

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

TAMISSA HOURIA

TOUTI NARIMANE

Thème:

**Comparaison entre les techniques d'extraction  
de puissance MPPT appliquées à une éolienne  
hybride**

Soutenu publiquement

Le : 04/06/2017

Devant le jury :

M<sup>r</sup> DJARAH DJALAL

MC (A)

Président

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> MEGHNI BILLEL

MA (A)

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M<sup>r</sup> TAIBI DJAMEL

MA (B)

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2016/2017

# Remerciement

*Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier le promoteur **B. MEGHNI** d'avoir accepté de nous encadrer et sans qui ce travail n'aurait jamais eu lieu. Je le remercie pour sa disponibilité, pour ses éclaircissements scientifiques, ainsi que pour ses précieux conseils et surtout pour m'avoir laissé une grande liberté dans la conception et la rédaction de ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participer au jury d'explication de ce travail.*

*Je tiens également à remercier tous les enseignants et les fonctionnaires du ministère de la Génie électrique de l'Université de OUARGLA pour leur et collègues de notre promotion (2016/2017), et spécialement **2<sup>eme</sup> année Master Électrotechnique Industrielle** qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère et très cher père, leurs patiences et leurs confiances. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi  
« que Dieu vous garde et vous bénisse ».*

*Mon très cher frère, Mes très chères sœurs et Mes tante Tous  
la famille Tamissa et Sebihi.*

*Tous mes amis (chacun dans son nom), en particulier  
(Narimane) mon binom dans la réalisation de ce travail.*

*J'adresse aussi mes sincères remerciements à l'ensemble des  
enseignants de l'université d'Ouargla et Toute ma  
promotion.*

*Je remercie également toute personne ayant  
contribué de près ou de loin à la réalisation  
de ce travail.*

**TAMISSA HOURIA**



# Dédicace

*Je tiens à dédier ce modeste travail :*

*A ma très Chère Mère "kamília badís" et à mon cher Père "necer", en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs Soutien permanent durant toutes mes années d'étude, leur sacrifices illimité, leurs réconfort moral, eux qui ont Consentí tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectation sans limite. A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

*A mes chère frère " Nadír et Nessíme" et mes sœurs "Níhad et Nessríne"*

*Toute ma famille. A mes chers Amies "Marwa , Síham , Bicha , hazar , salma , youcef , Madjeda , Bahía et Manel hobi, en particulier Houría"*

*Mes tantes " Síham et Amel" et Toute mes cousines, A ceux qui ont cru à Moí, Et à ceux qui croient à moi, Et à ceux qui croiront à toujours en moi. A vous tous.*

**TOUTI NARIMANE**



---

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I :

**Figure I.1** Aérogénérateur convertie les énergies.

**Figure I.2** Puissance éolienne installée annuelle mondiale.

**Figure I.3** Aérogénérateur à axe vertical structure Darrieus.

**Figure I.4** Aérogénérateur à axe verticale structure Savonius.

**Figure I.5** Aérogénérateur à axe horizontal à marche lente.

**Figure I.6** Aérogénérateur à axe horizontal à marche rapide.

**Figure I.7** Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval.

**Figure I.8** Éléments constituant une éolienne.

**Figure I.9** Éolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

**Figure I.10** Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

**Figure I.11** Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.

**Figure I.12** Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

## CHAPITRE II :

**Figure II.1** Système de conversion éolienne 'hybride' (éolienne à vitesse variable / batteries).

**Figure II.2** Déplacement du vent dans éolienne à axe horizontal.

**Figure II.3** Limite de Betz.

**Figure II.4** Vitesse du vent  $v$  et vitesse tangentielle  $R_t\Omega_t$ .

**Figure II.5** Coefficient de puissance pour différents types de turbine éolienne.

---

**Figure II.6** Allures des coefficients  $C_p$  et  $C_t$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$ .

**Figure II.7** Modèle de l'arbre de l'éolienne.

**Figure II.8** Représentation d'une machine synchrone.

**Figure II.9** Schémas équivalent d'un GS.

**Figure II.10** Passage du repère naturel abc du stator au repère d q de Park.

**Figure II.11** Le schème global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

**Figure II.12** Schéma électrique du bus continu.

**Figure II.13** Convertisseur de tension fonctionnant en mode onduleur.

**Figure II.14** Schéma électrique de batterie.

**Figure II.15** Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.

### **CHAPITRE III :**

**Figure III.1** Le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne englobe.

**Figure III.2** Commande de convertisseur côté générateur.

**Figure III.3** Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance vitesse de rotation.

**Figure III.4** La caractéristique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ .

**Figure III.5** Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR).

**Figure III.6** Schéma block de la méthode de MPPT par contrôle optimale de couple (OTC).

**Figure III.7** Algorithme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

**Figure III.8** Méthode de perturbation et d'observation du MPPT.

**Figure III.9** Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la GSAP commandée par l'orientation du flux.

**Figure III.10** Description des couplages.

**Figure III.11** Découplage par compensation.

---

**Figure III.12** Commande découplée.

**Figure III.13** Commande des courants en deux boucles indépendantes.

**Figure III.14** Commande de la vitesse.

**Figure III.15** Courbe de vitesse du vent (m/s).

**Figure III.16** MPPT TSR (a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.

**Figure III.17** MPPT OTC (a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.

**Figure III.18** MPPT P&O(a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.

**Figure III.19** (a) courant direct et quadrature de GSAP, (b) tension direct et quadrature de GSAP et (c) les trois courant à l'entrée de redresseur.

**Figure III.20** Puissance électrique et puissance mécanique.

**Figure III.21** Couple électromagnétique et couple mécanique.

**Figure III.22** Diagramme de blocs de contrôle de la batterie ESS.

**Figure III.23** Tension de bus continue DC (a) des puissances (b) soc (c).

**Figure III.24** Diagramme du contrôle des puissances coté réseau.

**Figure III.25** La puissance de réseau (a) courant de réseau phase a.

---

# LISTE DES TABLEAUX

## INTROGUCTION GENERALE

**Tab .0.1** Capacité de production des énergies renouvelables en 2004, 2012 et 2013 en (GW) [0.7].

## CHAPITRE I

**Tableau I.1** Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh).

**Tableau I.2** Comparaison Des Eolienne à vitesse fixe et vitesse variable.

## CHAPITRE III

**Tab III.1** Les performances des trois méthodes MPPT.

**Tab III.2** Les caractéristiques des trois méthodes MPPT.

---

# ACRONYMES ET ABREVIATIONS

VAWT	Vertical axis Wind turbine.
HAWT	Horizontal axis Wind turbine.
MAS	Machine Asynchrone.
MS	Machine synchrone.
MADA	Machine Asynchrone double alimentation.
GSAP	Générateur synchrone aiment permanent.
MSAP	Machine synchrone aiment permanent.
DC	Direct curent.
AC	Alternatif curent.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
ESR	Equivalent Séries Resistance.
MPPT	Maximum power point tracking.
TSR	Tip speed ratio.
P&O	Perturbe and observe.
OTC	Optimum torque control.
FOC	Flux oriented control.
SOC	Etat de charge.
PI	Proportionnelle intégrale
SCEE	système de conversion l'éolienne éolienne.

---

# NOMENCLATURE

$m$	La masse d'air.
$\rho$	La masse volumique d'air ( $\text{kg/m}^3$ ).
$S$	La section ( $\text{m}^2$ ).
$V_1$	La vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne ( $\text{m/s}$ ).
$V_2$	La vitesse du vent après passage à travers le rotor ( $\text{m/s}$ ).
$P_m$	La puissance extrait du vent ( $w$ ).
$P_{mt}$	La puissance totale théoriquement ( $w$ ).
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$\lambda$	La vitesse spécifique ou normalisée.
$\lambda_{opt}$	Le coefficient de vitesse réduite optimale.
$R_t$	Rayon de la turbine ( $m$ ).
$\Omega_t$	La vitesse mécanique de la turbine ( $\text{rad/s}$ ).
$V_v$	vitesse de vent ( $m/v$ ).
$\beta$	Angle de calage (degré).
$C_t$	Le coefficient de couple.
$T_m$	Couple mécanique.
$R_t$	Rayon de la turbine ( $m$ ).
$n_p$	Nombre des pales de l'éolienne.
$I$	Le range dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.
$\lambda_0$	Coefficient de puissance réduite initial.
$M$	Vitesse spécifique.

---

$W_k$	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k.
A	La valeur moyenne de la vitesse de vent.
$a_k$	Amplitude de l'harmonique de l'ordre k.
$T_{mec}$	Couple mécanique sur l'axe du générateur (Nm).
$T_{turbine}$	Couple de la turbine éolienne (Nm).
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire de la turbine.
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique de la génératrice.
J	L'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur.
$C_g$	Le couple issu du multiplicateur.
$C_{em}$	Le couple électromagnétique développé par le générateur.
$C_f$	Le couple résistant dû au frottement.
$E_{PN}$	fem induit à vide.
I	Courant de ligne (A).
V	Tension entre phase et neutre (V).
R	Résistance d'un enroulement statorique ( $\Omega$ ).
$X=L\omega$	Réactance synchrone d'un enroulement statorique.
$V_{abc}$	Les tensions des phases statorique (V).
$I_{abc}$	Les courants des phases statorique a,b,c (A).
$\Phi_{abc}$	Les flux produits par les phase statorique respectivement a,b,c (Wb).
$\Phi_{aa}$	Flux propre de la phase (a) sur (a) .
$\Phi_{ba}$	Flux mutuel de la phase (b) sur (a).
$\Phi_{ca}$	Flux mutuel de la phase (c) sur (a).

---

---

$\Phi_{fabc}$	Flux mutuel de l'aimant la phase (a), phase (b), phase (c).
$L_{sc}$	L'inductance cyclique d'un enroulement statorique (H).
$L_s$	L'inductance propre d'une phase statorique (H).
$M_s$	Mutuelle inductance entres phases du stator.
$V_{dq}$	Tension statorique sur l'axe direct et en quadrature (v).
$I_{dq}$	Courant statorique sur l'axe direct et en quadrature (A).
$\Phi_{dq}$	Flux statorique sur l'axe direct et en quadrature (Wb).
$(\theta)$	Transformation de park.
$(\theta)^{-1}$	Transformation inverse de park.
$\theta_s$	Position statorique.
$\Phi_f$	Flux d'excitation des aimants permanents (Wb).
$L_{d,q}$	Inductance d'axes direct et en quadrature (H).
$P$	Nombre de paires de pôles.
$C_e$	Couple électromécanique.
$C_r$	Couple résistance de la charge.
$I_{re}$	Courant de sortie redresseur (A).
$V_{dc}$	Tension du bus continue (v).
$I_{on}$	Courant de sortie onduleur (A).
$V_{ref}$	Tension de référence (V).
$R_s$	Résistance statorique ( $\Omega$ ).
$U_c$	Tension de bus continu (A).
$I_c$	Courant de bus continu (A).

---

---

$L_f$	Inductance du filtre (H).
$I_{t1,2,3}$	Courants circulant dans le filtre et fournis au réseau (A).
$V_{Lf}$	Tensions aux bornes de l'inductance du filtre (V).
$v_{Rf}$	Tensions aux bornes de la résistance du filtre (V).
$R_f$	Résistance de filtre ( $\Omega$ ).
$W_g$	Pulsation de réseau électrique.
$V_{dg,qg}$	Tension du réseau dans l'axe d et q (V).
$R_g$	Résistance de réseau ( $\Omega$ ).
$I_{dg,qg}$	Courant du réseau dans l'axe d et q (A).
$P_g$	Puissance active du réseau (W).
$Q_g$	Puissance réactive du réseau.
$C_{Bat}$	La capacité de stockage de la batterie.
$P_{eol}$	Puissance de générateur eolienne.
$P_L$	La charge demandée.
$\eta_{inv}$	Rendement de l'onduleur.
$\eta_{Bat}$	Rendement de batterie successivement.
$C_{Bmin,max}$	Capacité minimum et maximale de batterie.
$C_{Bat N}$	La capacité de stockage de batterie [AH].
DOD	La profond de décharge.
$N_a$	Le nombre de jour d'autonomie.
$V_{Bat}$	Tension de circuit ouvert (V).
$V_b$	La tension de système (V).
$N_b$	Rendement électrique des batteries.

---

---

$V_F$	La force électromotrice
$b$	Constant empirique
$I_{bat}$	Courant de batterie (A)
$R_{bat}$	Résistance interne de batterie ( $\Omega$ )

---

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art &amp; Description d'étude.....</b>	<b>7</b>
I.1 Introduction.....	8
I.2 L'énergie électrique éolienne .....	8
I.2.1 Bilan énergétique mondial.....	9
I.3 Types d'aérogénérateurs.....	10
I.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical VAWT .....	10
I.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus.....	10
I.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius.....	11
I.3.1.3 Avantages et inconvénient des aérogénérateurs à axe vertical.....	11
I.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal .....	12
I.3.2.1 Les éoliennes à marche lente .....	12
I.3.2.2 Les éoliennes à marche rapide.....	13
I.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal .....	14
I.4.1 Le rotor.....	14
I.4.2 Les pales.....	15
I.4.3 La nacelle.....	15
I.4.4 Les multiplicateur de vitesse .....	15
I.4.5 L'arbre secondaire.....	15
I.4.6 L'anémomètre .....	15
I.4.7 La girouette.....	15
I.4.8 La génératrice .....	15
I.5 Contrôle de la puissance fournie par une éolienne .....	15
I.5.1 Systèmes de control au niveau de la turbine .....	16
I.5.2 Contrôle au niveau de la génératrice .....	16
I.5.2.1 Eolienne à vitesse fixe .....	16
I.5.2.2 Eolienne à vitesse variable .....	17
I.5.2.3 Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable.....	17
I.5.2.4 Intérêt de la vitesse variable .....	17
I.6 Topologies de génératrices éoliennes à vitesse variable .....	18
I.6.1 Système utilisant une génératrice asynchrone.....	18

I.6.1.1	Avantages et inconvénients .....	18
I.6.2	Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation .....	19
I.6.2.1	Avantages et inconvénients .....	19
I.6.3	Système utilisant une génératrice synchrone.....	19
I.6.3.1	Avantages .....	20
I.7	Conclusion.....	20
I.8	Références bibliographiques .....	21
 <b>Chapitre II : Modélisation d'un système éolien à vitesse variable.....</b>		<b>23</b>
II.1	Introduction.....	14
II.2	Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique .....	24
II.2.1	La loi de Betz .....	24
II.2.2	Le coefficient de vitesse réduite TSR (tip-speed ratio).....	26
II.2.3	Le coefficient de puissance (power coefficient) $C_p$ .....	26
II.2.4	Le coefficient de couple (torque coefficient) $C_t$ .....	27
II.2.5	Courbes caractéristiques des turbines éoliennes .....	28
II.3	Modélisation de la turbine éolienne .....	29
II.3.1	Modélisation de vitesse du vent .....	29
II.3.2	Modèle de multiplicateur .....	29
II.3.3	Équation de l'arbre de transmission .....	30
II.4	Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent .....	30
II.4.1	Principe de fonctionnement des machines synchrones .....	30
II.4.2	Avantages de l'utilisation des machines synchrones .....	31
II.4.3	Circuit équivalent d'un générateur synchrone .....	31
II.4.4	Hypothèses simplificatrices .....	32
II.4.5	Équations électriques dans un repère naturel .....	32
II.4.6	Passage au repère de Park .....	34
II.4.7	Équations magnétiques.....	35
II.4.8	Puissance et couple électromagnétique .....	36
II.4.9	Équation mécanique .....	36
II.5	Modèles du convertisseur de puissance .....	36
II.5.1	Modélisation d'un redresseur MLI dans le repère naturel .....	37
II.5.1.1	Modèle en triphasé .....	38

---

II.5.1.2	Modèle dans le référentiel de Park.....	38
II.5.2	Modélisation du bus continu .....	38
II.5.3	Onduleur de tension côté réseau .....	39
II.5.3.1	Modèle en triphasé .....	39
II.5.3.2	Modèle dans le référentiel de Park.....	40
II.5.4	Modélisation du filtre .....	40
II.5.4.1	Modélisation du filtre dans le repère de Park.....	40
II.5.5.	Modélisation du réseau électrique.....	40
II.6	Modélisation de stockage .....	41
II.6.1	Modèle de la charge de la batterie.....	41
II.6.2	Modèle de la décharge de la batterie.....	41
II.7	Modélisation d'un hacheur Buck-Boost.....	43
III.8.	Conclusion.....	44
II.10	Références bibliographiques .....	45
 <b>Chapitre III : Expérimentation et résultat.....</b>		<b>47</b>
III.1	Introduction.....	48
III.2	Description général de système de contrôle .....	48
III.2.1	commande d'un convertisseur coté générateur.....	49
III.3	MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	49
III.3.1	Les différentes méthodes de MPPT .....	50
III.3.2	MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne	51
III.3.2.1	MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR) .....	51
III.3.2.2	MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC) .....	52
III.3.3	MPPT sans la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne	53
III.3.3.1	MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O) .....	54
III.4	Commande vectorielle de la GSAP par MLI.....	55
III.4.1	Description du système global.....	55
III.4.1.1	Découplage.....	56
III.4.1.2	Calcul des régulateurs de courant .....	58
III.4.1.3	Calcul de régulateur de vitesse .....	59
III.5	Les Résultats des simulations .....	59
III.5.1	Commande de convertisseur coté générateur .....	59

---

---

III.6 Contrôle du convertisseur (BSC).....	65
III.7 Contrôle de convertisseur coté de réseau.....	68
III.8 Conclusion.....	70
III.9 Les Références.....	71
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>73</b>
<b>Bibliographique.....</b>	<b>75</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>80</b>

## Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie [0.1]. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables [0.2]. Plusieurs sources des énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche, dont le but est de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique [0.2], [0.3]. Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels [0.4] : C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin de produire toujours d'énergie de manière plus propre et plus durable.

La combustion d'énergie fossile est la première activité humaine responsable de l'émission de gaz à effet de serre. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation humaine d'énergie fossile a rejeté 22639 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2000 [0.5].

Les rejets de la combustion des carburants représentent les trois quarts des émissions humaines de dioxyde de carbone. La concentration de ce gaz dans l'atmosphère augmente régulièrement. Actuellement, ce taux est de 0.0365% contre 0.028% au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle (+ 30%). Le deuxième gaz à effet de serre est le méthane (CH<sub>4</sub>), dont la concentration a doublé sur la même période. Ses émissions sont générées par l'agriculture (élevage et rizière), les activités énergétiques (fuites de gaz et industrie charbonnière) et les déchets ménagers [0.5], [0.6].

La capacité de production d'énergie à partir de sources renouvelables (y compris l'hydroélectricité) a atteint un nouveau record à 1 849 gigawatts (GW) fin 2015, ce qui représente une augmentation de 8,7% par rapport à 2014. Par conséquent, les énergies renouvelables représentent plus d'un cinquième (22%) de la production énergétique mondiale, derrière les énergies fossiles plus le nucléaire.

Au niveau de la consommation, les énergies renouvelables ont assuré 19% de la consommation finale d'énergie dans le monde en 2012 (78,4 % pour les énergies fossiles et 2,6 % pour le nucléaire) ; cette tendance s'est encore accentuée en 2013. Les énergies

---

renouvelables modernes ont représenté plus de 10% du total de 2012, les 9% restant provenant de la biomasse traditionnelle dont la part recule sensiblement [0.7].

**Tab .0.1** : Capacité de production des énergies renouvelables en 2012 / 2015 en (GW) [0.7].

<b>Energie</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Hydroélectricité</b>	960	1000	1036	1064
<b>Géothermie</b>	11,5	12	370	433
<b>Solaire photovoltaïque</b>	100	139	177	227
<b>Solaire thermique concentré</b>	2,5	3,4	4 ,3	4,8
<b>Eolien</b>	283	318	101	106
<b>Biomasse</b>	83	88	12,9	13,2
<b>TOTAL</b>	1440	1560	1701	1849

L'énergie éolienne (avantage par rapport d'autre forme d'énergie) La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [0.8], [0.9]. Cette énergie a connu depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers [0.2], [0.8]. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [0.10].

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages par rapport autre énergie.

- Est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du  $CO_2$ .

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [0.11].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [0.11].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [0.12].

Ainsi, l'objectif principal de nos travaux de mémoire est d'étudier les techniques de commande modernes et efficaces appliqués aux éoliennes hybride à vitesse variable à base de GSAP, pour atteindre plusieurs objectifs (maximisation, optimisation et gestion de la production d'énergie de vent, assure la demande de la charge quel que soit la vitesse de vent). Par optimisation, nous entendons non seulement l'amélioration de la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique mais aussi l'assurance d'une injection efficace de la puissance électrique vers le réseau. Ce qui aurait pour conséquence de rendre possible la fabrication des aéro-turbines plus légères améliorant de ce fait la productivité. Pour ce faire, le mémoire sera organisé en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet nous présentons dans un premier temps un état de l'art sur l'énergie éolienne hybride à travers une revue de la littérature disponible. Nous évoquons les différentes technologies éoliennes usuellement utilisées dans le domaine, Puis, nous abordons plus spécifiquement la question des chaînes éoliennes à vitesse variable, ainsi que les méthodes de contrôle utilisées pour maximiser leur efficacité énergétique. Le but étant qu'à la fin de ce chapitre, le type de générateur utilisé dans cette mémoire soit clairement identifié.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons d'abord la conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique (loi de betz, coefficient de vitesse réduit, coefficient de puissance). Ainsi nous décrirons et modéliserons la turbine éolienne hybride à vitesse variable basé sur GSAP; Nous modéliserons chaque élément indépendamment de l'autre (vent, turbine éolienne, multiplicateur, arbre mécanique, GSAP, convertisseur de puissance et batterie). Nous procéderons à la mise en équation de la GSAP, afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de Park.

Dans le troisième chapitre, des techniques de commande des convertisseurs côté (générateur, batterie et réseau) ont été appliquée. Pour cela, dans la première partie nous démontrons en détails les différentes étapes de la commande appliquée au convertisseur côté GSAP pour extraire la puissance maximale. Ensuite, trois techniques MPPT ont été étudiées et comparées exhaustivement. Enfin et pour chaque partie de contrôle nous présenterons les résultats de simulation avec les discussions de chaque courbes.

## Références bibliographiques

- [0.1]G. Cognet, P. Hesto, J.-L. Houzelot, Ch. Rombaut, J. Taine, B. Tamain, « L'énergie au XXIème siècle Une réflexion prospective Une analyse des verrous scientifiques et technologiques à lever », <http://www.recherche.gouv.fr/mstp/MRNT/MSTP/01-200>.
- [0.2] « Perspectives d'offre d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 -2005, [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
- [0.3]MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [0.4]Guy Cunty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-Provence, 2001, [www.edisud.com](http://www.edisud.com).
- [0.5]M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [0.6]Mons, L. Les enjeux de l'énergie, Larousse, France. (2005).
- [0.7]Source : notre-planete.info, <http://www.notre-planete.info/actualites/4047-energies-renouvelables-dynamisme>. <http://www.notre-planete.info/actualites/4047-energies-renouvelables-dynamisme>.
- [0.8] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [0.9]B. Sørensen, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Copyright. 2004 by Elsevier Science.
- [0.10] « Energies Renouvelables ». <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [0.11]HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [0.12]ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.

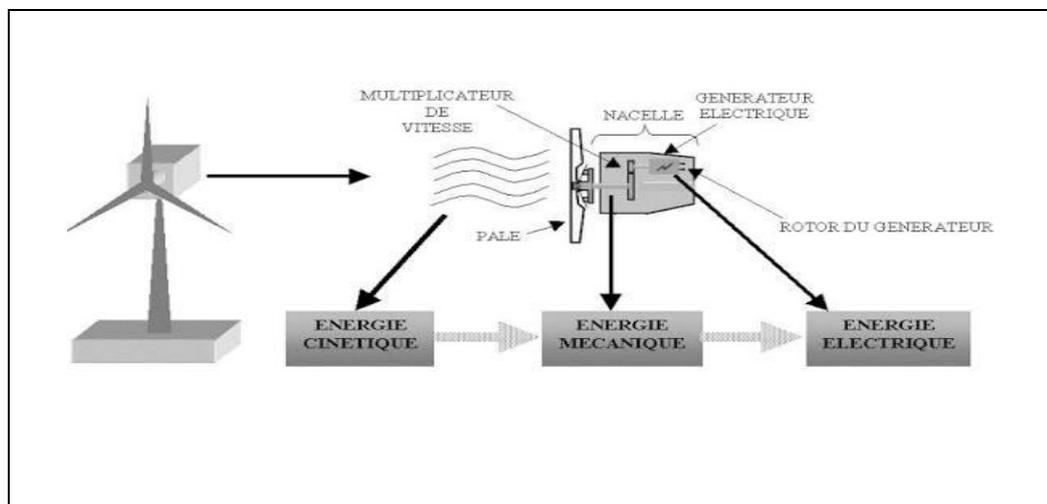
## I.1 Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes. Ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

## I.2 L'énergie électrique éolienne

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [I.1].

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40Kw
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 KW à quelques centaine de 1Kw
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1Mw



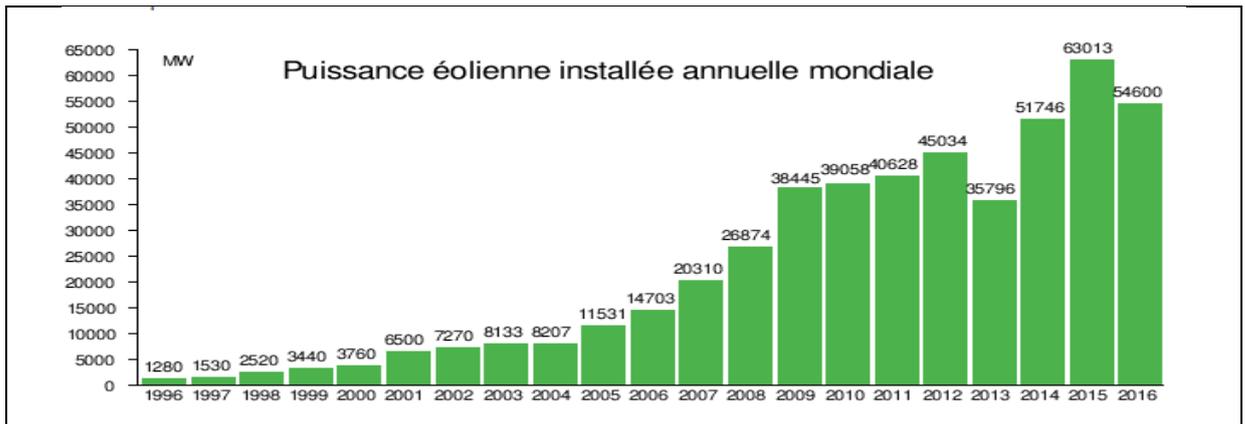
**Figure I.1** Aérogénérateur convertie les énergies.

### I.2.1 Bilan énergétique mondial

En 2014, la production mondiale d'électricité éolienne a atteint 717,8 TWh, en augmentation de 11,1 % par rapport à 2013 après +21,8 % de 2012 à 2013 ; elle représentait 3,0 % de la production totale d'électricité 33. En 2012, la production mondiale avait augmenté de 18,3 % par rapport à 2011 ; son taux moyen annuel d'accroissement depuis 10 ans a été de 26,1 % ; elle représentait 11,4 % de la production totale d'électricité renouvelable et 2,4 % de la production mondiale d'électricité 34. L'énergie éolienne est la deuxième source d'électricité renouvelable après l'hydraulique. L'Europe de l'Ouest est en 2012 la première région productrice avec 36,8 %, devant l'Amérique du Nord (28,6 %) et l'Asie de l'Est et du Sud-Est (23,3 %) ; l'Asie du Sud (5,6 %), l'Europe Centrale (2,1 %) et l'Océanie (1,5 %) ont amorcé leur démarrage depuis quelques années ; l'Amérique centrale (0,7 %), l'Afrique du Nord (0,4 %), l'Afrique Subsaharienne (0,04 %) et le Moyen-Orient (0,04 %) sont encore peu impliqués. La production a été multipliée par dix en une décennie ; les taux moyen de croissance sur 10 ans sont particulièrement élevés en Asie de l'Est et du Sud-Est (+57,5 % par an) et en Amérique du Nord (+30,4 %), qui rattrapent rapidement l'Europe de l'Ouest (+18,4 %). En 2012, la filière éolienne a été, après l'hydraulique, la seconde par sa contribution à la croissance de la production d'électricité renouvelable (30 %) 35 [I.2].

Pays	1990	2000	2010	2011	2012	2013	2014	%2014	2015p**
États-Unis	3,1	5,6	95,1	120,9	141,9	169,7	183,9	25,6	190,9
Chine	0,002	0,6	44,6	70,3	96,0	141,2	156,1	21,8	185,1
Allemagne	0,07	9,4	37,8	48,9	50,7	51,7	57,4	8,0	88,0
Espagne	0,014	4,7	44,3	42,9	49,5	55,6	52,0	7,3	48,4
Inde	0,03	1,7	19,7	24,5	30,1	33,6	37,2	5,2	41,4
Royaume-Uni	0,01	0,9	10,2	15,5	19,7	28,4	32,0	4,5	38,0
Canada	-	0,3	8,7	10,2	11,3	18,0	22,5	3,1	24,6
France	-	0,08	9,9	12,2	15,0	16,0	17,2	2,4	21,1
Italie	0,002	0,6	9,1	9,9	13,4	14,9	15,2	2,1	14,6
Danemark	0,6	4,2	7,8	9,8	10,3	11,1	13,1	1,8	14,1
Brésil	-	0,002	2,2	2,7	5,1	6,6	12,2	1,7	21,7
Portugal	0,001	0,17	9,2	9,2	10,3	12,0	12,1	1,7	11,9
<b>Total mondial</b>	<b>3,9</b>	<b>31,4</b>	<b>341,3</b>	<b>435,3</b>	<b>522,7</b>	<b>636,8</b>	<b>717,3</b>	<b>100</b>	<b>841,2</b>

**Tableau I.1** Evolution de la production d'électricité éolienne (TWh).



**Figure I.2** Puissance éolienne installée annuelle mondiale.

### I.3 Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types [I.3] :

- Les éoliennes à axe vertical (VAWT).
- Les éoliennes à axe horizontal (HAWT).

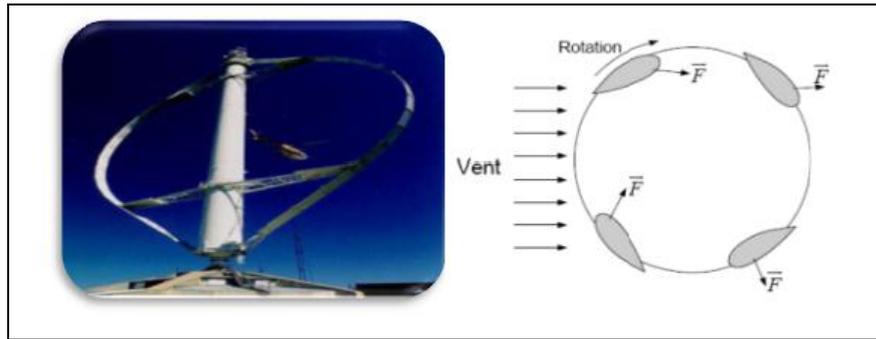
#### I.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical VAWT

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles :

Les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrius : conçu par l'ingénieur français George Darrius) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924) [I.4].

##### I.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrius

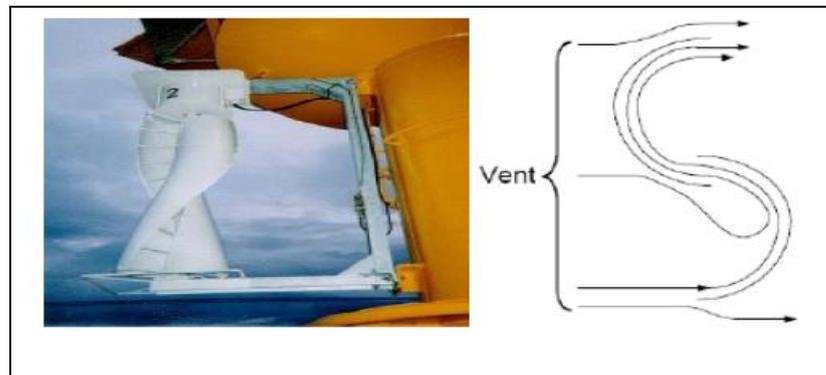
Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation de ce profil (Figure I.3) La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



**Figure I.3** Aérogénérateur à axe vertical structure Darrieus.

### I.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure I.4).



**Figure I.4** Aérogénérateur à axe verticale structure Savonius.

### I.3.1.3 Avantages et inconvénient des aérogénérateurs à axe vertical

#### ➤ Les Avantages

- Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de surface.
- Fonctionnement indépendant du sens du vent.
- Adéquat pour les toits de d'immeuble.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

#### ➤ Les inconvénients

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Solutions limité pour la régulation an cas de rafale de vent.
- Rendement moins fable.
- Fluctuation importante de couple et forte vibration mécaniques.

### **I.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal**

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [I.6]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [I.7]. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.

➤ **Les avantages d'aérogénérateur à axe horizontale**

- Fort rendement de conversion d'énergie.
- Régulateur de la puissance via décrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales.
- Accès au vent plus fort.

➤ **Les inconvénients**

- Systèmes d'orientation requis.
- Les câbles plus long du haut de la tour jusqu'à la terre.
- Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle.

#### **I.3.2.1 Les éoliennes à marche lente**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multiples sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [I.8].



**Figure I.5** Aérogénérateur à axe horizontal à marche lente.

### I.3.2.2 Les éoliennes à marche rapide

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [I.9].



**Figure I.6** Aérogénérateur à axe horizontal à marche rapide.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal à **marche rapide**:

➤ **Aval :**

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle le rotor est flexible, auto orientable

➤ **Amont :**

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par dispositif.

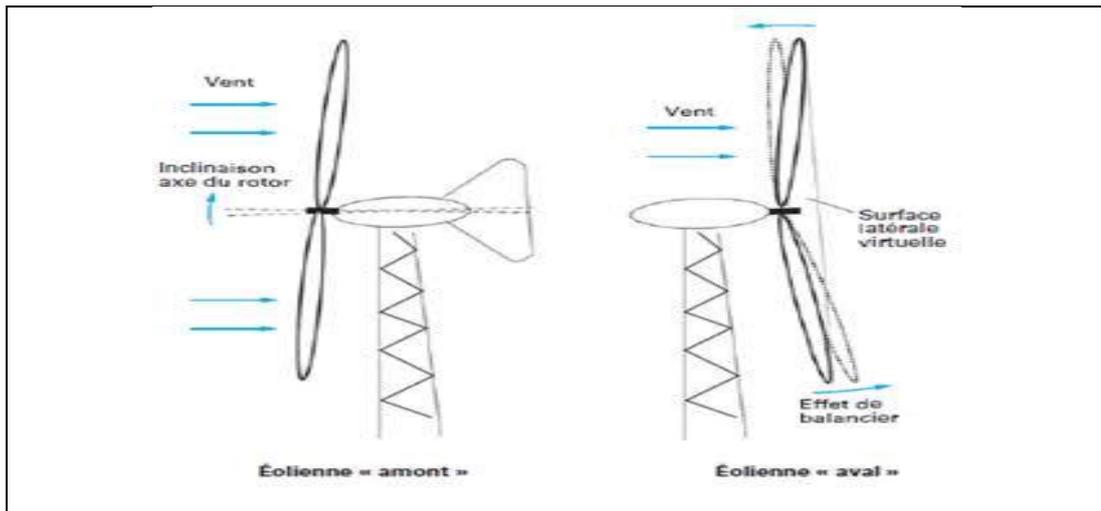


Figure I.7 Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont et en aval.

#### I.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal [I.10] [I.11]

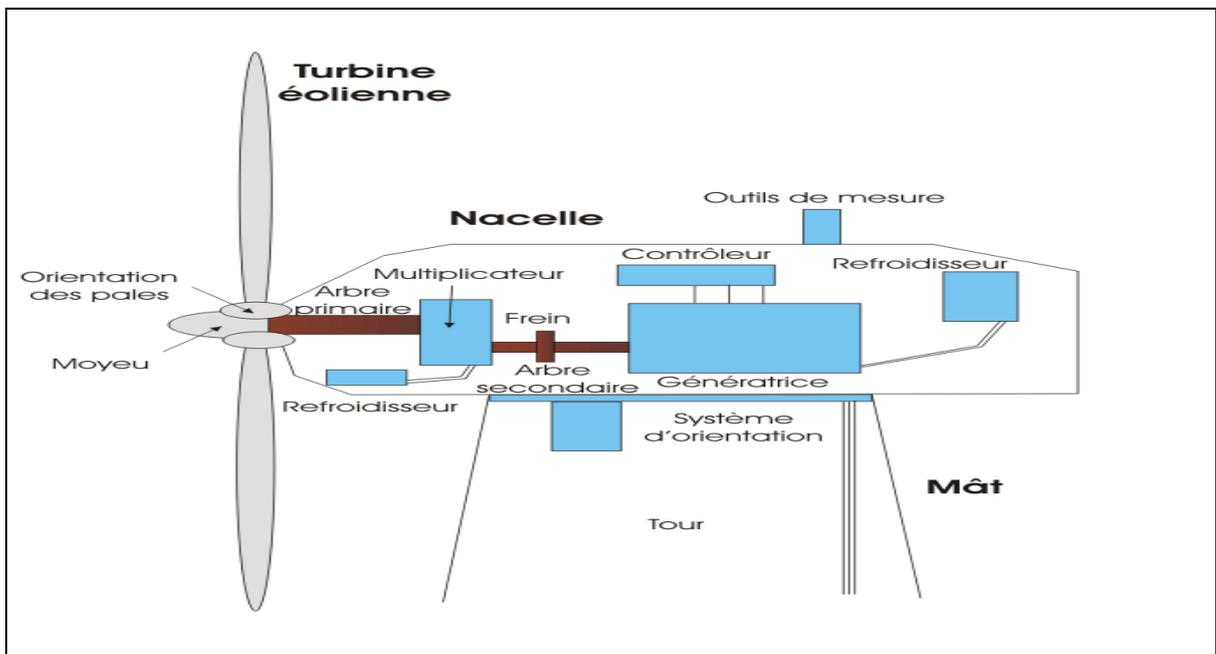


Figure I.8 Éléments constituant une éolienne.

##### I.4.1 Le rotor

Transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines une installation hydraulique permet de réguler le fonctionnement du mécanisme (pas des pales variable freinage du rotor). L'énergie est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent.

### **I.4.2 Les pales**

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

### **I.4.3 La nacelle**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique

### **I.4.4 Les multiplicateur de vitesse**

Sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

### **I.4.5 L'arbre secondaire**

L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

### **I.4.6 L'anémomètre**

Il mesure la vitesse du vent. Relier à un système de contrôle, il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir, voire d'arrêter l'éolienne si le vent est très fort.

### **I.4.7 La girouette**

La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et 3 coupoles captant le vent et entraînant rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

### **I.4.8 La génératrice**

C'est l'élément principal de la conversion mécano électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

## **I.5 Contrôle de la puissance fournie par une éolienne**

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes :

- La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- La vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice par un multiplicateur (de 750 à 3000 tr/min).
- La génératrice convertit, enfin l'énergie mécanique en énergie électrique, transmise ensuite directement ou indirectement au réseau électrique.

Le contrôle de la puissance fournie peut se faire soit au niveau de la turbine soit au niveau de la génératrice [I.12].

### I.5.1 Systèmes de control au niveau de la turbine

Ce moyen de contrôle permet essentiellement de limiter la puissance pour les vents forts.

### I.5.2 Contrôle au niveau de la génératrice

Le contrôle au niveau de la génératrice permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau. [I.13].

#### I.5.2.1 Eolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixes sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles du générateur. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, d'une fiabilité et d'un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de kW de générateur éolien. Cependant, avec la mise en place de très nombreux projets d'éolien dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développent à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure I.9. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, du multiplicateur de vitesse et de la génératrice [I.14].

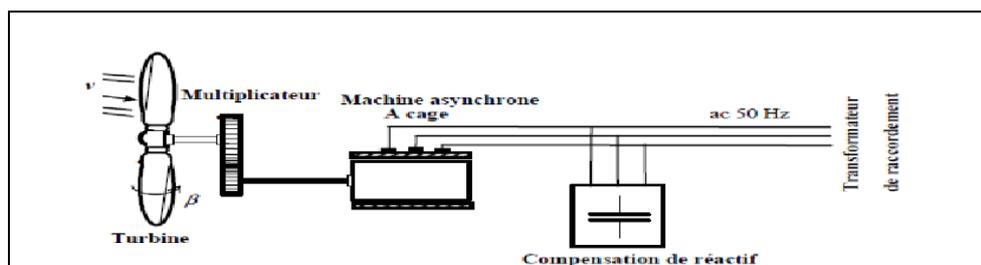


Figure I.9 Éolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

### I.5.2.2 Eolienne à vitesse variable

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure I.11. Est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure I.12. est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situé au circuit rotorique [I.15].

### I.5.2.3 Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable

Le tableau suivant explique la différence entre les éoliennes à vitesse fixe et vitesse variable :

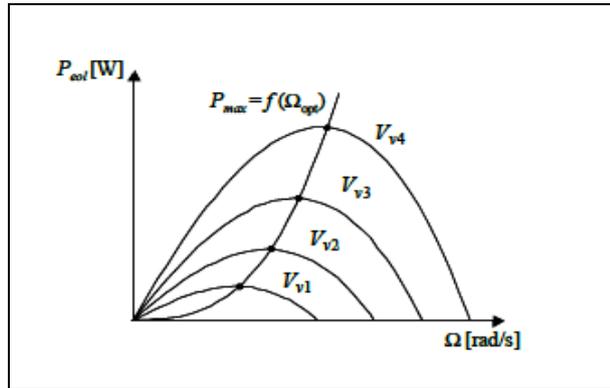
Les éoliennes à vitesse fixe	Les éoliennes à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité du système électrique.</li> <li>• Plus grande fiabilité.</li> <li>• Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne.</li> <li>• Moins cher.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation du rendement énergétique.</li> <li>• Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance</li> <li>• Réduction des efforts subis par le train de puissance.</li> <li>• Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de la vitesse nominale).</li> </ul>

**Tableau I.2** Comparaison des éoliennes à vitesse fixe et vitesse variable.

### I.5.2.4 Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes de la variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent (voir Figure. I.10), il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent. Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique. Montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Nous verrons dans ce qui suit

différents ensembles convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie.



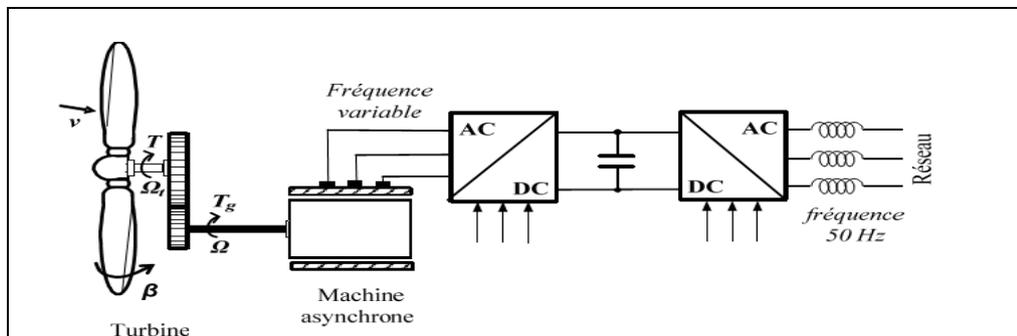
**Figure I.10** Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

## I.6 Topologies de génératrices éoliennes à vitesse variable

Les trois types de topologies indéniables pour des éoliennes à vitesses variables sont : la Machine Asynchrone (MAS) avec deux convertisseurs sont alors dimensionner pour la pleine Puissance avec un multiplicateur de vitesse (voir Figure. I.11), la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) (voir Figure. I.12) et la Machine Synchrone (MS) avec et sans réducteur de vitesse [I.13].

### I.6.1 Système utilisant une génératrice asynchrone

L'éolienne dans cette configuration entraîne un générateur asynchrone connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce que permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constant la tension du bus continu [I.17].



**Figure. I.11** Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.

#### I.6.1.1 Avantages et inconvénients

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale

### I.6.2 Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique (Fig. I.12). La du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotorique [I.14].

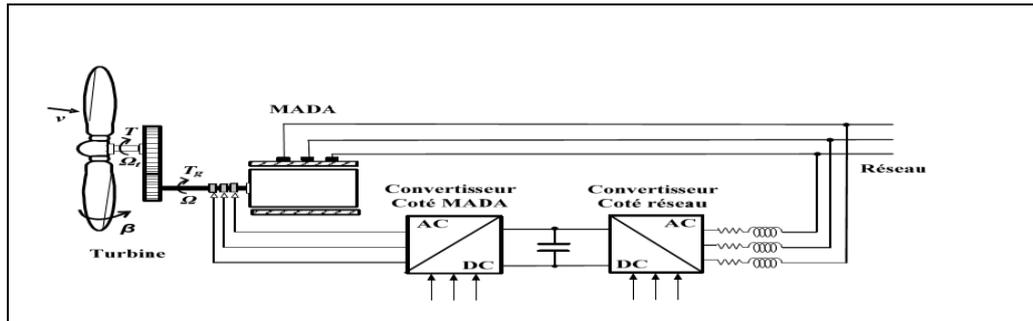


Figure I.12 Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

#### I.6.2.1 Avantages et inconvénients

##### ➤ Les avantages :

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale.
- Fonctionnement à vitesse variable (30% de la vitesse nominale).

##### ➤ Les inconvénients :

- Maintenance du multiplicateur.
- Commande complexe.
- Oscillations mécaniques.

### I.6.3 Système utilisant une génératrice synchrone

Malgré toutes les caractéristique et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenable. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pole est important.

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que les champs statorique. Ainsi, si

l'alternateur est connecté au réseau ; sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statorique.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion.

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électrique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [I.15].

### **I.6.3.1 Avantages**

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Absence de boîte de vitesse.
- Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse.

## **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices synchrones aiment permanent.

## I.8 Références bibliographiques

[I.1] Etude d'un aérogénérateur GERGAUD, Olivier. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. 2002. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.

[I.2] cite internet <http://wikipedia.org/wiki/energie.eolienne>.

[I.3] <http://tpe-eolienne-85.e-monsite.com/pages/i-generalites/b-differents-types.html>.

[I.4] THIÉRY, J. P. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fine en microscopie électronique. J. Microsc., Fr, 1967, vol. 6, p. 987-1018.

[I.5] BOSSARD, J., FRANC, J. P., MAÎTRE, T., et al. Mesures PIV du champ de vitesse dans une hydrolienne tripale de type Darrieus-Comparaison avec les simulations numériques. Congrès Francophone de Techniques Laser (Vandoeuvre-lès-Nancy), 2010.

[I.6] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 19-12-2003.

[I.7] A.Mirecki, "Étude Comparative de chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Éolienne de Petite Puissance", Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005

[I.8] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-a1/02/eoliennes-axe-horizontal.html>.

[I.9] KEITA, IBRAHIM A. COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE. 2010

[I.10] SMAÏL, M. A. et BENATIALLAH, A. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne équipée d'une machine asynchrone double alimentation. Revue des Energies Renouvelables ICES, 2011, vol. 11, p. 233-238.

[I.11] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.

[I.12] BILLEL, Meghni. Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne. 1955. Thèse de doctorat. Université de Tébessa.

[I.13] ABU-TABAK, Nesmat. Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation. 2008. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon.

[I.14] POITIERS, Frédéric. 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. 2003. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

[I.15] BELAKEHAL, S., BENTOUNSI, A., MERZOUG, M., et al. Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010, vol. 13, no 1, p. 149-161.

[I.16] CARON, Jean-Pierre et HAUTIER, Jean-Paul. *Modélisation et commande de la machine asynchrone*. Technip, 1995.

[I.17] MACHMOUM, M., POITIERS, F., MOREAU, L., et al. Etude d'éolienne à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA). GE44, Polytechnic Institute of Nantes, France, 2003.

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose de modéliser la chaîne de conversion hybride éolienne à vitesse variable qui intègre un générateur synchrone à aimant permanent connecté au réseau électrique à travers deux convertisseurs AC/DC/AC, ce système est pris en charge par un système de stockage basé sur une batterie plomb d'acide. Dans ce chapitre nous modéliserons de chaque élément indépendamment de l'autre, pour le préparer à la simulation de la chaîne éolienne hybride complète avec les différents algorithmes de commande appliqués au chapitre III.

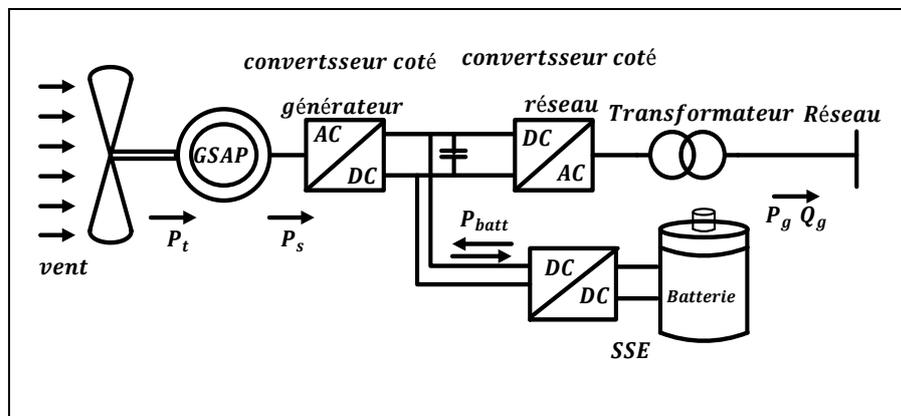


Figure II.1 Système de conversion éolienne 'hybride' (éolienne à vitesse variable / batteries)

## II.2 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

### II.2.1 La loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II.1, sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$ .



Figure II.2 Déplacement du vent dans éolienne à axe horizontal.

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.1})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression (équation II.2):

$$P_m = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1^2 + V_2^2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.3})$$

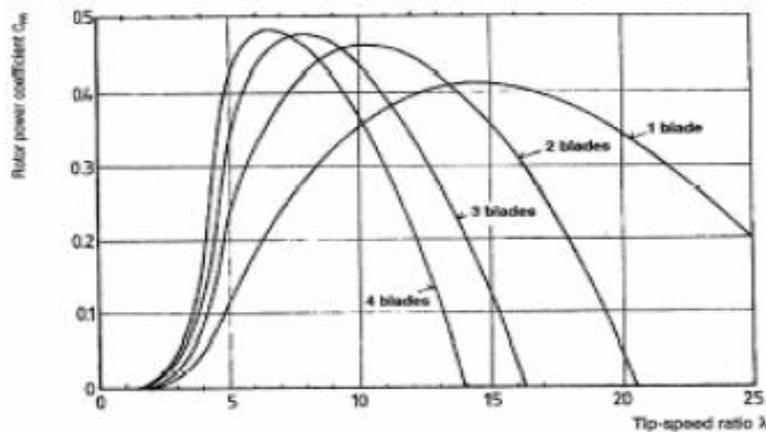
Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance théorique  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot s \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} = C_p \quad (\text{II.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure, on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum de  $16/27$ .



**Figure II.3** Limite de Betz.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse du vent [II.2].

### II.2.2 Le coefficient de vitesse réduite TSR (tip-speed ratio)

Pratiquement le coefficient  $C_p$  dépend de deux facteurs principaux, premièrement de l'angle  $\beta$  de calage ou de décrochage des pales de l'éolienne, et deuxièmement de la vitesse spécifique  $\lambda$  nommée aussi rapport d'avance ou paramètre de rapidité (en anglais TSR pour Tip Speed Ratio), il est défini comme étant le rapport en la vitesse de la bordure de la pale par rapport à la vitesse du vent.

$$\text{Alors : } \lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \quad (\text{II.6})$$

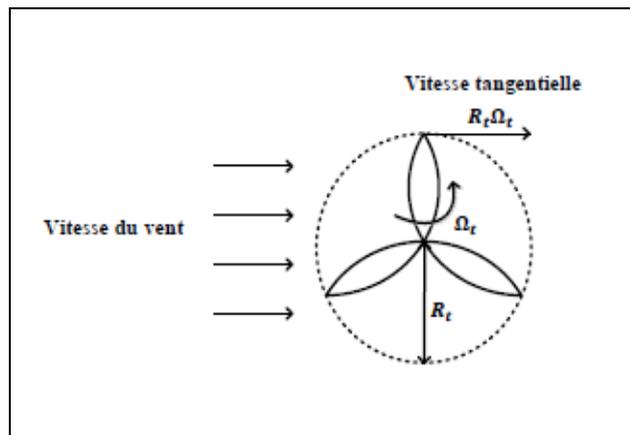


Figure II.4. Vitesse du vent  $v$  et vitesse tangentielle  $R_t \Omega_t$ .

### II.2.3 Le coefficient de puissance (power coefficient) $C_p$

On définit alors ce qu'on appelle un coefficient de puissance comme étant le rapport de la puissance de l'éolienne divisée par la puissance du vent.

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \quad (\text{II.7})$$

Alors, il faut garder à l'esprit la théorie de BETZ qui dit qu'on ne peut pas récupérer 100 % de l'énergie mais qu'au maximum on va pouvoir récupérer 0,59 fois la puissance du vent [II.3]. Autrement dit, on voit bien entre la relation :

$$P_m = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S C_p v_1^3 \quad (\text{II.8})$$

Alors en fait, une éolienne réelle pourra récupérer moins que 59 % de l'énergie ou de la puissance du vent. Donc ici, dans ce transparent, dans cette figure II.5, nous avons répertorié l'ensemble de toutes les éoliennes, qu'elle soit à axes vertical ou à axe horizontal. Le coefficient  $C_p$  est une grandeur variable en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ , la valeur

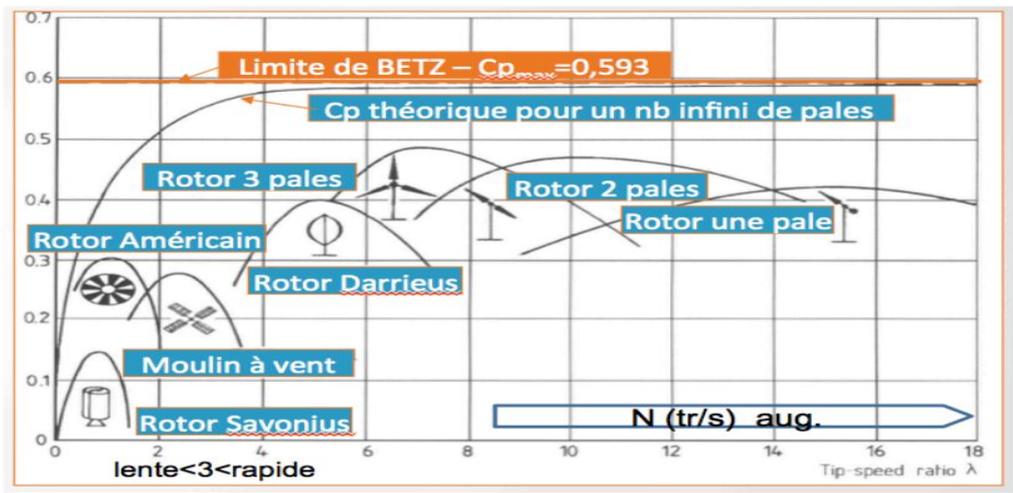
maximale théorique possible de la puissance et l'angle de calage  $\beta$ . Ce coefficient de puissance est différent pour chaque éolienne comme indiqué sur la Figure. II.5 [II. 3].

$$c_p(\lambda, \beta) = \sum_{i=0}^{n_c} a_i \lambda_i \quad (\text{II.9})$$

Dans ce travail nous avons appliqué une forme sinusoïdale de  $C_p(\lambda, \beta)$ , qui a été proposé par [II. 3, II. 4 et II. 5].

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.073 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.058\beta - 0.002\beta^{2.14} - 1.32 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Ou } \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^2 + 1}} \quad (\text{II.11})$$



**Figure II.5** Coefficient de puissance pour différents types de turbine éolienne.

## II.2.4 Le coefficient de couple (torque coefficient) $C_t$

Le coefficient de couple est fort utile afin de calculer la valeur des couples produits pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation  $\Omega_t$  nulle. En effet, au démarrage, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (\text{II. 12})$$

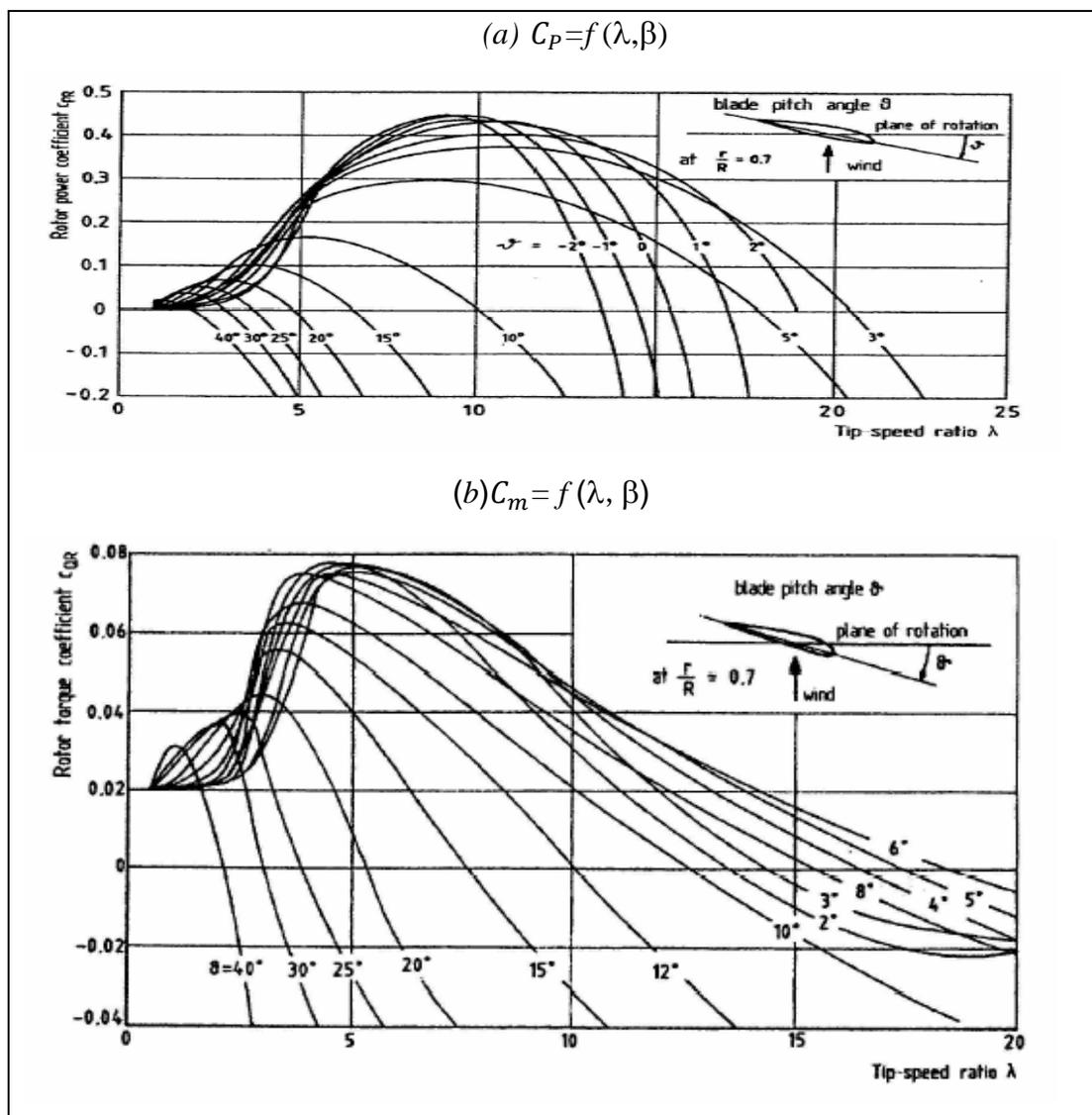
Et alors, la valeur du coefficient de couple  $C_t$  est déterminée par la formule suivante :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_m}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2} \quad (\text{II. 13})$$

Le coefficient  $C_t$  s'exprime, comme le coefficient  $C_p$ , en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , donc en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  [II. 4].

### II.2.5 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les deux coefficients de puissance  $C_p$  et de couple  $C_t$  et en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation dans la zone trois où la vitesse de vent est plus grande. L'allure de coefficient  $C_p$  et  $C_t$  change donc pour chaque angle décalage  $\beta$  comme représenté dans la Figure. II.6 [II.5].



**Figure II.6** Allures des coefficients  $C_p$  et  $C_t$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$ .

## II.3 Modélisation de la turbine éolienne

### II.3.1 Modélisation de vitesse du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle et où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.

La modélisation de vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- Développer et affiner la modélisation du rotor.
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- Fournir une aide l'implantation des machines.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et que la période de l'an concernée par l'étude, le modèle du vent est donné par une représentation en série de fourrier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques.

Il est donné par [II. 6] :

$$v_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(b_k \cdot w_k t) \quad (\text{II. 14})$$

Avec :

$A$  : la valeur moyenne de la vitesse du vent;  $a_k$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$ ;  $b_k$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$ .

### II.3.2 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$T_{mec} = \frac{T_{turbine}}{G} \quad (\text{II. 15})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II. 16})$$

Dans notre étude, nous supposons que le rapport de multiplicateur  $G = 1$ , donc la turbine est

liée directement au générateur donc :  $\left\{ \begin{array}{l} \Omega_t = \Omega \\ T_G = T_m \end{array} \right\}$

### II.3.3 Équation de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.17)$$

$J$  : l'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur, comprenant l'inertie de la turbine, du générateur, des deux arbres, et du multiplicateur.

$f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique, le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_f \quad (II.18)$$

$$C_f = f\Omega_{mec} \quad (II.19)$$

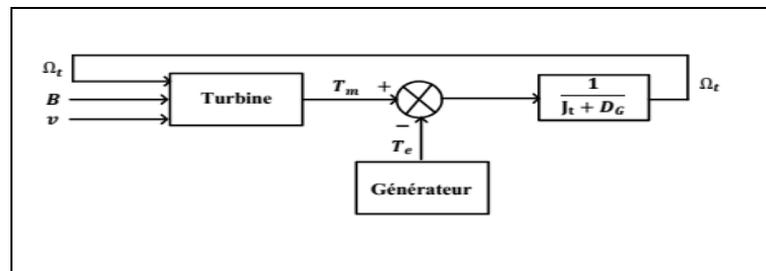


Figure II.7 Modèle de l'arbre de l'éolienne.

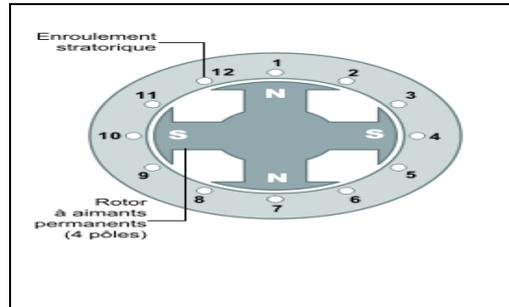
## II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de  $120^\circ$  électrique et au rotor des aimants permanents assurant son excitation [II. 7].

### II.4.1 Principe de fonctionnement des machines synchrones

Le machine synchrone se compose comme le machine asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. la seule différence se suit au niveau de la conception du rotor. La

figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimant permanents ou d'électro-aimant alimentés en courant continu.



**Figure II. 8** Représentation d'une machine synchrone.

Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge [II. 7][II.8] , on notera aussi que :

- La charge ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.

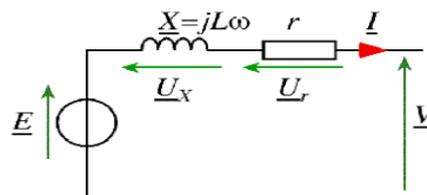
#### II.4.2 Avantages de l'utilisation des machines synchrones

La machine synchrone à aimants permanents en surface semble être le meilleur choix pour le moteur-roue. Ces machines ont effectivement des avantages non négligeables :

- Rapports couple/masse et puissance/masse élevés.
- Très bon rendement.
- Moindre usure et moins de frais d'entretien (pas de balais, ni charbons).

#### II.4.3 Circuit équivalent d'un générateur synchrone

Pour étudier génératrice triphasé, on modélise l'une de ses phases par une f.é.m.  $E_{PN}$  en série avec une résistance  $R$  et une réactance synchrone  $X = L\omega$ .



**Figure II.9** Schémas équivalent d'un GS

$E_{PN}$ : fem induite à vide;  $I$  : courant de ligne ;  $V$  : tension entre phase et neutre ;  $r$  : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y) ;  $X = L\omega$  : réactance synchrone d'un enroulement statorique.

#### • Remarques

$X$  est proportionnelle à la vitesse de rotation. Elle tient compte de la réactance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit. En pratique  $X \gg r$ .

#### II.4.4 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier l'étude, la modélisation de la MSAP nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices [II. 5].

- ✓ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre les flux et les courants.
- ✓ Nous négligeons l'hystérésis du circuit magnétique et les pertes par courants de Foucault.
- ✓ La variation des résistances en fonction de la température est négligeable.
- ✓ Nous admettons que les forces magnétomotrices sont à distribution spatiale sinusoïdale.

#### II.4.5 Équations électriques dans un repère naturel

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents en convention récepteur et en absence d'enroulements amortisseurs s'écrivent :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + \left(\frac{d}{dt}\right) \begin{pmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{pmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\Phi_{abc}] \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

$R$  : Résistance d'un enroulement statorique.

$I_{abc}$  : Les courants des phases statorique a, b, c.

$\Phi_{abc}$ : Les flux produits par les phases statorique respectivement a, b, c.

$V_{abc}$ : Les tensions des phases statoriques.

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par les aimants dans les trois phases statoriques (a, b, c) sont donnés par :

$$\begin{cases} \Phi_{fa} = \Phi_{max} \cos(\theta) \\ \Phi_{fb} = \Phi_{max} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \Phi_{fc} = \Phi_{max} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

Le flux produit dans chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes. Comme exemple, pour la phase (a), le flux ( $\Phi_a$ ) est la somme des termes :

**$\Phi_{aa}=L_s \cdot i_a$** : Flux propre de la phase (a) sur (a).

**$\Phi_{ba}=M_s \cdot i_b$** : Flux mutuel de la phase (b) sur (a).

**$\Phi_{ca}=M_s \cdot i_c$** : Flux mutuel de la phase (c) sur (a).

**$\Phi_{fa}$**  : Flux mutuel de l'aimant sur la phase (a).

L'expression du flux total dans la phase (a) est donnée par :

$$\Phi_a = \Phi_{aa} + \Phi_{ba} + \Phi_{ca} + \Phi_{fa} = L_s \cdot i_a + M_s (i_b + i_c) + \Phi_{fa} \quad (\text{II. 23})$$

Du fait que la machine est équilibrée à neutre isolé, on a ( $i_a+i_b+i_c=0$ ), d'où l'expression du flux dans la phase (a) se réduit alors à :

$$\Phi_a = (L_s - M_s) \cdot i_a + \Phi_{fa} = L_{sc} \cdot i_a + \Phi_{fa} \quad (\text{II. 24})$$

Avec :

$$L_{sc} = L_s - M_s$$

$L_{sc}$ : L'inductance cyclique d'un enroulement statorique.

$L_s$  : L'inductance propre d'une phase statorique.

$M_s$ : Mutuelle inductance entre phases du stator.

Par conséquent, les expressions des flux dans les autres phases se déduisent par :

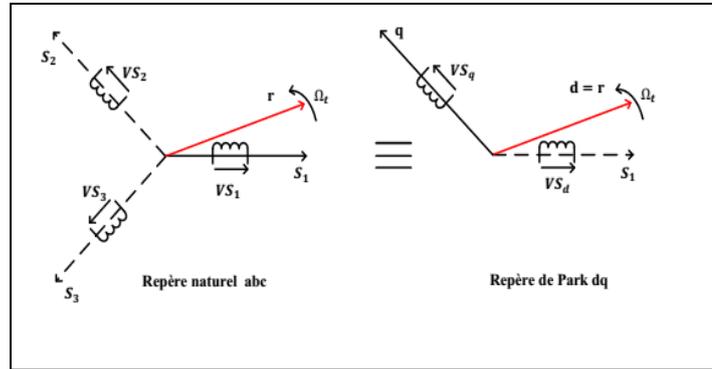
$$\begin{cases} \Phi_b = L_{sc} \cdot i_b + \Phi_{fb} \\ \Phi_c = L_{sc} \cdot i_c + \Phi_{fc} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant les expressions des flux dans le système des tensions. On obtient :

$$\begin{cases} V_a = -R \cdot i_a - L_{sc} \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \\ V_b = -R \cdot i_b - L_{sc} \cdot \frac{di_b}{dt} - \frac{d\Phi_{fb}}{dt} \\ V_c = -R \cdot i_c - L_{sc} \cdot \frac{di_c}{dt} - \frac{d\Phi_{fc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

### II.4.6 Passage au repère de Park

Pour supprimer la non linéarité des équations du modèle précédentes, nous utilisons la transformation de Park qui consiste à remplacer les enroulements des phases (a, b, c) par deux enroulements (d, q) dont les axes magnétiques sont solidaires au rotor et tournant avec lui avec une vitesse  $\Omega_r$ , comme le représente la figure II.11.



**Figure II.10** Passage du repère naturel abc du stator au repère d q de Park.

Où X représente la valeur courant, tension ou flux et  $\theta$  représente la position du rotor. Les termes  $X_d$ ,  $X_q$  représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (tensions, courants, flux et inductances).

La matrice de transformation  $p(\theta)$  est donnée par:

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

Dont la matrice inverse est la suivante:

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Le moteur est supposé avec une connexion étoile qui forme un système équilibré  $i_a+i_b+i_c=0$ . Ainsi, la composante homopolaire désignée par la troisième ligne de la matrice ( $X_o$ ) est nulle.

En appliquant la transformation (II.28) au (II. 21) système on aura:

$$[P]^{-1}V_{dq} = [R] \cdot [P]^{-1}[I]_{dq} + \frac{d}{dt} \{ [P]^{-1}[\Phi]_{dq} \} \quad (\text{II.29})$$

En multipliant l'équation à gauche par  $[P(\theta)]$  :

$$\begin{aligned}
 [P][P]^{-1}[V_{dq}] &= [P][R][P]^{-1}[I_{dq}] + [P] \frac{d}{dT} \{ [P]^{-1}[\Phi_{dq}] \} \\
 &= [P][R][P]^{-1}[I_{dq}] + [P] \left( [P]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + \frac{d}{dt} [P]^{-1} [\Phi_{dq}] \right) \\
 &= [P][R][P]^{-1}[I_{dq}] + [P][P]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + [P] \frac{d}{dt} [P]^{-1} [\Phi_{dq}]
 \end{aligned} \tag{II. 30}$$

Finalement :

$$[V_{dq}] = [R][I_{dq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + [P] \frac{d}{dt} [P]^{-1} [\Phi_{dq}] \tag{II. 31}$$

On démontre que :

$$[P] \frac{d}{dt} [P]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \tag{II. 32}$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement diphasé équivalent :

Au stator :

$$\begin{cases} v_d = R \cdot i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \phi_q \frac{d\theta}{dt} \\ v_q = R \cdot i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \phi_d \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \tag{II. 33}$$

#### II.4.7 Équations magnétiques

D'après les équations (II.22), (II.27), (II. 29). nous avons :

$$[\Phi_{dq}] = [P(\theta_s)][L][P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq}] + \Phi_f \tag{II. 34}$$

**D'où :**

$$\Phi_d = L_d I_d + \Phi_f$$

$$\Phi_q = L_q I_q$$

$L_d, L_q$ : Inductances d'axes directe et en quadrature. La machine étant supposée à pôles lisses, ce qui signifie que :  $L_d = L_q$ .

En tenant compte des équations du flux, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_d = R i_d + L_d \frac{di}{dt} - \Phi_q \frac{d\theta}{dt} \\ v_q = R i_{sq} + L_q \frac{di_q}{dt} + \Phi_d \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

#### II.4.8 Puissance et couple électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande.

L'équation du couple :

$$C_{em} = \frac{2}{3} P (i_d i_q - \Phi_f i_q) \quad (\text{II. 36})$$

#### II.4.9 Équation mécanique

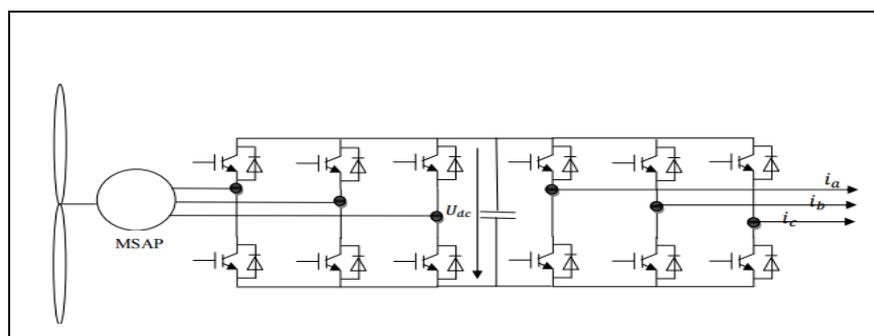
L'équation du mouvement s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (\text{II. 37})$$

$J$  : moment d'inertie du rotor ;  $f$  : coefficient de frottement visqueux ;  $C_r$  : couple résistant de la charge.  $p$  : Nombre de paires de pôles.

### II.5 Modèles du convertisseur de puissance

L'onduleur de tension représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. L'onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu (DC) en un signal de sortie alternatif (AC). Il a la même structure que le redresseur à MLI. La commande des états passant et bloqué des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI [II. 9].



**Figure II.11** Le schéma global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

### II.5.1 Modélisation d'un redresseur MLI dans le repère naturel

Dans l'étude de l'ensemble commande – machine – redresseur - charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le cote continu. Ensuite la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteur; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [II. 10] :

$$S_i = \begin{cases} +1, \bar{S}_i = -1 \\ -1, \bar{S}_i = +1 \end{cases} \text{ Pour } i = 1, 2, 3 \quad (\text{II. 38})$$

En notant,  $V_{rei}$  les tensions simples triphasées aux bornes du redresseur.  $V_{sa}, V_{sb}$  et  $V_{sc}$  Présente les tensions induites dans les phases du stator de la génératrice.

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{re1}}{dt} + I_{re1} R_s = V_{sa} - V_{re1} \\ L_s \frac{di_{re2}}{dt} + I_{re2} R_s = V_{sb} - V_{re2} \\ L_s \frac{di_{re3}}{dt} + I_{re3} R_s = V_{sc} - V_{re3} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{red} - I_{on} \\ I_{red} = \sum_1^3 \frac{U_i I_{rei}}{2} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

On désigne par  $S_i$  la fonction de commutation relative à l'interrupteur haut du bras  $B_i$ . Celle-ci est prise égale à 1 si l'interrupteur correspondant est fermé et à -1 s'il est ouvert.

$$\begin{bmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

On procède alors à un changement de variables sur les commandes:

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 41})$$

Ceci permet de mettre le modèle sous une forme découplée, chaque fonction de commutation  $W_i$  N'affectant que le courant correspondant  $I_{rei}$ .

$$\begin{cases} L_s \frac{dI_{re1}}{dt} + I_{re1}R_s = V_{sa} - S_1 \frac{V_{DC}}{2} \\ L_s \frac{dI_{re2}}{dt} + I_{re2}R_s = V_{sb} - S_2 \frac{V_{DC}}{2} \\ L_s \frac{dI_{re3}}{dt} + I_{re3}R_s = V_{sc} - S_3 \frac{V_{DC}}{2} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{red} - I_{on} \\ I_{red} = \sum_1^3 \frac{S_i I_{rei}}{2} \end{cases} \quad (\text{II. 42})$$

### II.5.1.1 Modèle en triphasé

On note :

$$\begin{cases} L_s \frac{dI_{re1}}{dt} + I_{re1}R_s = V_{sa} - S_1 \frac{V_{DC}}{2} \\ L_s \frac{dI_{re2}}{dt} + I_{re2}R_s = V_{sb} - S_2 \frac{V_{DC}}{2} \\ L_s \frac{dI_{re3}}{dt} + I_{re3}R_s = V_{sc} - S_3 \frac{V_{DC}}{2} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = \sum_1^3 \frac{S_i I_{rei}}{2} - I_{on} \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

### II.5.1.2 Modèle dans le référentiel de Park

On obtient dans ce cas :

$$\begin{cases} L_s \frac{dI_{red}}{dt} + I_{red}R_s = V_{sd} - S_d \frac{V_{DC}}{2} \\ L_s \frac{dI_{req}}{dt} + I_{req}R_s = V_{sq} - S_q \frac{V_{DC}}{2} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{red} - I_{on} \\ I_{red} = \frac{1}{2} [S_d I_{red} - S_q I_{req}] \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

## II.5.2 Modélisation du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif. La capacité joue le rôle de réservoir lors de l'échange d'énergie et permet de limiter l'ondulation de la tension du bus DC [II. 11].

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{II. 45})$$

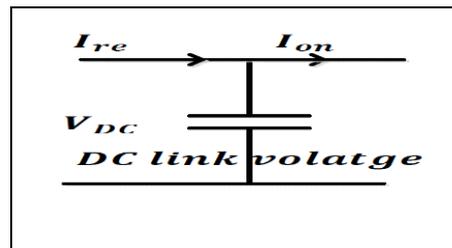


Figure II. 12 .Schéma électrique du bus continu.

Le courant du condensateur est issu d'un nœud circulant deux courants modélés par chaque convertisseur figure II. 13 :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II. 46})$$

On a également :

$$u_c = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (\text{II. 47})$$

Où  $u(t_0)$  est la valeur de la tension à l'instant initial  $t_0$ .

### II.5.3 Onduleur de tension côté réseau

Le courant en sortie des convertisseurs n'est pas sinusoïdal mais il sera filtré. En effet, introduit un filtrage de la tension générée par l'onduleur à l'aide du filtre  $R_f$ ,  $L_f$ .

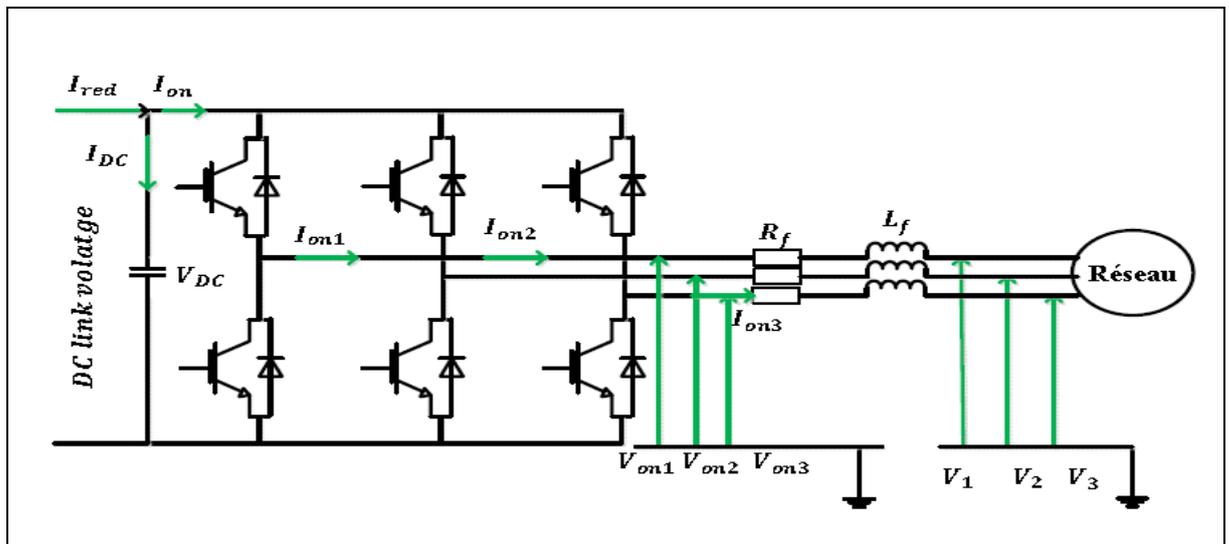


Figure II.13 Convertisseur de tension fonctionnant en mode onduleur.

#### II.5.3.1 Modèle en triphasé

On note :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{on1}}{dt} + I_{on1} R_s = V_1 - V_{on1} \\ L_f \frac{di_{on2}}{dt} + I_{on2} R_s = V_2 - V_{on2} \\ L_f \frac{di_{on3}}{dt} + I_{on3} R_s = V_3 - V_{on3} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{ron} - I_{red} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i I_{oni}}{2} - I_{red} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

### II.5.3.2 Modèle dans le référentiel de Park

On obtient dans ce cas :

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{ond}}{dt} + I_{ond}R_f = V_{sd} - S_d \frac{V_{DC}}{2} \\ L_f \frac{dI_{onq}}{dt} + I_{onq}R_f = V_{sq} - S_q \frac{V_{DC}}{2} \\ C \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{on} - I_{red} \\ I_{on} = \frac{1}{2}[S_d I_{ond} - S_q I_{onq}] \end{cases} \quad (\text{II. 49})$$

### II.5.4 Modélisation du filtre

#### II.5.4.1 Modélisation du filtre dans le repère de Park

Les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations (II.48) donne :

$$\begin{cases} V_{ond} = R_f I_{td} + L_f \frac{d}{dt} I_{td} - L_f \omega_g I_{tq} + V_d \\ V_{onq} = R_f I_{tq} + L_f \frac{d}{dt} I_{tq} - L_f \omega_g I_{td} + V_q \end{cases} \quad (\text{II. 51})$$

### II.5.5 Modélisation du réseau électrique

Le modèle dynamique de la connexion au réseau, en repère tournant en synchronisme avec la tension du réseau, est donnée comme suit :

$$V_{dg} = V_{di} - R_g I_{dg} - L_{dg} \frac{dI_{dg}}{dt} + L_{qg} \omega_g I_{qg} \quad (\text{II. 52})$$

$$V_{dq} = V_{qi} - R_g I_{qg} - L_{qg} \frac{dI_{qg}}{dt} + L_{dg} \omega_g I_{dg} \quad (\text{II. 53})$$

Les puissances active et réactive peuvent être obtenues à partir des équations suivantes:

$$P_g = \frac{3}{2} V_{dg} I_{dg} \quad (\text{II. 54})$$

$$Q_g = \frac{3}{2} V_{dq} I_{qg} \quad (\text{II. 55})$$

## II.6 Modélisation de stockage

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Le système de stockage utilisé dans une installation éolienne est une batterie d'accumulateur au plomb. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de batterie et super condensateur qui ont été proposés. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur éolienne et la charge demandée [II.12].

### II.6.1 Modèle de la charge de la batterie

Quand la puissance de générateur éolienne est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être décrite par :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left( P_{eol}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} \right) \cdot \eta_{Bat} \quad (II. 56)$$

$C_{Bat}(t)$  et  $C_{Bat}(t-1)$  Sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps ( $t$ ) et ( $t-1$ ) respectivement,  $\sigma$  est le taux horaire de la charge spontanée,  $P_{eol}$  est la puissance du générateur éolienne,  $P_L$  est la charge demandée au temps  $t$ ,  $\eta_{inv}$  et  $\eta_{Bat}$  sont les rendements de l'onduleur et de la batterie successivement. est augmente jusqu' 100%, par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie est diminués [II.13].

### II.6.2 Modèle de la décharge de la batterie

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps  $t$  peut être exprimée comme suite :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left( \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} - P_{eol}(t) \right) \quad (II. 57)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

$$C_{Bat \min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat \max} \quad (II. 58)$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ( $C_{Bat \min} = C_{Bat \max}$ ) et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD):

$$C_{Bat \min} = \text{DOD} \cdot C_{Bat N} \quad (II. 59)$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge. Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%. La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie [II.13] [II.14]. Elle peut être estimée par la relation suivante :

$$C_{Bat} = \frac{E_l - N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{déch} \cdot DOD} [\text{Wh}] \quad (\text{II. 60})$$

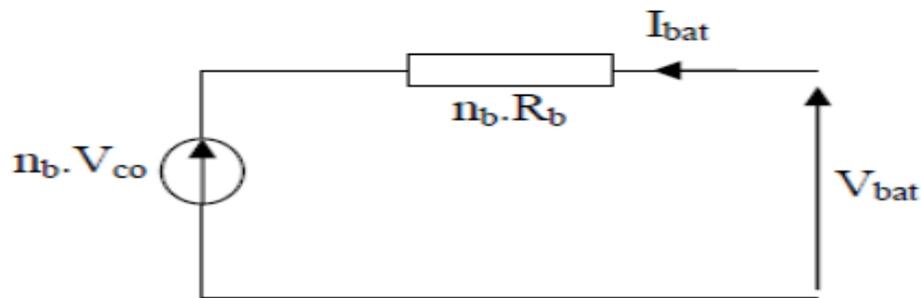
$$C_{Bat} [\text{Ah}] = \frac{C_{Bat}}{V_b} [\text{Wh}] \quad (\text{II. 61})$$

Avec

$C_{Bat}$ : La capacité de stockage de la batterie ;  $N_a$  : Le nombre de jour d'autonomie ;  $V_b$ : La tension du système ; DOD : la profondeur de décharge.

**a) Tension de la batterie :**

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge. Le schéma électrique de la batterie est représenté dans la figure (II.16).



**Figure II.14** Schéma électrique de batterie.

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{Bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{Bat}(t) \cdot R_{Bat}(t) \quad (\text{II. 62})$$

Où  $V_{Bat}(t)$  est la tension de circuit ouvert au temps t, et  $R_{Bat}(t)$  (t) est la résistance interne de batterie, la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge.

Tel que :

$$V_{co}(t) = VF + b \cdot \log(\text{SOC}(t)) \quad (\text{II. 63})$$

Où VF est la force électromotrice ; b est un constant empirique. La variation de en fonction de l'état de charge (SOC).

**b) Courant de batterie :**

Quand la puissance du générateur éolienne est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par :

$$I_{Bat} = \frac{P_{eol}(t)}{V_{Bat}(t)} - \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} \quad (II.64)$$

Quand la puissance du générateur éolienne ne peut pas rencontrer la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :

$$I_{Bat} = \frac{E_L(t)/\eta_{inv}}{V_{bat}(t)} - \frac{P_{eol}(t)}{V_{Bat}(t)} \quad (II.65)$$

## II.7 Modélisation d'un hacheur Buck-Boost

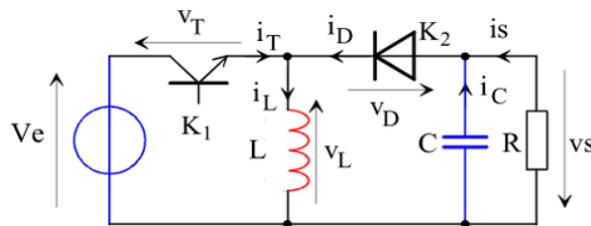
En conduction continue, les formes d'ondes de courant et de tension de ce convertisseur sont présentées dans la figure II.17. On en déduit la tension de sortie moyenne :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} * V_e \quad (II.66)$$

L'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L-f} \quad (II.67)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C-f} = \frac{\alpha^2 \cdot V_e}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (II.68)$$



**Figure II.15** Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élevateur-inverseur en tension [II.15].

Le courant moyen traversant l'inductance a pour valeur :

$$I_L = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{II.69})$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension on a :

$$V_{k,max} = |V_{d,max}| = V_{s,max} + V_e = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (\text{II.70})$$

Et en courant :

$$i_{k,max} = i_{d,max} = i_{l,max} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_s}{2} \quad (\text{II.71})$$

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties de la chaîne étudiée :

- sous-système aérodynamique (le rotor de la turbine) qui capte l'énergie cinétique du vent et qui fait tourner l'axe lent du système.
- sous-système de transmission mécanique (le multiplicateur de vitesse) qui transfère la puissance vers la génératrice électrique, tournant sur l'axe rapide du système.
- sous-système électromécanique, comprenant la génératrice électrique.
- Sous-système de stockage d'énergie comprenant la batterie et convertisseur bidirectionnel DC/DC.

Dans la phase suivante, la mise en équations était nécessaire pour commander les convertisseurs, ainsi la transformation de Park pour simplifier les équations de la partie électrique déjà modélisée permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de la machine et les convertisseurs.

## II.10 Références bibliographiques

- [II. 1] GHENNAM, Tarak. Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. 2011. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille; Ecole Militaire polytechnique Alger.
- [II. 2] <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/betz.htm>
- [II. 3] [https://www.fun-mooc.fr/.../MOOC\\_UVED\\_ENR\\_Recriptions\\_Eolien\\_Performan](https://www.fun-mooc.fr/.../MOOC_UVED_ENR_Recriptions_Eolien_Performan)
- [II. 4] ALI, BOUHEDDA Mr. Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne. 2011. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [II. 5] BILLEL, Meghni. Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne. 1955. Thèse de doctorat. Université de Tébessa.
- [II. 6] BOUDEBZA, Benaïssa. Etude et Commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double étoile connecté au réseau électrique. Thèse de doctorat. Université Mustapha Stambouli de Mascara.
- [II. 7] LE PIOUFLE, Bruno, GEORGIU, G., et LOUIS, J.-P. Application des commandes non linéaires pour la régulation en vitesse ou en position de la machine synchrone autopilotée. Revue de Physique appliquée, 1990, vol. 25, no 6, p. 517-526.
- [II. 8] BELAKEHAL, S., BENTOUNSI, A., MERZOUG, M., et al. Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne. Revue des Energies Renouvelables, 2010, vol. 13, no 1, p. 149-161.
- [II. 9] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos, « Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid», IEEE Transaction on energy conversion vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [II. 10] BELAKEHAL, Soltane. Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables. universite costantine, 2010.
- [II. 11] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille(ECL)

Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL) ,06décembre 2004.

[II.12] KELOUWANI, Sousso. Stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène. 2002. PhD Thesis. Université du Québec à Trois-Rivières.

[II.13]CROCI, Lila. Gestion de l'énergie dans UN système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. 2013. PhD Thesis. Université de Poitiers.

[II.14]BENCHERIF, Mohammed. Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome. 2015. PhD Thesis.

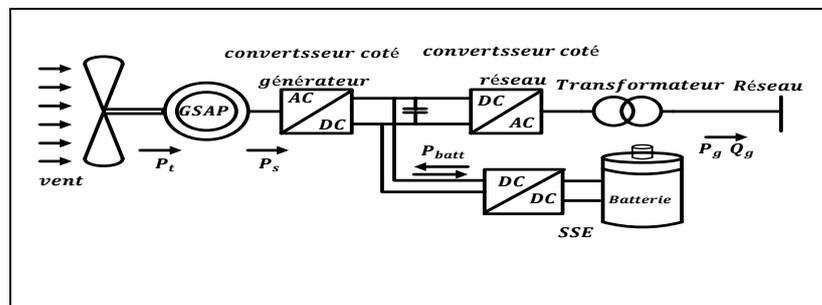
[II.15]HUANG, Bin. Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible. 2009. PhD Thesis. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.

### III.1 Introduction

La vitesse variable permet d'extraire le maximum de puissance et d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'objectif principal de la commande des éoliennes à vitesse variable est d'assurer une bonne qualité de la puissance mécanique et électrique générée. par la turbine et la génératrice et c'est à partir d'une source primaire variable qui est le vent [III.1], afin de fournir la puissance demandé par le réseau cet objectif est très important surtout avec le nouveau code de réseau universel pour l'énergie éolienne. ((Pour cette raison la commande des éoliennes hybrides dans les dernières décennies, fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [III.2, III.3 et III.4] qui visent à améliorer les performances de ces éoliennes 'vitesse variable basées sur le GSAP'))).

### III.2 Description général de système de contrôle

Le modèle complet de la chaîne de conversion hybride éolienne englobe en outre la turbine et son arbre, la GSAP, un redresseur MLI, un bus continu, une batterie, un convertisseur DC/DC un onduleur MLI, un filtre. Ce système est assez compliqué pour la génération des lois de commande qui le gère, néanmoins il suffit de partager en parties le système et ainsi suivre le flux de transfert de puissance de la turbine jusqu'au réseau.



**Figure III.1** Le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne englobe.

Ce chapitre met l'accent sur trois parties essentielles :

- Dans la première partie trois techniques MPPT sont analysées et comparées dans ce chapitre afin de choisir la méthode la plus robuste. Ensuite, l'approche de FOC (commande vectorielle à flux orienté) est introduite pour contrôler la vitesse de GSAP.
- Dans la deuxième partie, la technique MPPT adéquate (première partie) utilisé pour évaluer la simulation d'un système hybride basé sur l'ancien modèle (éolienne à

vitesse variable) supporter par une batterie de stockage d'énergie et contrôler par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnelle DC/DC.

- Enfin et pour assurer l'échange de la puissance de demander par le réseau un contrôleur de la puissance active et réactive a été assuré par un convertisseur de puissance DC/AC. Les résultats de simulation sont présentés pour valider les différents algorithmes de contrôles proposés [III.5].

### III.2.1 commande d'un convertisseur coté générateur

Le convertisseur côté générateur, commande la vitesse de rotation du générateur pour produire la puissance maximale de sortie par l'intermédiaire du contrôle du couple électromagnétique. La logique de commande proposée du convertisseur côté générateur est représentée sur la Figure III.2. La technique MPPT produit une vitesse de référence puis, une boucle de vitesse génère la composante de courant d'axe  $q$  pour commander le couple et la vitesse de la génératrice à différentes vitesses de vent via une estimation de la valeur de référence ( $I_{dref}, I_{qref}$ ) comme le montre la Figure III.2.

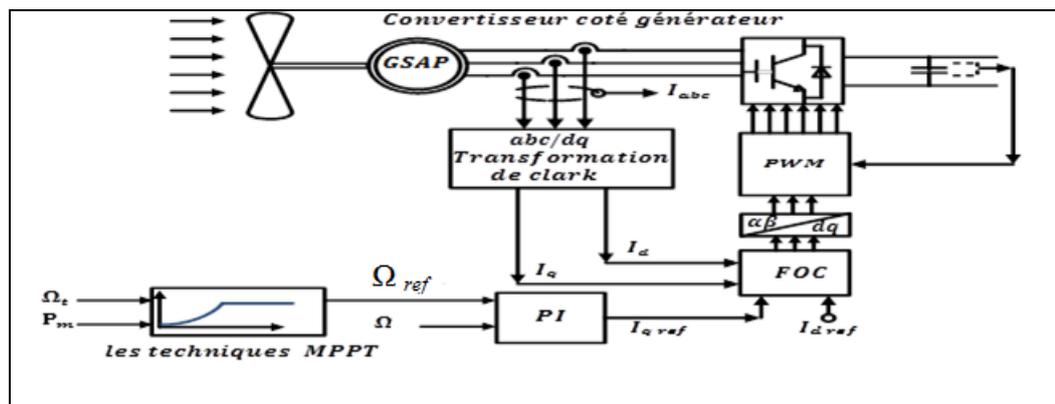


Figure III.2 Commande de convertisseur côté générateur.

Le contrôle de convertisseur côté générateur se compose en deux stratégies connexes:

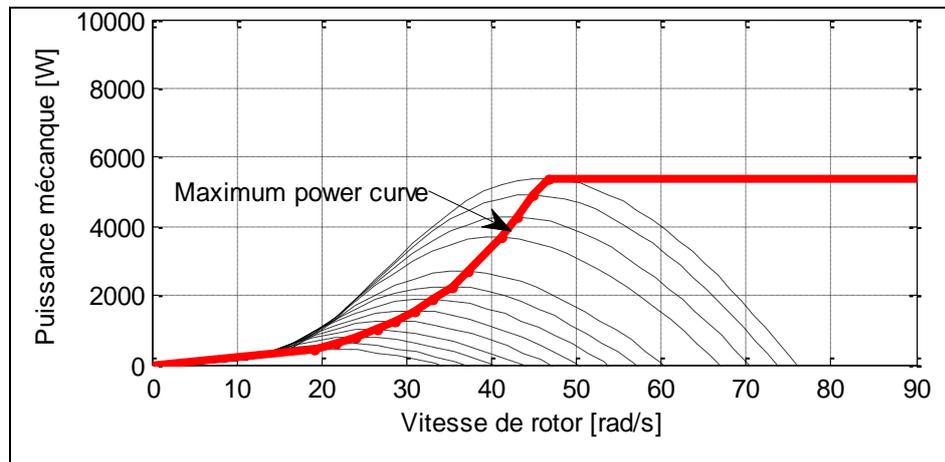
- L'algorithme utilise un contrôleur MPPT pour générer une référence de vitesse optimale à chaque instant.
- La boucle de commande de vitesse sur la base de régulateur PI pour fournir un couple électromagnétique de référence pour la commande FOC de générateur [III.5].

### III.3 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

L'algorithme de contrôle selon la méthode MPPT permet de rechercher les maximums de puissance électrique générée pour chaque vitesse de vent. La vitesse d'opération de la génératrice synchrone à aimant permanent est ainsi ajustée fin de produire un maximum de puissance en tout temps. Pour atteindre ce but, il faut estimer la position et la direction du

point d'opération courant sur la courbe de puissance en fonction de la vitesse. À la figure III.3. il est observé dans l'exemple que la puissance maximale, que la turbine peut produire pour chaque vitesse de vent, correspond à la vitesse optimale. Cette vitesse optimale est atteinte lorsque  $C_p$  est maximal [III.6].

$$P_{m \text{ opt}} = \frac{1}{2} \rho S C_{p \text{ opt}} (\lambda_{\text{opt}}) v^3 \quad (\text{III.1})$$



**Figure III.3** Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance vitesse de rotation.

Généralement, chacun de ces contrôleurs (MPPT) a été réalisé pour des applications spécifiques. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Le rendement global du système désiré par le constructeur.
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique.
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux).
- Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse.
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux) [III.5].

### III.3.1 Les différentes méthodes de MPPT

L'utilisation des turbines éolienne à vitesse variable permet de régler la vitesse de variation de la génératrice. Ceci s'avère très utile pour extraire le maximum de puissance dans la zone où l'algorithme MPPT est appliqué. Pour ce fonctionnement on cherche à optimiser la puissance extraite de la machine par adaptation de la vitesse de la turbine du vent tout en maintenant un angle de calage nul. Pour une éolienne l'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système capable d'aider la chaîne de conversion pour extraire le maximum de puissance

électrique à partir d'énergie cinétique du vent disponible. La sortie du système MPPT est une vitesse optimale variant selon la vitesse du vent capturée.

Plusieurs travaux ont abordons le problème d'optimisation de la production d'énergie, en utilisant différentes techniques MPPT. Ces dernières diffèrentes selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en trois familles, selon que la vitesse du vent et les caractéristiques aérodynamiques sont nécessaires ou non à la générateur de la référence [III.7].

### III.3.2 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Cette façon de procédé exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil de pâles. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux [III.7]

#### III.3.2.1 MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR)

Dans le fonctionnement à puissance maximale, on cherche à maintenir du coefficient de vitesse spécifique à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  représenté dans la Figure.III.4.

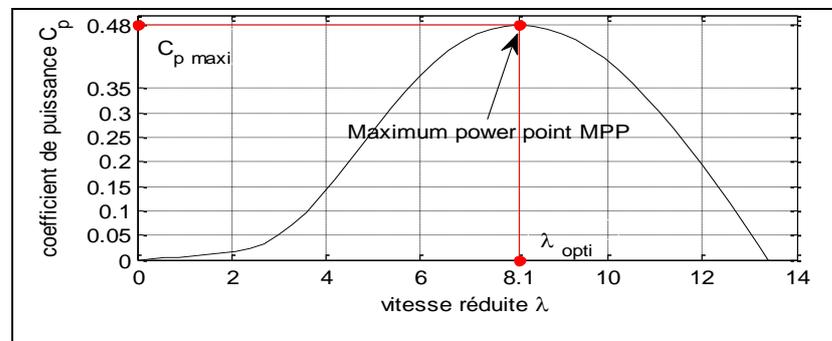


Figure III.4 La caractéristique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ .

Une boucle de régulation de vitesse est alors mise en œuvre et sa vitesse référence  $\Omega_{ref}$ . Comme nous l'avons vu précédemment ce contrôle de la vitesse de rotation peut être réalisé en agissant sur le couple  $C_{em}$ . le couple sur l'arbre éolien apparait comme une perturbation qui peut être compensée ou non dans la commande la nature fluctuant du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien et crée des variations continues de puissance. De ce fait, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelle que soit la puissance générée.

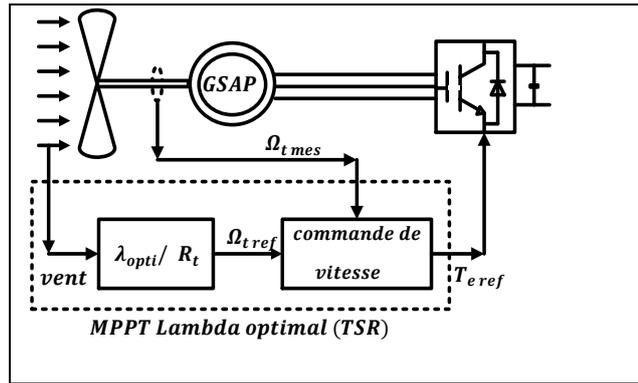


Figure III.5 Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR).

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de la vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence. Cette opération nécessite donc l'emploi d'un correcteur de vitesse  $C_{\Omega}$ . Par conséquent, la vitesse de référence  $C_{ref}$  est obtenue par une relation inverse :

$$C_{em-ref} = C_{\Omega}(\Omega_{ref} - \Omega)$$

$C_{\Omega}$  est un correcteur PI qui vise à anuler la différence entre la vitesse  $\Omega$  et sa référence  $\Omega_{ref}$ . La sortie de ce correcteur est le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$ .

### III.3.2.2 MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC)

Pour la méthode "Optimal Torque control", l'expression reliant la vitesse spécifique à la vitesse de rotation peut être mise sous la forme:

$$V = \frac{R\Omega}{\lambda} \quad (III.2)$$

Alors, l'expression de la puissance extraite du vent par la turbine devient:

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

Si la turbine tourne à  $\lambda_{opt}$ , la fonction  $C_P(\lambda)$  est à son maximum  $C_{Pmax}$ , alors en remplaçant  $\lambda$  par  $\lambda_{opt}$  et  $C_P$  par  $C_{Pmax}$ , on obtient :

$$P_{topt} = \frac{1}{2} \rho S \frac{R^3 C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \Omega^3 = K_{opt} \Omega^3 \quad (III.4)$$

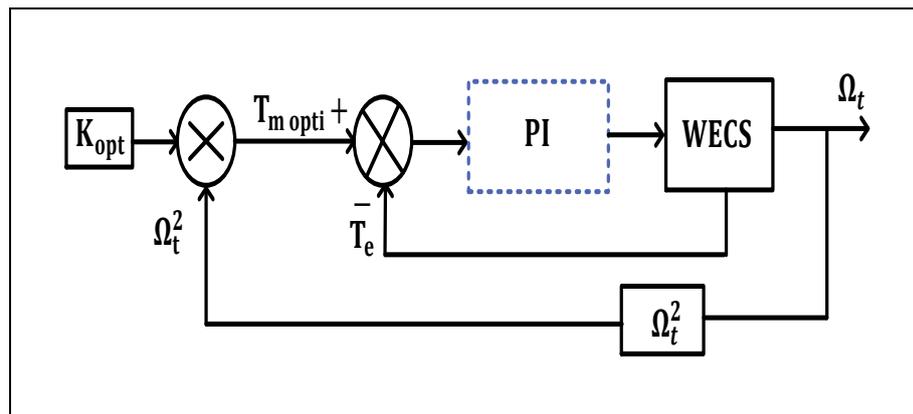
Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \rho S \frac{R^3 C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \quad (III.5)$$

On peut alors en extraire l'expression de couple optimal :

$$T_{topt} = \frac{P_{topt}}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^5 \left( \frac{C_{p,max}}{\lambda_{opt}^3} \right) \Omega_{t,opt}^2 = K_{opt} \Omega_{t,opt}^2 \quad (III.6)$$

Une boucle de régulation en couple peut alors être mise en place avec comme référence la valeur  $T_{topt}$  que l'on vient de calculer. Cette méthode est simple, elle nécessite néanmoins la connaissance du point maximum de la courbe  $C_p(\lambda)$  qui devra être déterminée auparavant. Cette méthode est plus lente que la méthode "TSR control", car les variations de vitesse du vent ne sont pas prises en compte directement. La valeur du couple peut être déduite de la mesure du courant délivré par la génératrice [III.8].



**Figure III.6** Schéma block de la méthode de MPPT par contrôle optimale de couple (OTC).

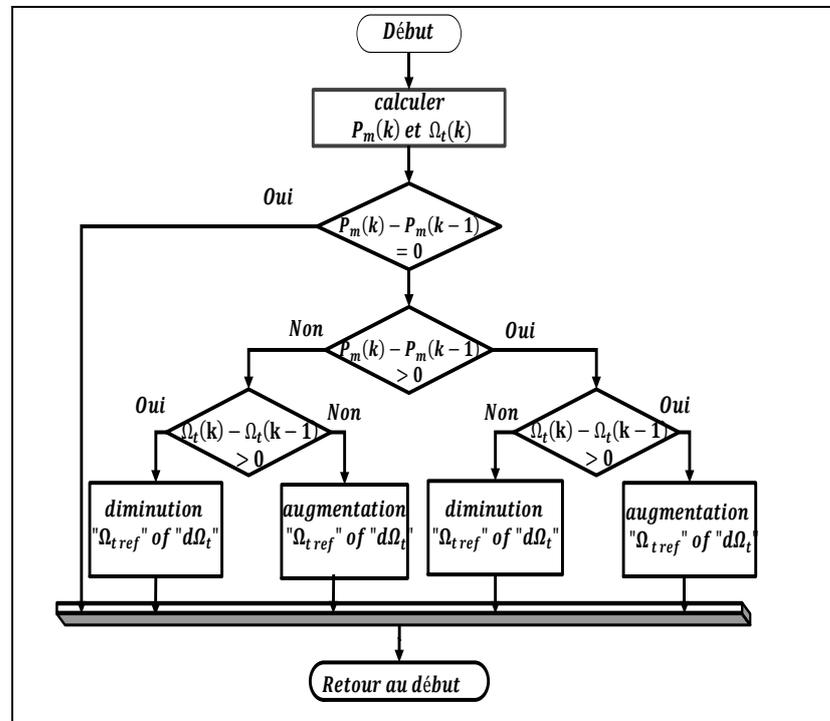
### II.3.3 MPPT sans la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique  $C_p$ ,  $\lambda_{opt}$ , une structure avec convertisseur à commande MLI est utilisée. Cette structure assure un contrôle dynamique et fiable en vitesse et en couple de la GSAP ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation (pour chaque vitesse de vent) et ainsi d'effectuer par ce biais une recherche de la puissance maximale souhaitée. Dans cette structure, la mesure de vitesse du vent n'est plus nécessaire, donc la complexité et le coût du système sont proportionnellement réduits.

### III.3.3.1 MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O)

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce système en augmentant ou en diminuant la vitesse de fonctionnement et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée.

La figure III.7 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure III.7, la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$  de la rangée. Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.



**Figure III.7** Algorithme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

- Avec cet algorithme, la vitesse de fonctionnement  $\Omega$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $\Omega$  oscillera autour de la tension idéale de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple  $C_p$ .
- Si  $C_p$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

- Si  $C_p$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation [III.9].

La valeur  $C_p$  idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement.

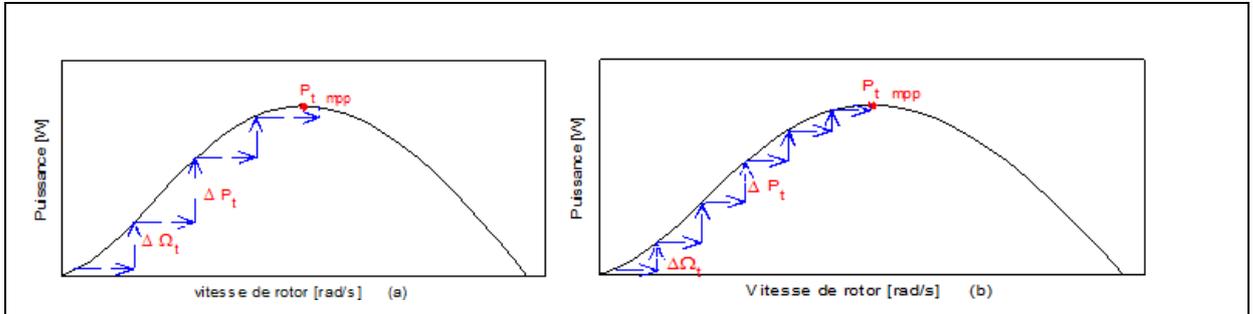


Figure III.8 Méthode de perturbation et d'observation du MPPT.

### III.4 Commande vectorielle de la GSAP par MLI

Cette stratégie est une alternative à la commande dans la repère a, b, c. Elle exige pour la régulation des courants  $I_d, I_q$  d'imposer les tensions de référence  $V_{dref}, V_{qref}$  : dont en déduit les tensions de référence sinusoïdales  $V_{aref}, V_{bref}, V_{cref}$  pour la commande de convertisseur côté générateur.

#### III.4.1 Description du système global

La commande vectorielle porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant sur les axes  $d, q$ . Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant les inconvénients d'une alimentation en courant. La figure.III.9, représente le schéma bloc d'une régulation de vitesse de GSAP alimentée en vitesse et commandée par orientation du flux (les courants).

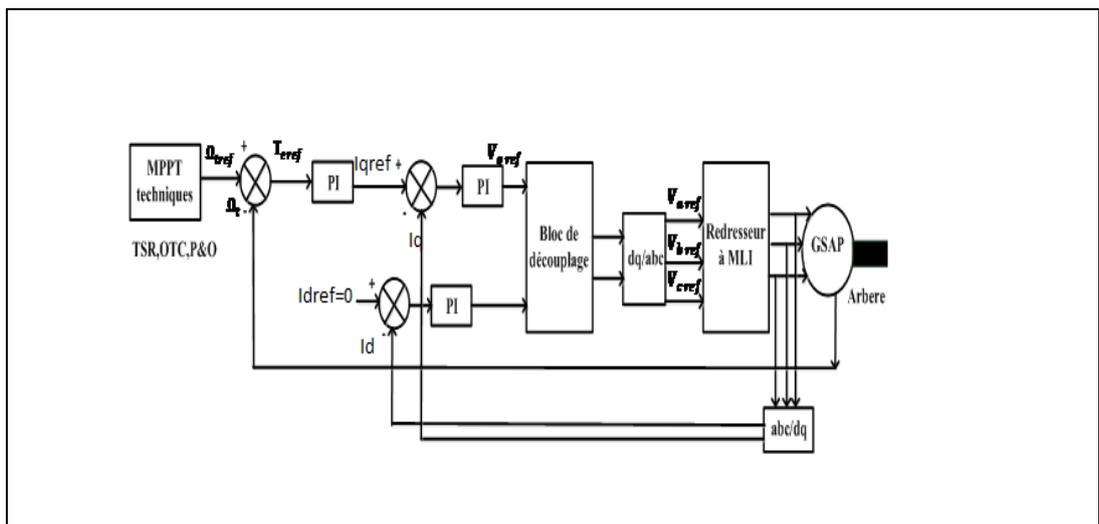


Figure III.9 Schéma bloc d'une régulation de vitesse de la GSAP commandée par l'orientation du flux.

La référence de courant direct  $I_{d\text{ref}}$  est fixée à la valeur de zéro. La référence de courant quadrature  $I_{q\text{ref}}$  à la sortie de régulateur de vitesse consiste la référence de couple  $T_e$ . Les références des courants  $I_d, I_q$  sont comparés séparément avec les courants réels de GSAP. Les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs classiques de type PI, en suite un bloc de découplage a été appliqué pour générer les tensions de références  $V_{d\text{ref}}, V_{q\text{ref}}$  et par la transformation de Park, on obtient les références de tensions  $V_a, V_b, V_c$  qui sont les tensions de la commande de redresseur à commande MLI [III.5].

### III.4.1.1 Découplage

Le système d'équation (II.35) introduit au chapitre précédent présente des non linéarités dues essentiellement à la présence des termes  $I_d, I_q$ , et  $\omega I_d, \omega I_q$ . Pour cette raison nous allons ajouter des termes de découplage afin de rendre les axes  $d$  et  $q$  complètement indépendants.

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possibles des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes  $d$  et  $q$ . La compensation a pour but de découpler les axes  $d$  et  $q$ . Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs [III.10] [III.11].

Les équations statoriques comprennent, en effet, des termes qui font intervenir des courants de l'autre axe. Ces équations s'écrivent:

$$\begin{cases} V_d = (R_s + L_d s)I_d - \omega L_q I_q \\ V_q = (R_s I_q + L_q s) + \omega(L_d I_d + \psi_f) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

La figure.III.17 représente le couplage entre les axes  $d, q$  :

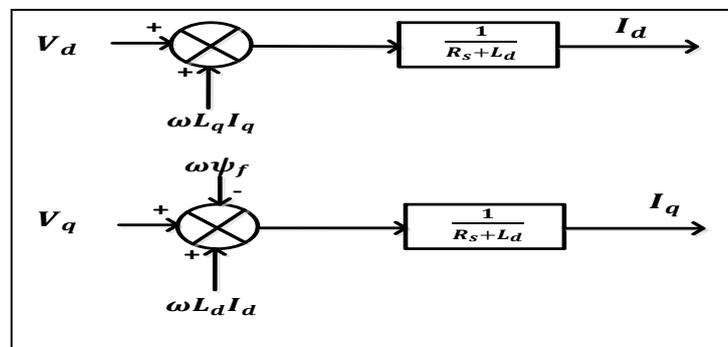


Figure III.10 Description des couplages.

À partir de l'équation (III.7), il est possible de définir les termes de découplage qui sont considérés, dans la suite, comme des perturbations vis-à-vis des régulations. Pour ne pas

compliquer cette étude, nous considérons le cas de décomposition des tensions comme montré dans la Figure III.11. Dans la première équation, on sépare la tension selon l'axe  $d$  en deux parties.

Alors:

$$\begin{cases} V_d = \dot{V}_d + e_d \\ e_d = -\omega L_q I_q \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\frac{I_d}{\dot{V}_d} = \frac{1}{R_s + L_d s} \quad (III.9)$$

La perturbation  $e_d$  est compensée par un terme identique de manière à ce que la fonction de transfert équivalente soit celle indiquée ci-dessus. On peut considérer de manière analogue la deuxième équation et définir:

$$\begin{cases} V_q = \dot{V}_q + e_q \\ e_q = \omega(L_d I_d + \psi_f) \end{cases} \quad (III.10)$$

$$\frac{I_q}{\dot{V}_q} = \frac{1}{R_s + L_q s} \quad (III.11)$$

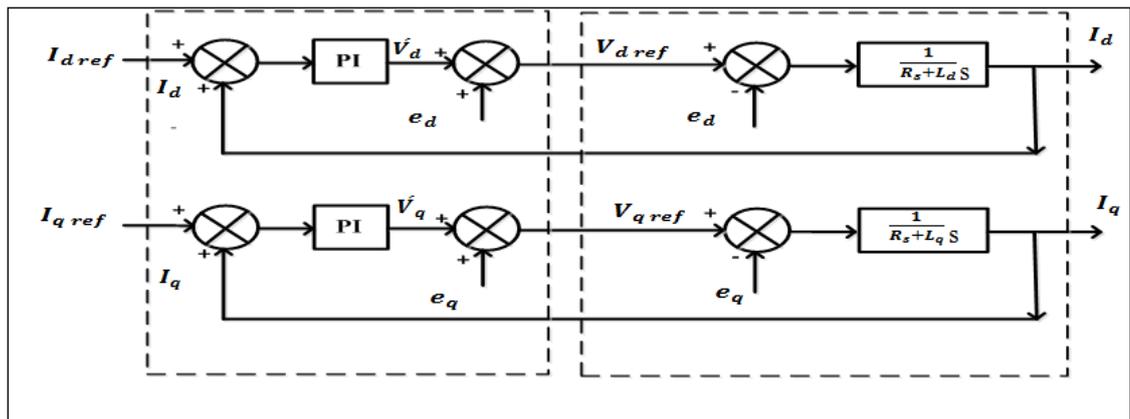


Figure III.11 Découplage par compensation.

Les actions sur les axes  $d, q$  sont donc découplées :

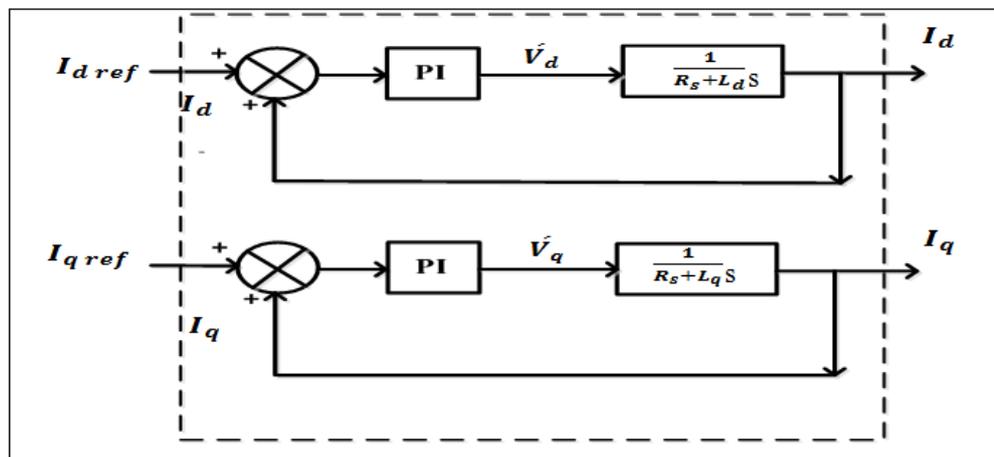


Figure III.12 Commande découplée.

### III.4.1.2 Calcul des régulateurs de courant s

Le schéma de contrôle des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure suivante :

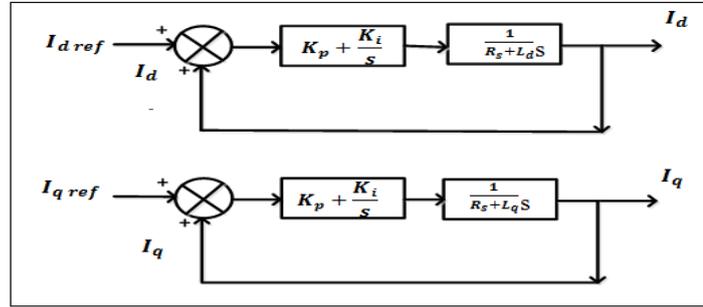


Figure III.13 Commande des courants en deux boucles indépendantes.

À partir des équations (III.7), (III.8) et (III.9), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$F_d(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} = \frac{I_d}{V_{d1}} \quad (\text{III.12})$$

$$F_q(s) = \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} = \frac{I_q}{V_{q1}} \quad (\text{III.13})$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left(1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d s} \quad (\text{III.14})$$

$$FTBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left(1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s\right) \frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_q s} \quad (\text{III.15})$$

Composons le pole  $\left(\frac{L_d}{R_s}\right)$  par  $\left(\frac{K_p}{K_i}\right)$  :

Les fonctions de transfert des courants en boucle fermée aux expressions suivantes :

$$FTBF_d = \frac{1}{1+\tau_d s} = \frac{I_d}{I_{dref}} \quad (\text{III.16})$$

$$FTBF_q = \frac{1}{1+\tau_q s} = \frac{I_q}{I_{qref}} \quad (\text{III.17})$$

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad (\text{III.18})$$

$$\tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}} \quad (\text{III.19})$$

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de  $\tau_d$  et  $\tau_q$ . Celles-ci sont choisies de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte [III.12].

### III.4.1.3 Calcul de régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet la détermination du couple de référence afin de maintenir la vitesse constante [III.13]. En insérant un régulateur  $PI$  dans la boucle de vitesse on obtient le schéma de la figure suivante :

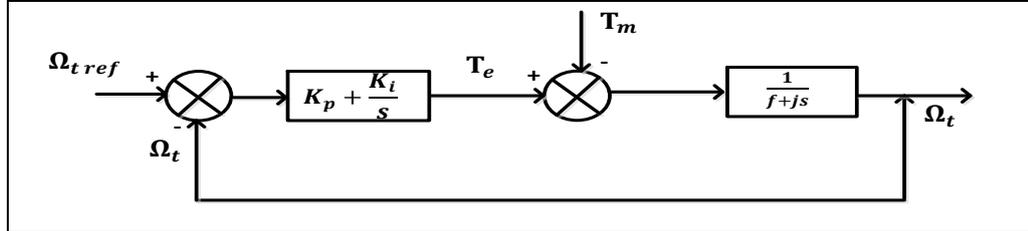


Figure III.14 Commande de la vitesse.

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{s} \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (\text{III.20})$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ( $T_m=0$ )

$$FTBO_{\Omega} = \frac{K_p}{s} \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{1}{f+js} \quad (\text{III.21})$$

En adoptant ainsi l'expression de la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée qui est décernée par:

$$FTBF_{\Omega} = \frac{\Omega_t(s)}{\Omega_{tref}(s)} = \frac{K_p \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{K_i + (f + K_p)s + js^2} \quad (\text{III.22})$$

On déduit  $K_i$  et  $K_p$  :

$$K_i = j\omega_0^2 \quad (\text{III.23})$$

$$K_p = \frac{2\zeta K_i}{\omega_0} - f \quad (\text{III.24})$$

## III.5 Les Résultats des simulations

### Partie 1 :

#### III.5.1 Commande de convertisseur coté générateur

Afin de mettre en évidence les performances des algorithmes de commande appliqués à la turbine et la génératrice (MPPT, FOC), on a simulé le système sous une vitesse de vent dont la valeur moyenne est de 9m/s, comme illustré dans la figure III.15 La simulation a été réalisée en utilisant le logiciel Matlab Simulink. Les paramètres du système sont donnés dans

l'annexe A. Les performances des trois méthodes de MPPT sont discutées et les résultats de simulation sont résumés dans le Tableau III.1 établi selon [III.11]. Ensuite, les résultats de simulation de la commande vectorielle FOC appliquée à la GSAP sont présentés pour un choix judicieux d'une méthode MPPT.

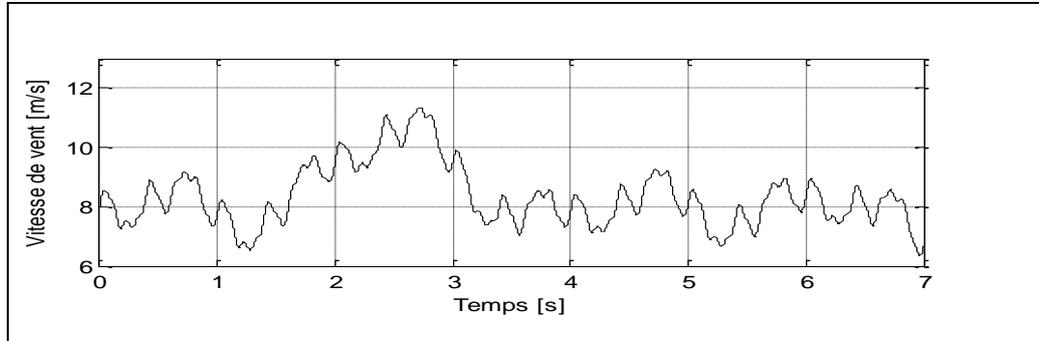


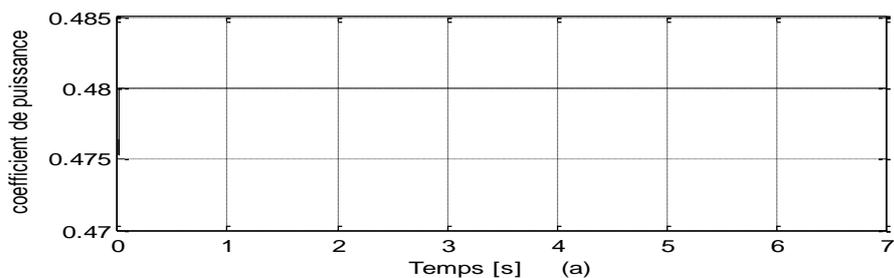
Figure III.15 Vitesse de vent (m/s).

Méthodes MPPT	Puissance moyenne KW	Pertes de la puissance $P_t$ $P_t(w)$	Coefficient de puissance	Vitesse spécifique	Temps de réponse (s)	Rendement mécanique $(P_m / P_{opt})\%$	Rendement mécanique $(P_e / P_{opt})\%$
<b>TSR</b>	2.2628	0.0211	0.4800	8.0994	0.0295	$\cong 100$	94.19
<b>OTC</b>	2.2540	0.1322	0.4799	8.1230	0.07	99.96	94.05
<b>P&amp;O</b>	2.2463	7.4252	0.4784	8.1088	0.0405	99.67	93.51

Tableau III.1 Les performances des trois méthodes MPPT.

Méthodes MPPT	complexité	Vitesse de convergence	de	Connaissance des résultats	Mémoire	Mesure de vitesse de vent	Performance sous divers conditions de vent	Robustesse
<b>TSR</b>	Simple	Rapide		Non	Non	Oui	Moyenne	Non
<b>OTC</b>	Simple	Rapide		Non	Non	Non	Bien	oui
<b>P&amp;O</b>	Simple	Dépend		Non	Dépend	Non	Dépend	Dépend

Tableau III.2 Les caractéristiques des trois méthodes MPPT.



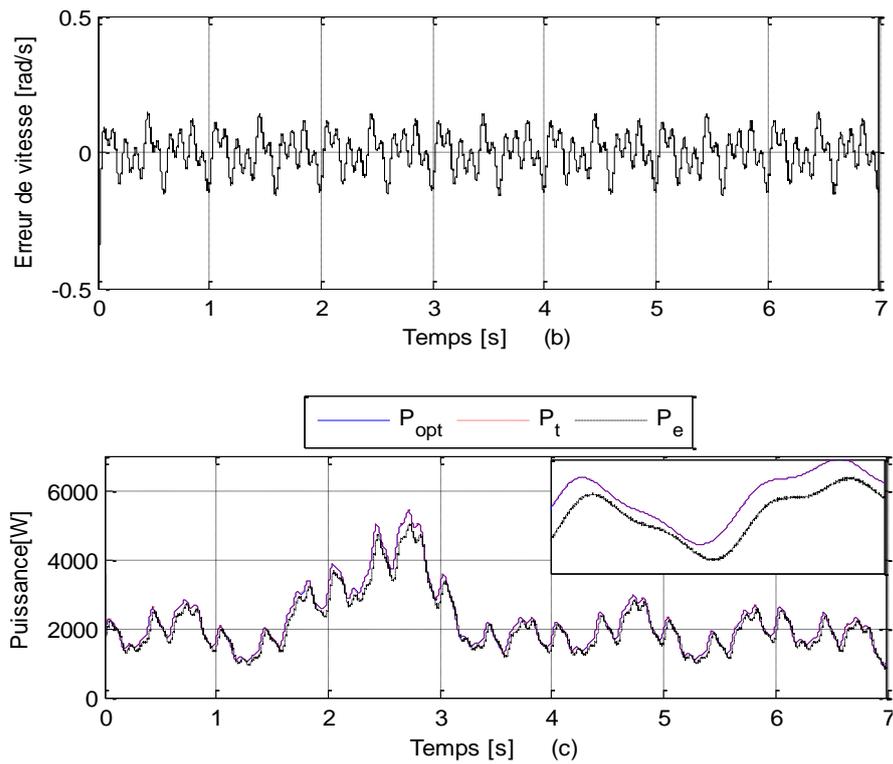
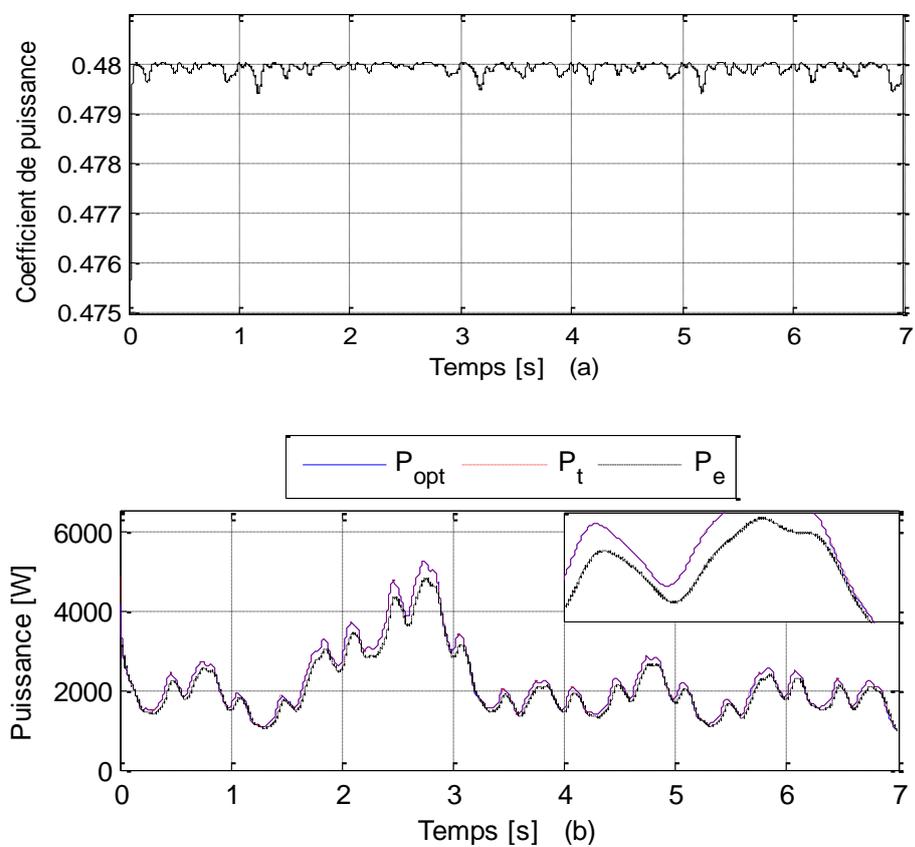


Figure III.16 MPPT TSR (a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.



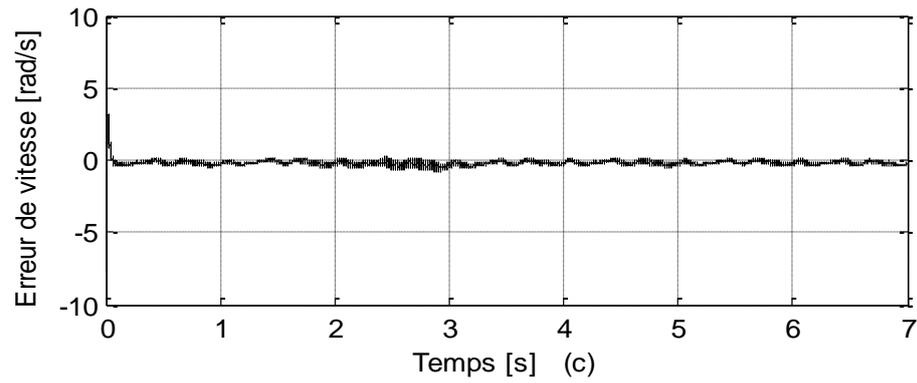


Figure III.17 MPPT OTC (a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.

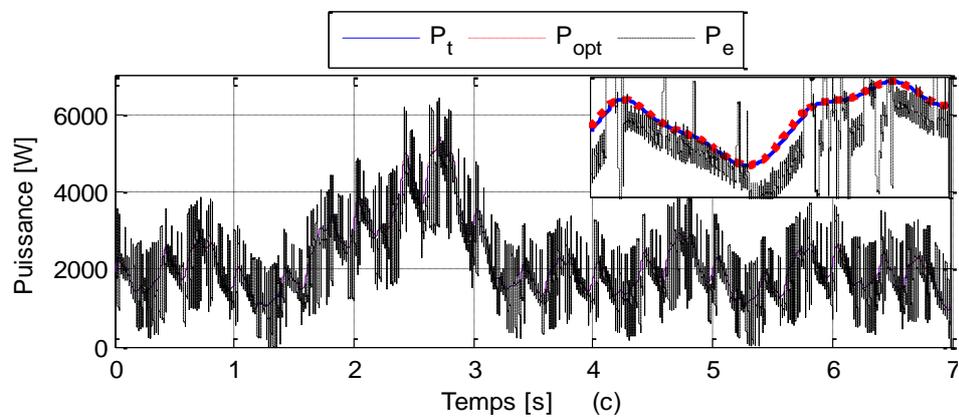
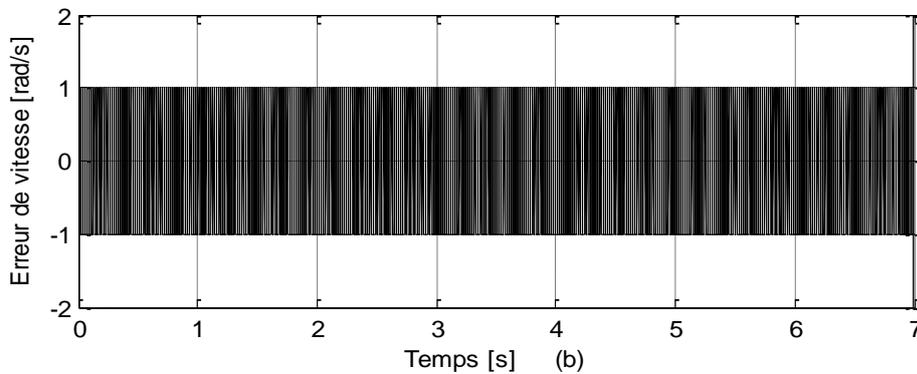
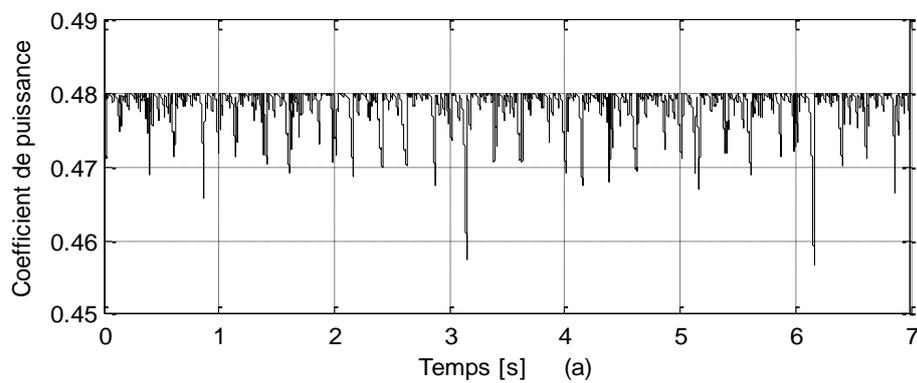


Figure III.18 MPPT P&O(a) coefficient de puissance, (b) erreur de vitesse et (c) puissance.

Le contrôleur de MPPT assure le suivi le point de puissance optimale à des vitesses de vent variables, en maintenant le coefficient de puissance à sa valeur maximale  $C_p = 0.48$ . Sur la base des résultats démontrés sur les figures III.16 (a), les méthodes TSR et OTC ont été trouvés pour être les plus rapides pour atteindre l'état d'équilibre tout en présentant une légère différence. En revanche, les procédés de P&O, est lents; leur temps de réponse est de 0.0405s. L'algorithme de contrôle basé sur la TSR et OTC atteint la valeur moyenne la plus élevée de  $C_{p\ max}$  pour une valeur approximative de 0,480 et 0.4799. Par comparaison, la méthode P&O, donne une valeur moyenne de  $C_p = 0,4784$ . Ce procédé est le moins efficace.

En raison de la variation instantanée et rapide de la vitesse du vent, la valeur moyenne des  $C_p$  ne peut pas maintenir sa valeur d'état d'équilibre, cela est dû à la différence dans le temps de récupération pour l'algorithme de contrôle (la méthodologie de recherche du MPP). En conclusion, d'après la comparaison des résultats de la simulation, on peut dire que les techniques (TSR et OTC) sont plus rapides que les technique P&O.

L'erreur de vitesse de la GSAP pour chacune des méthodes de MPPT est donnée dans les figures III.16(b).Trois remarques peuvent être faites à partir de l'analyse des figures. Pour chaque vitesse de vent, Par conséquent, la vitesse de la GSAP est suivie de manière satisfaisante à sa référence optimale dérivée de chacun des algorithmes MPPT (appliquées dans ce travail) avec une erreur négligeable, donc cette éolienne fonctionne toujours à une vitesse de rotation optimale. Nous concluons que le système fonctionne toujours à proximité du point de fonctionnement optimal, tout en maintenant ce point (MPP) pour le profil entier de la vitesse du vent, avec une certaine variation de chaque technique dans le maintien de cette fonction (MPP).

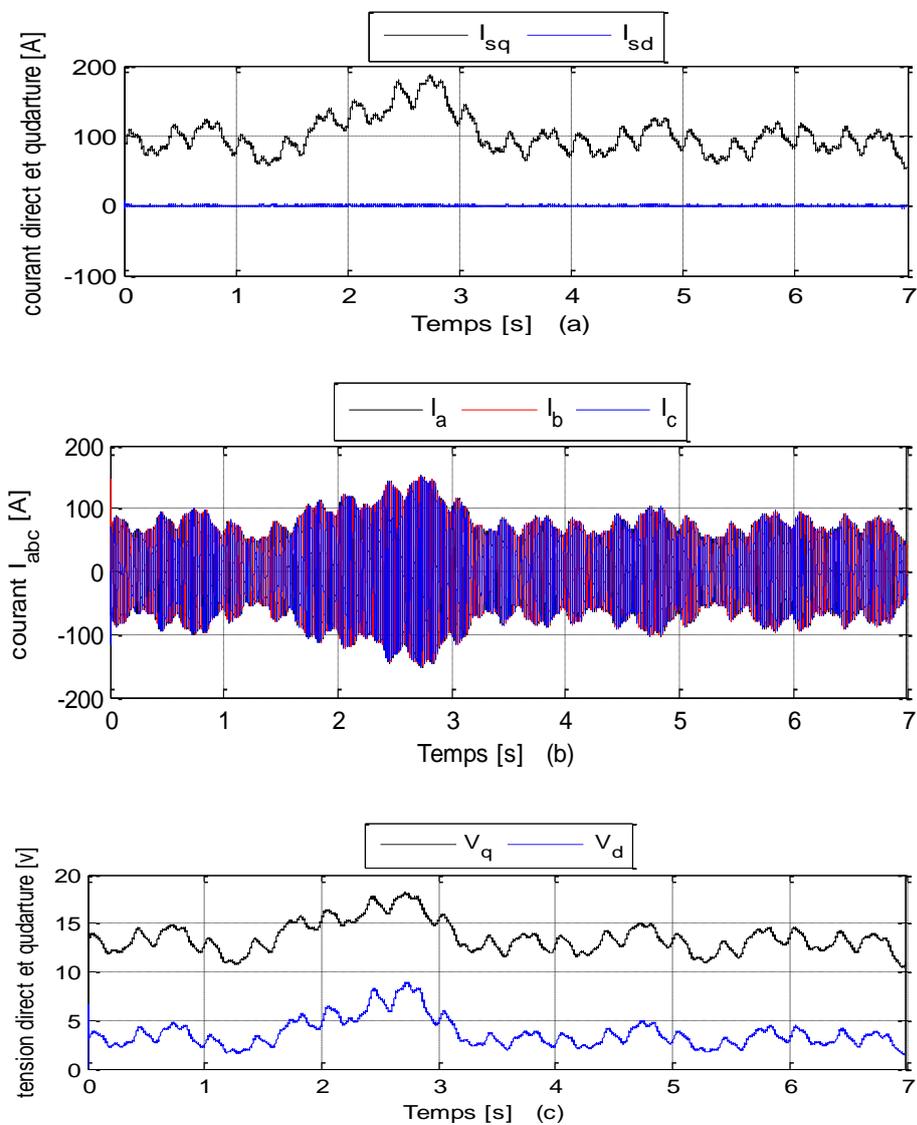
En outre, il peut être vu que la plage d'erreur de vitesse pour chaque méthode varie avec le changement de la vitesse du vent, mais avec une valeur différente. Par exemple, la plage d'erreur de vitesse pour la méthode TSR est [0,15, -0,1], qui peut être considéré comme de moindre valeur par rapport à la gamme OTC [0.5,-1], et P&O [1, -1]. Ces variations sont dues à l'algorithme inhérent de chaque MPPT pour suivre le pic maximal.

D'après les chiffres et l'analyse résumée dans le tableau. III.2, ci-dessus, il a été constaté que, dans les trois méthodes (TSR, OTC et P&O), la puissance extraite par la turbine suit la trajectoire désirée  $P_{m\ opt}$  avec une efficacité différente; les rendements mécanique et électrique sont résumés dans le tableau. III.2. Par exemple, il s'avère que les méthodes TSR et

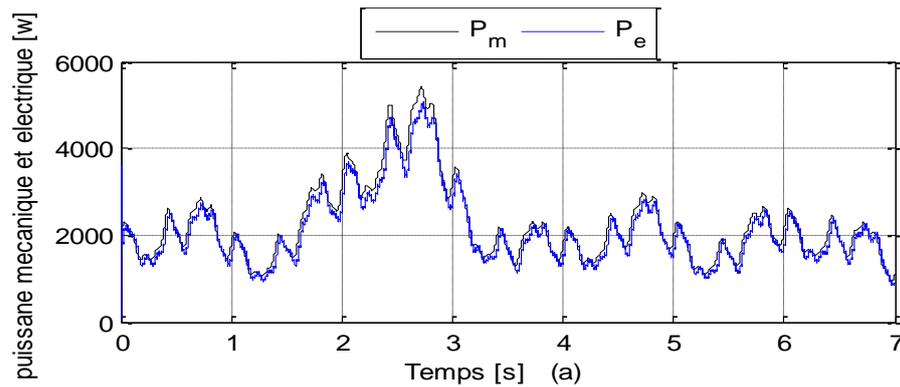
OTC réalisent la valeur moyenne la plus élevée du rendement. En comparaison, le P&O est une valeur moyenne 99,67.

La puissance électrique  $P_e$  fournie par le GSAP varie en fonction du changement de  $P_{m\ opt}$ , en tenant compte des pertes mécaniques et électriques (inertie, les pertes de Joule dans les résistances et inductances). En outre, la forme d'onde de l'énergie électrique par la méthode P&O montre quelques oscillations qui affectent la qualité de l'énergie. Ceci peut s'expliquer à partir de son incapacité à suivre le pic maximal. En outre, on peut noter qu'un suivi lisse de la puissance  $P_e$  est réalisé en utilisant les techniques (TSR et OTC).

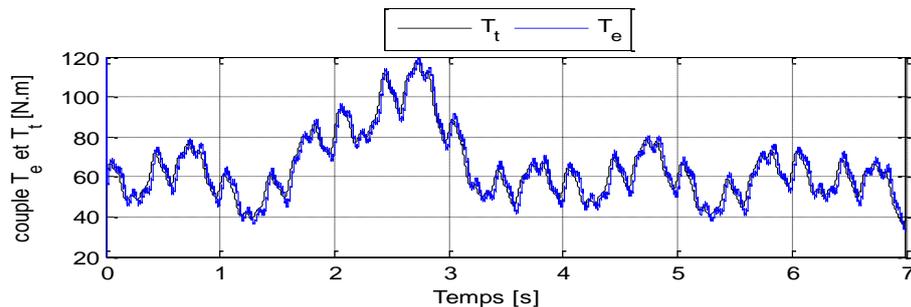
Selon les résultats et l'analyse présentés précédemment, certaine difficulté reste à choisir l'algorithme MPPT approprié pour un système de vent donné.



**Figure III.19** (a) courant direct et quadrature de GSAP, (b) tension direct et quadrature de GSAP et (c) les trois courant à l'entrée de redresseur.



**Figure III.20** Puissance électrique et puissance mécanique.



**Figure III.21** Couple électromagnétique et couple mécanique

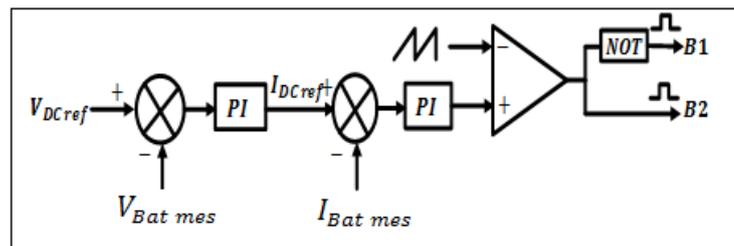
Les figures III.19 (a, b et c), représentent respectivement les courants direct et quadrature et les trois courants des phases (abc) à l'entrée du redresseur MLI et les tensions direct et quadrature délivrées par la génératrice GSAP, pour une vitesse de vent variable. A partir les figures précédentes, on peut observer l'influence de la vitesse du vent, et par suite, l'énergie cinétique du vent sur les amplitudes des courants. Avec l'augmentation de la vitesse du vent, les valeurs de courants et de tensions deviennent plus importantes, La figure. III.20 représente les puissances actives délivrées par la GSAP, cette figure montre la puissance active de la GSAP qui est sensiblement égale à la puissance générée par la source de vent (turbine). Dans la figure. III.21, on a présenté les changements des couples électromagnétique et mécanique. Avec le changement de la vitesse du vent, les deux couples changent en conséquence une légère erreur. Ces résultats illustrent la haute performance des boucles de contrôle basés sur la stratégie FOC.

### III.6 Contrôle du convertisseur (BSC)

Le flux grand défi de la production d'énergie éolienne est la nature intermittente et invisible de vitesse de vent qui peut écarter rapidement. Donc sa disponibilité intermittente est le principale obstacle pour contrôlée la qualité de la puissance injecté à la puissance électrique.

Comme nous le savons toute la variation continue de la fluctuante. Donc la stabilité et la qualité de l'opération de réseau est affété. Pour éviter la dégradation totale de performance du réseau un système de stockage d'énergie est essentiel.

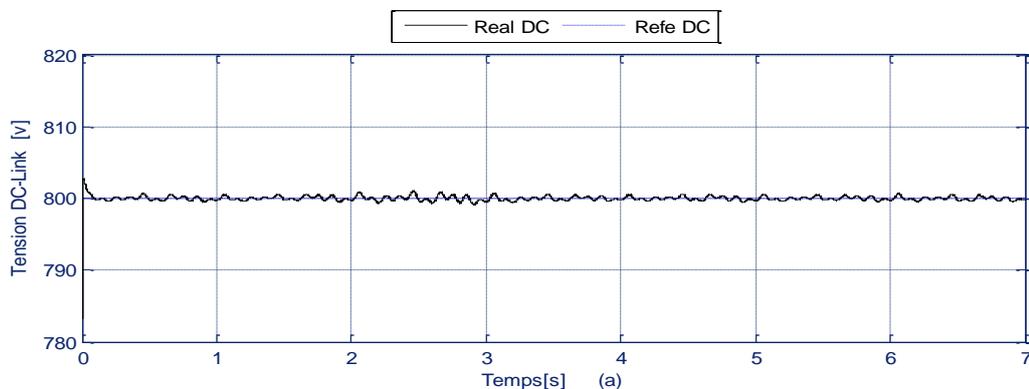
Ce convertisseur est commandé afin de maintenir la tension du bus continue proche de sa valeur nominale (800v). Comme l'augmentation de la puissance de sortie plutôt que la puissance d'entrée du condensateur à liaison CC entraîne une diminution de la tension ESS et vice versa. Plus détaillée, le Figure III.22, décrit la stratégie de contrôle pour le convertisseur bidirectionnel DC/DC; Ce contrôleur contient deux boucles de contrôle en cascade. La boucle de contrôle externe compare la tension de la liaison CC mesurée  $V_{DC}$  à la liaison CC  $V_{DC\ ref}$  souhaitée pour générer le courant de référence de batterie  $I_{DC\ ref}$  pour la boucle de contrôle interne. Le courant  $I_{DC\ ref}$  est comparé au courant de batterie mesuré  $I_{Bat\ mes}$  afin de générer les signaux de déclenchement pour les commutateurs IGBT. Le convertisseur DC/DC charge ou décharge la batterie selon le rapport de service des deux commutateurs IGBT.

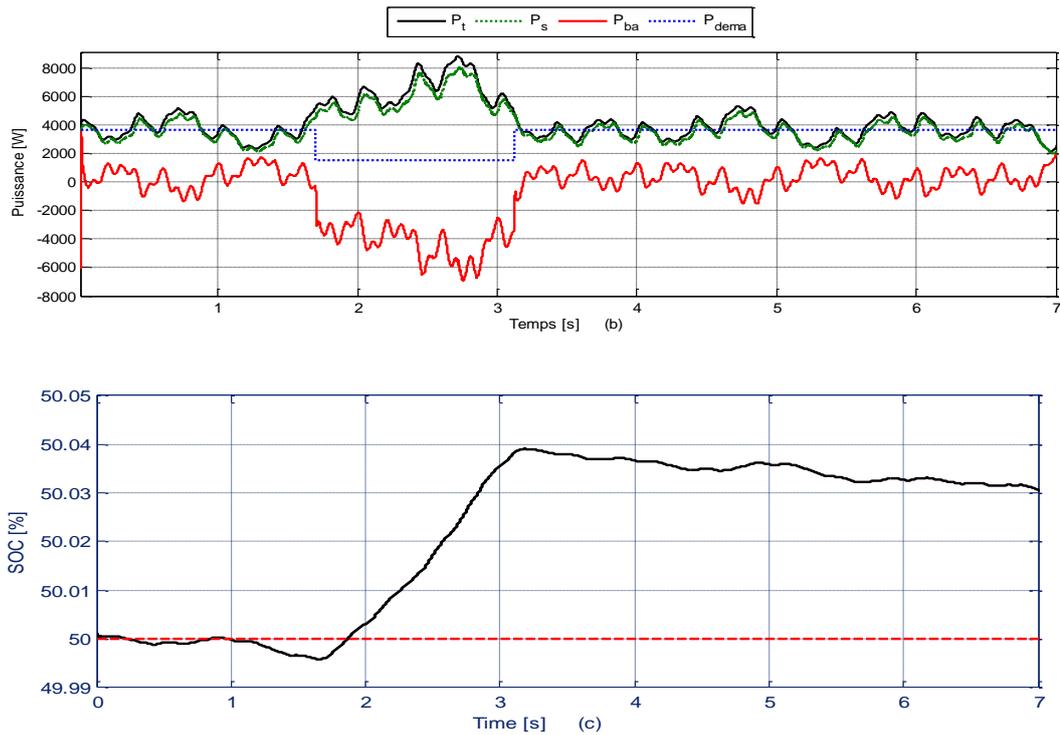


**Figure III.22** Diagramme de blocs de contrôle de la batterie ESS.

### Partie 2 :

Dans cette partie un système de stockage basé sur (batterie et un convertisseur bidirectionnel) est intégré au système éolien classique.





**Figure III.23** Tension de bus continue DC (a) des puissances (b) soc (c).

Pour cette raison, premier, lorsque la puissance active demandée par le réseau est plus élevée que l'énergie éolienne disponible Sous une variation instantanée de la puissance extraire (production) et la demande (charge), La batterie est utilisée pour stabiliser la tension au bus GSAP-DC, La deuxième tâche principale du système de commande est de maintenir la tension de liaison CC proche de sa valeur nominale 800 V, Comme on le voit sur la figure (a) par l'intermédiaire de convertisseur DC/DC. La réponse de la puissance active, mesurée à différents points du système hybride, est illustrée dans la Figure (b). La puissance demandée (puissance de référence) est initialement réglée à 3670 W dans l'intervalle de temps [0 - 1.7s]. La demande est réduite à une valeur allant jusqu'à 1500 W Et plus tard, il retourne à 3670 W pendant la période de [3.2s à 7s] comme le montre la figure (b).

Par exemple, nous trouvons à partir de [0-1.7 s], la puissance active demandée par le réseau  $P_{demande} = 3670 W$  (Une valeur prédéterminée), qui est inférieur ou supérieur à l'énergie éolienne disponible (production).

Pour cette raison, premier, lorsque la puissance active demandée par le réseau est plus élevée que l'énergie éolienne disponible (puissance extraite) La batterie compensées la sortie de GSAP (mode de déchargement) afin de fournir la puissance demandée par le réseau, jusqu'à le SOC atteint à la valeur le plus bas de 49.99% (recommandé). Puis quand

la puissance demandée par le réseau est plus basse, au-dessous de l'énergie éolienne disponible. Cet excès de puissance fourni par le GSAP est également stocké dans la batterie (mode de chargement), ce qui permet à SOC d'augmenter comme cela est observé dans la Figure (c).

De [1.7-3.2 s], la puissance active demandée par la grille est  $P_{demande} = 1500 W$ . Pendant cette période, la puissance de référence est inférieure à l'énergie éolienne disponible [ $P_{demande} > P_t$ ]. Dans ce moment, un cycle de recharge de la batterie commence et dure jusqu'à ce que le SOC atteigne au 50,04% ou plus. Pendant le temps de recharge la batterie est chargée par l'excédent de la puissance fourni par le GSAP. Cet avantage (stocker l'excès de puissance) est devenu une option importante dans le domaine des éoliennes,

Le même phénomène du premier intervalle [0 – 1.7 s] est similaire à l'intervalle de temps [3.7 – 7 s].

### III.7 Contrôle de convertisseur coté de réseau

L'objectif principal de contrôle de convertisseur coté réseau est de maintenir la tension du bus DC à une valeur de référence indépendamment des conditions de fonctionnement. Dans cette partie, le contrôle de la puissance active et réactive est effectué par la commande du courant direct et en quadrature respectivement de réseau. La figure III.26 montre deux boucles de contrôle indépendantes:

Une boucle externe pour le contrôle de la liaison continue bus ( $V_{dc}$ ) utilise une (batterie de SSE) avec un convertisseur DC / DC bidirectionnel pour réguler la tension continue à une valeur constante.

Une boucle interne contient un contrôleur de puissance active, en définissant la référence de courant de l'axe  $d$  pour une référence de puissance active. De même, nous contrôlons la puissance réactive en définissant le courant de référence  $q$  axe à une valeur nulle pour un facteur de puissance unitaire.

L'amélioration des performances de contrôle et de la qualité de la puissance active et réactive injectée dans le réseau nécessite des techniques de contrôle efficace et robustes pour surmonter diverses contraintes. Pour cette raison, dans cette partie une pratique courante dans le traitement des problèmes de contrôle du flux de puissance active et réactive du réseau consiste à utiliser une approche de commande vectorielle [III.14].

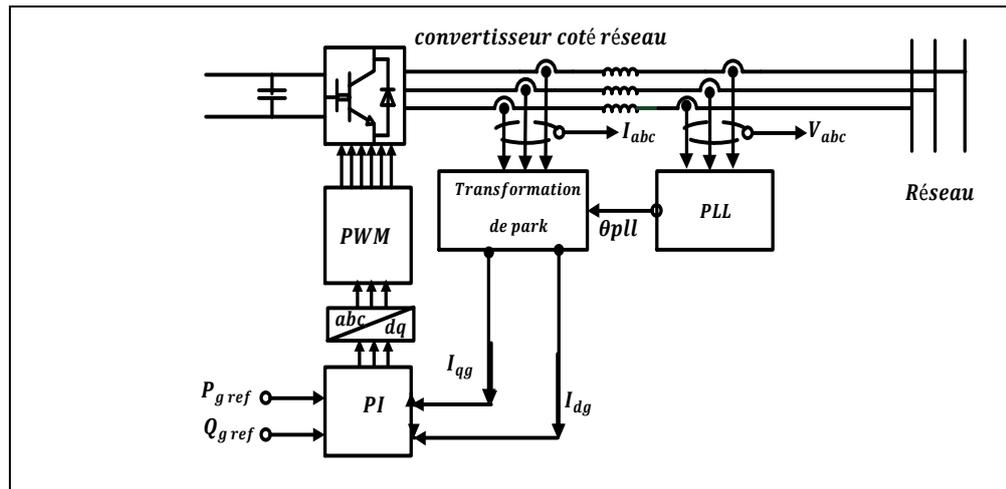


Figure III.24 Diagramme de contrôle des puissances côté réseau.

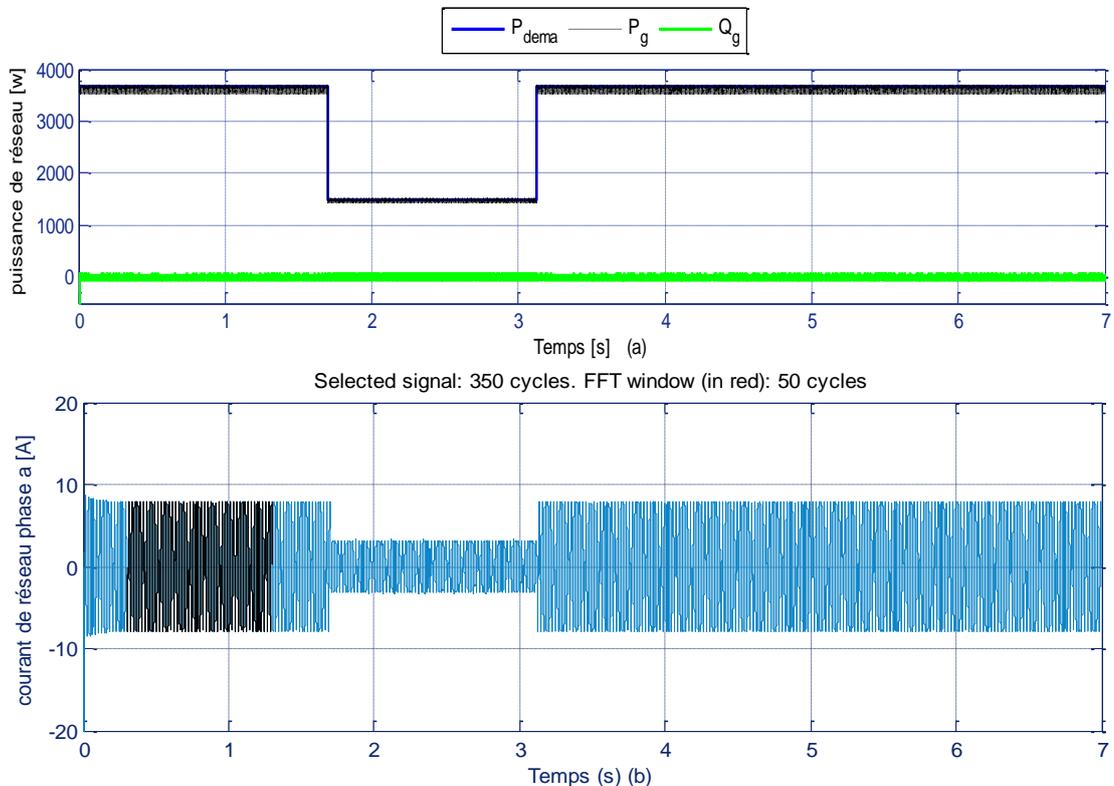


Figure III.25 La puissance de réseau (a) courant de réseau phase a.

Dans la dernière simulation, les commandes de la puissance active et réactive ont été réalisées en contrôlant respectivement les composantes de courant d'axe q et d'axe d. Le courant de l'axe des q est défini à zéro pour le facteur de puissance unitaire. La figure III.25 (a) affiche les puissances actives et réactive du côté de réseau, contrôlés via un régulateur PI. Cette figure montre que les quantités des puissances injectées au réseau suivent leur trajectoire désirée (réfère). La figure III.25 (b) illustre une forme d'onde d'échantillon du courant de

réseau pour la **phase A**. Les résultats obtenus dans cette section montrent une bonne performance pour suivre le chemin souhaité (puissance active et réactive)

### **III.8 conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation d'un système hybride éolien pour les différents types de contrôle appliqués au trois convertisseurs de puissance différents, afin d'assurer une meilleure qualité de l'énergie extraite et délivrer au réseau électrique. Une comparaison a été résumée dans deux tableaux qui fournissent un moyen simple et efficace pour sélectionner la méthode MPPT adéquate, qui atteignent le fonctionnement optimal d'une turbine éolienne hybride basée sur la GSAP /batterie connectée au réseau.

Les résultats de simulation montrent premièrement la supériorité de la méthode (OTC) en termes d'efficacité, de robustesse et de temps de réponse. En plus ils présentent les avantages de système de stockage d'énergie appliqués au système éolien et leur contribution dans l'amélioration de la qualité de réseau électrique.

### III.9 Les Références

[III.1] MUNTEANU, Iulian, BRATCU, Antoneta Iuliana, CUTULULIS, Nicolaos-Antonio, et al. Optimal control of wind energy systems: towards a global approach. Springer Science & Business Media, 2008.

[III.2] DADONE, Andrea et DAMBROSIO, Lorenzo. Estimator based adaptive fuzzy logic control technique for a wind turbine-generator system. Energy conversion and management, 2003, vol. 44, no 1, p. 135-153.

[III.3] WANG, Quincy et CHANG, Liuchen. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2004, vol. 19, no 5, p. 1242-1249.

[III.4] ABO-KHALIL, Ahmed G. et LEE, Dong-Choon. MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR. *Industrial Electronics, IEEE Transactionson*, 2008, vol. 55, no 3, p. 1489-1490.

[III.5] BILLEL, Meghni. Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne. 1955. Thèse de doctorat. Université de Tébessa.

[III.6] Frédéric Brédard Modélisation et contrôle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable connectée au réseau et utilisant une machine asynchrone, UNIVERSITE DU QUEBEC A RIMOUSKI 8 décembre 20141

[III.7] TAMAARAT, Azzouz. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2016. PhD Thesis.

[III.8] AUBRÉE, René. Thèse de Doctorat Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance. 2014. PhD Thesis. Université de Nantes.

[III.9] AOUCHICHE, N.; CHEIKH, MS Aït; MALEK, A. Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. *Revue des Energies Renouvelables*, 2013, 16.13: 485-498.

[III.10] KHALFA, M. A., et al. Commande vectorielle indirecte d'une pompe centrifuge photovoltaïque au fil de soleil. Revue des Energies renouvelables, CICME Sousse (Tunisie), 2008.

[III.11] SAID HASSAINE «Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents» thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran, 2008.

[III.12] BENCHABANE, F., et al. Etude comparative entre la commande vectorielle avec régulateurs PI et à mode glissant pour l'asservissement de la vitesse ou de la position d'un moteur synchrone à aimants permanents. 2014.

[III.13] FAIROUZ, Kendouli. Centrale eolienne et qualite de l'énergie électrique. 2017.

[III.14] POITIERS, Frédéric. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau. 2003. PhD Thesis. Université de Nantes.

## Conclusions générale

Dans le contexte mondial pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, le besoin de l'énergie renouvelable est indispensable. La production de l'énergie renouvelable, surtout éolienne et photovoltaïque, est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du site isolé grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de l'électronique de puissance.

L'objectif principal de ce travail de recherche présenté dans cette mémoire, consiste à identifier les meilleurs stratégies de commande, qui permettront de répondre au mieux à des exigences spécifiques dans la zone « deux », où la turbine éolienne sollicite des algorithmes de commande sophistiqués et robustes pour un fonctionnement optimal à différentes contraintes. On a proposé une commande robuste pour une gestion efficace et de haute qualité de la puissance injectée au réseau électrique.

Cette proposition a été appliquée dans un système éolien à vitesse variable basé sur une nouvelle génération pris en charge par un système de stockage d'énergie (batterie). Cette solution est préférable dans ce domaine car elle respect le nouveau code de réseau qui permet de l'intégration des éoliennes dans le réseau électrique.

Pour atteindre ces objectifs notre mémoire a été organisé comme suite :

Nous avons présenté, dans le premier chapitre, un état de l'art en évaluant les potentialités des diverses structures éoliennes (des différentes configurations électriques utilisées dans le domaine de l'énergie éolienne) et proposant en conséquence des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens. Ensuite, une étude aérodynamique de l'éolienne a été faite (les pales et leurs impacts sur le coefficient de puissance). Parmi les topologies identifiées, le choix a été porté sur une turbine éolienne à attaque direct basé sur un générateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation des différents composants d'une éolienne à vitesse variable a été accomplie (vent, turbine, GSAP, redresseur, onduleur, hacheur et batterie). Cette modélisation permettant d'expliquer la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Dans le troisième chapitre, les différentes zones de fonctionnement avec les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées. La zone particulière a été détaillée (où la maximisation

de l'énergie extraite du vent est l'objectif principal). En raison de la nature changeante et instantanée du vent, la puissance de sortie d'un système de conversion hybride éolienne est maximisée si le rotor de la turbine est entraîné à une vitesse de rotation optimale pour chaque vitesse de vent. Pour cela, nous avons abordé deux parties de commande : une première partie dédiée à la commande de la turbine et une seconde consacrée à la commande de la génératrice.

Ensuite, nous avons abordé trois parties de commande : une première partie dédiée à la commande de la turbine/GSAP et une seconde consacrée à la commande de bus continue /batterie et le dernière dévoyé à la commande de la puissance active et réactive coté de réseau.

Les résultats de simulation réalisée dans ce chapitre (MPPT et FOC, CCB, CCG) montrent clairement que :

- La supériorité de la technique de contrôle MPPT basée sur contrôle optimale de couple (OTC), ainsi que l'efficacité de la commande FOC appliqué dans ce système hybride éolienne.
- La fiabilité de système hybride éolienne fournit une puissance demandée par le réseau (charge) dans des conditions invisible et intermittente de vitesse de vent. Cependant, la possibilité de stocker des excédents d'énergie permet de capturer l'énergie éolienne maximale même lorsque la demande d'énergie est faible.
- La gestion de la commande vectorielle appliqué au convertisseur coté réseau maintien un échange de haute qualité de la puissance active et réactive injectée au réseau électrique.

---

## Reference bibliographique

- [1]G. Cognet, P. Hesto, J.-L. Houzelot, Ch. Rombaut, J. Taine, B. Tamain, « L'énergie au XXIème siècle Une réflexion prospective Une analyse des verrous scientifiques et technologiques à lever », <http://www.recherche.gouv.fr/mstp/MRNT/MSTP/01-200>.
- [2] « Perspectives d'offre d'énergie », Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 -2005, [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
- [3]MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [4]Guy Cuntty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-Provence, 2001, [www.edisud.com](http://www.edisud.com).
- [5]M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [6]Mons, L. Les enjeux de l'énergie, Larousse, France. (2005).
- [7]Source : notre-planete.info, <http://www.notre-planete.info/actualites/4047-energies-renouvelables-dynamisme>. <http://www.notre-planete.info/actualites/4047-energies-renouvelables-dynamisme>.
- [8] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [9]B. Sørensen, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Copyright. 2004 by Elsevier Science.
- [10] « Energies Renouvelables ». <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [11]HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [12]ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [13] Etude d'un aérogénérateur GERGAUD, Olivier. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. 2002. Thèse de doctorat. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [14] cite internet <http://wikipedia.org/wiki/energie.eolienne>.
- [15] <http://tpe-eolienne-85.e-monsite.com/pages/i-generalites/b-differents-types.html>.

- [16] THIÉRY, J. P. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fine en microscopie électronique. J. Microsc., Fr, 1967, vol. 6, p. 987-1018.
- [17] BOSSARD, J., FRANC, J. P., MAÎTRE, T., et al. Mesures PIV du champ de vitesse dans une hydrolienne tripale de type Darrieus-Comparaison avec les simulations numériques. Congrès Francophone de Techniques Laser (Vandoeuvre-lès-Nancy), 2010.
- [18] F. Poitiers, ‘‘Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne’’, Thèse de doctorat de l’université de Nantes, France, 19-12-2003.
- [19] A.Mirecki, ‘‘Etude Comparative de chaînes de Conversion d’Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance’’, Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005
- [20]<http://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-a1/02/eoliennes-axe-horizontal.html>.
- [21] KEITA, IBRAHIM A. COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE. 2010
- [22] SMAÏL, M. A. et BENATIALLAH, A. Modélisation d’une chaîne de conversion éolienne équipée d’une machine asynchrone double alimentation. Revue des Energies Renouvelables ICES, 2011, vol. 11, p. 233-238.
- [23] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [24] BILLEL, Meghni. Contribution à l’amélioration des performances d’une chaîne énergétique éolienne. 1955. Thèse de doctorat. Université de Tébessa.
- [25] ABU-TABAK, Nesmat. Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation. 2008. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon.
- [26] POITIERS, Frédéric. 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. 2003. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- [27] BELAKEHAL, S., BENTOUNSI, A., MERZOUG, M., et al. Modélisation et commande d’une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l’énergie éolienne. Revue des Energies Renouvelables, 2010, vol. 13, no 1, p. 149-161.

- [28] CARON, Jean-Pierre et HAUTIER, Jean-Paul. *Modélisation et commande de la machine asynchrone*. Technip, 1995.
- [29] MACHMOUM, M., POITIERS, F., MOREAU, L., et al. Etude d'éolienne à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA). GE44, Polytechnic Institute of Nantes, France, 2003.
- [30] GHENNAM, Tarak. Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation. 2011. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille; Ecole Militaire polytechnique Alger.
- [31] <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/betz.htm>
- [32] [https://www.fun-mooc.fr/.../MOOC\\_UVED\\_ENR\\_Recriptions\\_Eolien\\_Performan](https://www.fun-mooc.fr/.../MOOC_UVED_ENR_Recriptions_Eolien_Performan)
- [33] ALI, BOUHEDDA Mr. Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne. 2011. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [34] BOUDEBZA, Benaïssa. Etude et Commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double étoile connecté au réseau électrique. Thèse de doctorat. Université Mustapha Stambouli de Mascara.
- [35] LE PIOUFLE, Bruno, GEORGIU, G., et LOUIS, J.-P. Application des commandes non linéaires pour la régulation en vitesse ou en position de la machine synchrone autopilotée. *Revue de Physique appliquée*, 1990, vol. 25, no 6, p. 517-526.
- [36] BELAKEHAL, S., BENTOUNSI, A., MERZOUG, M., et al. Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010, vol. 13, no 1, p. 149-161.
- [37] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos, « Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid», *IEEE Transaction on energy conversion* vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [38] BELAKEHAL, Soltane. Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables. universite costantine, 2010.

- [39] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille(ECL) Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL) ,06décembre 2004.
- [40] KELOUWANI, Souso. Stratégie de commande d'un système à énergie renouvelable avec stockage d'hydrogène. 2002. PhD Thesis. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [41]CROCI, Lila. Gestion de l'énergie dans UN système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. 2013. PhD Thesis. Université de Poitiers.
- [42]BENCHERIF, Mohammed. Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome. 2015. PhD Thesis.
- [43]HUANG, Bin. Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible. 2009. PhD Thesis. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- [44] MUNTEANU, Iulian, BRATCU, Antoneta Iuliana, CUTULULIS, Nicolaos-Antonio, et al. Optimal control of wind energy systems: towards a global approach. Springer Science & Business Media, 2008.
- [45] DADONE, Andrea et DAMBROSIO, Lorenzo. Estimator based adaptive fuzzy logic control technique for a wind turbine-generator system. *Energy conversion and management*, 2003, vol. 44, no 1, p. 135-153.
- [46] WANG, Quincy et CHANG, Liuchen. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, no 5, p. 1242-1249.
- [47] ABO-KHALIL, Ahmed G. et LEE, Dong-Choon. MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR. *Industrial Electronics, IEEE Transactionson*, 2008, vol. 55, no 3, p. 1489-1490.
- [48]Frédéric Brédard Modélisation et contrôle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable connectée au réseau et utilisant une machine asynchrone, UNIVERSITE DU QUEBEC A RIMOUSKI 8 décembre 20141

- [49] TAMAARAT, Azzouz. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2016. PhD Thesis.
- [50] AUBRÉE, René. Thèse de Doctorat Stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance. 2014. PhD Thesis. Université de Nantes.
- [51] AOUCHICHE, N.; CHEIKH, MS Aït; MALEK, A. Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. *Revue des Energies Renouvelables*, 2013, 16.13: 485-498.
- [52] KHALFA, M. A., et al. Commande vectorielle indirecte d'une pompe centrifuge photovoltaïque au fil de soleil. *Revue des Energies renouvelables, CICME Sousse (Tunisie)*, 2008.
- [53] SAID HASSAINE «Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents» thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran, 2008.
- [54] BENCHABANE, F., et al. Etude comparative entre la commande vectorielle avec régulateurs PI et à mode glissant pour l'asservissement de la vitesse ou de la position d'un moteur synchrone à aimants permanents. 2014.
- [55] FAIROUZ, Kendouli. Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique. 2017.
- [56] POITIERS, Frédéric. 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. 2003. PhD Thesis. Université de Nantes.

## ANNEXE A : Paramètres de la chaîne éolienne

**Tab.A.1.** : Paramètres de GSAP

Paramètres	valeur
Puissance nominale	$P_e = 10 \text{ kw}$
Résistance statorique	$R_s = 0.00829\Omega$
Inductance direct statorique	$L_d = 0.174 \text{ mH}$
Inductance quadrature statorique	$L_q = 0.174 \text{ mH}$
Flux d'aimant	$\psi_m = 0.071 \text{ wb}$
Nombre de pair de pole	$n_p = 6$
Inertie Totale	$J_t = 0.089 \text{ kg.m}^2$
Force de frottement	$f = 0.005 \text{ N.m}$

**Tab.A.2.** : Paramètres de la turbine éolienne

Paramètres	valeur
Rotor de la turbine	$R_t = 2 \text{ m}$
Air density	$\rho = 1.225 \text{ kg.m}^3$
L'angle de calage	$\beta = 0^\circ$
La vitesse spécifique optimale	$\lambda_{opti} = 8.1$
Coefficient de puissance maximale	$C_{p \max} = 0.48$

**Tab.A.3.** : Paramètres de batterie et de bus continu

Paramètres	valeur
Tension nominale de bus continu	$V_{dc} = 800 \text{ V}$
Capacité de bus continu	$C = 0.0091 \text{ F}$
Puissance nominale de batterie	$P_{bat} = 3800 \text{ W}$
Tension nominale de bus continu	$V_{bat} = 400 \text{ V}$
SOC initial	50%

**Résumé:** Dans les éoliennes à vitesse variable l'amélioration du rendement énergétique nécessite des techniques de contrôle sophistiqués et robustes pour surmonter diverses contraintes, afin d'obtenir une conversion optimale de l'énergie aérodynamique. En raison de la nature changeante et instantanée du vent, la puissance de sortie d'un système de conversion de l'énergie éolienne (SCEE) est maximisée si le rotor est entraîné à une vitesse de rotation optimale pour chaque vitesse de vent. Ce résultat est obtenu avec un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Au cours des années, nous avons distingué une variété d'études sur les techniques d'extraction de puissance éolienne MPPT, mais très peu des travaux et des études dans la littérature donner des directives pour distinguer la technique de MPPT le plus adaptée et le plus robuste. Dans ce travail, une comparaison exhaustive des trois méthodes MPPT a été faite. Ces techniques peuvent être classées en différentes catégories selon le cout, la robustesse, la complexité, l'efficacité. En plus la contribution essentiel de cette comparaison a été réalisé dans un système sophistiqué basé sur un GSAP et mis en charge par un système de stockage d'énergie contienne une batterie a plomb d'acide. Les résultats obtenus montrent clairement la supériorité de la technique de contrôle basé sur le contrôle optimal de couple (OTC).

**Mots clés:** énergie éolienne, MPPT, SCEE, contrôle optimale de couple.

**المخلص:** في توربينات الرياح متغيرة السرعة يتطلب تحسين كفاءة استخدام الطاقة تقنيات تحكم متطورة وقوية للتغلب على القيود المختلفة، من أجل تحقيق تحويل أقصى قدر للطاقة الهوائية. نظرا للطبيعة المتغيرة و الحظية للرياح، يتم توسيع و تكبير انتاج الطاقة من نظام تحويل طاقة الرياح (SCEE) إلا إذا كان العضو الدوار مدفوع بسرعة دوران مثلى لكل سرعات الرياح. ويتحقق ذلك مع وحدة تحكم لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT). خلال السنوات المنصرمة، حددنا مجموعة متنوعة من الدراسات حول تقنيات استخراج طاقة الرياح (MPPT)، ولكن عدد قليل جدا من المقالات والدراسات المتواجدة في الأدب تعطي توجيهات للتمييز بين التقنيات (MPPT) أكثر ملائمة قوة. في هذا العمل، تم إجراء مقارنة شاملة بين ثلاثة طرق (MPPT). ويمكن تصنيف هذه التقنيات إلى فئات مختلفة وفقا للتكلفة، المتانة، التعقيد، الكفاءة. وبالإضافة إلى ذلك تم تحقيق المساهمة الأساسية التي تقدمها هذه المقارنة في نظام معقد يستند على GSAP ويدعمه نظام تخزين الطاقة الدائرة التي تحتوي على بطارية الرصاص الحمضية. النتائج تظهر بوضوح تفوق تقنية التحكم الأمثل لعزم الدوران (OTC).

**الكلمات البحث:** طاقة الرياح، SCEE، توربينات الرياح متغيرة السرعة، MPPT، التحكم الأمثل لعزم الدوران.

**Abstract:** Wind generator performance improvement requires sophisticated and robust control techniques to overcome various constraints, in order to achieve optimal aerodynamic energy conversion. Due to the instantaneous changing nature of the wind, the output power of a wind energy conversion system (WECS) is maximized if the wind rotor is driven at an optimal rotational speed for a particular wind speed. This is achieved with a maximum power point tracking (MPPT) controller. Over the years, we have seen a variety of MPPT studies, but very few provide guidelines to single out the most suited MPPT technique. In this memory, a comprehensive comparison of the three most used schemes has been made in relation to permanent magnet synchronous generator (PMSG) wind turbine system. These techniques can be classified into various categories. In addition the essential contribution of this comparison was achieved in a sophisticated system based on a PMSG and supported by an energy storage system ESS containing a lead acid battery. The obtained results show clearly the superiority of the optimum torque control (OTC) technical.

**Key words:** wind energy, MPPT, WECS, optimal torque control, an energy storage system.