stator.

- $\Phi_f$  : Amplitude du flux des aimants permanents.
- $\Theta$  : Angle électrique du rotor par rapport au stator de la génératrice.
- $V_{dc}$  : est la tension redressée.
- $V_d$  : La tension statorique sur l'axe d.
- $V_q$  : La tension statorique sur l'axe q.
- $I_{dc}$  : Le courant modulé par le redresseur.
- $i_d$  : Le courant statorique sur l'axe d
- $i_q$  : Le courant statorique sur l'axe q
- $L_d$  : L'inductance statorique sur l'axe d
- $L_q$  : L'inductance statorique sur l'axe q
- $K_t$  : Le coefficient du couple.
- $S_a, S_b, S_c$  sont les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égal à 1 si l'interrupteur est fermé et zéro s'il est ouvert).
- LabVIEW : (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)
- PCI : Peripheral Component Interconnect
- VI : Virtual instrument
- Daq : Data Acquisition

# INTRODUCTION GENERAL

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer. Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [3].

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique, ... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon). Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible, sauf la volonté et le manque de prise de conscience de la majorité des autorités africaines. Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [1].

Ce mémoire propose une étude d'une éolienne en isolé ou autonome, les grand axes de ce travail sont structuré en quatre principaux chapitre.

Le premier chapitre de notre mémoire nous présentons un état d'art sur l'énergie éolienne, après l'introduction de quelques notions théoriques sur l'énergie éolienne, nous décrivons diverses architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et dans les systèmes éoliens isolés et autonomes.

Le second chapitre consiste à faire la Modélisation des différents constituants de la chaine de conversion éolienne afin de simuler le comportement du système global.

Le troisième chapitre sera consacré pour la commande et la gestion de puissance de la chaine de conversion éolienne, cette commande a pour but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent par la turbine.

Le quatrième chapitre est consacré pour l'acquisition des données en temps réel des paramètres électrique de la chaine de conversion éolienne afin d'évaluer les performances de notre système, On finalise ce travail avec une conclusion général qui est dédiée à une synthèse du travail présenté et aux perspectives futur dans le domaine des énergies renouvelables.



# *CHAPITRE I*

Etat d'art sur l'énergie éolienne

## I.1 Introduction

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor. L'aspect le plus visible de cette évolution est sans conteste, celui de l'utilisation des grandes centrales de production de masse, reliées au réseau, et dont la puissance unitaire ne cesse de croître.

Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ou autonomes.

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, différentes machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique en tant que génératrice. Toutefois, pour des raisons de fiabilité, robustesse et prix de revient, la machine asynchrone à cage d'écureuil demeure largement répandue [2].

## I.2 Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moudre des grains depuis le 7<sup>ème</sup> siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moudre des grains mais aussi pour le pompage d'eau. L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées [31]. Par ailleurs, la construction d'éoliennes multipales

ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin américain. Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis [32]. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années, la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européen 3873 MW. La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW [31]. Avec certains projets d'énergie éolienne développés (au large des côtes), de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix aussi concurrentiel que celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon).

### I.3 Constitution d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée des composants suivant :

- **le mât** : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons... Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

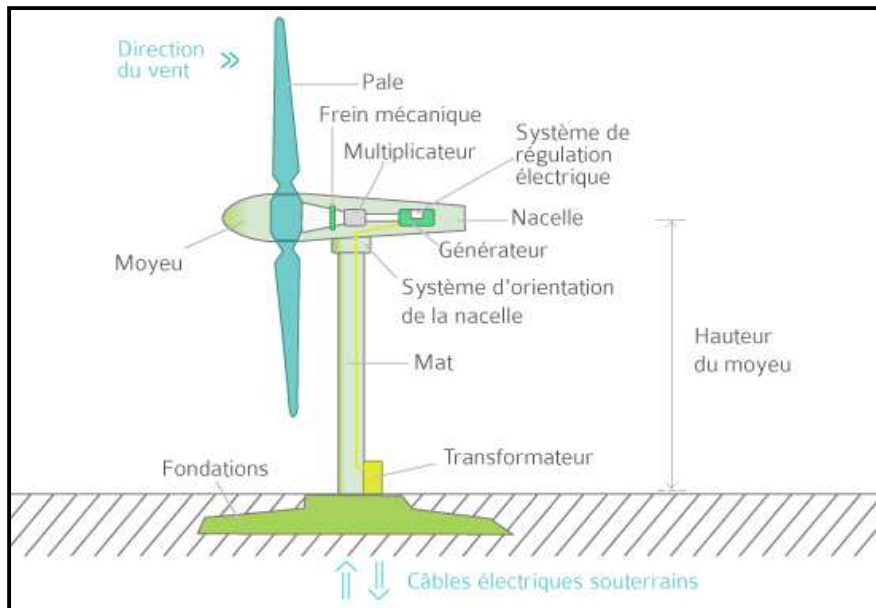
La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle

Et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor [5].

- **Le rotor** : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [5].

- **La nacelle** : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine.

Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne [5].



**Figure I.1 :** Constitution d'une éolienne à axe horizontale

## I.4 Les différents types d'éoliennes

### I.4.1 Les éoliennes 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 accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de **Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [7].



**Figure I.2 :** Eolienne à axe vertical de type Savonius

- Le rotor de **Darrieus**, du nom de l'ingénieur français Georges Darrieus qui breveta sa conception en 1931, est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales, Figure I.3, qui fonctionne selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande. Lorsqu'elle démarre sa vitesse de rotation peut être importante puisque la vitesse du vent apparent s'ajoute à la vitesse de bout de pale pour des configurations déterminées [8].



**Figure I.3 :** Eolienne à axe vertical de type Darrieus

#### **I.4.2 Les Eoliennes à axe horizontale**

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [9].

Figure I.4

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont

profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [10] Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [11].



Bipale

Tripale

Multipale

**Figure I.4** : les différentes éoliennes à axe horizontales

On distingue aussi :

- Les éoliennes terrestres dites **On shore** installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites **Off shore** installées au large des côtes.

**Figure I.5** : Les éoliennes Offshore **Figure I.6** : Les éolienne On shore

#### I.4.2.1 Eolienne a vitesse constante (FIX)

Sont souvent munies d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du

synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance [11].

**A) Avantages :**

- Système électrique simple
- Grand fiabilité
- Non nécessité de systèmes électrique de commande
- Moins cher

**B) Inconvénients :**

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre Quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur  
Asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice  
Asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter  
La puissance réactive appelée à ce réseau [2].

#### **I.4.2.2 Eoliennes a vitesse variable**

Sont souvent moins coûteuse car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [11].

**A) Avantages :**

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent [12]
- Augmentation du rendement énergétique
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres Parties mécaniques.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient [2].



## I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique par une génératrice [3].

D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique, généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance. Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome [18].

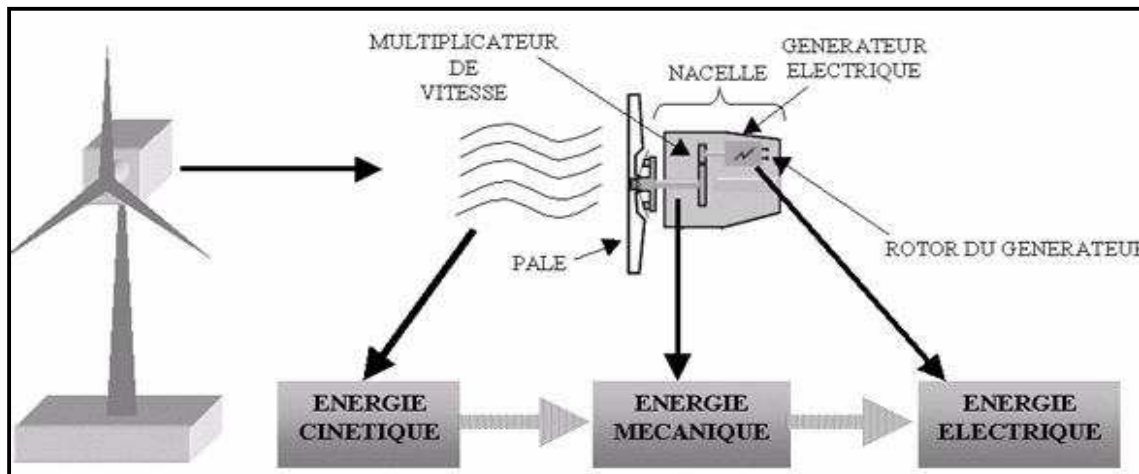


Figure I.7 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais

les éoliennes de la Nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [4].

## I.6 Puissance récupérable par une éolienne

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} * C_p(\lambda) * \rho * S * V_v^3 \quad (\text{I.1})$$

Ou :

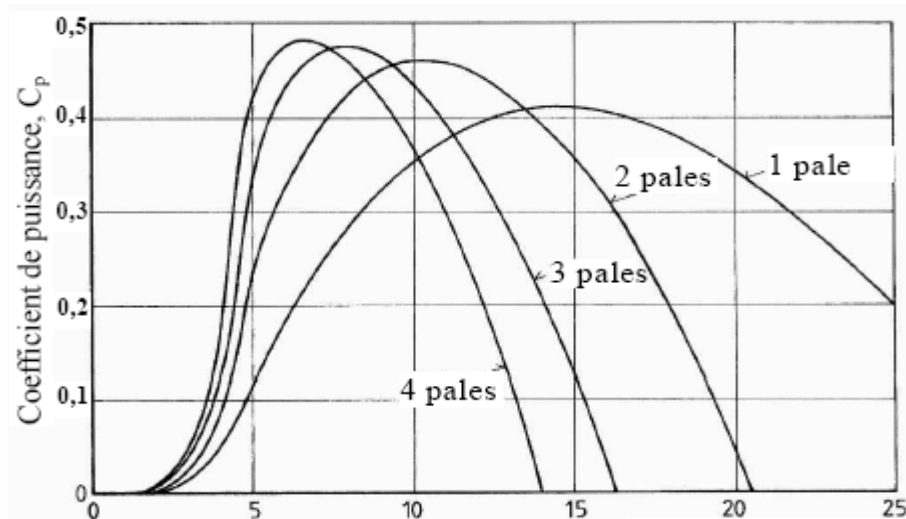
- $C_p$  : est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine  $C_p(\lambda)$  (c'est la caractéristique propre de la turbine).
- $\rho$  : est la masse volumique de l'air.
- $S$  : la surface balayée par la turbine.
- $V_v$  : la vitesse du vent.

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent et admet une valeur maximale théorique, appelée limite de Betz, qui est de  $16/27 \approx 0.5926$

Et on définit aussi  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pales ( $R * \Omega$ ) sur la vitesse instantanée du vent [24] [25].

$$\text{Soit : } \lambda = \frac{R * \Omega}{V_v} \quad (\text{I.2})$$

La figure (I.8) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pales [24]. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse normalisée.  $\lambda_{opt}$ , 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

### I.7 Régulation mécanique de la puissance

Les stratégies de commande aérodynamiques permettent d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de Vent) [19]. Trois systèmes de régulation existent :

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à Faire varier 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. En général, le 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. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.
- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", 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. 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.
- Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de La régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production D'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**Active stall**". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [2].

## **I.8 Utilisation de l'énergie éolienne en autonome**

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir d'une part, de l'énergie électrique à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans des îles, ou dans des zones à relief accidenté qui est inaccessible au réseau électrique, ou encore pour alimenter en électricité des Voiliers, des phares et des balises et d'autre part pour le pompage de l'eau domestique et d'irrigation pour l'agriculture. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel [8].

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de part leur faible coût, leur

Robustesse et leur standardisation. [13], [14] Ces derniers sont souvent associés à Une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

Des générateurs synchrones sont également utilisés [15]. Ils offrent un bon

Couple massique et peuvent éventuellement s'affranchir de multiplicateur de vitesse. Néanmoins, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille [16].

## **I.9 Machines électriques dans les aérogénérateurs**

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les Machines synchrones et asynchrones.

### **I.9.1 Machine synchrone**

#### **I.9.1.1 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)**

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans Les applications éoliennes isolées et autonomes elle est simple et présente un bon rendement. Et nécessite pas une source d'alimentation pour le circuit d'excitation.

Dans plusieurs éoliennes de petite taille, les aimants tournent autour du stator alors situé au Centre de la machine. Il est possible d'immobiliser le rotor en présence de vents modérés de façon à réaliser la maintenance de la turbine.

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. [2] [20]

### A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [21]. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure I.9. 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 [9].

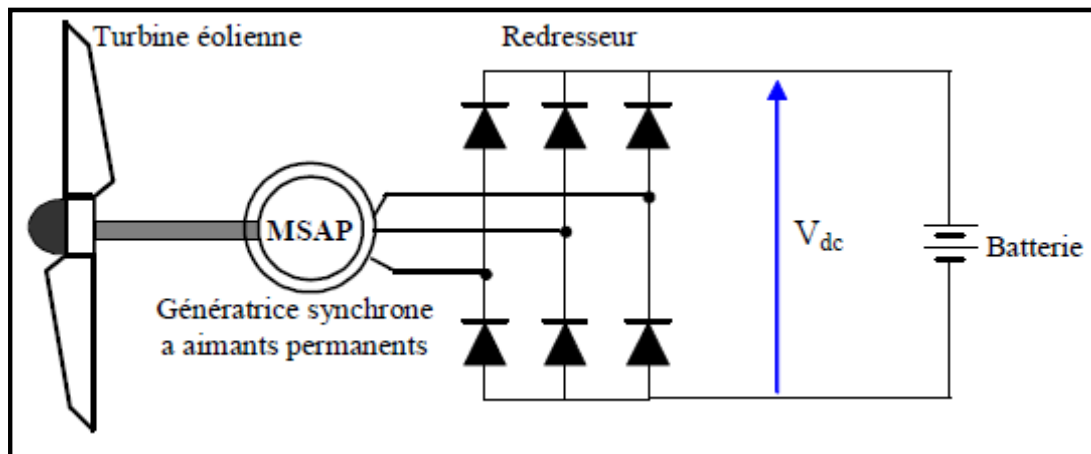
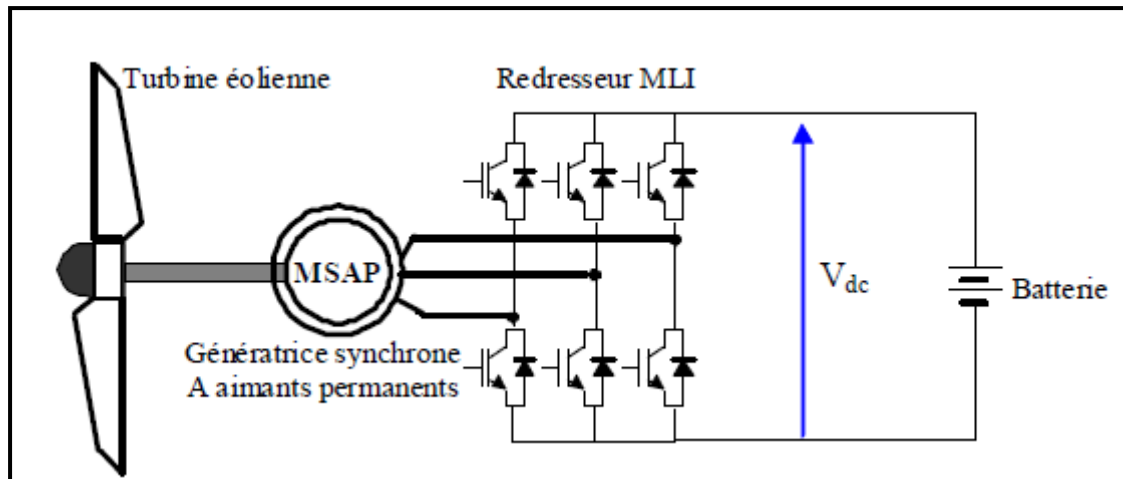


Figure I.9 : Machine synchrone avec redresseur à diodes

### B. Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur Triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure I.10, il est possible d'effectuer un Contrôle dynamique et fiable en vitesse où en couple de la génératrice synchrone ce qui Permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de Rotation [10]. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six Interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de Position [2].



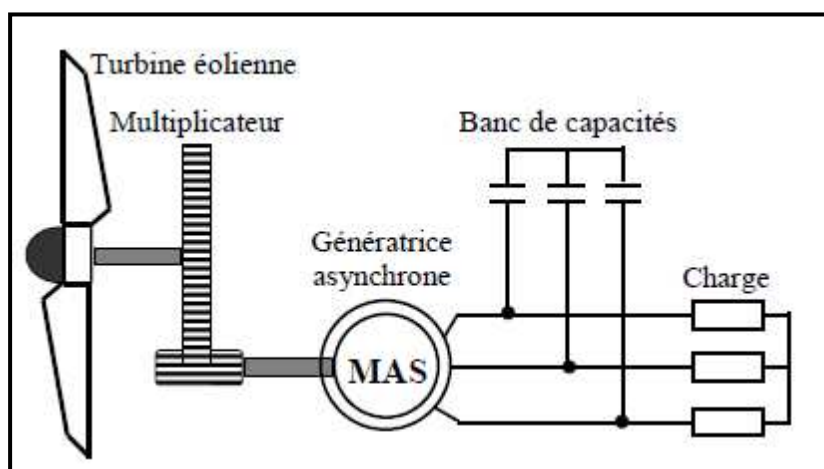
**Figure I.10 :** Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI

## I.9.2 Machines asynchrones

### I.9.2.1 Machines asynchrones a cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée elle a l'avantage d'être standardisé, fabriqué en grande quantité et dans une grande échelle de puissance, elle aussi la moins exigeante en termes d'entretien [22].

Cette dernière fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation donc elle est souvent associée à une batterie de condensateurs de compensation, Figure I.11 [23].



**Figure I.11 :** Machine asynchrone auto – excitée avec une batterie de condensateurs

### **I.9.2.2 Machines asynchrones a double alimentation (MADA)**

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté a tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau a travers un convertisseur de fréquence, si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles sont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes a bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement a vitesse variable un avantage suffisant [22].

## **I.10 Maximisation de puissance**

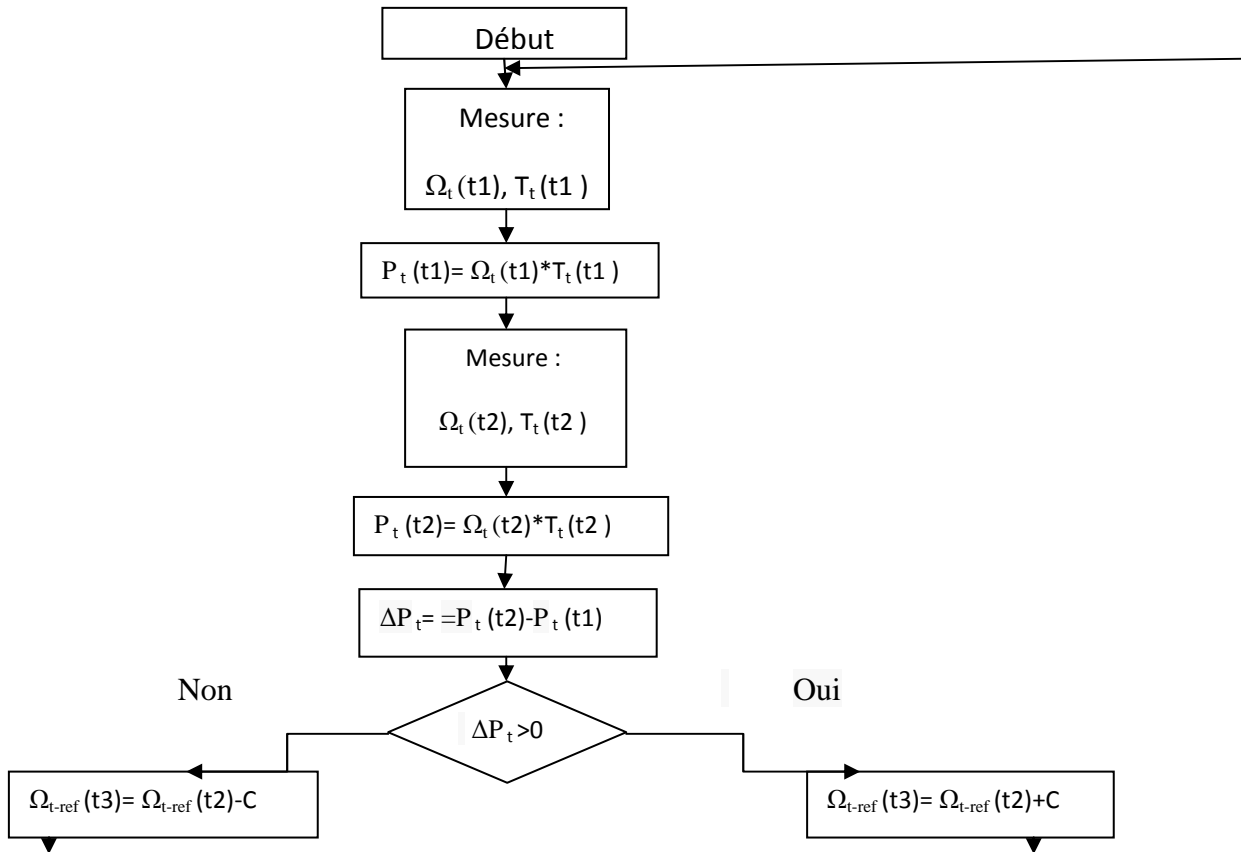
L'énergie éolienne, même si abondante, varie continuellement et comme les changements de vitesse du vent dans la journée, Le montant de la puissance du moteur à partir d'un système de conversion d'énergie éolienne dépend de l'exactitude avec laquelle les points de puissance de pointe sont suivis par la recherche de point de puissance maximale (MPPT) de commande du système de commande quel que soit le type de générateur utilisé.

Dans ce qui suit, on donne un aperçu de quelques contrôleurs MPPT utilisés pour l'extraction de la puissance maximale des systèmes de conversion d'énergies éolienne

### **I.10.1 La Méthode de perturbation et observation (P&O)**

Le principe de la commande MPPT de type 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 initial et d'analyser le comportement de la variation de la P(t) ainsi, on peut 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 a gauche du point optimal (PO), si au contraire la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le point optimal.

En résumé, si suite a une perturbation de vitesse, la vitesse ( $\Omega_t$ ) augmente, la direction de perturbation est maintenu. Dans le cas contraire elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau (PO) [26].



**Figure I.12 :** Organigramme de la technique de commande perturbation et observation

### I.10.2 La Méthode de gradient

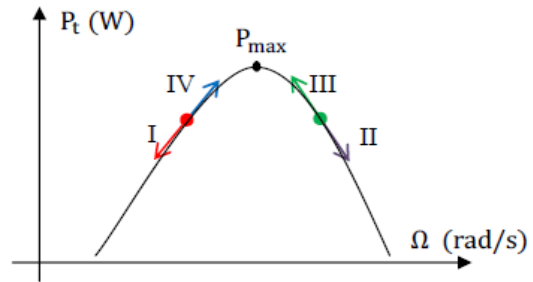
La recherche du point optimal par la méthode de gradient est plus simple sans connaître les paramètres  $\lambda_{opt}$  et  $Cp_{Max}$  pour chaque vitesse du vent, la référence de vitesse est ajustée de manière à ce que la turbine fonctionne autour du point donnant le maximum de puissance pour chaque vitesse de vent. Pour agir sur la vitesse de rotation de la génératrice, on surveille le sens de variation du rapport  $(\frac{dp}{d\Omega})$ . Lorsqu'on atteint le point désiré (maximum de puissance), ce rapport sera nul [33] [34].

Mathématiquement, on peut écrire :  $\frac{dpt}{d\Omega} = \frac{dpt}{dt} \left(\frac{d\Omega}{dt}\right)^{-1}$

On distingue quatre cas possible résumés dans le tableau 1 est illustré par la figure (I.13)

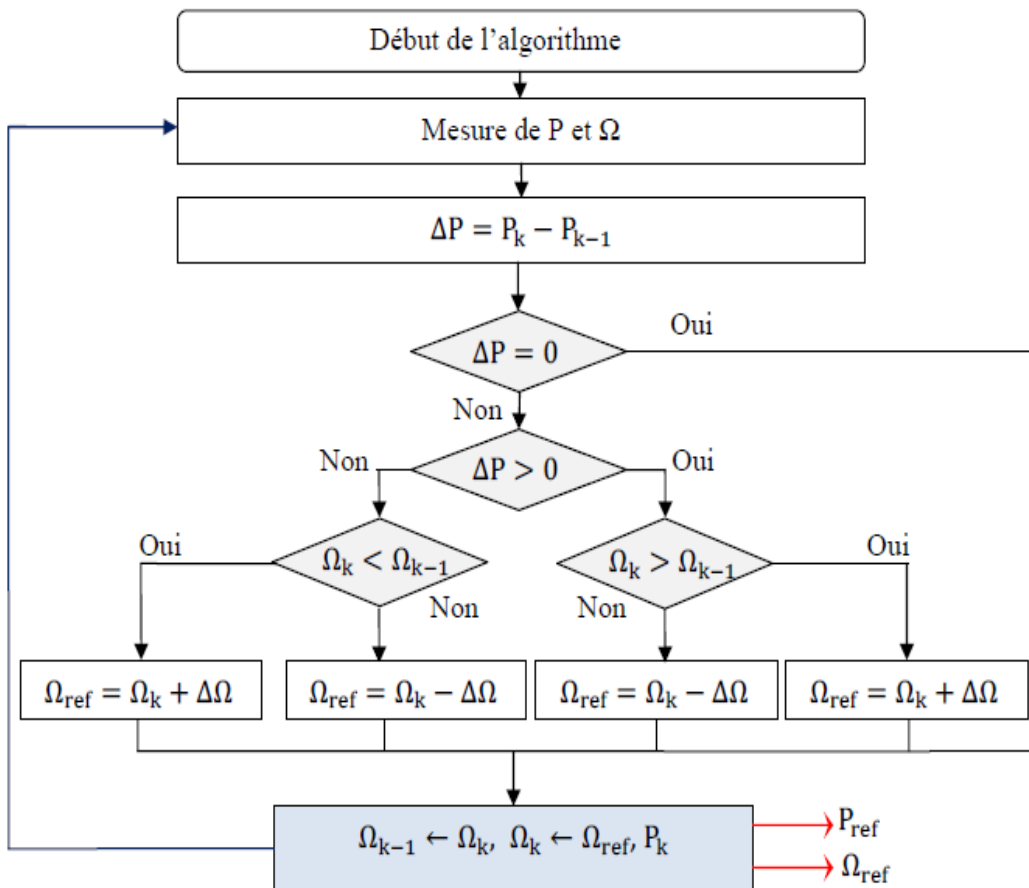


$\frac{d\Omega}{dt} \backslash \frac{dP_t}{dt}$	$< 0$	$> 0$
$< 0$	$\Omega \nearrow$ Cas I	$\Omega \searrow$ Cas II
$> 0$	$\Omega \searrow$ Cas III	$\Omega \nearrow$ Cas IV



**Tableau 1** : les commandes à effectuer      **Figure I.13** : MPPT par la méthode gradient

L'algorithme nécessite la connaissance de la puissance et de la vitesse de rotation à chaque instant. Selon les quatre cas possible décrits dans le tableau 1, à l'itération  $K$  on augmente ou on diminue la référence de vitesse  $\Omega_{k+1}$  d'un pas fixe  $\Delta\Omega$ . L'algorithme d'optimisation est illustré par l'organigramme de la figure I.14



**Figure I.14** : Organigramme de MPPT avec la méthode de gradient

### I.10.3 La Méthode de vitesse en bout de pales (Tip speed ratio)

La puissance produite par une éolienne est donnée par :

$$P_m = \frac{1}{2} * \pi * \rho * C_p(\lambda) * R^2 * V_v^3 \quad (I.3)$$

Le tip speed ratio est donné par :

$$\lambda = \frac{R * \Omega}{V_v} \quad (I.4)$$

Où  $\omega_r$  est la vitesse angulaire de la turbine. La puissance cible optimale d'une éolienne peut être écrite comme [35] :

$$P_{max} = K_{opt} * \omega_{r opt} \quad (I.5)$$

Où

$$K_{opt} = \frac{0.5 * \pi * \rho * C_{p max} * R^5}{\lambda_{opt}^3} \quad (I.6)$$

Et

$$\omega_{r opt} = \frac{\lambda_{opt} * V_v}{R} \quad (I.7)$$

La puissance pour une certaine vitesse de vent est maximum pour une certaine valeur de vitesse du rotor appelé la vitesse optimale du rotor  $\omega_{opt}$ . C'est la vitesse qui correspond à la vitesse de point optimale  $\lambda_{opt}$ . Afin d'avoir la puissance maximale possible, la turbine devrait toujours fonctionner à  $\lambda_{opt}$ . Ceci est possible en commandant la vitesse de rotation de la turbine de manière à avoir toujours la turbine qui tourne à la vitesse optimale de rotation.

La TSR régule la vitesse de rotation du générateur afin de maintenir le TSR à une valeur optimale au cours de laquelle la puissance extraite est maximale. Cette méthode nécessite à la fois la vitesse du vent et la vitesse de la turbine à être mesuré ou estimé, en plus de nécessiter la connaissance de la TSR optimale de la turbine pour que le système puisse extraire le maximum de puissance possible.

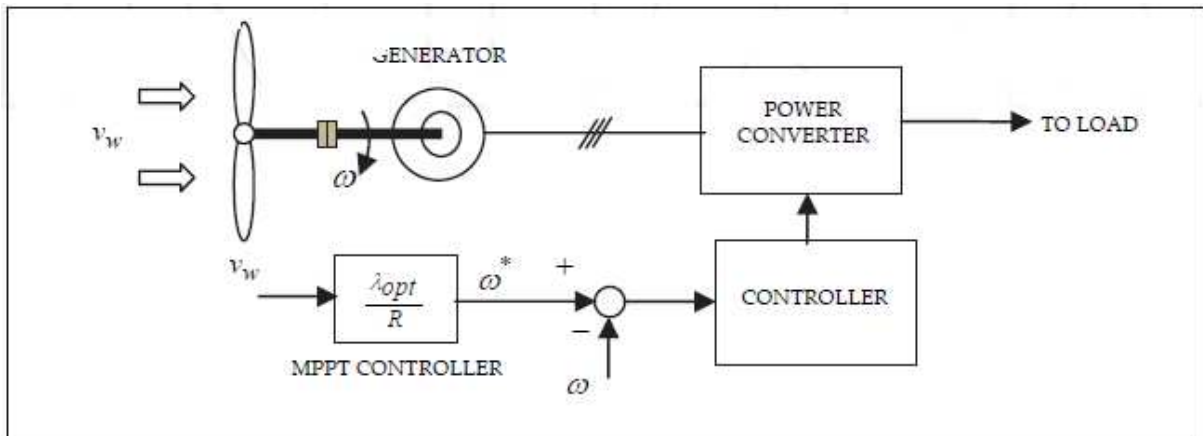


Figure I.15 : Commande de rapport de vitesse en bout des pales

### I.10.4 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 courbe de puissance maximale doivent être obtenu par le biais de simulations ou offline (enregistrée) expérience sur les éoliennes individuelles. En 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. La figure I.16 montre le schéma de principe d'un système éolien avec PSF contrôleur pour l'extraction d'énergie maximale [26].

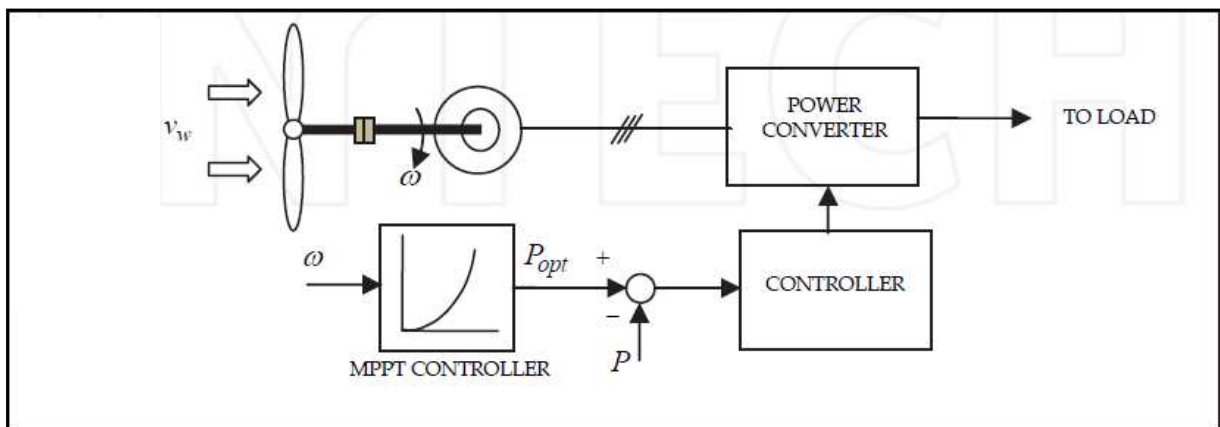


Figure I.16 : Asservissement du signal de puissance

### **I.10.5 La Méthode de couple optimal (OTC)**

Le couple optimal est une variante de premier type, mais qui utilise les valeurs de la caractéristique du couple, mais sa complexité d'implémentation reste équivalente aux méthodes qui utilisent le retour d'information de la puissance, sans performances supplémentaires.

On cite quelques méthodes.

« Look-up table » : sont les plus utilisés, ces méthodes demandent la présence d'un capteur ou observateur de vitesse de rotation de la génératrice, en plus d'un tableau préenregistré qui contient les valeurs de la vitesse de rotation optimal du générateur, correspondante à chaque vitesse de vent, pour que la puissance développée soit maximale [30].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis, un bref aperçu sur les différents types d'éoliennes.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentées avec quelques spécifications liées aux différentes structures d'alimentation, ainsi que les stratégies de commande aérodynamiques.

Finalement ce chapitre est clôturé par la représentation de quelques méthodes de la maximisation de la puissance captée par la turbine éolienne.

# *CHAPITRE II*

*Modélisation des différents composants de la chaîne de conversion éolienne*

## Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la Compréhension du système éolien. Dans ce chapitre nous allons procéder à la modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une partie mécanique et d'une autre électrique, notre choix se porte sur une génératrice synchrone à aimant permanent qui a comme rôle de convertisseur électromécanique débitant sur une charge et une batterie par le biais d'une interface d'électronique de puissance.

La modélisation des différents éléments constituant mis en jeu dans la chaîne, a pour but de simuler le comportement du système global.

### II.1 Modèle du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien, il est essentiel et déterminant pour le calcul de production d'électricité et de rentabilité.

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude des systèmes de conversion d'énergie car la puissance éolienne dans les conditions optimales est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tri dimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance d'un point de vue de la voilure éolienne car elle n'a pas de vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur vitesse évolue dans le plan horizontal.

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps :  $V_v = f(t)$  [09] [22]

### II.2 Modèle de la turbine

La turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

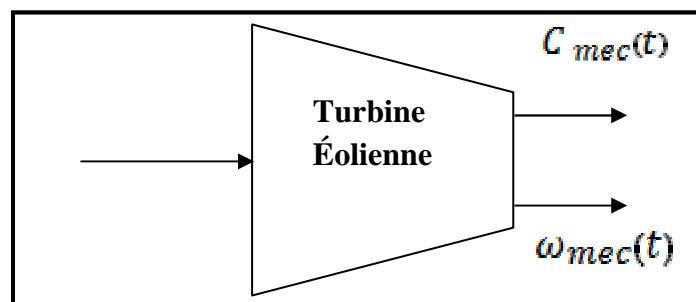


Figure II.1 Entrées-Sorties du modèle de la turbine.

La puissance fournie par le vent est donnée par la relation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho * S * V_v^3 \quad (\text{II.1})$$

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent, la puissance de la turbine s'écrit alors :

$$P_t = \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

Où  $C_p$  est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

Et on définit aussi  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire des extrémités des pales ( $\Omega_t, R$ ) sur la vitesse instantanée du vent. [24] [25]

$$\text{Soit : } \lambda = \frac{R * \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.3})$$

L'expression du couple aérodynamique est donnée par :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p * \rho * S * V_v^3 * \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

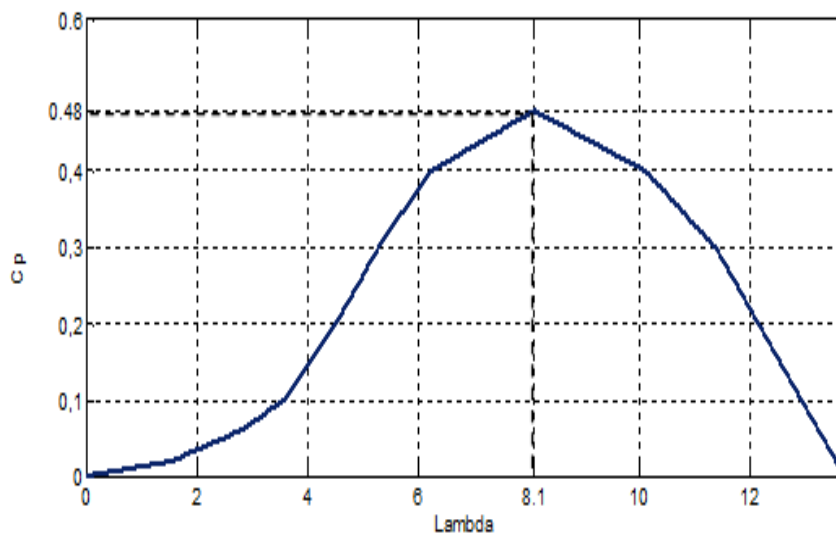
$S = \pi R^2$ , La surface balayée par la turbine éolienne

Où :  $R$  : Diamètre des pales

$\rho$  La masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$ )

$V_v$  La vitesse du vent

$\Omega_t$  Vitesse de la turbine éolienne



**Figure II.2** : Caractéristique de la turbine

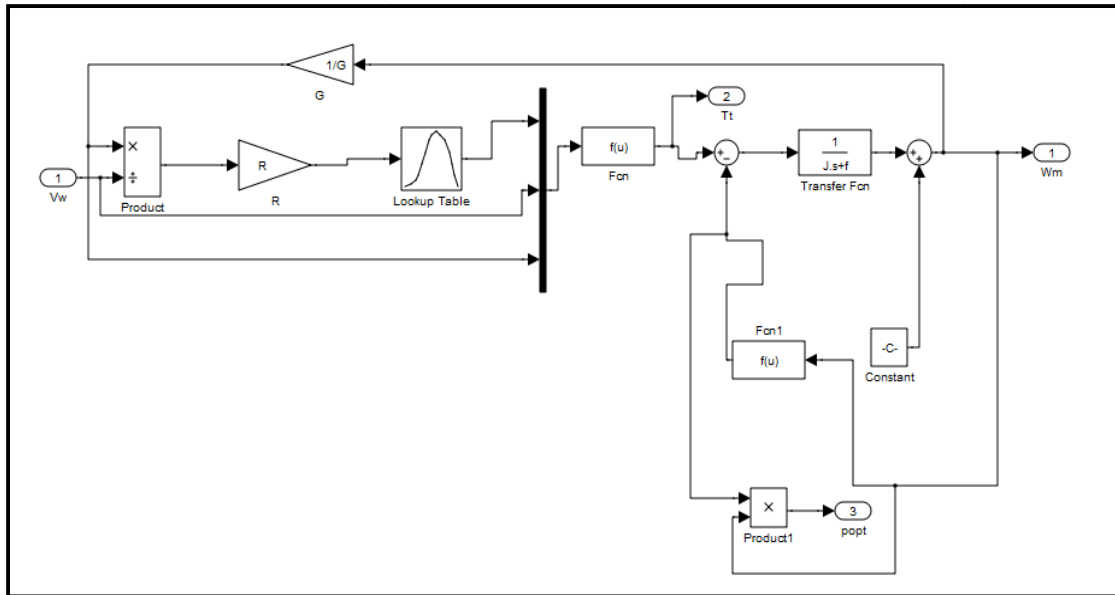


Figure II.3 : Schéma bloc de la turbine

### II.3 Modélisation de la l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [09]]. L'équation différentielle qui caractérise le comportement Mécanique de l'ensemble Turbine - Génératrice est donnée par :

$$(I_t + I_m) \frac{d\Omega}{dt} = T_t - T_{em} - (f_m - f_t) * \Omega \quad (II.5)$$

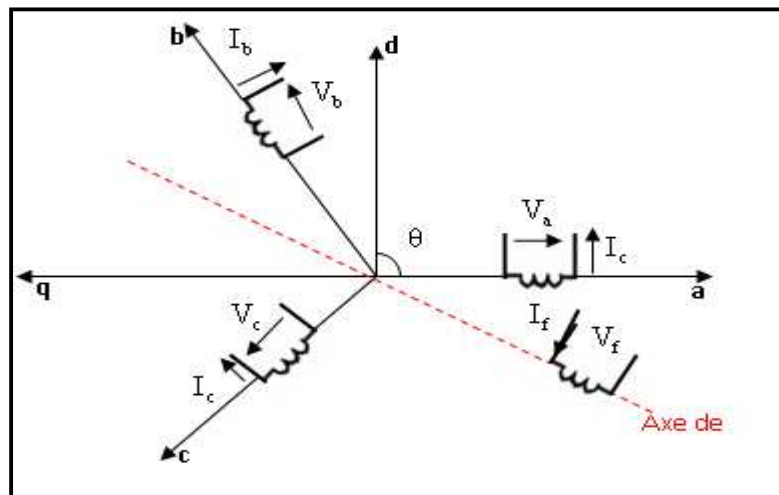
- $I_m$  : inertie de la machine
- $f_m$  : coefficient de frottement de la machine
- $I_t$  : inertie de la turbine
- $f_t$  : frottement des pâles
- $T_t$  : le couple statique fournie par l'éolienne

### II.4 Modèle de la machine synchrone a aimant permanent

La machine synchrone a aimant permanent est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée a une turbine éolienne et surtout pour les applications isolées et autonomes qui est notre cas. Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base des hypothèses simplificatrices [27] [28] :



- La machine fonctionne dans un régime non saturé.
- L'effet d'hystérésis est négligé avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- Les résistances de fuites sont indépendantes de la position du rotor.
- La distribution de la force magnétomotrice créée par les enroulements du stator est sinusoïdale.



**Figure II.4** Représentation symbolique de la MSAP

**Les équations électrique de la MSAP dans le plan (a, b, c)**

$$\begin{cases} V_a = R_s * I_a + \frac{d}{dt} \Phi_a \\ V_b = R_s * I_b + \frac{d}{dt} \Phi_b \\ V_c = R_s * I_c + \frac{d}{dt} \Phi_c \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$[\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c]$  : Vecteur des flux statorique

$[R_s]$  : Résistance d'une phase d'enroulement statorique

Et les expressions des flux mutuels inducteur-phases sont données par [29] :

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \Phi_f * \begin{bmatrix} \cos(P\theta) \\ \cos(P\theta - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(P\theta - \frac{4\Pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$[\Phi_f]$  : Amplitude du flux des aimants permanents

### Les équations de la MSAP dans le plan de Park :

La transformation de Park est donnée par :

$$P\theta = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

En inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a, b, c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$P\theta^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{dq}] = P\theta [i_{abc}] \quad (\text{II.10})$$

$$[V_{dq}] = P\theta [V_{abc}] \quad (\text{II.11})$$

$$[\Phi_{dq}] = P\theta [\Phi_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

Les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont données par les expressions suivantes : (II.13)

$$\begin{cases} V_d = R_s * i_d + L_d * \frac{di_d}{dt} - p \Omega * L_q i_q \\ V_q = R_s * i_q + L_q * \frac{di_q}{dt} + p \Omega * L_d i_d \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

En fin Le couple électromagnétique est donné par :

$$Cem = Kt * iq + p * (L_d - L_q) * id * iq$$

$$Kt = p * \Phi_f$$
(II.15)

Ou :

$p$  : Le nombre de paires de pôles ;

$V_d$  : La tension statorique sur l'axe d ;

$V_q$  : La tension statorique sur l'axe q ;

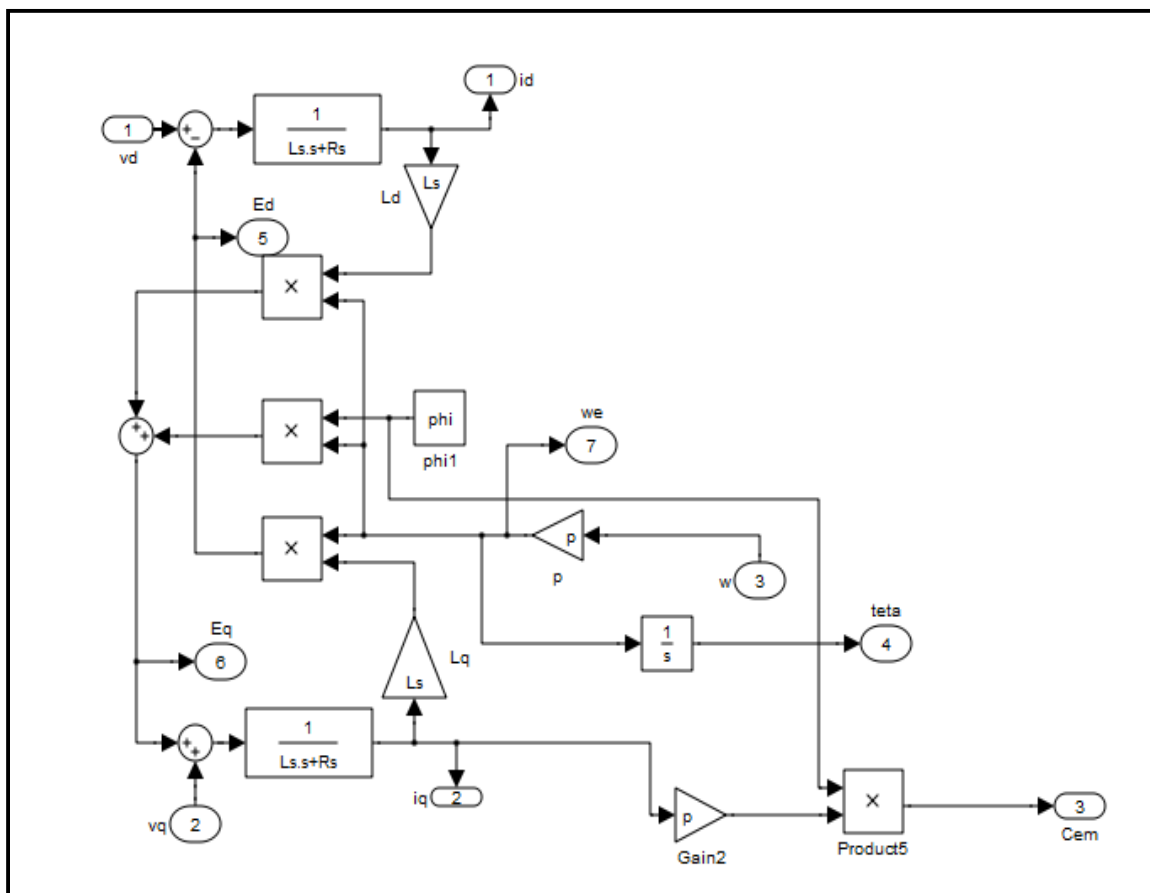
$i_d$  : Le courant statorique sur l'axe d ;

$i_q$  : Le courant statorique sur l'axe q ;

$L_d$  : L'inductance statorique sur l'axe d ;

$L_q$  : L'inductance statorique sur l'axe q ;

$Kt$  : Le coefficient du couple.



**Figure II.5** Schéma bloc de la machine synchrone à aimant permanent

## II.5 Modélisation du redresseur à diodes

Le modèle du redresseur est donné par l'équation suivante :

$$V_{dc} = \max(V_j) - \min(V_j) \quad (\text{II.16})$$

$j=1, 2, 3$

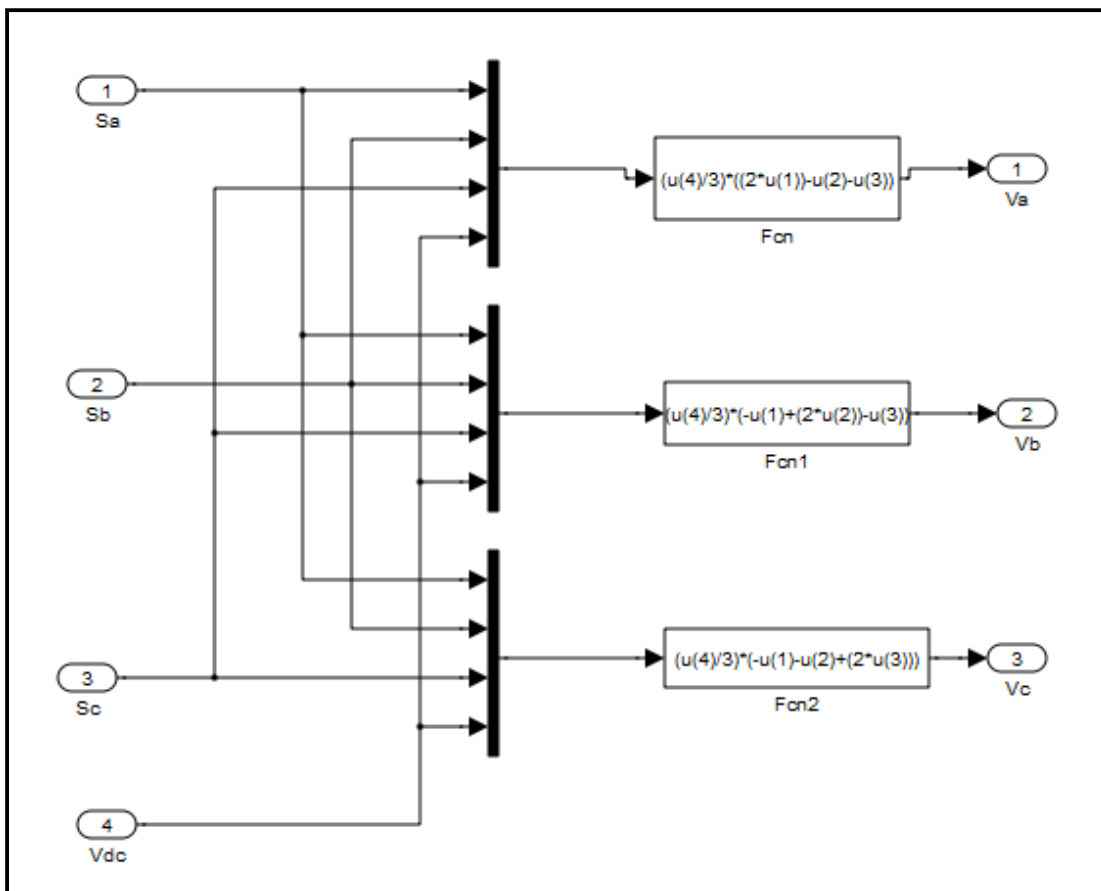


Figure II.6 Schéma bloc du redresseur

## II.6 Modèle de la batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée au 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 exacte dans toutes les circonstances. Pour ne pas tomber dans un excès de complexité un modèle simplifié à été choisi :

$$\mathbf{V}_{\text{batt}} = \mathbf{E}_{\text{batt}} + \mathbf{R}_{\text{batt}} \mathbf{I}_{\text{batt}} \quad (\text{II.17})$$

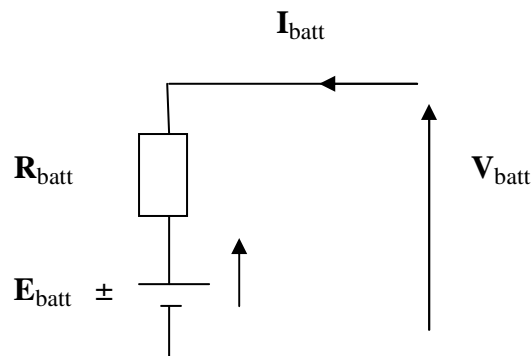
Avec:

$\mathbf{V}_{\text{batt}}$ : La tension de la batterie

$\mathbf{E}_{\text{batt}}$ : La force électromotrice de la batterie

$\mathbf{R}_{\text{batt}}$ : la résistance de la batterie

$\mathbf{I}_{\text{batt}}$  : Le courant de la batterie



**Figure II.7** : Schéma équivalent de la batterie

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanents. Les modèles présentés permettent de simuler le comportement dynamique de cette chaîne pour des différentes conditions de fonctionnement, afin de développer une architecture qui permet un meilleur transfert d'énergies éolienne. La simulation du système global sur MATLAB/Simulink., et les méthodes d'optimisation pour l'extraction de maximum de puissance (MPPT) de la turbine fera l'objet des prochains chapitres.

# *CHAPITRE III*

*Gestion de puissance et commande de la chaîne de conversion éolienne*

## Introduction

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet le réglage de la vitesse de la génératrice dans le but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent par la turbine. En effet, pour chaque vitesse du vent correspond une vitesse de la génératrice pour laquelle la courbe de puissance de l'éolienne présente un maximum. L'optimisation de la puissance à ce niveau passe par la recherche permanente de ce maximum par une technique que l'on retrouve dans la littérature sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Dans ce chapitre, on va adopter une technique MPPT classique pour une optimisation avec connaissance de la courbe caractéristique de la turbine ensuite la commande et la gestion de puissance de la chaîne de conversion éolienne, cette commande a pour but de pouvoir capturer le maximum de puissance possible du vent par la turbine, les résultats seront présentés dans ce qui suit.

### III.1 Maximisation avec connaissance de la courbe caractéristique de la turbine

MPPT classique une façon de procéder qui consiste à la recherche du point maximal en connaissant la courbe caractéristique de la turbine éolienne à piloter.

La forme en cloche très prononcée qui caractérise la courbe spécifique d'une turbine nécessite un dispositif d'extraction maximale en puissance (MPPT). L'amont de cette courbe représente la puissance maximale extractible. Ce point est localisé par la vitesse réduite optimale  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{p\ max}$  la valeur de la vitesse spécifique est donnée par l'équation (II.3) du chapitre précédent.

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine :

$$P_t = \frac{1}{2} * C_p(\lambda) * \rho * S * \frac{R^3}{\lambda^3} \Omega t^3 \quad (III.1)$$

Si on divise cette dernière par la vitesse de rotation, on aura le couple sous :

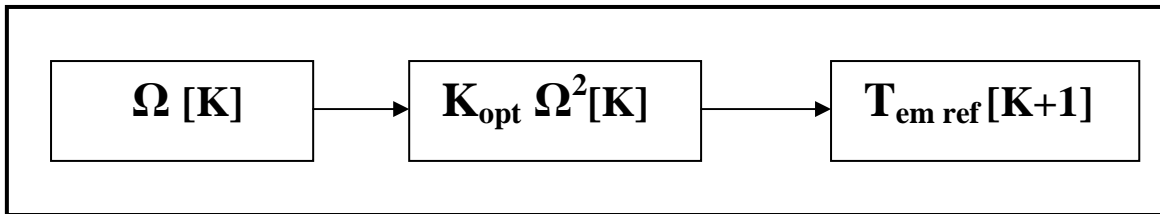
$$T_t = \frac{P_t}{\Omega t} = \frac{1}{2} C_p * \rho * \pi * \frac{R^5}{\lambda^3} \Omega t^2 \quad (III.2)$$

Considérant les conditions optimales le couple aura la forme suivante :

$$T_{em\ opt} = K_{opt} * \Omega t^2 \quad (III.3)$$

$$\text{Avec } K_{opt} = \frac{1}{2} C_p * \rho * \pi * \frac{R^5}{\lambda^3} \quad (III.4)$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence montré par la figure suivante :



**Figure III.1 :** Couple de référence de la vitesse de rotation

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La figure III.2 illustre graphiquement ce mode de recherche du point maximale de puissance.

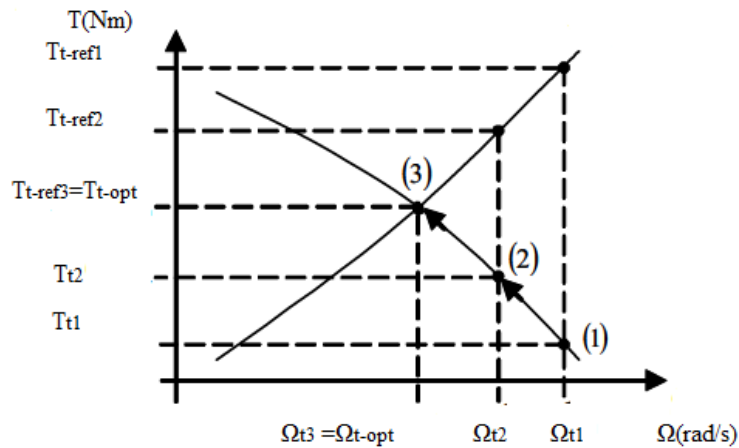
- La mesure de la vitesse de rotation  $\Omega t$  engendre le calcul du couple  $T_{em\ ref}$ . Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$T_t - T_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \quad (III.5)$$

- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique précédente pour atteindre, au pas de calcul suivant la vitesse  $\Omega t$ , ou de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée.
- Après quelques itérations, le processus atteint l'optimum à  $(T_{opt}, \Omega_{opt})$  correspondant à la puissance optimale  $P_{opt} (\lambda_{opt} \ Cp_{max})$

A partir de la vitesse du vent mesurée, on détermine la vitesse mécanique de la turbine, en multipliant cette dernière par la valeur du gain dans notre cas 1 (attaque direct) on obtient la vitesse mécanique adéquate du rotor de MSAP, tangible au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale.



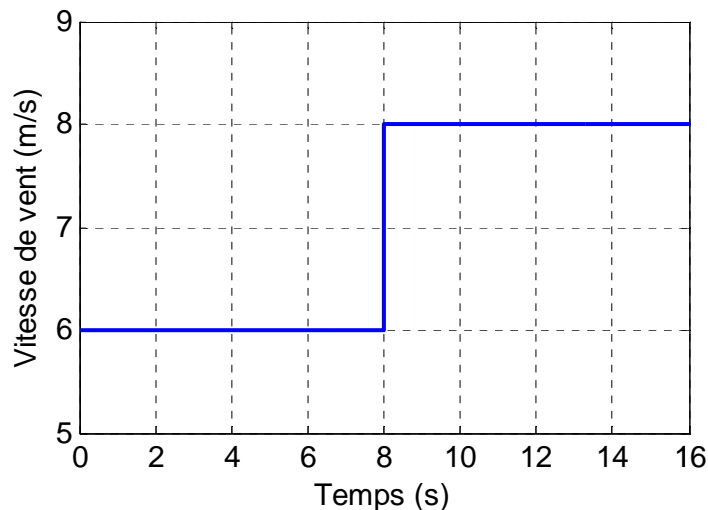


**Figure III.2** : Couple vers le point optimal-Contrôle en couple [9].

Le couple déduit à partir des conditions optimales ( $C_p^{Max}, \lambda_{opt}$ ) sera utilisé comme référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine.

### III.1.1 Résultats de simulation

Une simulation de la turbine éolienne est faite, on a appliqué un échelon de vitesse de vent et qui sera le même pour toute notre étude. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.



**Figure III.3** : L'échelon du vent appliqué

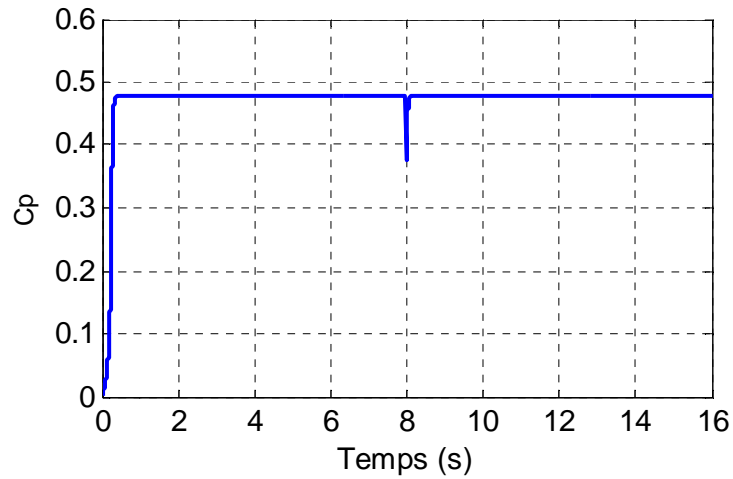


Figure III.4 : Le coefficient de puissance  $C_p$

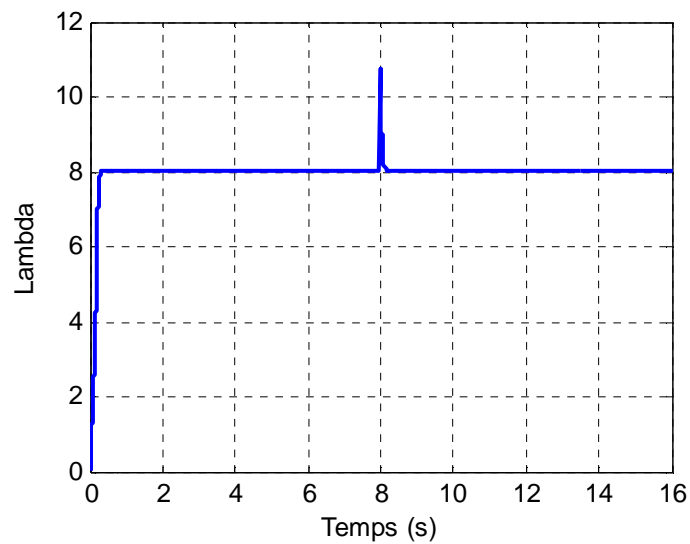


Figure III.5 : La vitesse spécifique ( $\lambda$ )

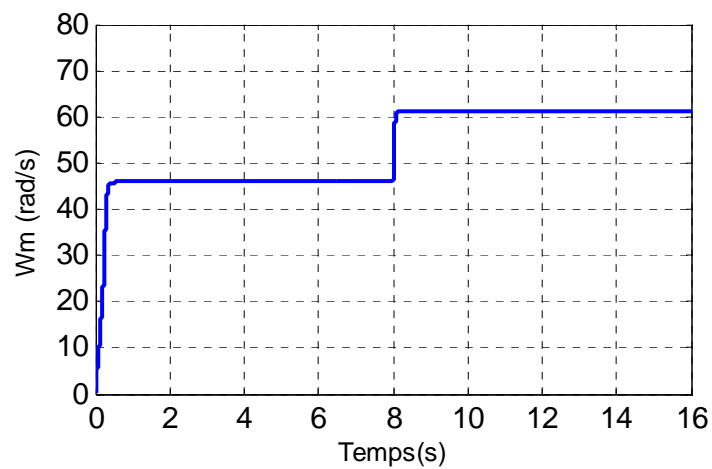
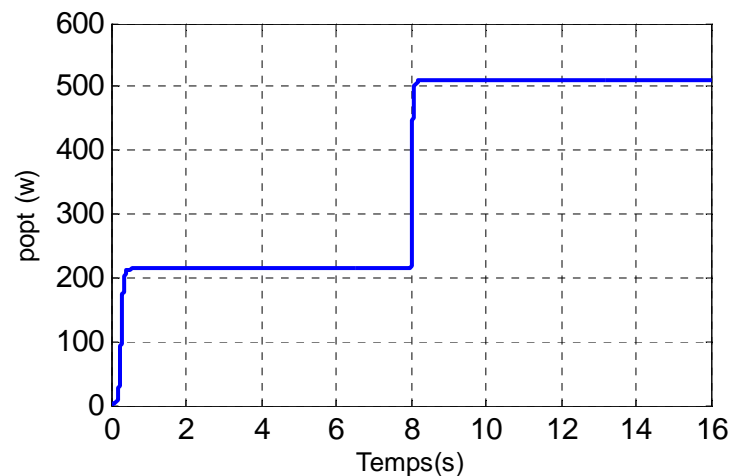


Figure III.6 : La vitesse de la turbine



**Figure III.7 :** La puissance de la turbine

### III.1.2 Interprétations

La Figure (III.4), représente le coefficient de puissance de la turbine. On remarque qu'il atteint sa valeur théorique maximale [ $C_{p_{Max}} = 0.48$ ] et cela quelque soit la vitesse du vent appliquée. Cette valeur de  $C_{p_{Max}}$  correspond a une valeur optimal de la vitesse spécifique ( $\lambda_{opt} = 8.1$ ) représenté sur la Figure (III.5). De ce fait ( $C_{p_{Max}}, \lambda_{opt}$ ), on déduit que la turbine fonctionne en son régime optimal.

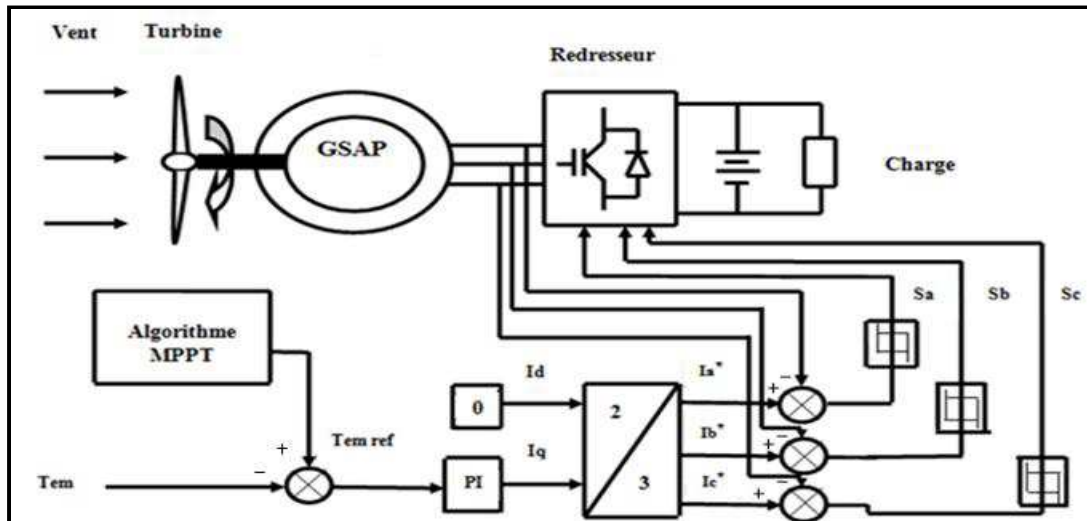
La Figure (III.6), représente la vitesse de la turbine, On constate qu'elle tend à suivre le profil du vent.

La Figure (III.7), représente la puissance de la turbine éolienne elle suit aussi le profil du vent

### III.3 Commande du générateur éolien

Le schéma global avec la commande du générateur éolien est représenté sur la figure III.8. La commande de ce système basé sur deux fonctions, l'algorithme d'extractions du maximum de puissance (MPPT) et le contrôle du bus continu à la sortie du redresseur. Le principe de contrôle des courants par hystérésis est celui qui est utilisé dans le présent travail. Ce type de commande est robuste et facile à mettre en œuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

Il s'agit d'une commande vectorielle en couple, dont le courant d'axe d est maintenu nul pour minimiser les pertes joules. Le courant d'axe q issue de la régulation du couple de la turbine a sa référence, cette commande dans le repère réelle est schématisée dans la figure III.8, la régulation des courants se fait à l'aide des régulateurs à hystérésis.



**Figure III.8 :** Schéma global avec la commande par hystérésis

Dans ce cas, chaque courant de phase est comparé à sa référence sinusoïdale à l'aide d'un comparateur à hystérésis dont la sortie est liée au circuit de commande des interrupteurs. Les ondulations du courant sont fixées par la valeur de la bande d'hystérésis.

Ce contrôle de courant par hystérésis assure une bonne filature de la consigne. Les ondulations du courant, autour de la valeur désirée au centre de l'enveloppe d'hystérésis, sont fixées par la largeur de cette dernière.

### III.4 principe de la commande vectorielle

Quelque soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), il est nécessaire de contrôler instantanément le couple, Ceci peut se faire en agissant sur les courants statoriques réels, soit en agissant sur leurs composantes directs et en quadratures. Le principe de la commande vectorielle vise à simplifier cela par un choix judicieux du repère d'axe ( $O_d$ ,  $O_q$ ) qui se traduit dans le cas d'une machines synchrone par le choix d'un repère lié au rotor.

Dans le cas d'une MSAP à rotor lisse, l'expression du couple est donnée par la relation (II.15). Etant données que le flux rotorique  $\Phi_f$  est fixe, en remarque que ce couple ne dépend que de la composante en quadrature du courant ( $I_q$ ), et il est maximale pour un courant donné,

lorsque  $I_d = 0$ . Ainsi, le déphasage entre les courants de phase et la f.é.m. de la machine est nul, et le couple électromagnétique est proportionnel aux courants d'alimentations, comme dans une machine à courant continu à excitation séparée. De même la puissance absorbée est optimisée pour  $I_d = 0$ . [29]

Le principe du contrôle des courants par hystérésis est illustré comme suit par la figure III.9

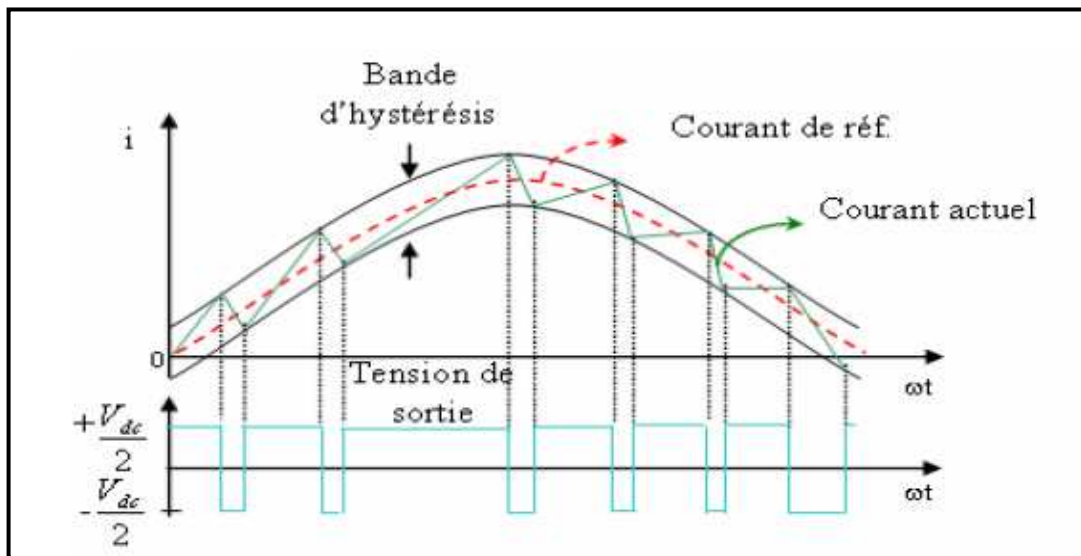


Figure III.9 Principe de la commande par hystérésis

## III.5 Résultats de simulation et interprétations

### III.5.1 Méthode classique

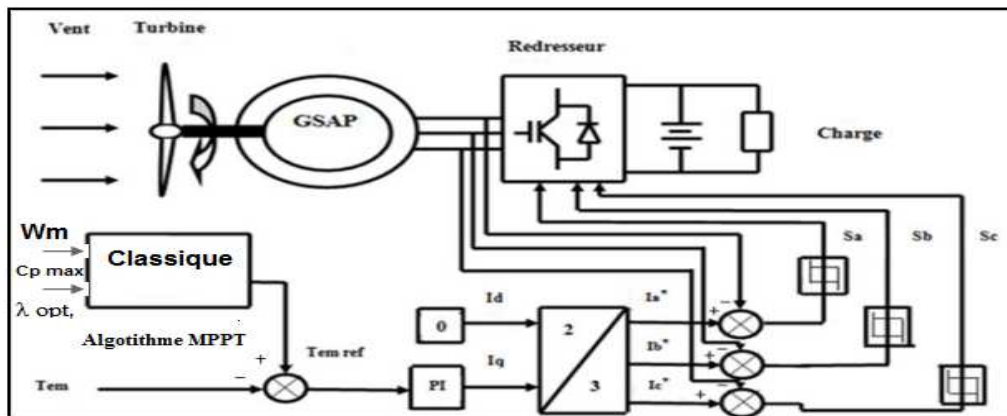


Figure III.10 : Schéma global avec la méthode MPPT classique

On a simulé le système global représenté sur la figure III.10, sachant que cette simulation est faite par connexion de l'éolienne à une charge en parallèle à une batterie et on a obtenu les résultats qui s'en suivent.

On a appliqué un profil de vitesse de vent (aléatoire) représenté dans la figure III.11 Et qui sera le même pour toute notre étude.

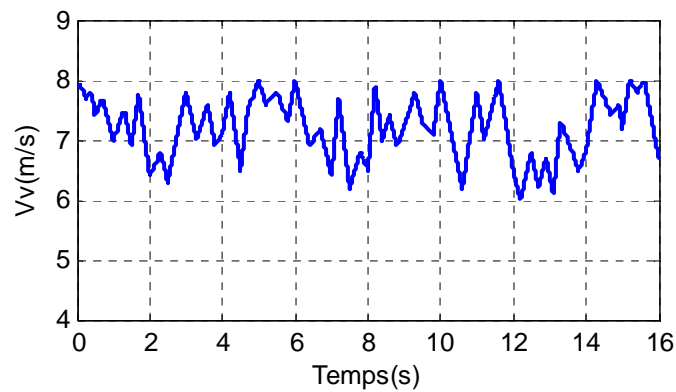


Figure III.11 : Le profil du vent appliqué

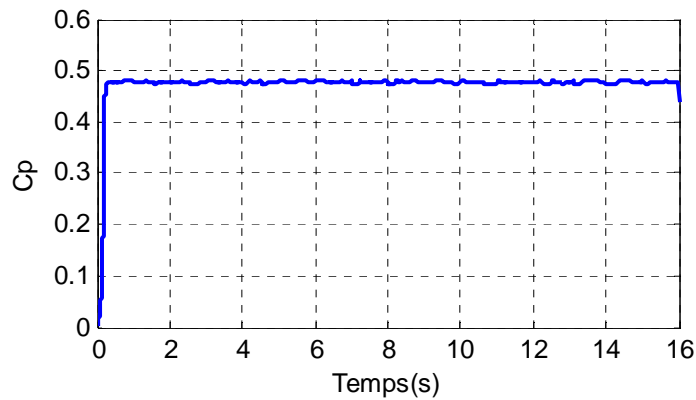


Figure III.12: Le coefficient de puissance  $C_p$

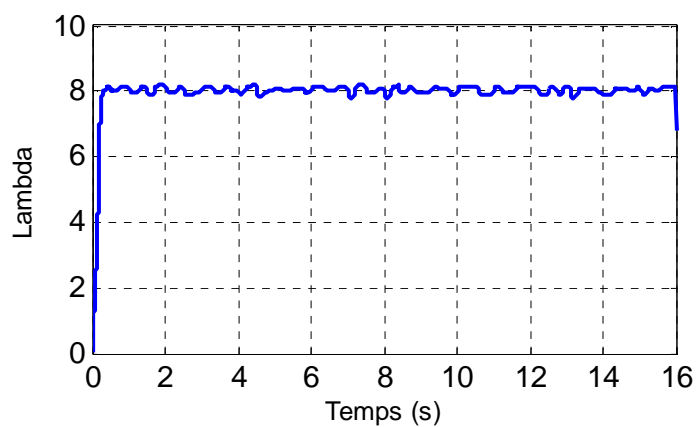
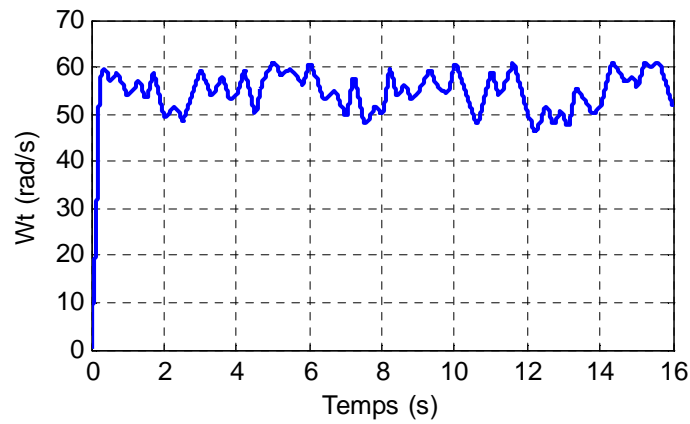
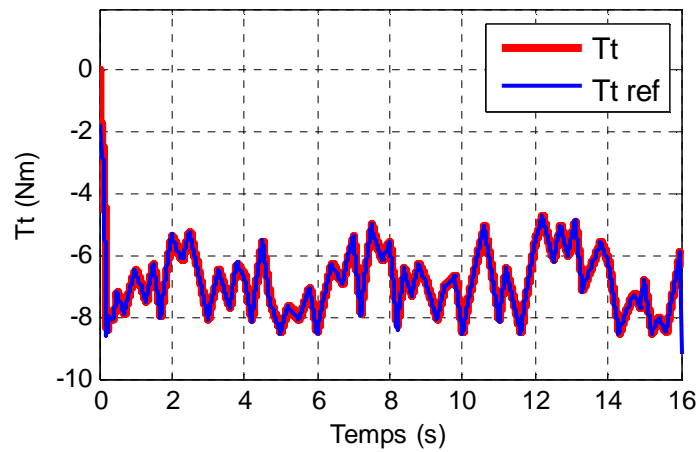


Figure III.13 : La vitesse spécifique  $\lambda$

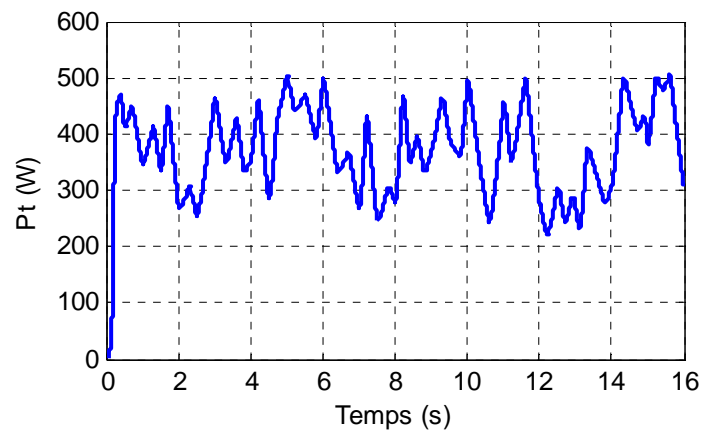


**Figure III.14 :** La vitesse de la turbine

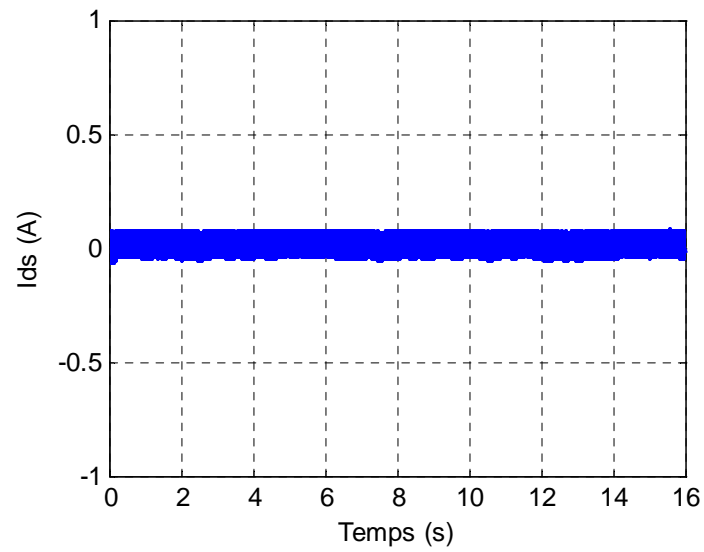
Le couple de référence appliqué est donné par la relation (III.3).



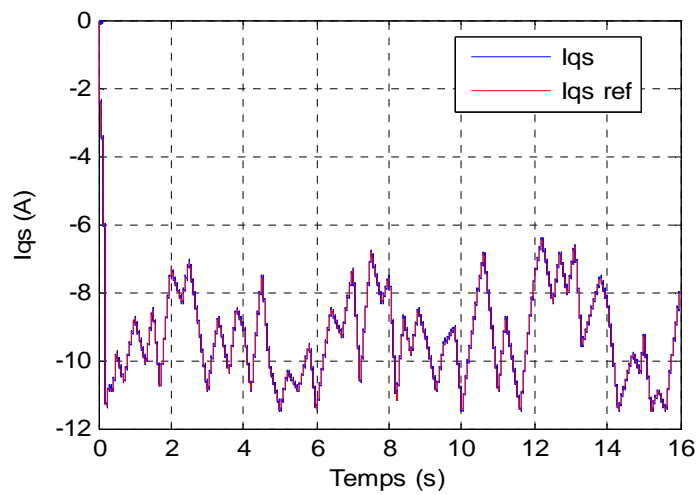
**Figure III.15 :** Le couple de la turbine



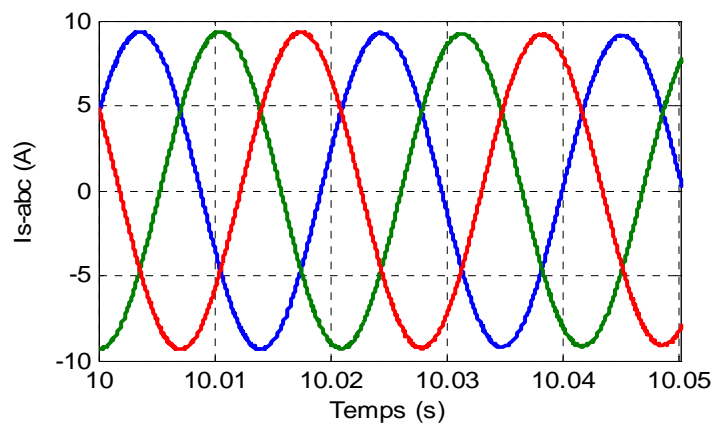
**Figure III.16 :** La puissance de la turbine



**Figure III.17 :** Le courant statorique  $I_{ds}$

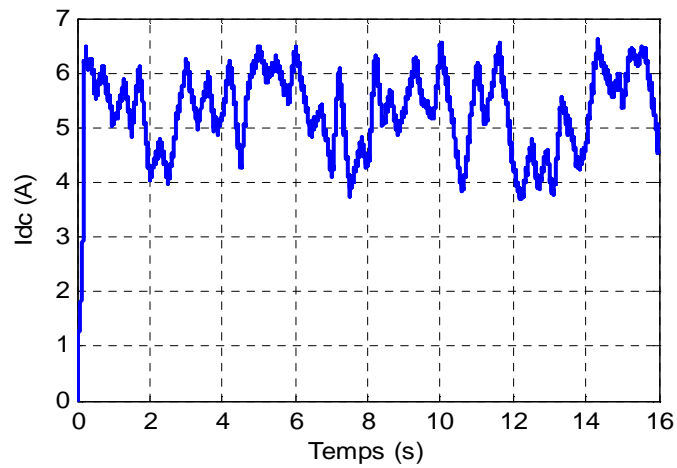
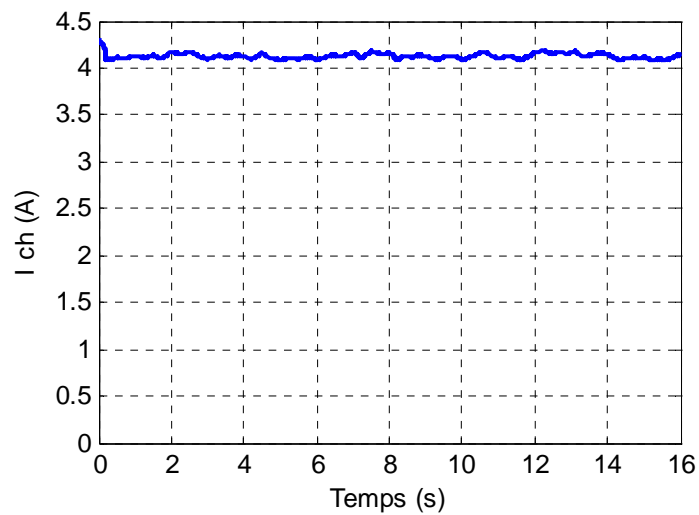
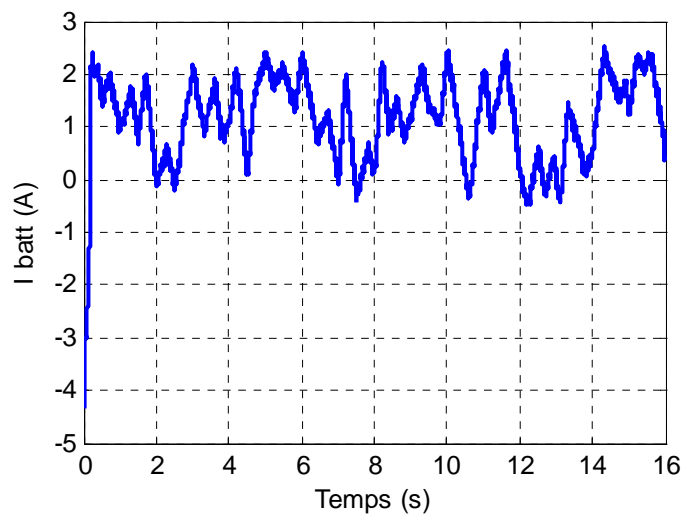


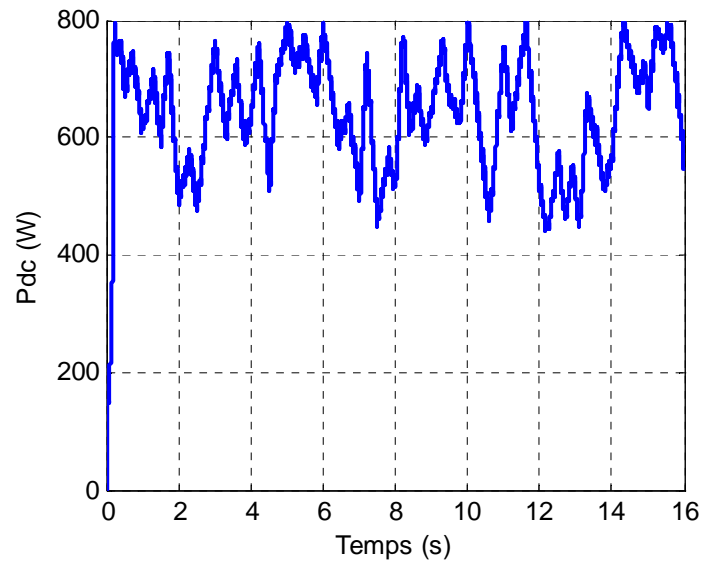
**Figure III.18 :** Le courant statorique  $I_{qs}$



**Figure III.19 :** Les courants de phases de la machines



**Figure III.20** Le courant du bus continu**Figure III.21** Le courant de charge**Figure III.22** Le courant de la batterie



**Figure III.23** La puissance du bus continu

### III.5.2 Interprétations

Les figures (III.12) et (III.13) : représentent respectivement le coefficient de puissance  $C_p$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  de la turbine en fonction du temps. On remarque que ces coefficients sont constants même pour la variation de la vitesse du vent.

La figure (III.14), représente l'évolution de la vitesse de la turbine. On constate qu'elle est proportionnelle à la vitesse du vent.

La figure (III.15), représente le couple électromagnétique de la machine synchrone à aimant permanent et il apparaît clairement qu'il suit sa référence issue de l'algorithme MPPT classique et prend une allure similaire que celle ( $I_{qs}$ ).

La figure (III.16), représente la puissance de la turbine éolienne elle suit aussi le profil du vent

La figure (III.17), représente le courant statorique  $I_{ds}$  de la machine, ce dernier est maintenu nul indépendamment du courant suivant l'axe de quadrature.

La figure (III.18), représente le courant statorique  $I_{qs}$  de la machine. On remarque bien qu'il est superposé sur sa référence issue de l'algorithme MPPT classique, cette allure l'influence de la variation de la vitesse qui cause une variation du couple électromagnétique.

La figure (III.19), représente les courants de phases de la machine à aimant permanent, on remarque bien que la forme des courants est sinusoïdale.

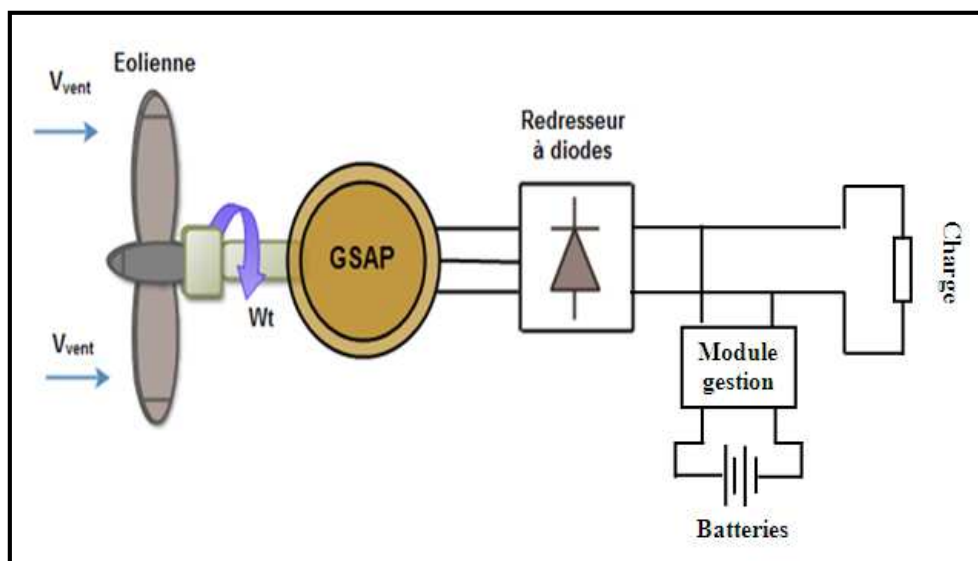
Les figures (III.20), (III.21), (III.22) représentent respectivement le courant du bus continu, le courant de charge et le courant de batterie. On remarque qu'ils suivent dans leurs évolutions les variations de la vitesse du vent.

La figure (III.23) représente la puissance du bus continu, On remarque qu'elle suit la variation de la vitesse du vent.

### III.6 Description du système de gestion de puissance :

Dans cette partie, une étude d'un système éolien est présentée. Ce système est représenté sur la figure (III.24) et il est composé des sous systèmes suivants :

- Une éolienne.
- Convertisseur AC/DC.
- Des batteries de stockages.
- Module de gestion.
- Une charge.



**Figure III.24 :** Structure du système de gestion de puissance

Le module de gestion sera chargé de gérer l'énergie provenant de l'éolienne et du stockage suivant la puissance exigé par la charge.

### III.6 .1 Résultats de simulation :

Nous avons simulé le système éolien avec batteries pour une variation de la vitesse de vent (Figure III.25)

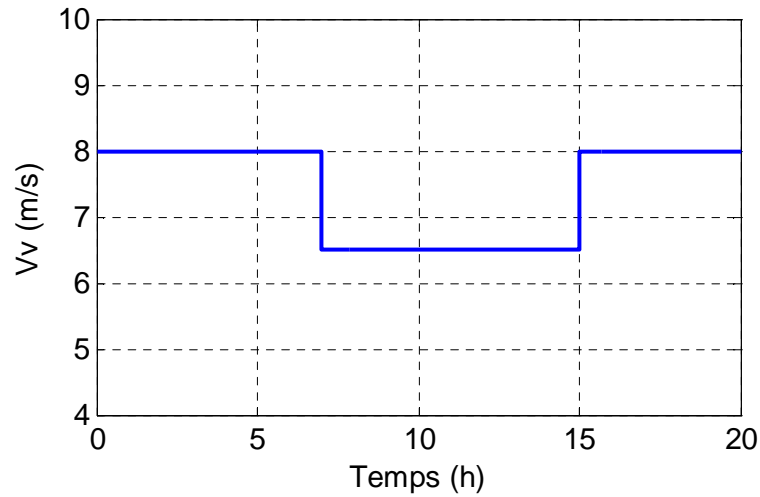


Figure III.25 : L'échelon du vent appliqué

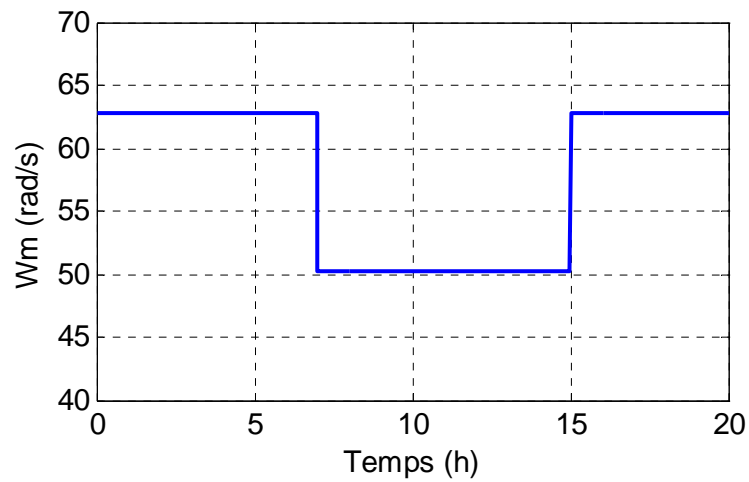
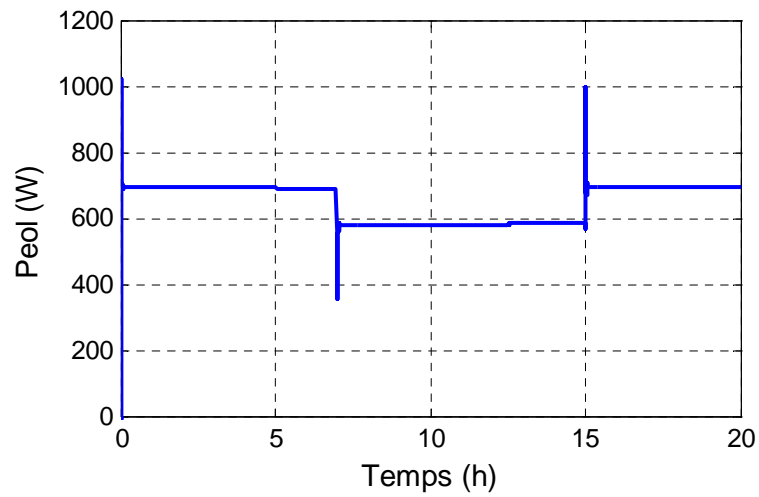
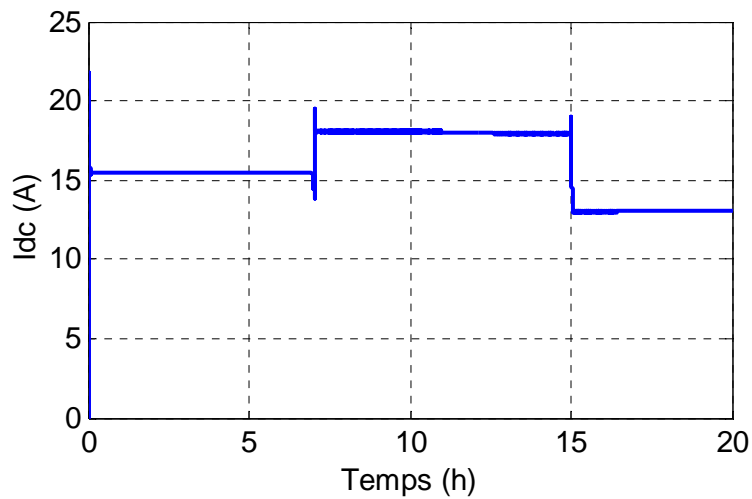
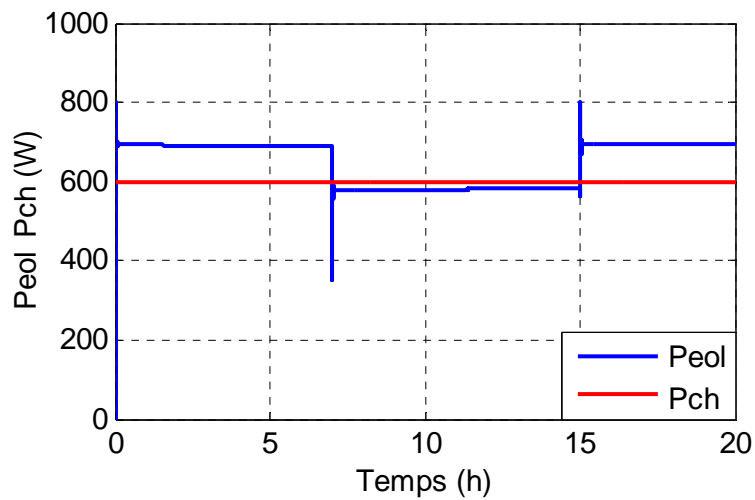
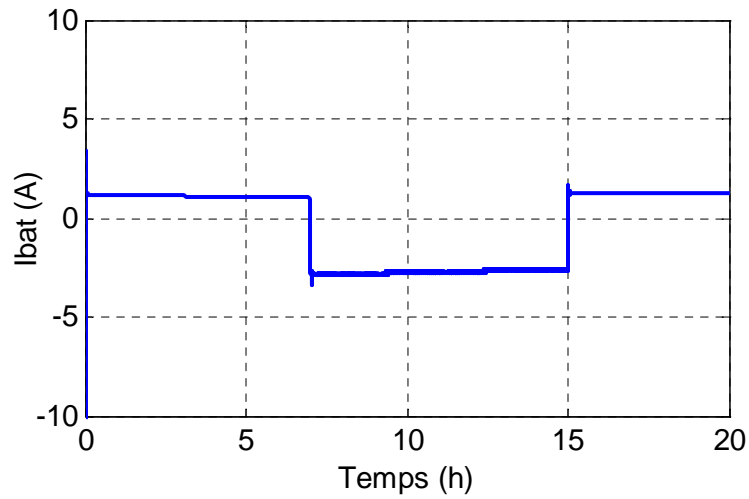
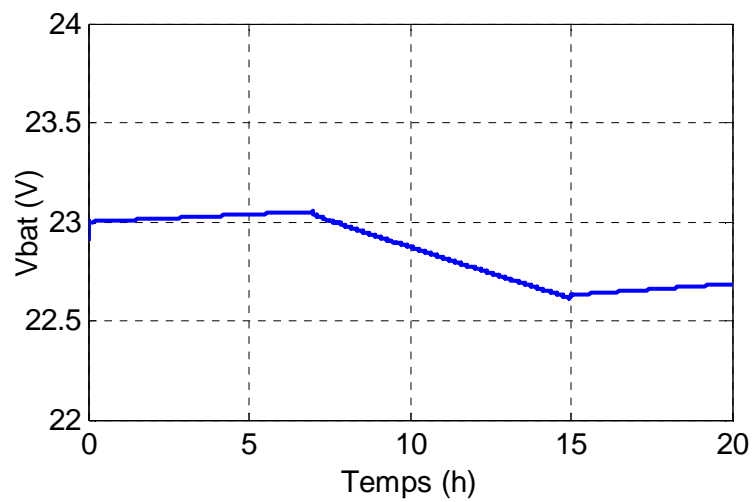


Figure III.26 : La vitesse de la turbine

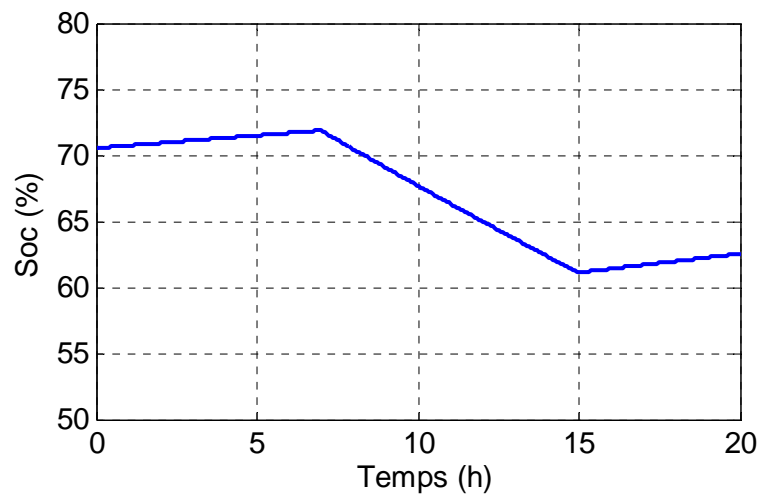
**Figure III.27** : La puissance de l'éolienne**Figure III.28** : Le courant redressé**Figure III.29** : la puissance éolienne et la puissance de charge



**Figure III.30 :** le courant de la batterie



**Figure III.31 :** la tension de la batterie



**Figure III.32 :** Le soc de la batterie

### III.6.2 Interprétations

La Figure (III.26), représente la vitesse de la turbine, On constate qu'elle tend à suivre le profil du vent.

La Figure (III.27), représente la puissance de la turbine éolienne elle suit aussi le profil du vent.

La Figure (III.30), représente le courant des batteries. On peut constater qu'il est positif en cas de charge, et négatif en cas de décharge.

Les Figures (III.31) et (III.32) représente la tension et le soc de la batterie, On remarque que la tension et l'état de charge des batteries évoluent de la même manière. Donc le soc est l'image de la tension.

### Conclusion

Dans ce chapitre, on a procédé à la simulation de la turbine avec MPPT classique qui a pour but de montrer le comportement de la turbine. Aussi une commande vectorielle a été établie pour prédire le comportement du système lors de l'imposition d'un couple de référence afin d'optimiser la puissance extraite et enfin une gestion de puissance de l'énergie provenant de l'éolienne et du stockage suivant la puissance exigée par la charge, Les résultats obtenus sont discutés.

# *CHAPITRE IV*

*Acquisition des données du système éolien*



## Introduction

Ce chapitre sera consacré pour l'acquisition des données en temps réel des paramètres électrique utilisons une carte de type **PCI** référence **NI-6259** et le logiciel Labview, afin d'évaluer les performances de notre système.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un langage de Programmation graphique qui utilise des icônes au lieu des lignes de texte pour créer des applications. Contrairement aux langages de programmation textuels où ce sont les instructions qui déterminent l'ordre d'exécution du programme, LabVIEW utilise la programmation par flux de données, c'est le flux des données transitant par les nœuds sur le diagramme qui détermine l'ordre d'exécution des Vis et des fonctions. Les Vis ou instruments virtuels sont des programmes LabVIEW qui imitent les instruments physiques.

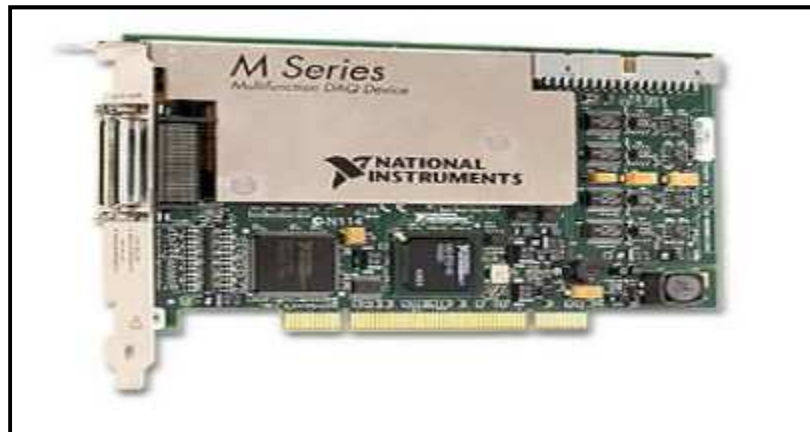
### IV.1 Description de la carte d'acquisition

La carte choisie est une **NI-PCI 6259** de National Instrument. Cette dernière est une carte d'acquisition de données multifonction haute vitesse de la Série «**M**», optimisée pour une excellente précision aux fréquences d'échantillonnage élevées. «**NI**» représente le nom de Constructeur national instrument, «**PCI**» c'est le port de communication avec le microordinateur et «**6259**» est le numéro (classement) de la carte [36].

### IV.2 Caractéristique de la carte [36]

Dans cette partie, on a décrit les caractéristiques de la carte d'acquisition utilisée au Nouveau laboratoire L.T.I.I

- 32 entrées analogiques 16 bits, 1 Méch./s (multivoie), 1.25 Méch./s (monovoie).
- 4 sorties analogiques 16 bits, 2.8 Méch./s, 48E/S numériques, compteurs 32 bits.
- Certificat d'étalonnage du NIST (National Institute of Standards and Technology) et Plus de 70 options de conditionnement de signaux.
- Technologie d'étalonnage NI-Mcal pour une précision de mesure accrue E/S numérique corrélée (32 voies cadencées, 10MHz), déclenchement analogique et Numérique.
- Précision de mesure, une résolution et une sensibilité accrue.
- Elle est accompagnée par son propre logiciel interactif d'enregistrement de données NI LabVIEW.



**Figure IV.1** Carte d'acquisition.

### **IV.3 Software de la carte**

Comme on a déjà dit, la carte d'acquisition fait appel à un logiciel qui est le LabVIEW (Laboratory Instrumentation Engineering Workbench) pour acquérir les différentes données Et les traiter sur microordinateur.

Le LabVIEW est un environnement de développement en langage G. Il a été créé en 1986, initialement pour Apple Macintosh qui était à l'époque l'un des seuls ordinateurs proposant une interface graphique native. L'histoire de LabVIEW explique un vocabulaire spécifique et explique encore certaines actions. A l'origine, LabVIEW s'exécute sur des écrans noirs et blancs, puis sur des écrans 16 couleurs, 256 couleurs...etc. [37].

LabVIEW est un environnement de développement propriétaire développé et vendu par la société National Instrument (NI). Le premier métier de NI est de fabriquer du matériel d'acquisition rapidement destiné au marché des microordinateurs. Ainsi la première version De Labview s'attache à offrir un environnement de développement dont le rôle est de permettre simplement à l'utilisateur de créer des instruments virtuels utilisant le matériel d'acquisition NI pour reproduire sur un microordinateur le comportement d'un instrument Personnalisé et personnalisable à volonté. [37]

### **IV.4 Le concept d'instrument virtuel [37]**

L'idée de base est d'utiliser une carte d'acquisition ou un périphérique d'acquisition dont le rôle est d'acquérir un signal électrique de l'extérieur, généralement un capteur ou un ensemble de capteurs, effectuer un traitement, un enregistrement dans un fichier ou une base

De données, une restitution à l'écran via une interface graphique et éventuellement effectuer un ensemble d'actions sur le monde extérieur à l'aide d'actionneurs. Les variations possibles sont finies en fonction des besoins et de leurs évolutions.

L'avantage de l'instrument virtuel sur l'instrument réel est indéniable puisqu'il est du ressort du programmeur de l'instrument virtuel.

#### IV.5 Les différentes étapes de création d'un projet sous LabView

Les étapes que nous avons suivies pour la création de notre projet sous Labview à partir de ce logiciel qui nous a permis d'utiliser les données acquises via la carte et les utiliser dans des programmes de calcul ainsi pour tracer les courbes.

Pour faire ce travail, nous avons suivi les étapes suivantes :

##### Étape 1 :

Lorsqu'on lance Labview, l'écran de démarrage permet de démarrer toutes les opérations proposées par cet environnement de développement Figure IV.2. Pour créer un nouveau programme, on sélectionnera « VI vide ». Labview utilise le nom de VI (Virtual instrument) à prononcer en anglais « Vi-aié » pour les programmes et sous-programmes.

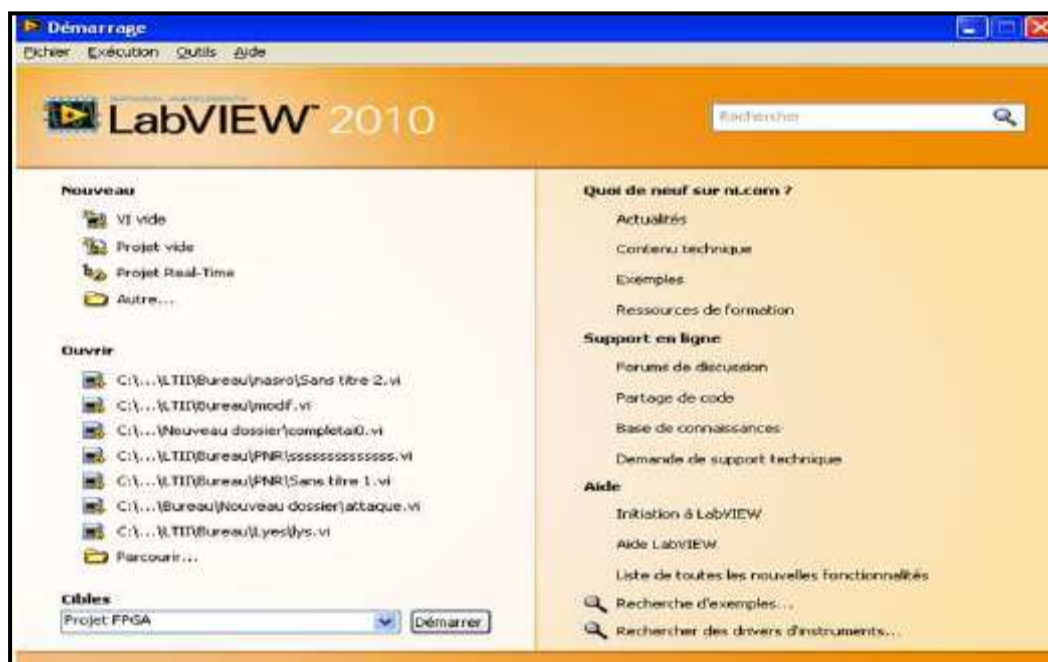


Figure IV.2 Ecran d'accueil de LabVIEW

Les programmes ou sous-programmes auront l'extension « VI » et seront donc nommés VI. Nous verrons qu'il y a peu de différences entre un programme et un sous-programme, on

pourra donc parfois utiliser spécifiquement le terme de « sous VI » pour sous-programme, mais cela ne sera pas toujours le cas.

Sur l'écran de démarrage, la partie gauche permet de créer ou d'ouvrir un VI ou un projet, la partie droite sur laquelle nous reviendrons bientôt, permet d'accéder à la documentation extrêmement riche, incluant notamment divers tutoriaux. De plus, elle donne un pointeur vers les nouveautés de la version courante par rapport à la version précédente, ainsi que vers des sites internet.

## Étape 2 :

Que l'on souhaite créer un programme ou un sous-programme, on crée un **VI**. Pour LabVIEW tout **VI** est considéré comme un instrument virtuel. Par conséquent, il a un Comportement Figure IV.3. Donnée sur le diagramme (fenêtre blanche) et une interface Utilisateur nommé face-avant (fenêtre grise). De plus, un **VI** sera symbolisé par son icône. Il est important de retenir qu'un **VI** est stocké dans un unique fichier **VI**.

Sur la face-avant, nous serons donc amenés à placer des éléments graphiques (entrées du Programme, à l'instar des boutons d'un instrument, sorties à l'instar des éléments affichés sur un instrument,...), alors que sur le diagramme, nous placerons la logique du programme, en général logique qui relie les entrées aux sorties : comment calculer les sorties à partir des Entrées.

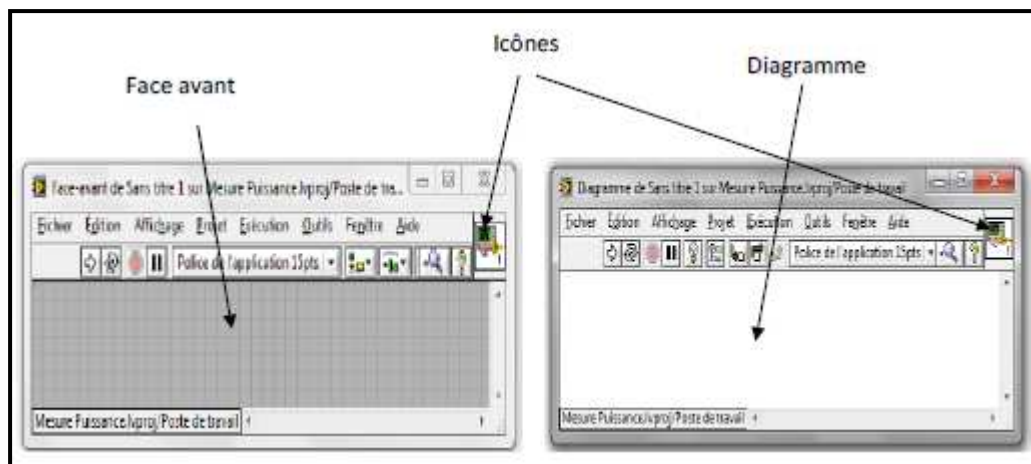


Figure IV.3 Diagramme et interface de Labview

**Etape 3 :**

En LabVIEW, toute la programmation se passe de façon graphique, il n'y a pas de syntaxe à connaître (pas de begin, end, for, etc). Quand on débute, on commence souvent par créer la face-avant, puis on passe au diagramme pour représenter la logique du programme.

➤ **Palettes de commande :**

Nous verrons par la suite qu'il est souvent plus rapide de faire l'inverse (sauf pour le VI correspondant à ce qui sera montré finalement à l'utilisateur). Commençons donc comme tout débutant par créer l'interface graphique : supposons que le programme prend deux numériques à l'entrée, et calcule un résultat sous forme d'un numérique. Il nous faudra donc créer deux entrées numériques et une sortie numérique (affichage). Dans Labview, les entrées s'appellent des commandes et les sorties des indicateurs (toujours par analogie avec un instrument).

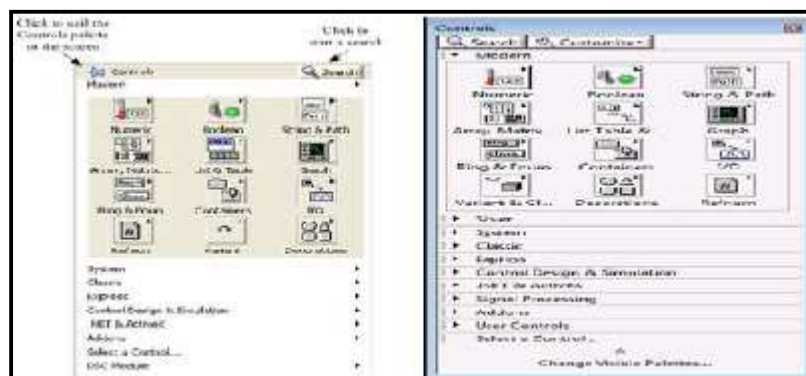
Les commandes, indicateurs et décoration sont disponibles à partir de la palette de Commandes de Labview Figure IV.4. Il y a plusieurs façons d'afficher la palette de commandes :

- ✓ Faire un click droit sur la face-avant.

On remarque la punaise en haut à gauche de la palette qui apparait sous forme d'un menu : en cliquant sur celle-ci, la palette reste affichée sous forme d'une fenêtre.

- ✓ Dans le menu déroulant de la face-avant, On clique sur « Affichage », puis sélectionner « Palettes des commandes ». Cela a pour effet d'afficher la palette sous forme d'une fenêtre (équivalent à utiliser la punaise).

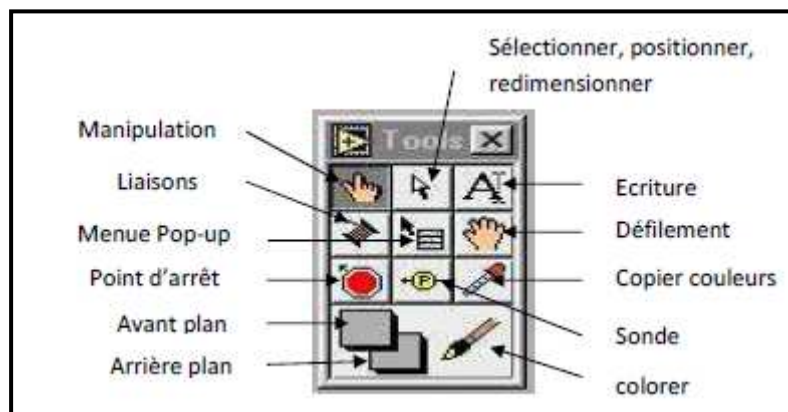
On remarque que même si elle est affichée, la palette de commandes devient invisible lorsque la fenêtre de la face-avant n'est pas active.



**Figure IV.4 :** Palettes de commande

### ➤ Palettes d'outils

On fait apparaître la boîte à outils permettant de manipuler les objets graphiques, en suivant la séquence de menu Windows >> Show Tools palette ou bien en ouvrant un menu local dans la fenêtre avec la touche SHIFT enfoncée. Une fois apparue, la boîte à outils est toujours visible. On sélectionne l'outil désiré en cliquant dessus. Il est à noter que la touche de tabulation permet une sélection rapide des outils les plus utilisés.



**Figure IV.5** La palette d'outils pour le choix de la fonctionnalité de la souris

- ✓ Outil doigt : permet de positionner des éléments des palettes **Control et Fonction** sur la face-avant du diagramme.
- ✓ Outil flèche : permet de positionner, redimensionner et sélectionner les objets.
- ✓ Outils texte : permet de modifier du texte et d'en créer.
- ✓ Outil bobine : permet de câbler des objets entre eux dans le diagramme.
- ✓ Outil menu local : fait apparaître un menu local dans un objet.
- ✓ Outil main : fait défiler toute la fenêtre sans avoir recours aux barres de défilement.
- ✓ Outil point d'arrêt : permet de définir des points d'arrêt dans les **VI**s, les fonctions, les séquences et les structures.
- ✓ Outil sonde : permet de créer des sondes sur les fils.
- ✓ Outil pipette : copie les couleurs pour les coller à l'aide de l'outil Pinceau.
- ✓ Outil pinceau : permet de définir la couleur de l'arrière-plan et du premier plan.

### Etape 4 : Création du diagramme

Supposons que nous souhaitons réaliser un convertisseur d'unité de température de °C Vers °F en utilisant la formule  $F=1,8*C+32$ .

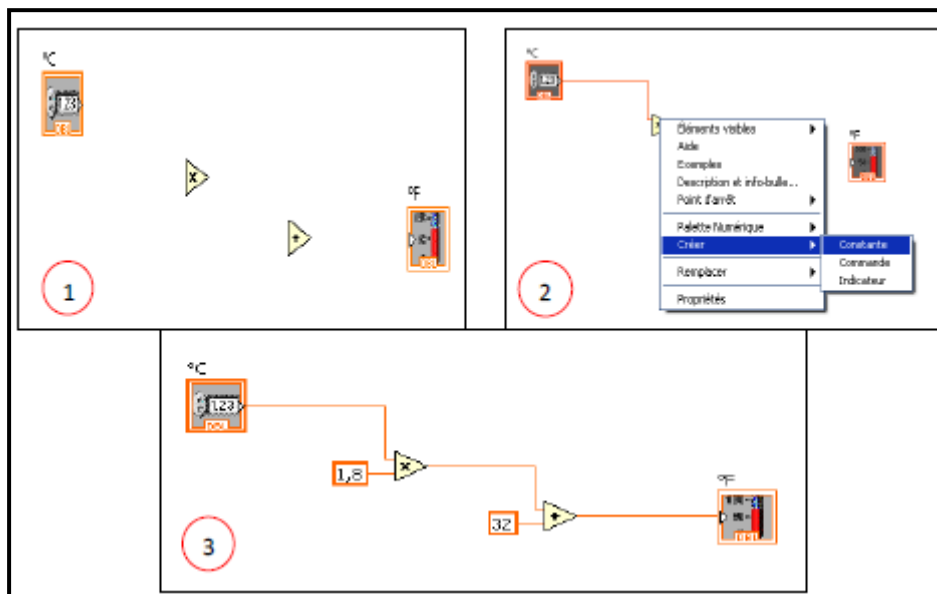
Il nous faut commencer, pour le convertisseur, à placer les fonctions nécessaires : une

Addition et une multiplication. Toutes les deux sont dans la palette « **Numérique** » (étape 1 de La figure IV.6). Ensuite on utilise l’outil bobine pour câbler. L’entrée (la commande) « °C » à Une entrée de la fonction multiplication (étape 2). Il nous faut alors multiplier cela à la constante (1,8).

Il y a différents moyens de créer une constante, mais le plus simple est de faire un click droit sur l’entrée, puis de choisir « **Créer** » « **Constante** ». Une constante du bon type est alors créée et reliée à cette entrée.

Le diagramme est enfin complété comme à l’étape 3. Pour exécuter le **VI**, il faut cliquer sur le bouton « **Exécuter** ». Certains utiliseront « **Exécuter en continu** » qui a pour effet d’exécuter le VI sans arrêt jusqu’à l’appui sur le bouton « **Abandonner l’exécution** ».

Cependant nous déconseillons de prendre cette habitude : un programme bien fait contient une Boucle d’exécution au niveau le plus haut et son propre bouton d’arrêt sur la face avant.



**Figure IV.6** : Etapes de la construction du diagramme

A partir d’ici, il convient d’utiliser la fenêtre **d’aide contextuelle** (menu déroulant « **aide** », « **Afficher l’aide contextuelle** » ou raccourci clavier (**Ctrl+h**) afin d’obtenir des descriptions rapides des fonctions ou bien savoir quel type de données passe sur un fil. La souris. Ainsi, si l’on place la souris sur le nœud « x » de la figure, on obtient l’aide contextuelle donnée sur la Figure IV.7



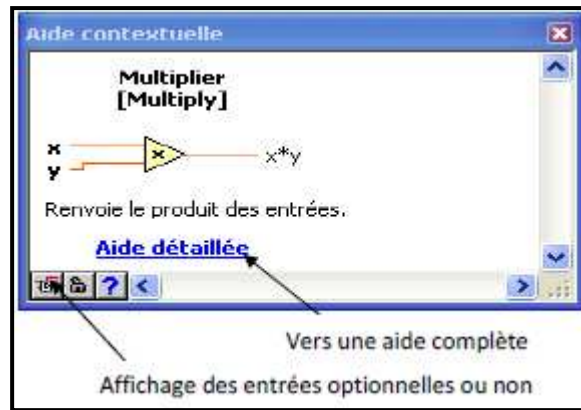


Figure IV.7 : Aide contextuelle.

### ➤ Utilisation avancée

Nous avons maintenant vu les éléments de base de la programmation LabVIEW. Cette partie propose de voir quelques graphes proposés par LabVIEW, et surtout la façon dont on peut créer une interface graphique.

### ➤ Utilisation de graphe

Les trois principaux types de graphe proposés par LabVIEW sont le **graphe déroulant** (Affiche les courbes point par point) le **graphe** (Affiche les courbes à partir du/des tableaux contenant tous les points) et le **graphe XY** (courbes paramétriques).

## IV.6 Acquisition des données et communication avec des instruments

Ce passage présente les **VI** express qu'on peut utiliser pour acquérir des données et communiquer avec des instruments sous Windows.

## IV.7 Acquisition d'un signal

On peut créer une tâche pour mesurer une grandeur physique telle qu'une tension, un courant ou une température sur une ou plusieurs voies d'un périphérique **DAQ**.

La boîte de dialogue affiche la liste des voies sur chaque périphérique DAQ installé, Le nombre de voies affichées dépend du nombre de voies dont dispose notre périphérique DAQ. Dans la liste de **voies physiques supportées** L'assistant **DAQ** ouvre une nouvelle boîte de dialogue représentée par la figure IV.8 qui affiche l'option de configuration pour la voie que vous avez sélectionnée pour la tâche.



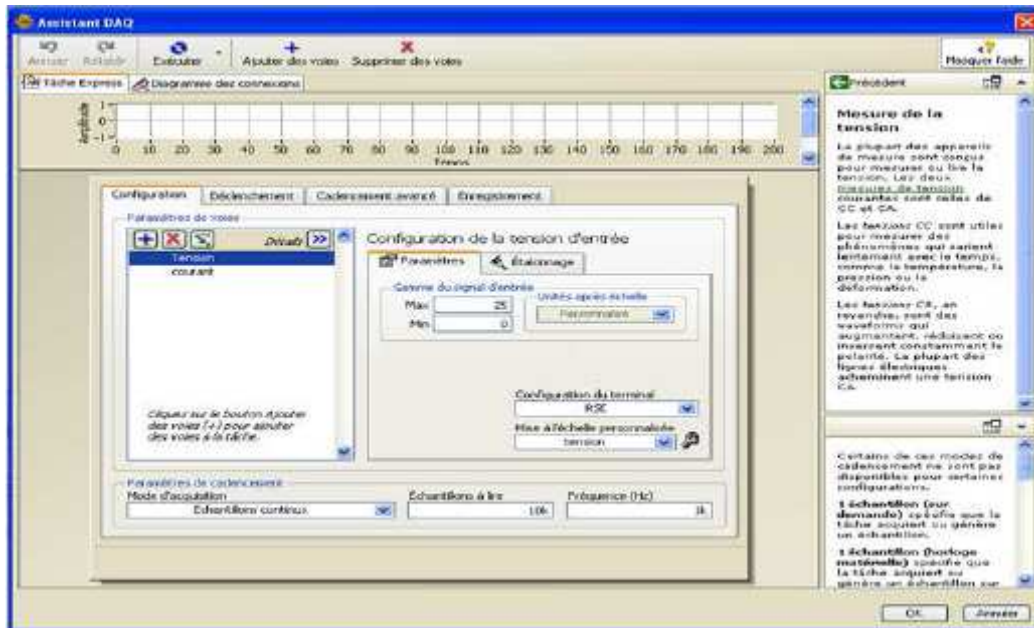


Figure IV.8 Configuration d'une tâche avec l'Assistant DAQ

## IV.8 Système d'analyse et d'enregistrement d'un signal

LabView contient un ensemble de Vis Express qui facilitent l'analyse de vos signaux. Ce passage vous montre comment utiliser LabVIEW pour effectuer une analyse élémentaire d'un signal et comment enregistrer les données analysées dans un fichier.

Par défaut, le VI express simule un signal sinusoïdal. On peut personnaliser le signal simulé en changeant les options de la boîte de dialogue configurer simuler un signal. Si on veut faire la valeur efficace ou la valeur moyenne de ce signal, on peut le faire grâce au bloc qui se nomme mesure d'amplitude et de niveaux à partir de la bibliothèque traitement du signal. La bibliothèque traitement de signal contient plus de 50 modèles de traitement des signaux filtre passe bas, passe haut.



Figure IV.9 : Instrument de traitement

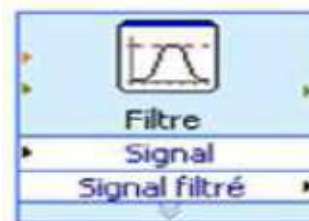


Figure IV.10 : Filtre de traitement

### IV.9 Bloc du système d'acquisition

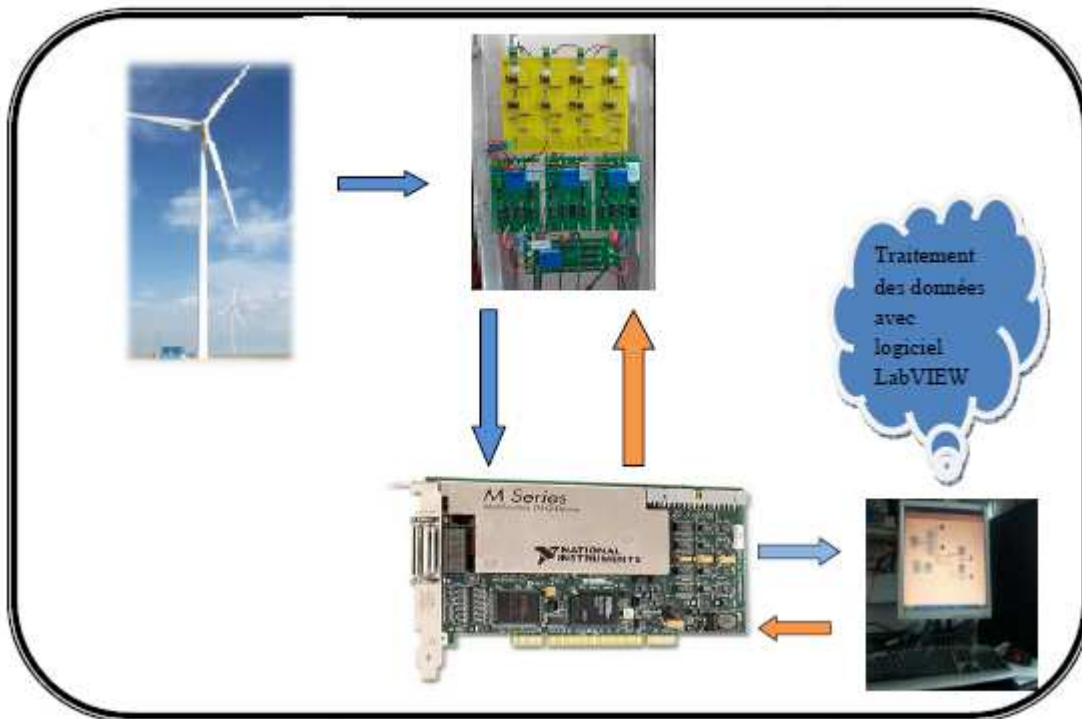


Figure IV.11 Schéma bloc du système d'acquisition

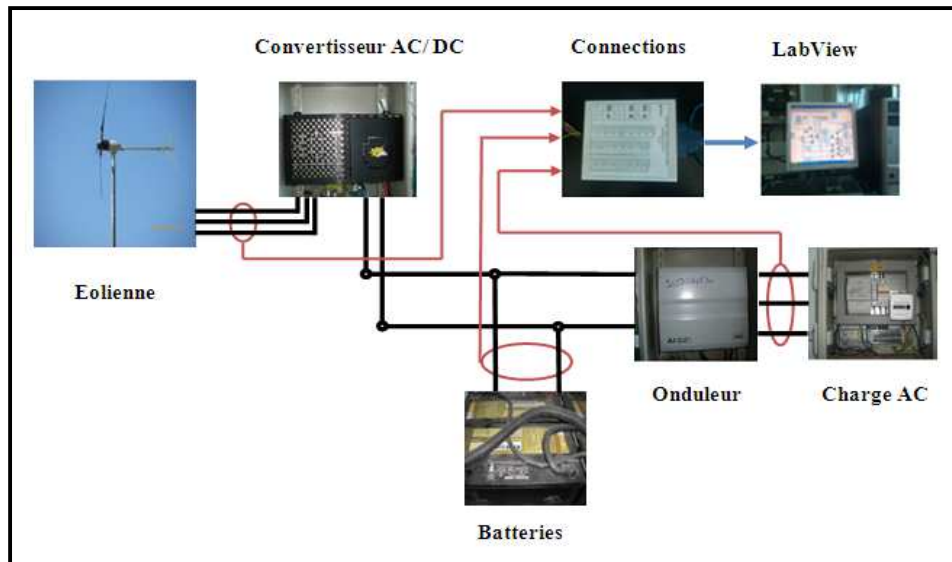
### IV.10 Unité d'acquisition des données

Pour le pilotage de la carte d'acquisition et la capture des différents paramètres climatiques et électriques, un programme Labview a été mis en œuvre.

#### IV.10.1 Programme Labview

Le programme labview se compose de quatre étapes :

- **Etape 1** : Cette étape est mise en place pour envoyer depuis la carte d'acquisition un signal de commande triangulaire qui représente l'image de courant
- **Etape 2** : Après l'envoi du signal de commande, vient l'étape d'acquisition des signaux à la sortie des capteurs de mesure
- **Etape 3** : Cette étape est faite pour le traitement de donnée Elle est constituée d'un filtre et d'un instrument mesurant la valeur moyenne.
- **Etape 4** : Après acquisition et le filtrage de données, il est maintenant temps d'afficher les résultats.

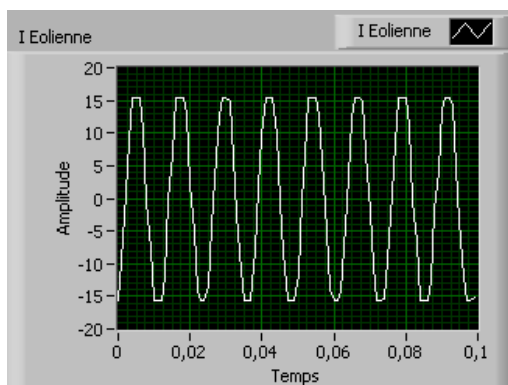


**Figure IV.12** Schéma global de connexion du système étudié

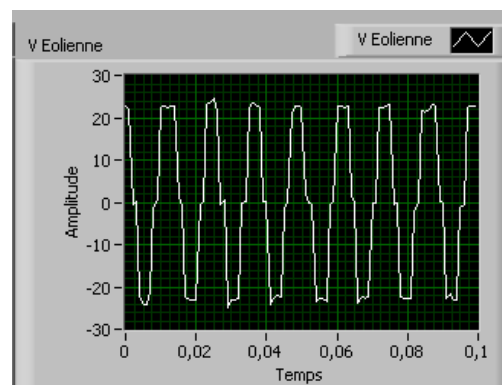
#### IV.11 Résultats expérimentaux sous Labview

Dans ce travail on a procédé à la supervision en temps réel et l'acquisition des données d'un système éolien avec batteries de stockage alimente une charge alternative via un onduleur monophasé.

Les résultats suivants ont été pris pendant un instant de fonctionnement correspondant à une vitesse du vent de 11 m/s

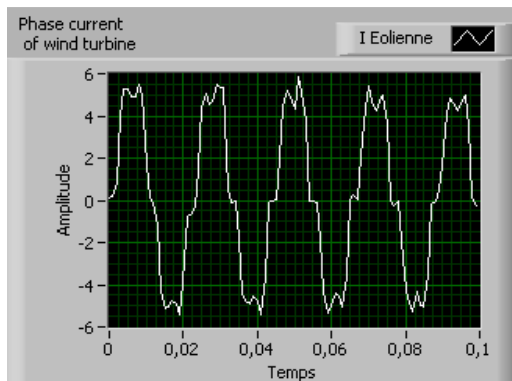


**Figure IV.13** Le courant de l'éolienne

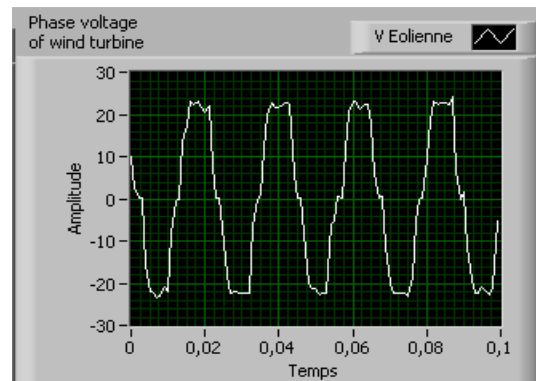


**Figure IV.14** la tension de l'éolienne

On a pris Les tests suivant Pour une vitesse du vent faible de 3.5 m/s



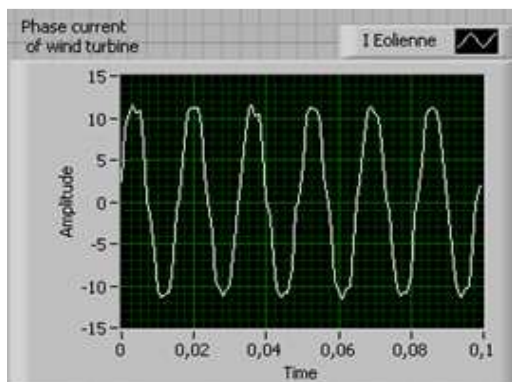
**Figure IV.15** Le courant de l'éolienne



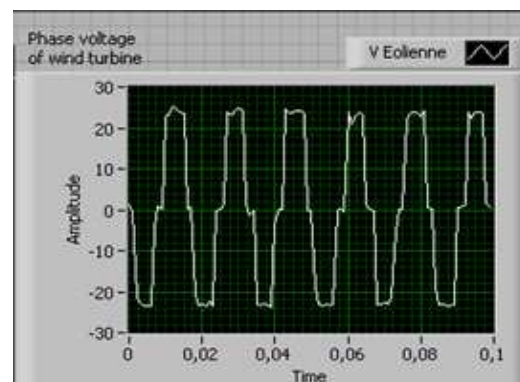
**Figure IV.16** la tension de l'éolienne

➤ **Aquisition des données pour la chaine de conversion eolienne**

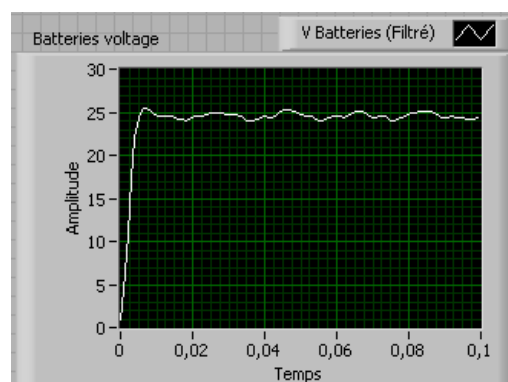
On a pris Les tests suivant pour une vitesse moyenne du vent de 8.6m/s



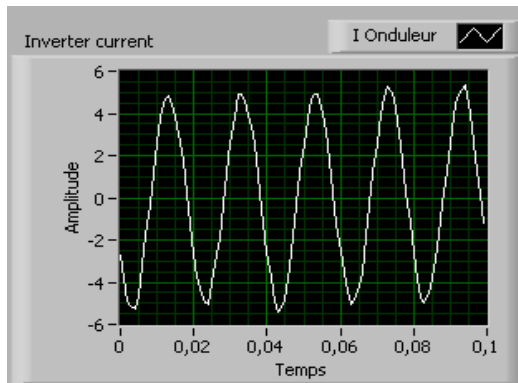
**Figure IV.17** Le courant de l'éolienne



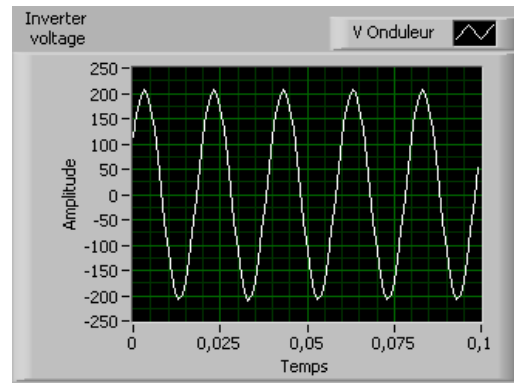
**Figure IV.18** la tension de l'éolienne



**Figure IV.19** La tension de la batterie



**Figure IV.20** Le courant de l'onduleur



**Figure IV.21** La tension de l'onduleur

### IV.12 .1 Interprétations

Les Figures (IV.13) et (IV.14) : représentent respectivement le courant et la tension de la turbine éolienne en fonction du temps prise pour une forte vitesse de vent (11m/s).

On remarque que le courant et la tension sont de forme sinusoïdale.

Les Figures (IV.15) et (IV.16) : représentent respectivement le courant et la tension de la turbine éolienne en fonction du temps prise pour une faible vitesse de vent (3.5m/s).

On remarque que le courant et la tension oscille, et les amplitudes des courants sont plus importante pour les vitesses du vent élevée donc le courant est proportionnelle à la vitesse du vent.

Les Figures (IV.17) et (IV.18) : représentent respectivement le courant et la tension de la chaîne de conversion eolienne pour une vitesse du vent moyenne de (8.6m/s).

On remarque que le courant et la tension sont de forme sinusoïdale, et cet dernière est nul au démarrage.

La Figure (IV.19) : représente la tension de la batterie qui se stabilise après son évolution au alentour de 25 v.

Les Figures (IV.20) et (IV.21) : représentent respectivement le courant et la tension de L'onduleur, On remarque que forme et l'amplitude de la tension sont bien adaptées, tandis que la forme du courant dépend de la nature de la charge (Charge résistive) utilisée, ce qui justifie sa forme d'onde.

### ➤ Fichier d'enregistrement et stockage de données

La figure suivante montre le fichier d'enregistrement par le système d'acquisition de données

1	LabVIEW Measurement											
2	Writer_Vers	2										
3	Reader_Vers	2										
4	Separator	Tab										
5	Decimal_Sep	.										
6	Multi_Head	No										
7	X_Columns	One										
8	Time_Pref	Absolute										
9	Operator	LTH										
10	Date	26/06/2013										
11	Time	59:31,8										
12	***End_of_Header***											
13												
14	Channels	8										
15	Samples	100										
16	Date	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013	26/06/2013
17	Time	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2	59:32,2
18	X_Dimension	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time
19	X0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
20	Delta_X	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
21	***End_of_Header***											
22	X_Value	I Eolienne	V Eolienne	I Onduleur	V Onduleur	PV	V PV (Filtré)	Batteries	V Batteries	Comment		
23	0	-1,915693	21,728703	-0,039559	-38,170458	1,249479	7,344841	0,697922	0,856123			
24	0,001	-1,109263	22,016803	-0,202566	-103,318715	1,25145	15,466599	2,500652	4,462545			
25	0,002	-0,003737	14,72067	0,261694	-157,729536	1,341999	23,9021	3,120417	10,900637			
26	0,003	-0,06668	9,181918	-0,56501	-197,424633	1,380225	32,6698	9,111281	17,50458			

Figure IV.22 Fichier d'enregistrement sous Excel

## Conclusion

Dans ce chapitre on a procédé à l'acquisition des données en temps réel des paramètres électrique utilisons une carte de type **PCI** et le logiciel Labview, afin d'évaluer les performances de notre système.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire et qui été réaliser au laboratoire L.T.I.I à pour but l'étude d'un système éolien en fonctionnement autonome, en traquant le maximum de puissance qu'on peut extraire d'une turbine éolienne, basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur une charge par une interface d'électronique de puissance.

Vue de l'importance de l'énergie éolienne, on s'est intéressé dans l'ensemble des chapitres à la simulation d'un modèle d'une chaine de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée, ou on a donné des différents couplages possibles aussi quelques méthodes de recherche de point de puissance maximal.

Dans un second temps nous avons abordés la modélisation des différentes constitutions du système de conversion d'énergie éolienne étudié, à savoir la turbine, la machine synchrone à aimants permanents, le redresseur et la batterie.

Ensuite, une simulation de la turbine avec MPPT classique a fait l'objet, qui a pour but de monter le comportement da la turbine. Aussi une commande vectorielle a été établie pour prédire le comportement du système lors de l'imposition d'un couple de référence afin d'optimiser la puissance extraite et enfin une gestion de puissance de l'énergie provenant de l'éolienne et du stockage suivant la puissance exigé par la charge, Les résultats obtenus sont discutés.

Dans un dernier temps, une acquisition des données en temps réel des paramètres électrique de la chaine de conversion éolienne été faite afin d'évaluer les performances de notre système.

En perspective, nous souhaitons étudié d'autres méthodes MPPT et de les implanter sous dspace.



# Références Bibliographiques

- [1] **S. MAKHTOUB** << Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne>> mémoire d'ingénieur d'état.  
Ecole Nationale Polytechnique ,2007
- [2] **K.IDJDARENE** << Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes >> Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010
- [3] **N.HAMDI** << Modélisation et commande des génératrices éoliennes>>  
Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2008
- [4] **R. SWISHER, C. REAL DE AZUA, J. CLENDENIN**, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [5] **R.REDJEM** << Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne>> Thèse Magister Université Mentouri de Constantine, 2009
- [6] **S.EL AIMANI** « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [7] **O. DE VRIES** "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [8] **D.DJEMAA** << Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne>> Thèse Magister Université El-hadj lakhdhar – Batna, 2010

- [9] **A. MIRECKI** « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.
- [10] **L. LECLERCQ** « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un Réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [11] **F. POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.
- [12] **H.ARANTZMENDI** «Etude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisés», Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [13] **F. A. FARRET, B. PALLE ET M. G. SIMOES** « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 152, No 1, January 2005.
- [14] **D. SEYOUM, M. F. RAHMAN ET C. GRANTHAM** « Terminal voltage control of a Wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field Control », Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'03), Eighteenth Annual IEEE, vol. 2, Miami Beach, 9-13 Février 2003, pp. 846-852.
- [15] **O. GERGAUD, B. MULTON ET H. BEN AHMED** « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance », Electrotechnique du Futur, Nancy, France, 14-15 Novembre 2001, pp. 1-6.

[16] **H. CAMBLONG** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[17] **Z.ROUMILA** «Commande d'un système d'énergie hybride » (Photovoltaïque - éolien- diesel), Thèse de Magister, Université de Bejaia, 2009

[18] **L. CHANG** « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.

[19] **B. ROBYNS, B. FRANÇOIS, F. DEGOBERT ET J. P. HAUTIER** « Commande Vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la Logique floue », Editions Technip, France, Juillet 2007.

[20] **M.LOPEZ** « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université paris-sud 11, 2008

[21] **A. SCHMIDHOFER, H. WEISS** « Optimization of Power Electronics for small Stand alone wind power stations », 10<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

[22] **A. ABDELLI** « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.

[23] **D. REKIOUA, K. IDJDARENE, T. REKIOUA ET A. TOUNZI** « Vector controlled strategy of an autonomous induction generator: modeling and simulation », International Conference on Modeling and Simulation (ICMS'05), Marrakech, Maroc, 22-24 November 2005, pp. 1-5.

[24] **O.GERGOUD** « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé a un accumulateur» Thèse de doctorat de L'ENS de Cachan France, 2002

[25] **J. MARTIN** « Energies éoliennes », Techniques de l'ingénieur, vol. B 1360,1990

[26] **J.THONHAM, O.MOHAND** «Méthode de control MPPT de vent de système de conversion d'énergie», département de l'énergie renouvelable STAS Inc2Electric machines identification and control laboratory, departement of applied science ; university of quebec, at chicoutimi, quebec, canada

[27] **ZHUQIANG LU , HONGGANG SHENG, HERBERT L.HESS, KEVIN M BUCK,** «The modeling and simulation of permanenet megnet synchronous motor with direct torque control based on Matlab/Simulink», University of Idaho, Moscow, Odaho USA, 2005 IEEE, pp.7803-8987.

[28] **F.MEIBODY-TABAR** « Machines synchrones a aimants permanant alimentés par onduleur de tension ; Modélisation, Commande et segmentation de puissance », habilitation à diriger des recherche, Nancy, France, 2000.

[29] **S.HAMECHA** « Etude et Commande d'une éolienne a base d'une machine synchrone a aimant permanent » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou

- [30] **M.LA DRGUA**, projet de coopération scientifique interuniversitaire (PCSI) financé par l'agence universitaire et la Francophonie (AUF), groupe de recherche en Electrotechnique et Automatique de l'université du Havre, France
- [31] **THOMAS ACKERMANN**, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.
- [32] **JEAN CHATELAIN**, Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [33] **M.SELLAH** « Etude et optimisation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne» Thème d'ingénieur d'état de l'université A. Mira Bejaia, 2011
- [34] **LAVERDURE N** « Sur l'Intégration des Générateurs Eoliens dans les Réseaux Faibles ou Insulaires », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2005.
- [35] **S.ALLOUNE, K.IDJDARENE**, « Etude de la commande vectorielle de la machine synchrone double étoile », Mémoire d'ingénieure, université A. Mira Bejaia, 2002
- [36] **A. Maroun Msaed**, « Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intègre » Thèse institut polytechnique de Grenoble, 2009.
- [37] **HTTP://sine .ni.com/nips/cds/view/p/lang/fr/nid/14128.**

## Annexes

### Paramètres de la turbine :

- La puissance nominale :  $P_t = 1 \text{ KW}$
- Rayon :  $R = 1.05 \text{ m}$
- Le gain de multiplicateur de vitesse :  $G = 1$
- La vitesse nominale :  $W_n = 65 \text{ rd/s}$

### Paramètres de la machine synchrone

Les paramètres électriques :

- Le Rotor est un aimant permanent
- Nombre de paire de pole :  $P = 5$
- $R_s = 0.5 \Omega$
- $L_s = 0.016 \text{ H}$
- Le flux :  $\varphi = 0.148 \text{ Wb}$

Les paramètres mécaniques :

- $J = 0.021 \text{ Kg.m}^2$
- $f = 0 \text{ N/rd.s}^{-1}$