

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف

Université Hassiba Benbouali de Chlef (U.H.B.C)

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



Projet de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme

## MASTER

Domaine : Sciences & Technologies

Filière : Electrotechnique

Option : Réseau - Commande Electrique

## Thème

---

**Commande MPPT basée sur l'algorithme conductance incrémentale  
D'un système de conversion d'énergie éolienne**

---

**Présenté par :**

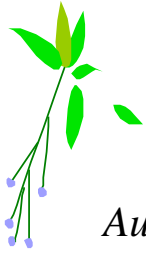
CHAA Abdelkarim

DJILALI SAIAH Mohammed

Soutenu le 26 / 06 / 2024 devant le jury composé de :

Président	Mr. BESSAAD TAIEB
Encadreur	Mr. YAHDOUN Adil
Examineur	Mr. BOUYAKOUB Ismail
Examineur	Mr. BOUROUINA Ahmed

**Promotion : 2023/2024**



# REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*

*Nous adressons toute notre gratitude au Président du jury et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce modeste travail et ne feront qu'améliorer la qualité de cet ouvrage.*

*Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à MR YAHDOU pour, leurs orientations et leur gentillesse afin de permettre le bon déroulement de notre travail.*

*Nos remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de notre Travail.*

*Enfin, nos remerciements sont adressés plus particulièrement à nos familles et nos amis(es) qui ont su nous soutenir, nous encourager, nous aider et nous supporter tout au long des années.*

*Abdelkarim*

*Mohammed*

*La force d'être deux fait toujours naître de grandes choses.*



# Dédicace

*Je dédie ce mémoire :*

*À ma chère maman, et ma grand-mère (رحمهم الله)*

*À Mon chère père,*

*Spécialement À grand père, que Allah les protège, Qui m'a Donné toute la liberté pour mes choix dans la vie et qu'ils soient très Fiers et Heureux de me voir réussir, a traversé ce travail je vous témoigne mon amour et ma gratitude.*

*À mes chères frère Mohammed, ilyas et ma chère sœur que Allah les protège.*

*À toute ma grande famille.*

*À mon binôme Mohammed avec qui j'ai partagé les bons et les durs moments.*

*À mon encadreur.*

*À tous mes amis qui ont répondu présent à chaque fois que j'ai eu besoin d'eux.*

*À tous ceux et celles qui me sont chers.*

*Abdelkarim*

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire:*

*À Mes parents, et À ma chère ma grand-mère,  
Pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes  
les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.*

*À mes frères pour leur tendresse, leur complicité et leur présence.*

*À Toute ma famille*

*À mon binôme abdelkarim avec qui j'ai partagé les bons et les durs  
moments.*

*À mon encadreur.*

*À tous mes amis qui ont répondu présent à chaque fois que j'ai eu  
besoin d'eux.*

*À tous ceux et celles qui me sont chers.*

*Mohammed*

# *Sommaire*

## Sommaire

**Remerciement**

**Dédicace**

**Liste des notations et symboles**

**Liste des figures et tableaux**

**Introduction générale** ..... 1

### Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

**I.1 Introduction** .....4

**I.2 Définition de l'énergie éolienne**.....4

**I.3 Comment fonctionne une éolienne**.....5

**I.4 Principaux composants d'une éolienne**.....6

**I.4.1 La tour**.....6

**I.4.2 La nacelle**.....7

**I.4.3 Le rotor**.....7

**I.5 Les différents types d'éoliennes**.....7

**I.5.1 Éoliennes à axe vertical**.....8

**I.5.2 Éoliennes à axe horizontal**.....9

**I.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne**.....10

**I.6.1 Avantages**.....10

**I.6.2 Inconvénients**.....11

**I.7 Conversion électromécanique dans systèmes éoliens**.....12

**I.7.1 Machine asynchrone**.....12

**I.7.1.1 Machines asynchrones à cage(MAS)**.....12

**I.7.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator**.....14

**I.7.1.3 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"** .....15

**I.7.2 Systèmes utilisant la machine synchrone**.....16

**I.7.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné**.....16

**I.7.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents(GSAP)**.....17

**I.8 Puissance et dimensions des aérogénérateurs** .....20

**I.9 L'énergie éolienne en quelques chiffres**.....20

**I.9.1 A l'échelle mondiale**.....20

<b>I.9.2</b> A l'échelle nationale.....	21
<b>I.10</b> Fonctionnement optimal d'une éolienne.....	22
<b>I.10.1</b> Système d'orientation des pales ou "Pitch Control" .....	23
<b>I.10.2</b> Système à décrochage aéro dynamique ou "StallControl" .....	24
<b>I.11</b> Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne.....	24
<b>I.11.1.</b> Le stockage à court terme.....	25
<b>I.11.2</b> Le stockage à long terme.....	25
<b>I.12</b> Classification des algorithmes MPPT pour les systèmes éoliens.....	25
<b>I.13</b> Conclusion.....	27
<b>Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne</b>	
<b>II.1</b> Introduction .....	29
<b>II.2</b> Description de la chaîne de conversion .....	30
<b>II.3</b> Modélisation de l'énergie du vent .....	31
<b>II.4</b> Modélisation de la turbine .....	32
<b>II.4.1</b> Modèle du multiplicateur .....	35
<b>II.4.2</b> Equation dynamique de l'arbre .....	37
<b>II.5</b> Modélisation des convertisseurs .....	38
<b>II.5.1</b> Modélisation de convertisseur statique coté machine (redresseur) .....	38
<b>II.5.2</b> Modélisation du bus continu .....	40
<b>II.5.3</b> Modélisation de convertisseur statique coté réseau (onduleur) .....	41
<b>II.6</b> Machine synchrone à aimants permanents .....	43
<b>II.6.1</b> Modèle de la MSAP .....	44
<b>II.6.2</b> Types des MSAP .....	44
<b>II.6.3</b> Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	44
<b>II.6.3.1</b> Équations électriques de la MSAP dans le repère fixe (abc) .....	45
<b>II.6.3.2</b> Transformation de Park (dq) .....	46
<b>II.6.3.2.1</b> Équations électriques de la MSAP dans le repère (d q) .....	47
a) Équations de tension dans le repère (d q) .....	48
b) Équations de flux magnétiques dans le repère (d q) .....	48
<b>II.6.3.3</b> Équations du couple électromagnétique et d'équation mécanique .....	48
<b>II.7</b> Modélisation du réseau électrique .....	49
<b>II.8</b> Conclusion .....	50
<b>Chapitre III: Contrôle et simulation de la chaîne de conversion éolienne</b>	
<b>III.1</b> Introduction .....	52

---

<b>III.2</b> Stratégies de contrôle du système de production d'énergie éolienne .....	52
<b>III.2.1</b> Contrôle MPPT .....	53
<b>III.2.1.1</b> conductance incrémentale .....	53
<b>III.2.1.2</b> Principe de l'algorithme de conductance incrémentale.....	53
<b>III.2.1.3</b> Avantages de l'algorithme de conductance incrémentale.....	53
<b>III.2.1.4</b> Inconvénients de l'algorithme de conductance incrémentale.....	54
<b>III.2.1.5</b> Variations de l'algorithme IC.....	54
<b>III.2.1.6</b> Facteurs influençant les performances de l'algorithme IC.....	54
<b>III.2.1.7</b> Applications de l'algorithme IC.....	55
<b>III.2.1.8</b> Contrôle du bus continu.....	57
<b>III.2.2.9</b> Contrôle de puissance active et réactive du réseau.....	57
<b>III.3</b> Commande du convertisseur .....	58
<b>III.3.1.</b> Stratégie de la commande à MLI .....	58
<b>III.4</b> Résultats de simulation .....	59
<b>III.5</b> Conclusion .....	64
<b>Conclusion générale</b> .....	66
<b>Annexe A</b> .....	68
<b>Annexe B</b> .....	70
<b>Bibliographie</b> .....	74

*Liste des notations et  
symboles*

## Liste des notations et symboles

SEE	Systèmes d'énergie éolienne
MS	Machine synchrone ;
MAS	Machine Asynchrone ;
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents ;
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents ;
MSAPI	Machines synchrones à aimants permanents insérés ;
PI	Proportionnel intégral ;
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée (Insulated-Gate Bipolar Transistor);
MSAPC	Machines synchrones à aimants permanents chapeautés ;
MPP	Maximum Power Point ;
MSAPE	Machines synchrones à aimants permanents enterrés ;
GTO	Gate Turn-Off Thyristor ;
FMM	Force magnétomotrice ;
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion ;
IC	Incrémental conductance
P&O	Perturb and observe;
CPO	perturbation et observation conventionnelles ;
MPPT	Maximum Power Point Tracking;
(P, Q)	Puissance active et réactive ;
d , q	Axes de référentiel de Park ;

### Grandeurs électriques au stator :

$V_a V_b V_c$	Tensions statoriques des phases a, b, c ;
$i_a i_b i_c$	Courant statoriques des phases a, b, c ;
$V_d V_q$	Tensions statoriques sur l'axe d et l'axe q ;
$i_d i_q$	Courant statoriques sur l'axe d et l'axe q ;
$i_s$	Courant traverse les bobines statoriques ;
$[p(\theta)]$	Matrice de transformation de Park ;

**Grandeurs magnétiques:**

- $\Phi_a \Phi_b \Phi_c$  Flux totaux traversant les bobines statoriques ;  
 $\Phi_d \Phi_q$  Flux statoriques sur l'axe d et l'axe q ;  
 $\Phi_f$  Flux de l'aimant permanent ;  
 $\Phi_s$  Flux statorique ;

**Grandeurs mécaniques :**

- $\omega$  Pulsation des tensions [rad/s] ;  
 $C_{em}$  Le couple électromagnétique ;  
 $C_r$  Couple résistant [Nm];  
 $\theta$  Angle mécanique entre le stator et le rotor ;  
 $\Omega$  Vitesse angulaire mécanique rotorique ;  
 $J$  Moment d'inertie ;  
 $f$  Coefficient de frottement visqueux ;

**Grandeurs mécaniques de la turbine :**

- $G$  Le gain du multiplicateur ;  
 $J_{turbine}$  L'inertie de la turbine ;  
 $C_t$  Le couple développé par la turbine sous l'action du vent ;  
 $C_g$  Le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone ;  
 $F_v$  Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice ;  
 $\Omega_g$  La vitesse mécanique de la génératrice ;  
 $\Omega_t$  La vitesse de rotation de la turbine ;  
 $C_p$  Coefficient de puissance ;  
 $\beta$  Angle de calage des pales ;  
 $\lambda$  Vitesse spécifique ;  
 $\rho$  La densité du vent ;

$S$	La surface balayée par les pales ;
$R$	Rayon d'une pale de la turbine ;
$V_v$	Vitesse du vent ;
$P_t$	Puissance aérodynamique ;
$P_v$	Puissance fournie par le vent ;
$\lambda_{opt}$	Vitesse spécifique optimale ;
$\Omega_{g\ ref}$	La vitesse de référence ;
$\Omega_{t\ ref}$	La vitesse de référence de la turbine ;
$C_{em\ ref}$	Le couple de référence ;
$\Omega_{min}$	La vitesse minimale ;
$\Omega_{nom}$	La vitesse nominale ;
$\Omega_{max}$	La vitesse maximale ;

**Paramètres de la machine :**

$R_s$	Résistance d'une phase d'enroulement statorique ;
$L_d L_q$	L'inductance statoriques du repère de Park ;
$P$	Nombre de paires de pôles ;
$M$	Inductance mutuelle entre deux phases du stator ;

**Paramètres bus continu :**

$i_{ond}$	Le courant à onduleur ;
$i_{red}$	Le courant redressé ;
$V_{dc}$	Tension de bus continu ;
$i_{dc}$	Le courant de charge du condensateur ;
$C$	Capacité du bus continu ;

**Paramètre de convertisseurs :**

$T_i, T'_i$	Des thyristors (l'interrupteur) ;
$S_a, S_b, S_c$	Les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur (égal à si l'interrupteur est fermé et zéro s'il est ouvert) ;
$f_p$	Signal de porteuse ;
$f_m$	Signal de modulatrice ;

*Liste des Figures*  
*Et Tableaux*

**Liste des figures :**

**Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne**

Figure I.1: Principe de la conversion d'énergie.....5

Figure I.2: Les composants d'une éolienne.....6

Figure I.3: Illustration des composants des éoliennes.....6

Figure I.4 : Les différents type d'éolienne.....7

Figure I.5 : Eolienne type Savonius.....8

Figure I.6: Eoliennes type Darrieus.....9

Figure I.7 : éolienne a axe vertical et à voilure tournante.....9

Figure I.8: Eolienne a axe horizontal.....10

Figure I.9: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.....12

Figure I.10 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....13

Figure I.11: Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de  
Puissance.....14

Figure I.12 : La MAS à double stator.....15

Figure I.13 : Machine asynchrone à rotor bobiné.....15

Figure I.14 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur  
à diodes,(b)avec convertisseur commandé.....17

Figure I.15: Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a)  
GSAP avec deux convertisseurs MLI.(b) GSAP avec redresseur, hacheur et onduleur.....19

Figure I.16: Système éolien à coût minimum basé sur GSAP.....19

Figure I.17 Capacité éolienne mondiale installée cumulée par pays en 2022.....21

Figure I.18 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....23

Figure I.19 Classification des algorithmes MPPT pour les systèmes éoliens à connexion au réseau.....26

**Chapitre II: Modélisation de la chaine de conversion éolienne**

Figure II.1: Structure de la chaine de conversion éolienne étudiée.....30

Figure II.2 : Simulation du profile de la vitesse du vent.....32

Figure II.3 : Coefficient de puissance  $C_P$  en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ .....35

Figure II.4 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.....35

Figure II.5: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....37

Figure II.6: Schéma de principe du convertisseur statique côté machine (Redresseur).....39

Figure II.7 : Schéma électrique du bus continu.....40

Figure II.8: Schéma du convertisseur statique coté réseau (Onduleur).....41

Figure II.9 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc).....45

Figure II.10 : Représentation d'une MSAP dans le repère (d q).....47

Figure II.11: Modèle du réseau électrique.....49

**Chapitre III : Contrôle et simulation de la chaine de conversion éolienne**

Figure III.1: Schéma de la chaîne globale de conversion éolienne.....52

Figure III.2: Contrôle MPPT basé sur l'algorithme conductance incrémentale .....55

Figure III.3 : Organigramme de l'algorithme conductance incrémentale .....56

Figure III.4: Contrôle de la tension du bus continu.....57

Figure III.5: Stratégie de contrôle des puissances actives et réactives.....58

Figure III.6: La vitesse du vent.....60

Figure III.7 : Le coefficient de la puissance.....60

Figure III.8 : La puissance mécanique de la génératrice.....61

Figure III.9 : ratio de vitesse.....61

Figure III.10 : La vitesse du rotor de la génératrice.....	62
Figure III.11.a : La puissance réactive.....	62
Figure III.11.b : La puissance active.....	63
Figure III.12 : Les courants de réseau.....	63
Figure III.13 : La tension Vdc.....	64

**Liste des tableaux :**

**Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne**

Tableau I.1: Classification des éoliennes selon leur puissance nominale.....	20
--	----

**Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne**

Tableau II.1: Caractéristiques de la turbine éolienne.....	34
--	----

*Introduction*  
*Générale*

## Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée au cours des dernières décennies est étroitement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication. Actuellement, une grande partie de l'électricité est produite à partir de ressources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium, dont la régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Cela entraîne un risque non négligeable d'épuisement de ces ressources à moyen ou long terme [47].

De plus, la demande d'électricité continue de croître et dépasse déjà l'offre, entraînant, par exemple, une forte fluctuation des prix mondiaux du pétrole. Il existe plusieurs types de sources d'énergie renouvelable : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des alternatives viables, rivalisant avec les énergies fossiles en termes de coût et de performance de production. Cependant, les systèmes de conversion de ces énergies en électricité manquent souvent d'optimisation, ce qui les rend encore coûteux et déficients en rendement et en fiabilité. Bien que de nombreuses recherches démontrent la viabilité de sources comme l'énergie éolienne ou l'énergie photovoltaïque, il existe encore beaucoup de réticences à installer ces systèmes à grande échelle, tant pour la production de masse que pour les particuliers.

Les chercheurs ont cherché à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie grâce à la multiplication des éoliennes. L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser, de concevoir et de mettre en œuvre une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) efficace basée sur l'algorithme de conductance incrémentale pour un système éolien.

Dans ce cadre, L'objectif principal de ce mémoire est la modélisation et la simulation d'une chaîne éolienne avec l'application de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basée sur l'algorithme de Conductance Incrémentale. Cette étude vise à optimiser la production d'énergie éolienne en maximisant l'efficacité de conversion grâce à des techniques avancées de contrôle et de gestion de l'énergie.

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des rappels sur les systèmes éoliens, quelques concepts fondamentaux sur l'énergie éolienne et un état de l'art. Nous aborderons les différentes définitions des constituants impliqués, ainsi que les différentes génératrices utilisées dans la chaîne de conversion.

Le second chapitre sera dédié à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne. Notre chaîne de conversion sera composée d'une turbine éolienne associée à une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), suivie d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur connecté au réseau électrique.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons le contrôle et la simulation de la chaîne de conversion éolienne. Nous explorerons également le contrôle de maximisation de puissance (MPPT) avec l'algorithme de conductance incrémentale utilisé dans le système éolien. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation des résultats de simulation de la chaîne obtenus sous MATLAB/Simulink, suivie des interprétations de ces derniers.

Enfin, nous conclurons notre mémoire par une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

# *Chapitre I*

*Généralité sur les systèmes  
éoliens*

## I.1 Introduction

L'intérêt de l'utilisation d'énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne [2].

La technologie des capteurs éoliens a évolué depuis l'introduction du moulin à vent. Au début des années quarante, de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Diverses technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteurs à axe vertical ou horizontal), et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [3]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est cruciale. De nombreux appareils existent également là-bas, et la majorité d'entre eux utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les techniques de gestion de ces machines et leurs interfaces potentielles avec le réseau doivent permettre de maximiser l'utilisation d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible. Ceci dans le but d'augmenter la rentabilité des éoliennes.

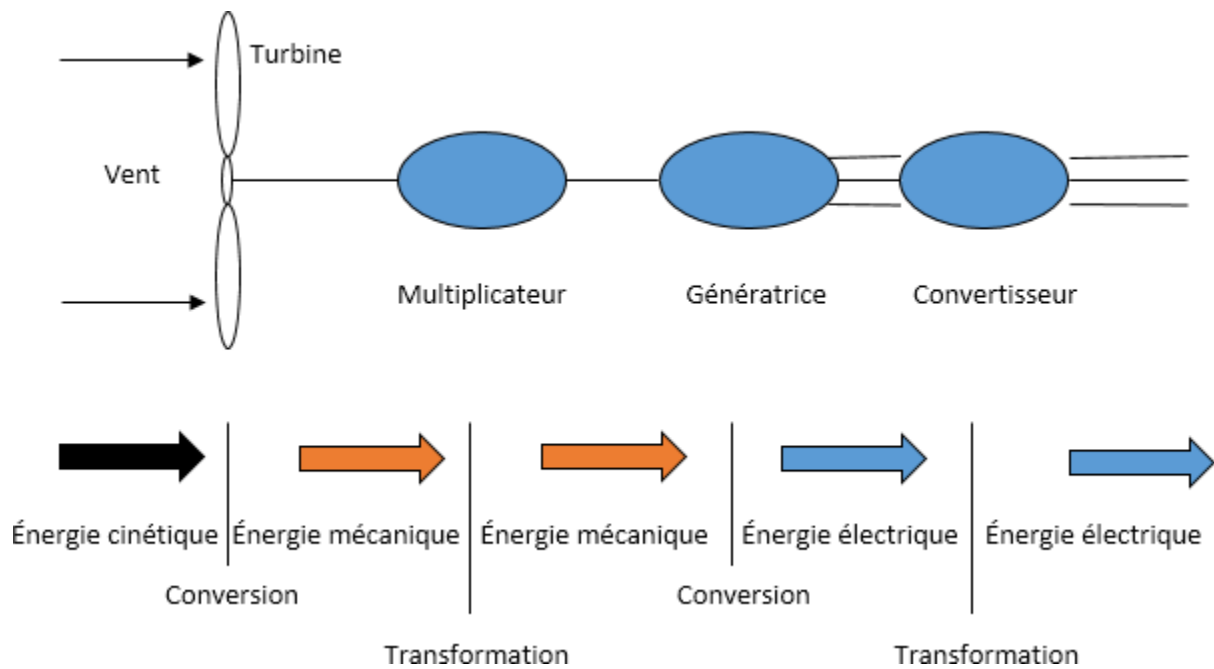
Dans ce chapitre, on présente les éoliennes de manière générale et explique comment choisir une chaîne de conversion électrique autonome.

## I.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision.

Un aérogénérateur, également connu sous le nom d'éolienne, est un appareil qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission et ensuite en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).



**Figure I.1** Principe de la conversion d'énergie [4].

### I.3. Comment fonctionne une éolienne ?

L'énergie éolienne est produite grâce à la force exercée par le vent sur des pales fixées à un rotor.

Dans sa configuration la plus commune, le rotor comporte trois pales tournant autour d'un axe horizontal. Le diamètre qu'elles balaisent varie de 80 à plus de 200 mètres. Plus les pales sont longues, plus la capacité de production d'électricité est importante.

En tournant, le rotor entraîne un générateur qui produit de l'énergie électrique. Dans les éoliennes de conception classique, le générateur nécessite une vitesse de rotation entre 1 000 et 2 000 tours par minute, alors que les pales tournent plus lentement (entre 5 et 25 tours par minute). Dans ces éoliennes, un multiplicateur (ou boîte de vitesse) est installé entre le rotor et le générateur pour augmenter la vitesse de rotation. Il existe aussi des machines de conception plus récente, à entraînement direct, dont les générateurs fonctionnent avec une vitesse de rotation variable (de 5 tours à 2000 tours par minute) et qui n'utilisent pas de multiplicateur. L'ensemble constitué par le multiplicateur et le générateur forme la nacelle.

La nacelle est installée au sommet d'un mât mesurant entre 50 et plus de 200 m de haut. Un système permet de l'orienter pour que le rotor et les pales soient toujours face au vent. Les éoliennes fonctionnent généralement à des vitesses de vent comprises généralement entre 10 et 90 km/h. Au-delà de cette vitesse maximum, elles s'arrêtent automatiquement pour éviter tout accident.

L'énergie électrique produite par le générateur est acheminée le long du mât via des câbles

jusqu'à un transformateur, avant d'être injectée dans le réseau électrique par des câbles souterrains [5].

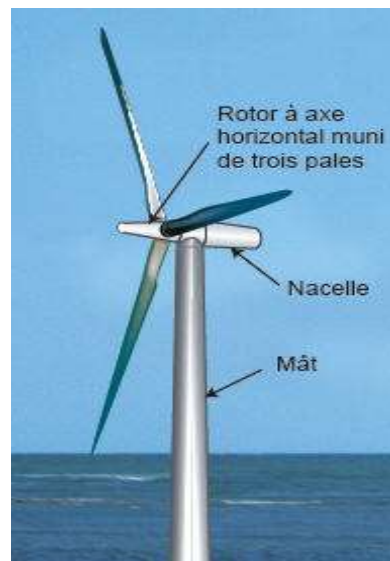


Figure I.2 Les composants d'une éolienne[6].

#### I.4. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est composée, principalement, des éléments suivants :

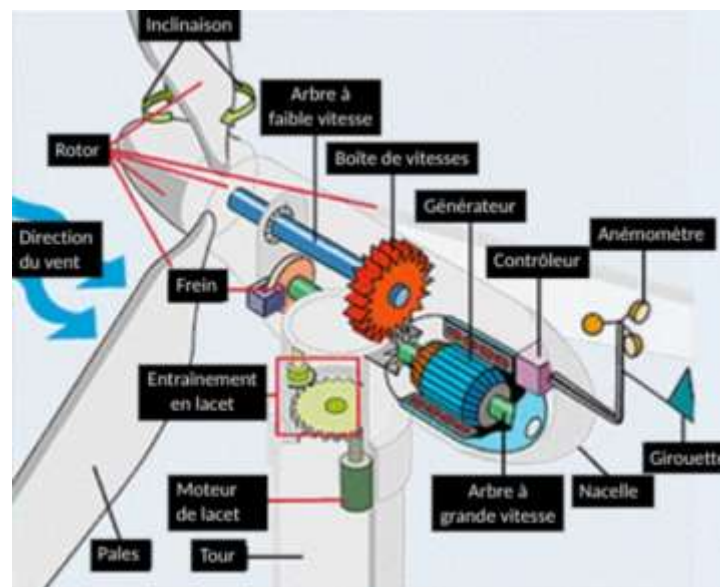


Figure I.3 Illustration des composants des éoliennes[7].

##### I.4.1 La tour

Elle est constituée du mat généralement conique en béton ou en acier pour supporter la nacelle avec une ouverture en bas pour permettre l'accès aux différents équipements de l'éolienne, du transformateur pour élever la tension avant d'être injectée dans le réseau et du

système de commande électrique.

### I.4.2 La nacelle

C'est une structure abritant les différents éléments mécaniques, pneumatiques, électriques et électroniques. A l'avant, il y a le rotor qui tourne pour orienter la machine dans la bonne direction.

### I.4.3 Le rotor

C'est la partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé d'un certain nombre de pales ayant une forme aérodynamique (en général trois) en matériaux composite. Il est branché au système mécanique directement ou via un multiplicateur de vitesse à engrenages [8].

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

Il On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal

Il existe de nos jours plusieurs sortes d'éoliennes parmi ces deux grandes catégories :

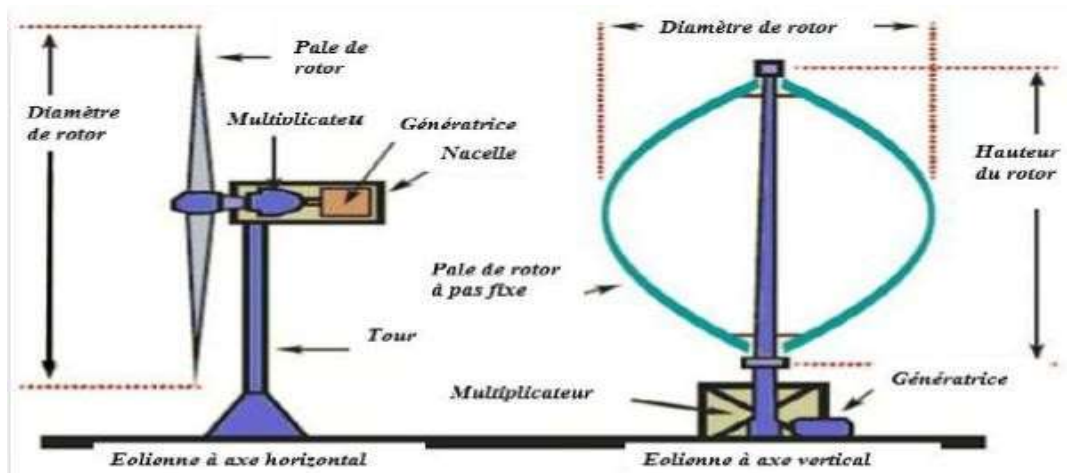


Figure I.4 Les différents type d'éolienne[4].

### I.5.1. Éoliennes à axe vertical

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

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible.

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [13].

#### ➤ Type Savonius

Constitué de demi-cylindres reliés à un axe vertical, ce type d'éolienne utilise la force de traînée du vent, sur le principe des moulins à vent. Son rendement est plus faible que celui des éoliennes qui utilisent la force de portance, mais ce type de machine permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles. De faible encombrement et plus silencieuses que les autres éoliennes, les éoliennes de type Savonius sont idéales pour l'intégration en milieu urbain[11].

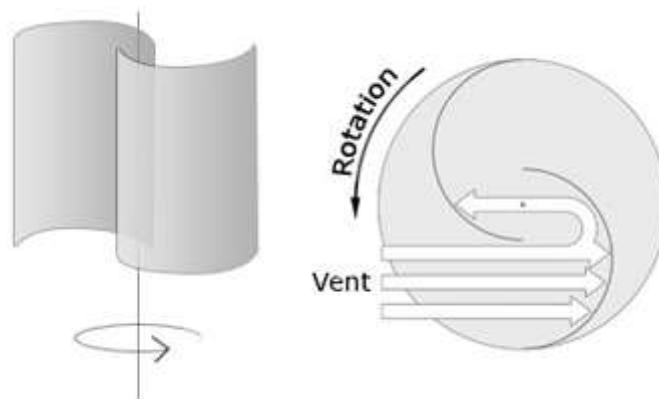


Figure I.5 Eolienne type Savonius[12].

#### ➤ Type Darrieus

Le rotor de Darrieus du nom de son inventeur, un ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.6) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

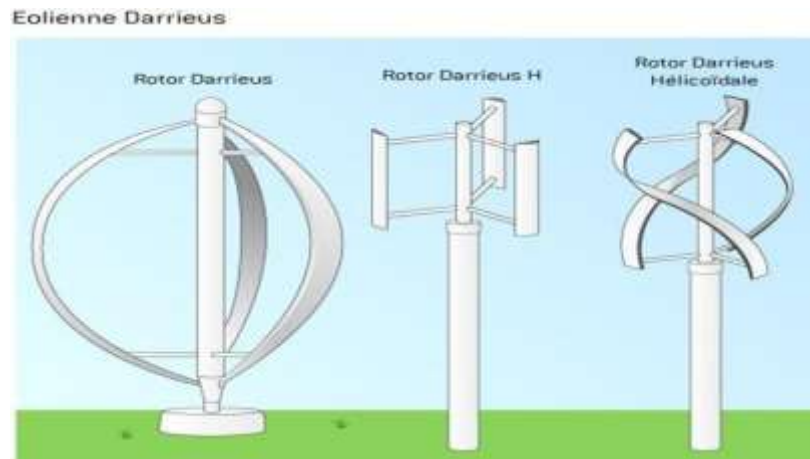


Figure I.6 Eoliennes type Darrieus[4].

### ➤ Type à voile tournante

Les éoliennes à voile tournante sont équipées de pales dont l'orientation dynamique permet de mieux exploiter l'énergie du vent, à la manière d'un navire à voile.

Ce mécanisme rend possible l'exploitation de vents plus puissants que ceux que peuvent exploiter les éoliennes classiques à trois pales. En outre, le bruit généré est fortement réduit par ce système.



Figure I.7 éolienne à axe vertical et à voile tournante [11].

## I.5.2. Éoliennes à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu. Il utilise la force de portance du vent appliqué aux pales, à la manière des ailes d'un avion, pour entraîner un générateur électrique[10].



**Figure I.8** Eolienne a axe horizontal [14].

Nous trouvons dans cette famille d'aérogénérateur deux catégories, « onshore » et « offshore », ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.

- Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites « off-shore » sont installées en mer.

## **I.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne**

### **I.6.1 Avantages**

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [9] elle présente plusieurs avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment au ralenti a fin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne).
- Chaque mégawatt-heure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- 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.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puis que 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.
- Une éolienne est en grande partie recyclable car elle est construite en acier. Au-delà de sa période de fonctionnement (environ 20 ans) elle peut être entièrement démontable. On peut même, au besoin, retirer la fondation en béton ne laissant derrière aucun produit contaminant autour d'elle et pourra être très facilement remplacée.

### **I.6.2 Inconvénients**

L'énergie éolienne a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement[9]:

- L'impact visuel :les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage ,mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette Idée reçue.
- Le bruit: il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor. Celle-ci doit donc être limitée.
- Des flashes très puissants doivent être émis toutes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Plus le parc éolien est dense plus le risque de collision devient important. Des systèmes lumineux montés sur les pales peuvent réduire ce danger. Ce pendant, ces flashes intermittents perturbent la qui étude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire.
- L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. Le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines. D'autres études disent quel essites éoliens ne doivent pas être implantés sur les par cours migratoires des oiseaux afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant implanté sur des sites très favorables (c'est à dire là où il y a le plus de vent) est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques. Son coût reste encore néanmoins plus élevé que celui des autres sources classiques sur les sites moins

ventés.

## I.7. Conversion électromécanique dans systèmes éoliens

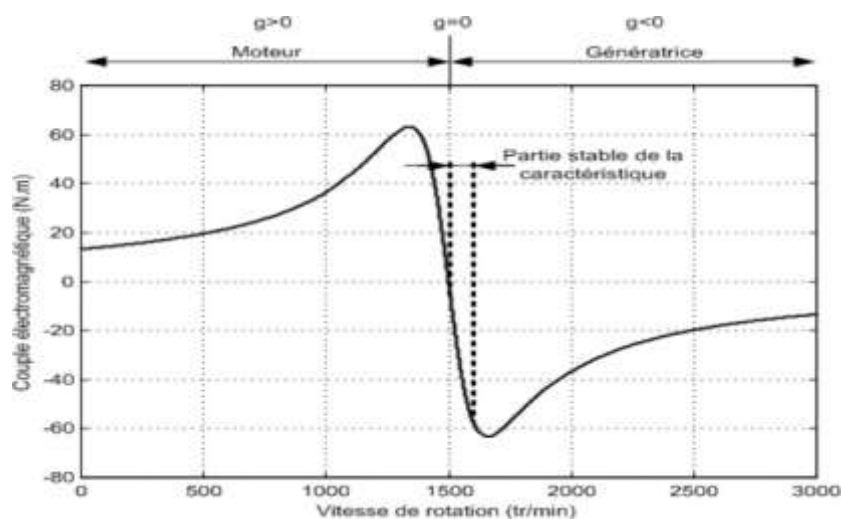
### I.7.1 Machine asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Sinon convenaient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

#### I.7.1.1 Machines asynchrones à cage(MAS)

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur(cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

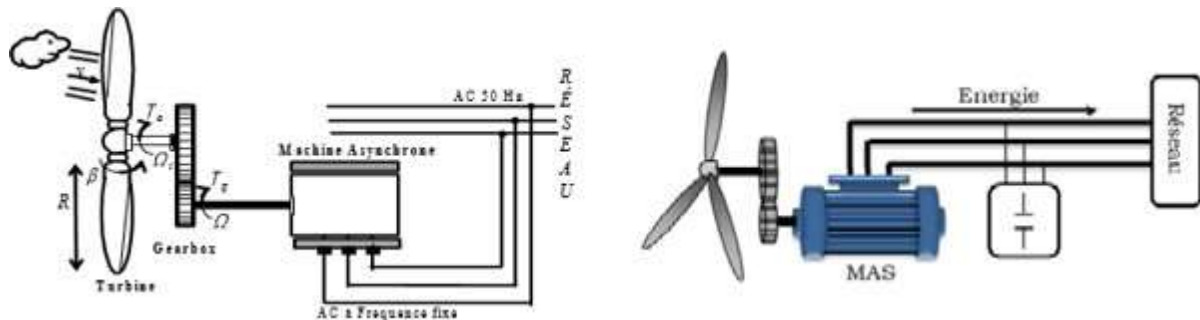
La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la(Figure I.9)[22].



**Figure I.9:** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles[22].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.10).



**Figure I.10:** Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau[22].

La machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

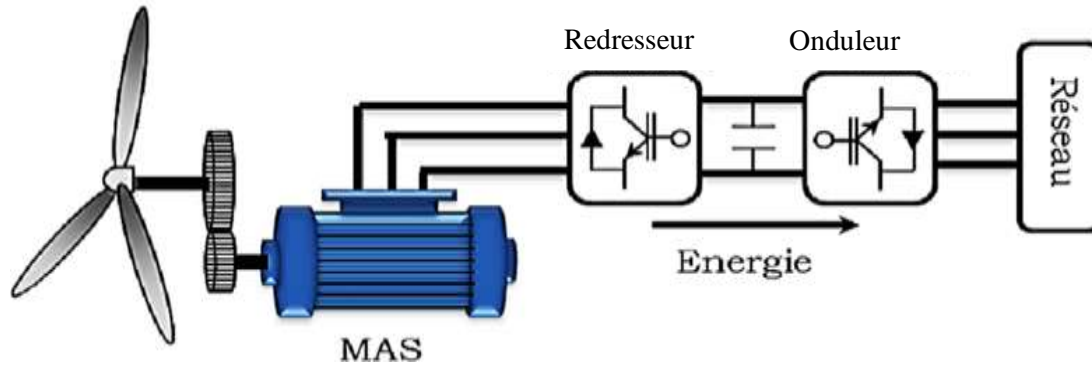
La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être deux fois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la (Figure I-10) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients:

- Il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor.
- Elle ne permet pas une vitesse variable.
- Le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du couple.
- Elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs.

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance, voir (Figure I.11)



**Figure I.11** :Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de Puissance[22].

### I.7.1.2 Machine Asynchrone à Double Stator

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Figure I.12) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par:

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (\text{I.1})$$

A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par:

$$\Omega = \frac{\omega}{s_p} \quad (\text{I.2})$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs[22].

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées[22].

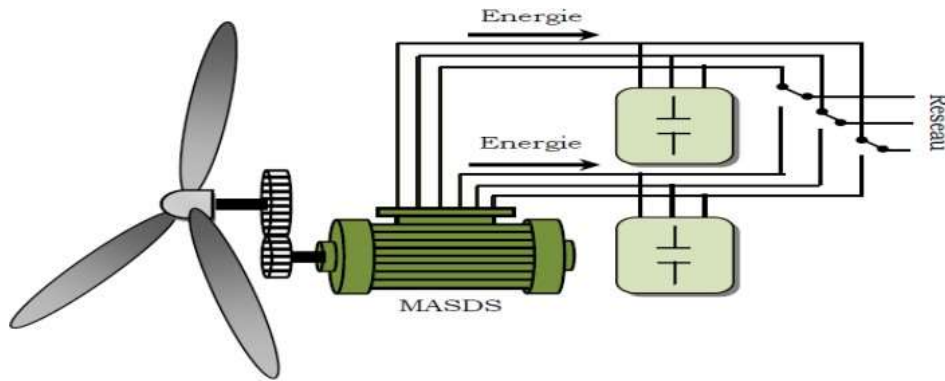


Figure I.12: La MAS à double stator[22].

### I.7.1.3 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.13). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor.

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage).

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec les quelles elle sont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

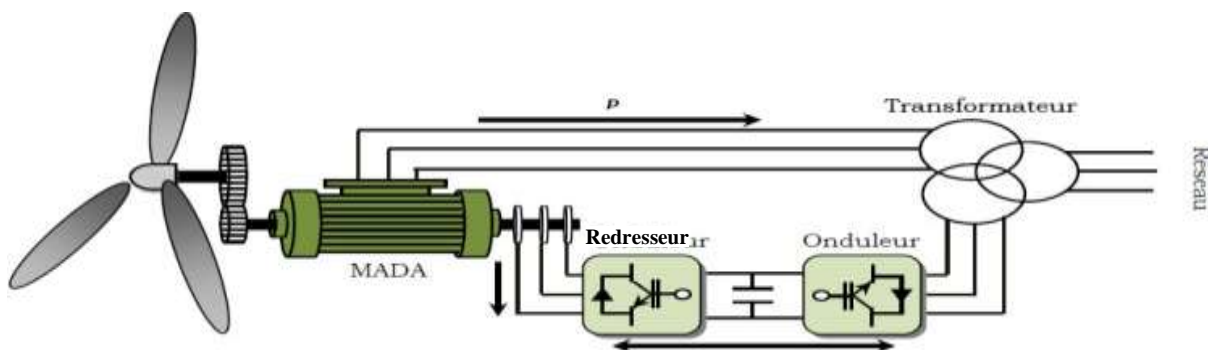


Figure I.13: Machine asynchrone à rotor bobiné[23].

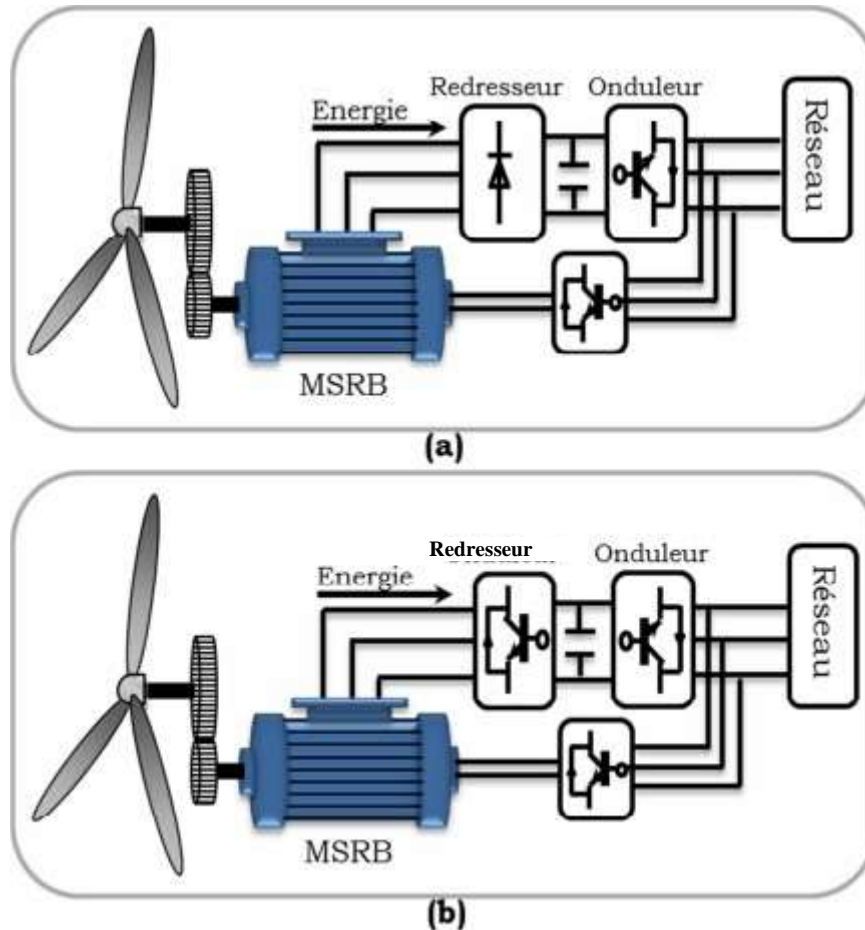
## **I.7.2 Systèmes utilisant la machine synchrone**

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20kW(environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

### **I.7.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné**

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.14) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation[22].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.



**Figure I.14 :** Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commandé[22].

### I.7.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiés aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la

suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure I.15). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet en fin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

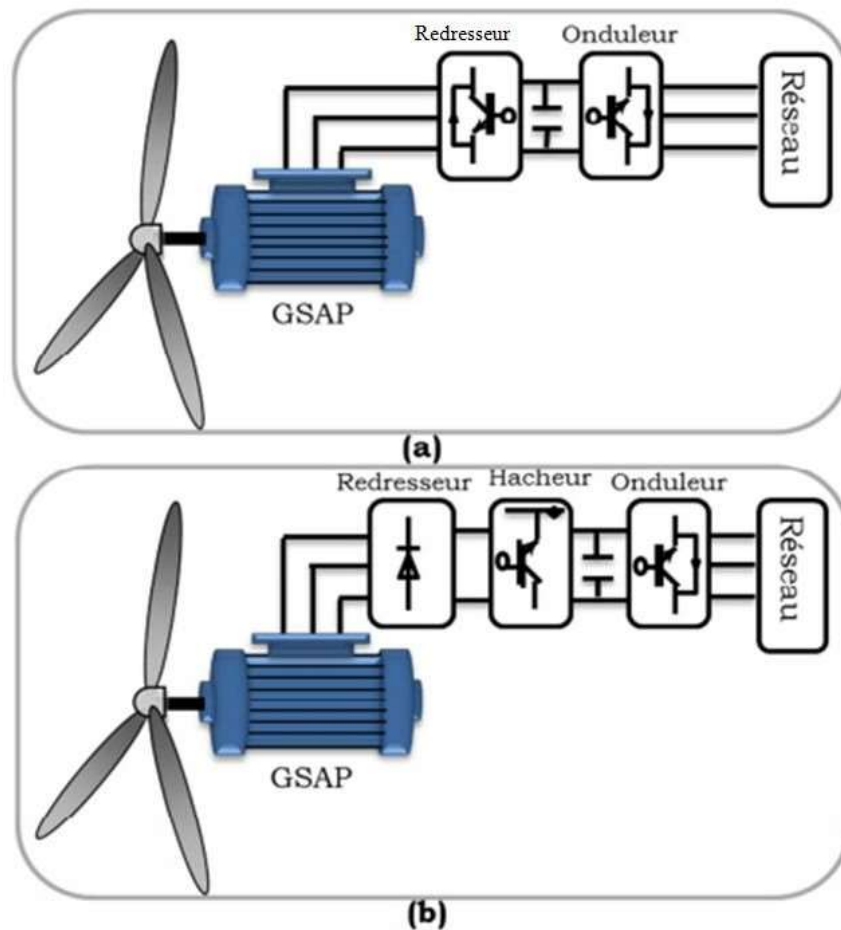
L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

Dans la configuration de la GSAP de la (Figure I.15(b)), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique.

La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance.

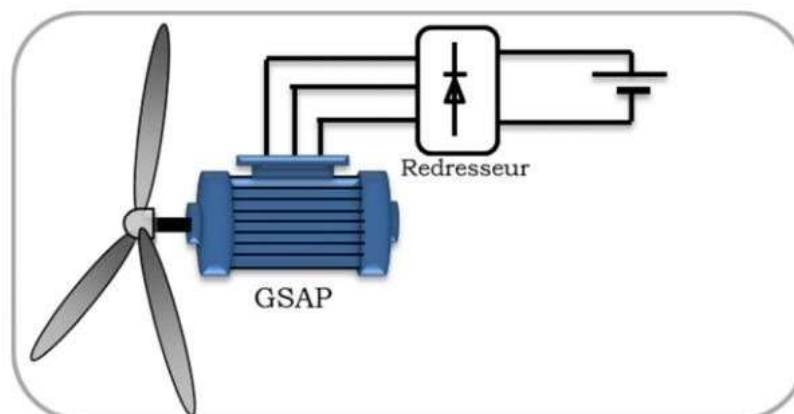
L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW).

Dans la configuration de la (Figure I.15(a)), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence.



**Figure I.15:** Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec deux convertisseurs MLI.(b) GSAP avec redresseur, hacheur et onduleur[22].

En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Figure I.16, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut-être obtenu[22].



**Figure I.16:** Système éolien à coût minimum basé sur GSAP[22].

## I.8. Puissance et dimensions des aérogénérateurs

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale ,ainsi nous Avons :

- Les éoliennes de petite puissance : inférieures à 40KW.
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW.
- Les éoliennes de forte puissance : supérieures à 1MW.

De plus ,le tableau ci-dessous propose une classification de ces éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

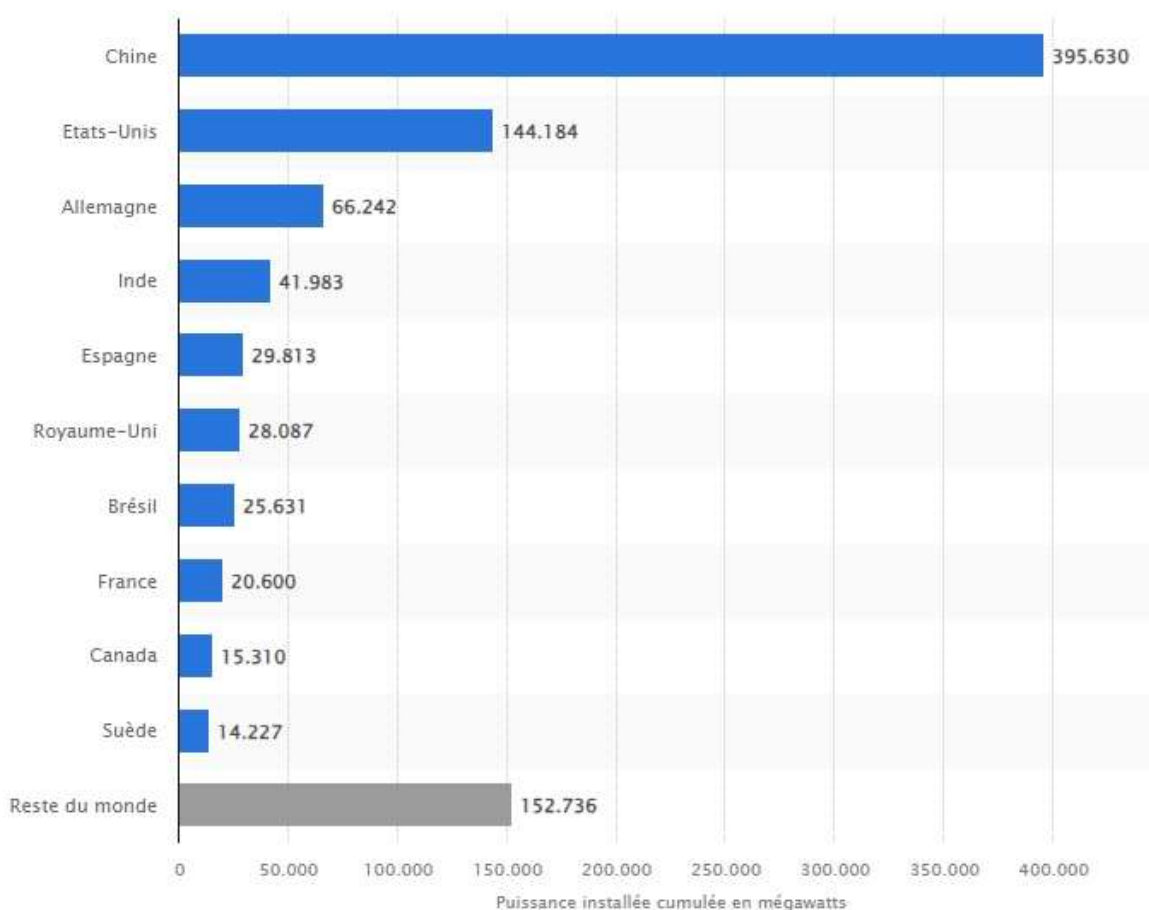
<b>Eolienne</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12m	Moins de 40kW
<b>Moyenne</b>	12m à 45m	De 40Kw à 1MW
<b>Grande</b>	46m et plus	1MW et plus

**Tableau I.1** Classification des éoliennes selon leur puissance nominale[4].

## I.9. L'énergie éolienne en quelques chiffres

### I.9.1 A l'échelle mondiale

Ce graphique représente la capacité en énergie éolienne installée cumulée dans le monde en 2022, selon le pays et en mégawatts. La Chine est de loin le plus grand installateur de capacité d'énergie éolienne au monde, faisant plus que doubler les États-Unis, qui arrivent en deuxième position. En 2022, la Chine avait installé plus de 395 gigawatts d'énergie éolienne, contre 122,2 gigawatts aux États-Unis.



**Figure I.17** Capacité éolienne mondiale installée cumulée par pays en 2022[15].

## I.9.2 A l'échelle nationale

L'Algérie a mis en service sa première ferme d'une capacité de 10 MW, à Adrar en 2014 et qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 32 GW d'ici 2030 (22 GW pour le marché national et 10 GW destinés à l'exportation) [16].

"L'exploitation du gisement éolien offshore estimé à 18 GW est une opportunité qui permettrait de doter l'Algérie d'une filière industrielle génératrice d'emplois hautement qualifiés et s'inscrirait dans ses efforts de diversification de l'économie nationale", a souligné M. Hariz dans une conférence organisée par l'Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral (ENSSMAL) sur ce type d'énergie renouvelable.

Selon lui, le recours à l'énergie éolienne permettrait également "d'alimenter la consommation électrique grandissante au Nord du pays qui inclut notamment le programme national énergivore d'extension des stations de dessalement, et à considérer des options d'épargne des réserves en gaz et des capacités d'export progressives vers d'autres marchés".

Dans ce sens, le conférencier a relevé que l'éolien offshore était l'une des technologies les plus "prometteuses" dans le mix énergétique mondial affirmant qu'il offrait "des capacités de production d'électricité dé carbonée à des échelles multi-gigawatts dans les grandes étendues des eaux territoriales nationales et zones économiques exclusives".

Evoquant les potentielles zones d'investissement dans l'énergie éolienne, M. Hariz a indiqué que les études effectuées font ressortir la région Ouest du pays comme une zone "très prometteuse" pour l'exploitation de cette énergie renouvelable, suivie des corridors Tizi-Ouzou- Boumerdes et Skikda-Jijel.

Il a également assuré que "la grande expérience" algérienne dans le domaine de l'énergie conventionnelle et "les compétences avérées" de ce secteur peuvent constituer "un autre atout" dans l'exploitation du potentiel national de l'énergie éolienne.

L'expert a affirmé, d'autre part, que l'éolien offshore connaît un développement à l'international notamment en Méditerranée qui enregistre "une prolifération importante de ces projets".

La conférence à laquelle ont pris part des étudiants de l'ENSSMAL ainsi que des cadres du secteur de l'énergie et des instituts nationaux en relation avec les énergies renouvelables a été marquée par un riche débat notamment sur le rôle de la recherche scientifique et la formation de compétences dans le développement de l'éolien offshore[18].

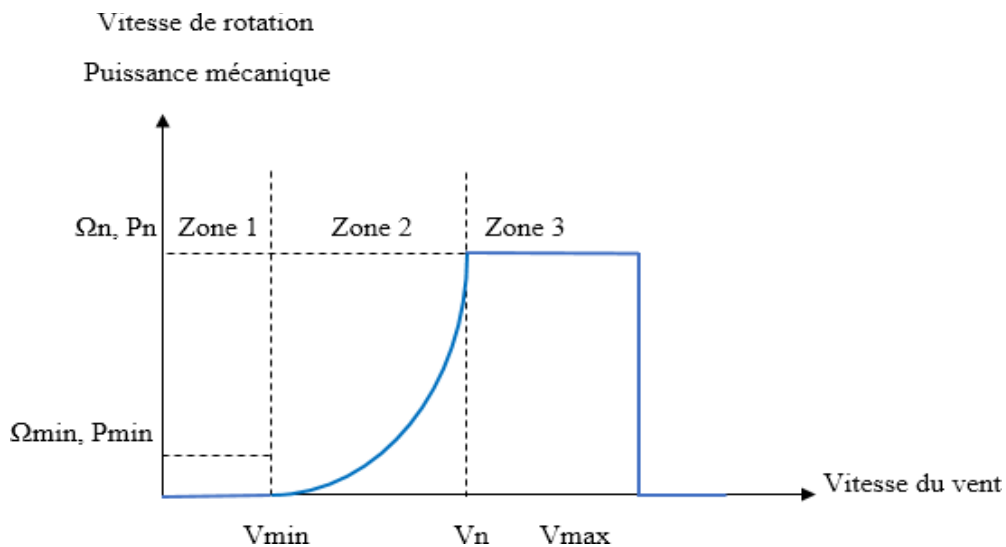
## **I.10. Fonctionnement optimal d'une éolienne**

La puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale  $P_n$  une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments [11] [16] [17]. C'est pour cela que la turbine éolienne doit modifier ses paramètres, afin de maintenir la vitesse à sa valeur nominale et d'éviter toute destruction mécanique.

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre (la Figure I.10).

- **Zone 1** la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- **Zone 2** le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ .

➤ **Zone 3** le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominal es afin de ne pas endommager l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer ,par exemple ,en orientant les pales de l'éolienne a fin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.



**Figure I.18** Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable[4].

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues sur tout dans les grandes turbines sous les noms de «Pitch Control» et «Stall Control»

### I.10.1 Système d'orientation des pales ou "Pitch Control"

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire.

En agissant par le Pitch Control, le coefficient de puissance  $C_p$  ne varie plus en fonction de  $\lambda$  comme précédemment mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 3 à sa valeur maximale[11][17][19].

En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet certaines actions distinctes [17][18] :

- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie quand la vitesse du vent évolue entre  $V_{min}$  et  $V_n$ .
- La régulation par limitation de la puissance pour une vitesse du vent supérieure à la

vitesse nominale  $V_n$ .

- La protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ( $>V_{max}$ ) par la mise en drapeau des pales sans nécessité d'un système puissant de freinage pour les arrêts d'urgence.

### **I.10.2 Système à décrochage aéro dynamique ou "StallControl"**

Cette méthode se base sur les caractéristiques mêmes du profil de pale en utilisant le procédé de décrochage aéro dynamique. Les pales des éoliennes qui utilisent ce procédé, sont prévues pour décrocher à des vitesses de vents supérieures à la valeur nominale.

Lorsque la vitesse du vent dépasse cette valeur, l'angle d'incidence devient important [11] [18].

Ce décrochage dépend notamment de l'angle décalage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout [17]. Cette technique aussi quelques avantages [11][17][18].:

- ✓ Pas de système de contrôle d'angle décalage ;
- ✓ Construction plus simple et moins coûteuse du rotor ;
- ✓ Maintenance plus aisée et un contrôle simple et efficace de la puissance.
- ✓ Cependant, ce système de contrôle manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté [11]. Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control [17].

### **I.11. Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne**

Pour permettre aux unités de production basées sur des sources aléatoires (éolien, photovoltaïque) de participer pleinement aux services système, il faudra leur associer des systèmes de stockage de l'énergie électrique. L'électricité n'êtré, cependant, pas facilement stockée. Elle nécessiterait sa transformation sous une autre forme énergétique (chimique, mécanique, thermique, magnétique, etc.). Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable [19,20].

Il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en deux catégories :

### I.11.1. Le stockage à court terme

Pour cette catégorie, le temps de stockage est inférieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour lisser les fluctuations de puissance produite par la ferme éolienne et pour régler la tension et la fréquence du réseau (réglage primaire).

Les moyens de stockage court terme, possédant un temps de réponse court, sont :

- **Les super-condensateurs** fonctionnant à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau par le biais d'un redresseur/onduleur.
- **Les volants d'inertie** entraînés par un variateur électronique utilisant un redresseur/onduleur.

### I.11.2 Le stockage à long terme

Le temps de stockage est supérieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures de pointe du réseau électrique et encas d'absence du vent.

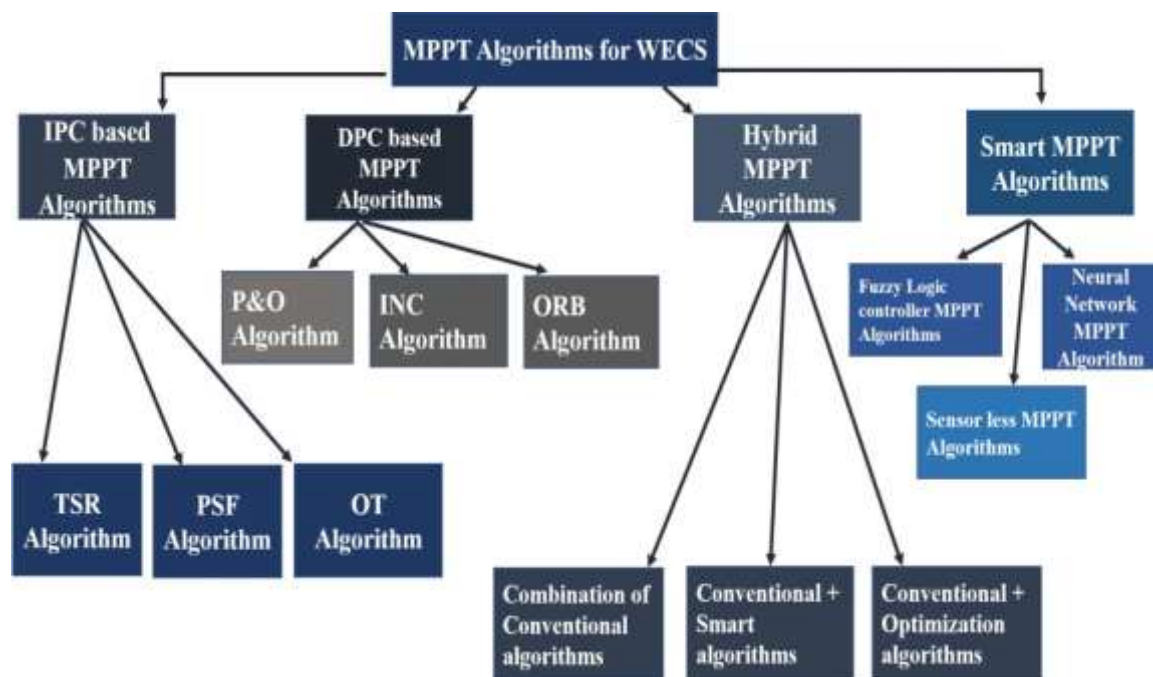
Les moyens de stockage long terme, possédant une capacité de stockage importante, sont :

- **Les batteries** alimentées à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.
- **De l'air comprimé** fonctionnant avec une machine à courant continu pilotée par un hacheur alimenté par un bus de tension continue et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.
- **Les piles à combustible** avec redresseur/onduleur pour la connexion au réseau et fonctionnement à l'aide d'un hacheur[21].

## I.12 Classification des algorithmes MPPT pour les systèmes éoliens

Le principal objectif de l'utilisation de l'algorithme MPPT est de suivre et de capturer la puissance maximale des systèmes d'énergie éolienne(SEE).Les différentes régions de fonctionnement des SEE et la région du MPPT. Nous pouvons très bien comprendre le concept de MPPT. Le point de puissance maximale (MPP) à chaque vitesse du vent constitue la courbe  $p_{opt}$ . Aucune génération n'a lieu pour toutes les vitesses en dessous de la valeur de démarrage car c'est la vitesse minimale requise pour commencer à produire de l'énergie utilisable. La vitesse à laquelle la puissance utilisable nominale est générée est la vitesse nominale. La puissance maximale est extraite dans la région deux qui se situe entre deux vitesses de vent  $v_{min}$  et  $v_n$ . Plusieurs variables important est elles que la tension, la puissance optimale et le rapport cyclique doivent être estimées, ce qui peut être difficile comme indiqué dans [22]. Pour le choix de l'algorithme MPPT approprié, parmi plusieurs paramètres,

l'efficacité, la vitesse, le besoin de capteurs de vitesse du vent et la complexité de mise en œuvre sont pris en compte. Les algorithmes MPPT trouvent leurs applications dans les systèmes d'énergie renouvelable tels que le PV solaire, l'énergie éolienne et autres. Les algorithmes MPPT conçus dans les travaux passés utilisent des paramètres tels que le TSR, la relation entre la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance, et bien d'autres mentionnés ci-dessous. Ils aident essentiellement à suivre et à extraire la puissance maximale des SEE. Dans [22], la classification des algorithmes MPPT est présentée. Ils peuvent être largement classés en fonction de l'utilisation de capteurs de vitesse, comme illustré dans la Figure(I.19).



**Figure I.19** Classification des algorithmes MPPT pour les systèmes éoliens à connexion au réseaux[22].

Les algorithmes MPPT sont classés en principaux types, tels que le contrôle de puissance direct (DPC) et le contrôle de puissance indirect (IPC), ainsi que d'autres méthodes avancées utilisant des réseaux neuronaux (NN) et un régulateur logique flou (FLC). Il existe des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) telles que le rapport de vitesse de pointe (TSR), la rétroaction du signal de puissance (PSF) et le couple optimal (OT) dans le cadre du schéma de contrôle IPC. Dans la technique IPC, la puissance est précalculée en utilisant les courbes de vitesse du vent, ce qui maximise la puissance mécanique  $p_{mec}$ , tandis que dans le schéma DPC, la puissance électrique est directement examinée pour faire fonctionner l'éolienne au point de puissance maximale (MPP). Le schéma de contrôle DPC inclut les algorithmes MPPT tels que la perturbation et observation (P&O), la conductance

incrémentielle (INC) et la relation optimale basée sur (ORB). Un aperçu de plusieurs algorithmes MPPT est présenté dans cette section [22].

### **I.13 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, Nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine, puis on a donné une vue d'ensemble des différents rotors éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique, nous avons présenté aussi les différents types d'éoliennes (éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical) suite la conversion électromécanique dans les systèmes éoliens. Finalement, on a terminé ce chapitre par les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne et les systèmes de stockage de l'énergie éolienne aussi les classifications des commandes MPPT.

Dans le chapitre suivant, on va procéder à la modélisation du système de conversion éolienne.

# *Chapitre II*

*Modélisation de la chaîne de  
conversion éolienne*

## II.1 Introduction

La modélisation mathématique constitue un outil indispensable pour décrypter le comportement des systèmes physiques complexes, tels que les éoliennes. En traduisant le fonctionnement de ces systèmes en équations, nous pouvons non seulement les comprendre plus en profondeur, mais également faciliter leur dimensionnement et simuler leur évolution dans le temps à l'aide de logiciels spécialisés. Dans le contexte de ce chapitre, l'outil de simulation choisi est Simulink, intégré à l'environnement MATLAB.

Ce chapitre s'attache à la modélisation détaillée des différentes composantes de la chaîne de conversion éolienne. Cette chaîne est composée d'une turbine éolienne couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), suivie d'un redresseur, d'un onduleur à commande MLI et enfin raccordée au réseau électrique.

L'analyse débute par une description précise du système de conversion éolienne, en distinguant deux parties principales :

- **Partie mécanique** : Elle englobe la turbine éolienne et l'arbre de la génératrice. La modélisation de cette partie prend en compte les forces aérodynamiques exercées par le vent sur les pales de la turbine, ainsi que les interactions mécaniques entre les différents composants rotatifs.
- **Convertisseurs statiques** : Cette section se concentre sur la modélisation des convertisseurs électroniques qui permettent la transformation de l'énergie électrique produite par la génératrice. Cela inclut le redresseur, qui convertit le courant alternatif (AC) en courant continu (DC), l'onduleur, qui effectue la conversion inverse, et le bus continu, qui assure le stockage temporaire de l'énergie électrique.

Une attention particulière est portée à la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), un élément crucial du système de conversion éolienne. Une description détaillée de la GSAP est fournie, en précisant sa structure générale et ses caractéristiques.

Un modèle mathématique complet de la GSAP est ensuite développé, en tenant compte des équations électriques, magnétiques et mécaniques dans les repères triphasé et biphasé. Ce modèle simplifié facilite la simulation et l'analyse du système. L'expression du couple

électromagnétique de la GSAP est également établie, permettant de comprendre son comportement en fonction des paramètres du système.

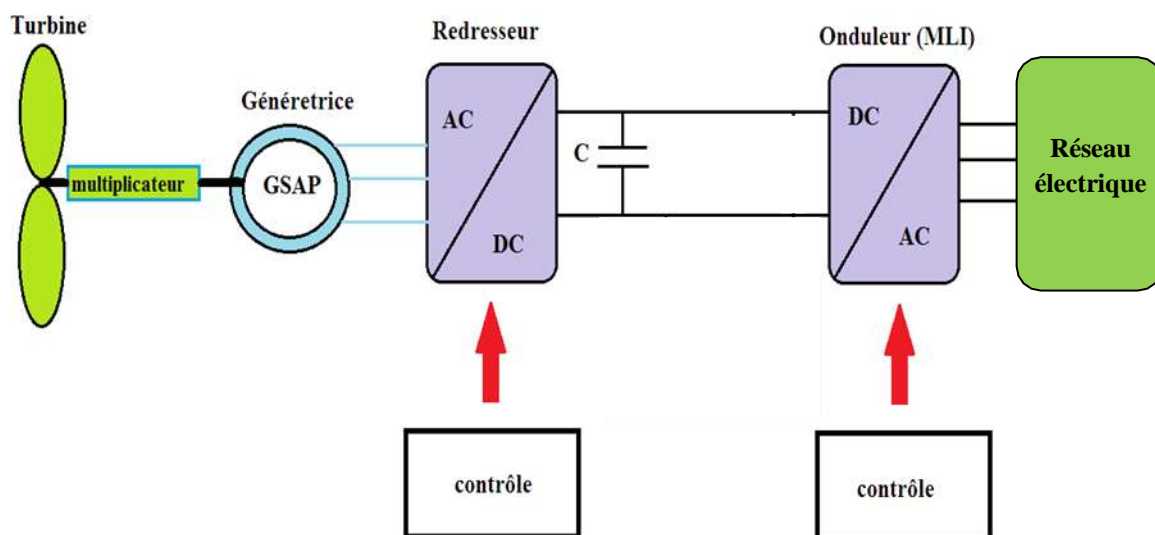
Finalement, le chapitre se termine par la modélisation du réseau électrique auquel l'éolienne est raccordée. Cette étape est essentielle pour analyser le comportement du système dans son ensemble et évaluer son impact sur le réseau électrique.

## II.2 Description de la chaîne de conversion

L'objectif de cette modélisation est de simuler le comportement global de l'ensemble du dispositif de conversion éolienne. La transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique se déroule en plusieurs étapes.

La figure II.1 illustre la structure de la chaîne de conversion éolienne étudiée. Tout d'abord, l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique sur l'arbre de la génératrice grâce à une turbine éolienne à axe horizontal. La génératrice utilisée est une machine synchrone à aimants permanents.

Le système éolien étudié comporte deux convertisseurs triphasés : un convertisseur connecté à la sortie de la génératrice MSAP fonctionnant en mode redresseur, et un convertisseur connecté au réseau jouant le rôle d'onduleur.



**Figure II.1** : Structure de la chaîne de conversion éolienne étudiée[22].

La commande de chaque convertisseur statique permet d'assurer un fonctionnement précis. La commande du redresseur a pour but de fournir une tension continue constante au niveau du bus continu. Le convertisseur côté réseau contrôle les puissances actives et réactives, garantissant une fréquence fixe et un courant de forme sinusoïdale.

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) fonctionne en mode génératrice (GSAP), convertissant l'énergie magnétique stockée en énergie mécanique disponible sur son arbre, puis en énergie électrique.

### II.3 Modélisation de l'énergie du vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période l'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques[23].

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

Avec:

A: La valeur moyenne de la vitesse du vent.

$a_k$ : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k.

$w_k$ : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k.

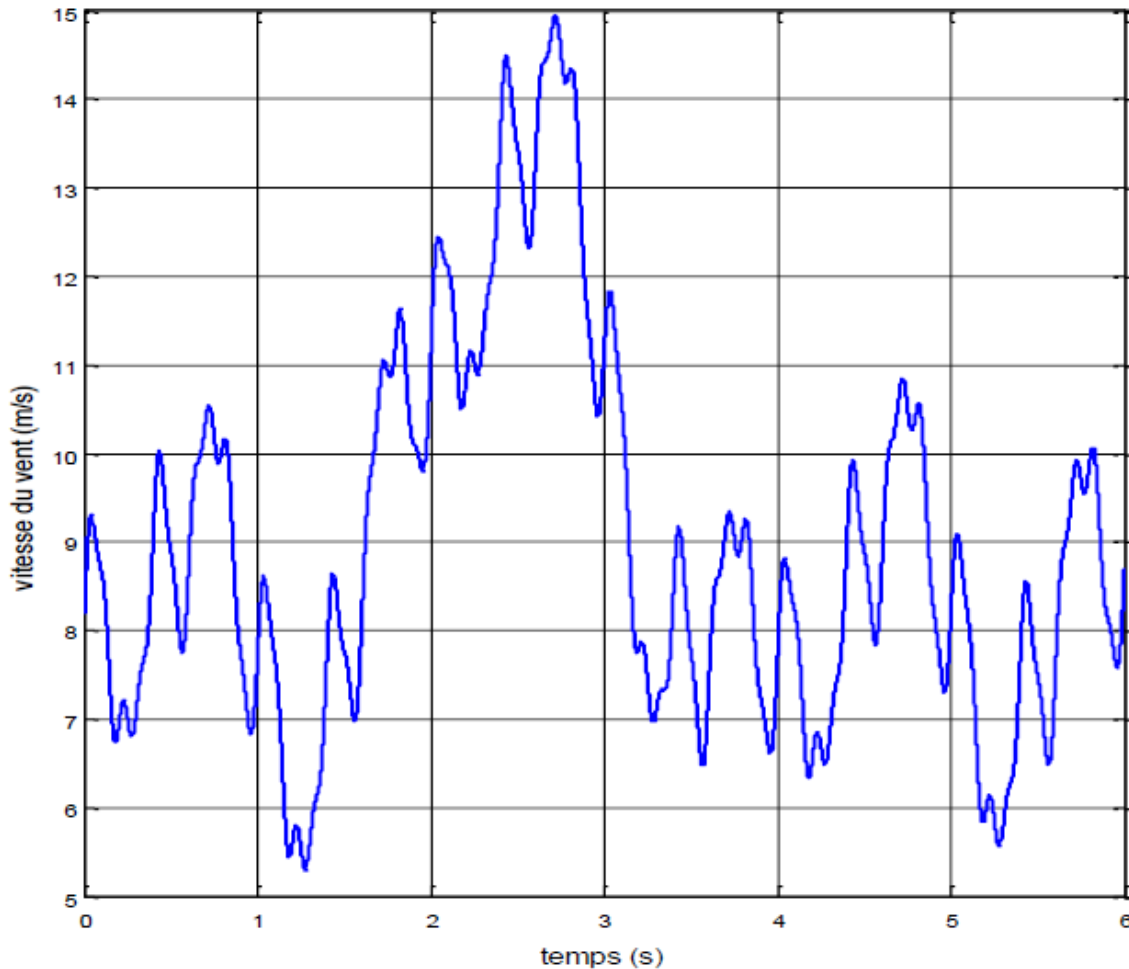
i: Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques[24],[25]:

$$V_{(t)} = 8.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (\text{II.2})$$

Avec:  $\omega = \frac{2\pi}{10}$

La figure II.2 représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8.2m/s.



**Figure II.2 :** Simulation du profil de la vitesse du vent.

La figure (II.2) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (6s) entre deux valeurs ( $V=15\text{m/s}$ ) comme valeur maximale et ( $V=5.3\text{m/s}$ ) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

#### II.4 Modélisation de la turbine

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par [25]:

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

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraire dans sa totalité [26].

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

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

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{2 P_t}{\rho S V_v^3} = 0.59 \quad (\text{II.5})$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_P$  de l'éolienne, est propre à chaque voileure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 P_t}{\rho S V_v^3} \quad (\text{II.6})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée dite vitesse relative  $\lambda$ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.7})$$

Où  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine,  $R$  le rayon de la pale et  $V_v$  la vitesse du vent.

L'expression approchée du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et de l'angle de calage des pales  $\beta$  est donnée par[27]:

$$C_p = A_1 \left[ \left( \frac{A_2}{\lambda} - A_3 \beta - A_4 \right) e^{\frac{A_5}{\lambda_i}} + A_6 \lambda \right] \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$$\lambda_i = \frac{1}{(\lambda + 0.08)} - \frac{0.035}{(\beta^3 - 1)} \quad (\text{II.9})$$

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  et  $A_6$ : sont des coefficients liés aux caractéristiques de la turbine, ils sont donnés pour les turbines de grande puissance comme suit:

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
22	116	0.4	5	-21	0.0068

**Tableau II.1:** Caractéristiques de la turbine éolienne.

La figure (II.3) montre les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK de l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour quelques angles de calage  $\beta$ .

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique  $C_t$  disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par:

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p \frac{\rho S V_v^3}{2 \Omega_t} \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$C_p$ : Coefficient de puissance.

$\lambda$ : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent.

$\rho$ : La densité du vent en  $[\text{Kg}/\text{m}^3]$  (généralement  $\rho = 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ , pour les conditions atmosphériques).

$S$ : La surface balayée par les pales de l'éolienne  $[\text{m}^2]$ .

$\Omega_t$ : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne  $[\text{rad}/\text{s}]$ .

$V_v$ : Vitesse du vent  $[\text{m}/\text{s}]$ .

$R$ : Rayon d'une pale de la turbine  $[\text{m}]$ .

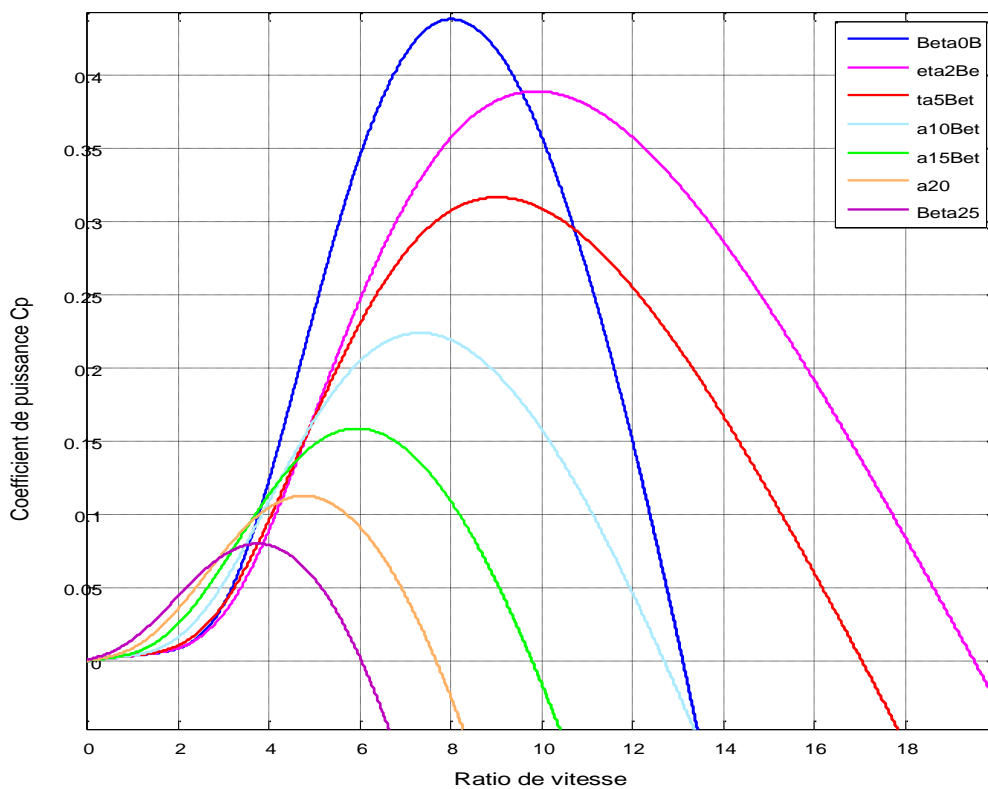


Figure II.3: Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour différents  $\beta$ .

### II.4.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est un dispositif de liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et défini par un simple gain. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suit[28]:

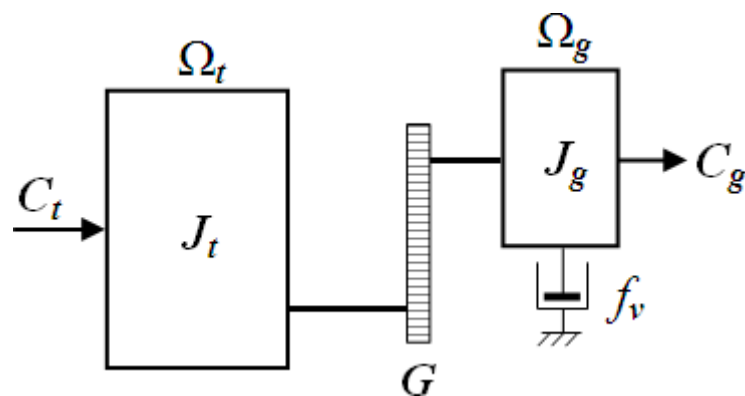


Figure II.4 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec:

$J_{totale}$ : L'inertie totale.

G: est le gain du multiplicateur.

$C_g$ : Le couple développé par la génératrice synchrone.

$C_t$ : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.

$\Omega_g$ : La vitesse mécanique de la génératrice.

$F_v$ : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,

$\Omega_t$ : La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes [29]:

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.11})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II.12})$$

D'après la figure (II.4), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par:

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (\text{II.13})$$

Avec  $C_{em}$  le couple électromagnétique de la génératrice.

Le schéma bloc de la figure (II.5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_g$  de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage d'espales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la génératrice. La vitesse du vent  $V_v$  est considérée comme une entrée perturbatrice au système [29].

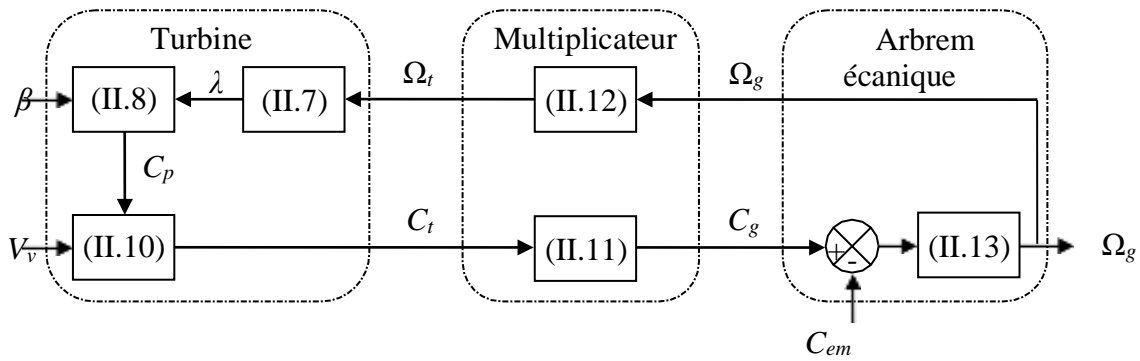


Figure II.5: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne[29].

### II.4.2 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice[30].

$$J_{totale} = J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_m \quad (II.14)$$

Avec:

$J_m$ : L'inertie de la génératrice.

$J_{turbine}$ : L'inertie de la turbine

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (II.15)$$

Avec:

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.16)$$

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$C_g$ : Couple de la génératrice.

$C_{vis}$ : Couple de frottement de visqueux.

Le couple résistant du aux frottements  $C_{vis}$  est modélisé par un coefficient de frottement visqueux  $F_v$ :

$$C_{vis} = F_v \Omega_{méc} \quad (\text{II.17})$$

Alors:

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_g - C_{em} - F_v \Omega_{méc} \quad (\text{II.18})$$

Alors l'équation de la vitesse mécanique s'exprime par:

$$\Omega_{méc} = \frac{1}{J_{S+f}} (C_g - C_{em}) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

S: L'opérateur de Laplace.

Ou bien c'est la résolution d'équation différentielle de premier ordre :

$$\frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - F_v \Omega_{méc}) \quad (\text{II.20})$$

## II.5 Modélisation des convertisseurs

### II.5.1 Modélisation de convertisseur statique coté machine (redresseur)

Les tensions obtenues par le générateur sont transmises au convertisseur statique (redresseur) afin d'obtenir une tension moyenne continue qui sert comme alimentation de l'onduleur. Le redresseur triphasé permet de contrôler la puissance capturée par la turbine en contrôlant la génératrice, ainsi, l'amélioration de la qualité des courants.

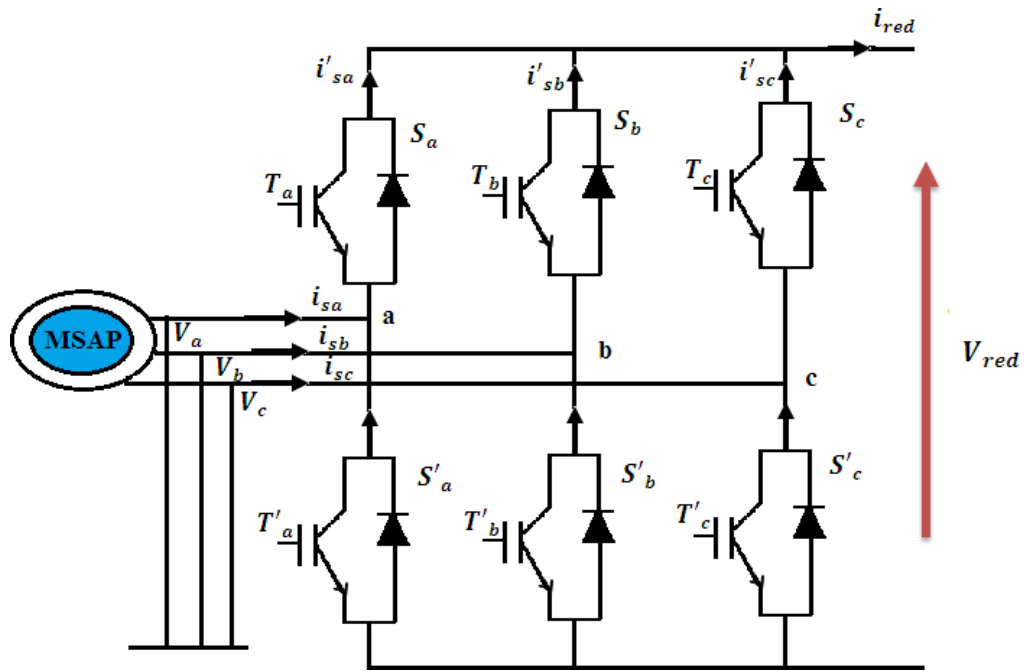
Le redresseur est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un IGBT et d'une diode en antiparallèle comme le représente la figure (II.6)[31].

Le redresseur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i = (i=a,b,c)$  On appelle

$T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a:

Si  $S_i=1$  alors  $T_i$  est fermé et  $T_i'$  est ouvert.

Si  $S_i=0$  alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est fermé.



**Figure II.6:** Schéma de principe du convertisseur statique côté machine (Redresseur)[31].

Dans ces conditions, on peut écrire les courants  $i'_{s(a,b,c)}$  en fonction des signaux de commande

$$S_i = (i = a, b, c)$$

$$\begin{cases} i'_{sa} = i_{sa} \cdot S_a \\ i'_{sb} = i_{sb} \cdot S_b \\ i'_{sc} = i_{sc} \cdot S_c \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

D'après la loi de Kirchhoff (loi des nœuds), on obtient le courant redressé selon l'équation suivante

$$i_{red} = i'_{sa} + i'_{sb} + i'_{sc} = (i_{sa} S_a) + (i_{sb} S_b) + (i_{sc} S_c) \quad (\text{II.22})$$

En exprimant les courants précédents en fonction des tensions délivrées par la machine et les point (a, b et c), on aura:

$$\begin{cases} V_a = L_s \frac{d}{dt} i_{sa} + R_s i_{sa} \\ V_b = L_s \frac{d}{dt} i_{sb} + R_s i_{sb} \\ V_c = L_s \frac{d}{dt} i_{sc} + R_s i_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Sachant que :

$L_s$ : L'inductance de l'enroulement statorique de MSAP

$R_s$ : Résistance de l'enroulement statorique de MSAP

Donc:

$$\begin{cases} i_{sa} = \frac{1}{R_s + L_s s} V_a \\ i_{sb} = \frac{1}{R_s + L_s s} V_b \\ i_{sc} = \frac{1}{R_s + L_s s} V_c \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant (II.24) dans (II.22), on obtient le courant redressé en fonction des équations instantanées des tensions simples et les grandeurs de commande  $S_i = (i = a, b, c)$ , et on aboutit au modèle mathématique du convertisseur:

$$i_{red} = \frac{1}{R_s + L_s s} [V_a \ V_b \ V_c] \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

## II.5.2 Modélisation du bus continu

Les schéma électrique de la figure (II.7) permet par la loi des nœuds d'établir la relation suivante [32]:

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int i_{dc} \quad (\text{II.26})$$

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} i_{dc}(t) \quad (\text{II.27})$$

$$i_{red} = i_{ond} + i_{dc} \quad (\text{II.28})$$

$$i_{dc} = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II.29})$$

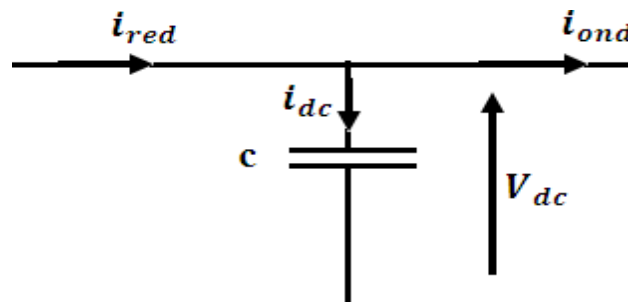


Figure II.7: Schéma électrique du bus continu [32].

Avec:

$i_{red}$ : Le courant redressé.

$i_{ond}$ : Le courant à onduleur.

$i_{dc}$ : Le courant de charge du condensateur.

### II.5.3 Modélisation de convertisseur statique coté réseau(onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif et est alimenté par une source de tension continue.

Dans la chaîne de conversion éolienne, l'onduleur se situe entre le réseau et le bus continu dans le but d'avoir à la sortie de l'onduleur un signal plus proche d'une sinusoïde.

Un onduleur est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants chaque interrupteur est montée nanti par aller le avec une diode de récupération. Les interrupteurs  $(S_a, S'_a)$ ,  $(S_b, S'_b)$ ,  $(S_c, S'_c)$  sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court – circuit de la source. L'onduleur permet de transformer un signal d'entrée continue un signal de sortie alternatif (FigureII.8) [32].

L'état des interrupteurs, supposées parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $S_i(i=abc)$ .

✚Branche a :

$S_a = 1$  si  $S_a$  est en position fermé et  $S'_a$  est ouvert.

$S_a = 0$  si  $S_a$  est en position ouvert et  $S'_a$  est fermé.

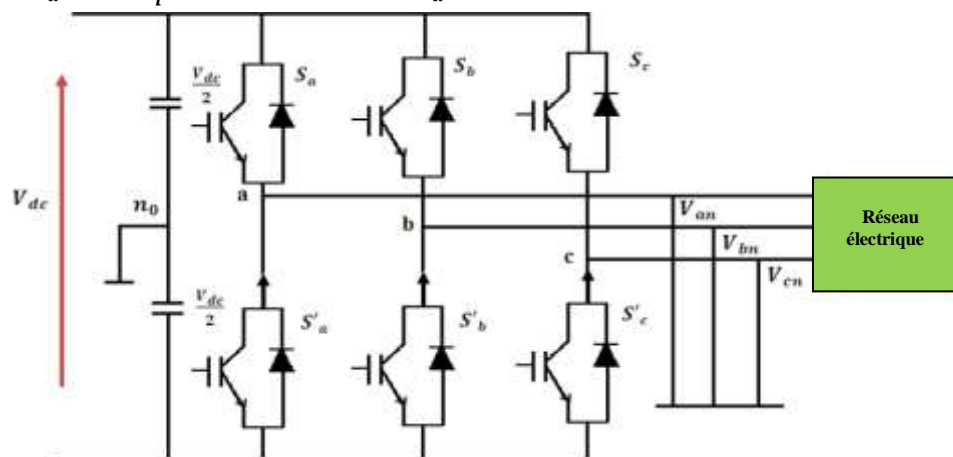


Figure II.8: Schéma du convertisseur statique coté réseau (Onduleur)[31].

✚ Branche b:

$S_b=1$  si  $S_{bv}$  est en position fermé et  $S'_{bv}$  est ouvert.

$S_b=0$  si  $S_b$  est en position ouvert et  $S'_b$  est fermé.

✚ Branche c :

$S_c=1$  si  $S_c$  est en position fermé et  $S'_c$  est ouvert.

$S_c=0$  si  $S_c$  est en position ouvert et  $S'_c$  est fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phase  $V_{in,abc}$  en fonction des signaux de commande:

Les fonctions de commande  $S_i$  sont générées par un bloc de commande en fonction des objectifs de la commande du système.

$$V_{in,abc} = S_i V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.30})$$

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivantes:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Soit "n" le point neutre du côté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} - V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} - V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} - V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.33})$$

La substitution de (II.33) dans (II.32) nous donne :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant (II.34) dans (II.32) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs ( $S_a, S_b, S_c$ ) permettent de générer huit vecteurs de tensions dont deux correspondent au vecteur nul comme le montre la figure(II.8).

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

## II.6 Machine synchrone à aimants permanents

Dans la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans des plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique...,etc.[33].

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigide set de perméabilité voisine de celle de l'air[34].

La machine synchrone a aimant permanent est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne et surtout pour les applications isolées et autonome

### II.6.1 Modèle de la MSAP

La machine synchrone à aimant permanent est caractérisée par plusieurs paramètres qui influent sur son fonctionnement, parmi lesquels certains paramètres non linéaires, ce qui complique le modèle mathématique de la machine; pour cela la majeure partie de la littérature propose quelques hypothèses simplificatrices qui servent à simplifier ce modèle mathématique et à le rendre utilisable dans l'étude du comportement de la génératrice [35],[36],[37]:

- ✓ L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- ✓ La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- ✓ L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- ✓ L'effet d'encoche est négligeable.
- ✓ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

### II.6.2 Types des MSAP

La partie fixe de la machine synchrone est similaire à d'autres types de machines à trois phases ; la différence est dans la partie mobile(rotor) dans laquelle on peut distinguer plusieurs types selon la topologie et la construction de ce dernier. Selon la disposition des aimants sur le rotor, nous pouvons distinguer quatre types de MSAP[35],[38]:

- ❖ Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (Surface Mounted) [35],[39]:
- ❖ Machines synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)[39].
- ❖ Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC)
- ❖ Machines synchrones à aimants permanent sen terrés (MSAPE)[39].

### II.6.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

### II.6.3.1 Équations électriques de la MSAP dans le repère fixe (abc)

Les équations électriques dans le plan (a, b, c)

Peuvent s'écrire comme suit:

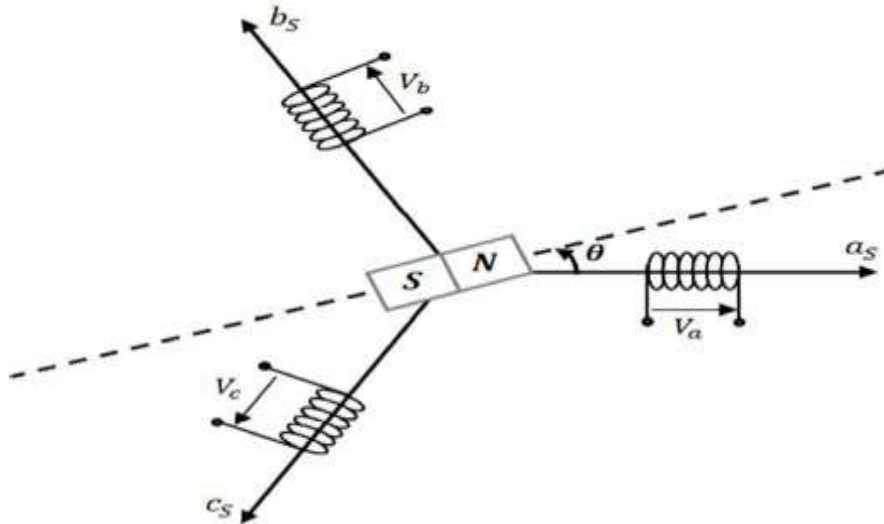


Figure II.9 :Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)[40].

#### a) Équations électriques de tension:

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \\ V_b = R_s i_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \\ V_c = R_s i_c + \frac{d\Phi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

La forme matricielle des équations de tensions:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 38})$$

Avec:

$[\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^t$ : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

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

$[i_a \quad i_b \quad i_c]^t$ : Vecteur des courants statoriques.

$[V_a \quad V_b \quad V_c]^t$ : Vecteur des tensions statoriques

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

**b) Équations de flux magnétique :**

$$\begin{cases} \Phi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \Phi_{af} \\ \Phi_b = L_b i_b + M_{bc} i_c + M_{ba} i_a + \Phi_{bf} \\ \Phi_c = L_c i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + \Phi_{cf} \end{cases} \quad (\text{II. 40})$$

$$[\Phi_s] = [L_s][i_s] + [\Phi_f] \quad (\text{II. 41})$$

Avec:

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 43})$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 44})$$

$$[\Phi_f] = \begin{bmatrix} \Phi_{af} \\ \Phi_{bf} \\ \Phi_{cf} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

$L_s$ : Matrice d'inductance du stator.

$\Phi_f$ : Vecteur Flux créé par l'aimant à travers les enroulements statoriques.

$\Phi_s$ : Vecteur de flux statorique.

$i_s$ : Courant traverse les bobines statoriques.

**II.6.3.2 Transformation de Park (d q)**

Il existe plusieurs transformations ayant pour objectif la simplification des équations de la machine en les rendant plus facile à résoudre numériquement. Parmi ses transformations, la transformation de Park qui consiste à un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques (a b c) fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes d et q déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor[41].

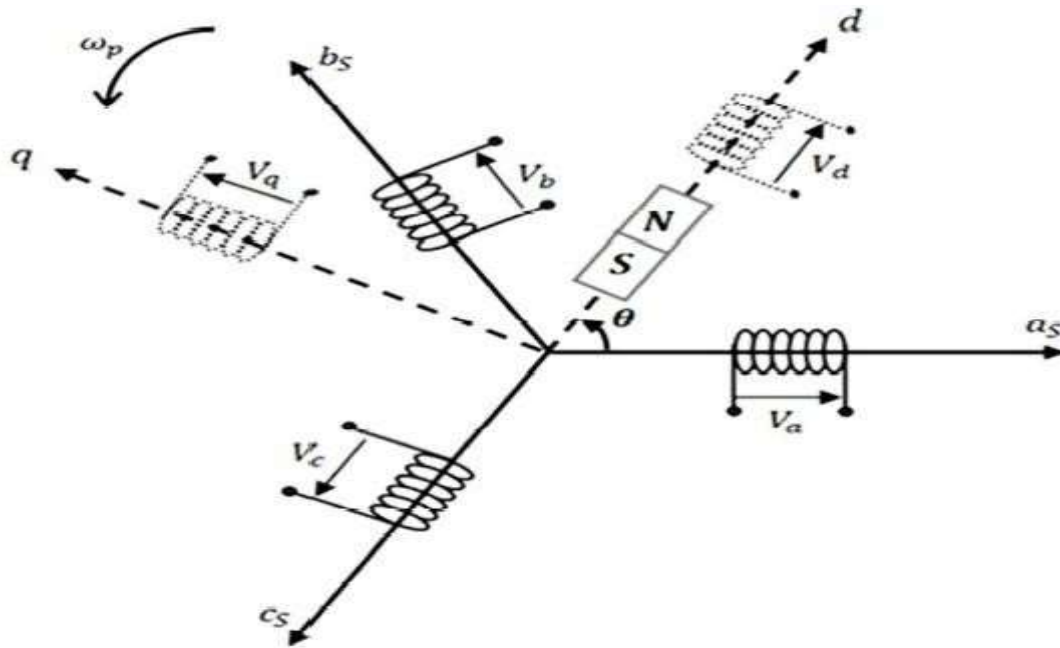


Figure II.10: Représentation d'une MSAP dans le repère (d q)[40].

En réalité, la transformation de Park n'est qu'une rotation de la transformation de Clark (conservation des amplitudes) ou bien de Concordia (conservation des puissances ou Park modifiée) définie par la matrice «  $[P(\theta)]$  » reliant les grandeurs des deux domaines « abc » et « d q » par l'équation:

$$[X_{dq}] = [P(\theta)][X_{abc}] \tag{II.46}$$

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \tag{II.47}$$

$[P(\theta)]$ : Matrice de Park est donnée par:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.48}$$

$[P(\theta)]^{-1}$ : Matrice de Park inverse est donnée par:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.49}$$

### II.6.3.2.1 Équations électriques de la MSAP dans le repère(d q)

#### a) Équations de tension dans le repère (d q):

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Avec:

$V_d, V_q$ : Tensions statoriques du repère de Park.

$i_d, i_q$ : Courants statoriques du repère de Park.

$\Phi_d, \Phi_q$ : Flux statoriques du repère de Park.

$\omega$ : Pulsation des tensions[rad/s].

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme:

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\Phi_d}{dt} + \omega L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega(L_d i_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

#### b) Équations de flux magnétiques dans le repère(d q):

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

$L_d, L_q$ : L'inductances ta toriques du repère de Park.

$\Phi_f$ : Le flux des aimants permanents.

### II.6.3.3 Équations du couple électromagnétique et d'équation mécanique

Pour compléter le modelé électromécanique de la MSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique. L'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = P[\Phi_d i_q - \Phi_q i_d] \quad (\text{II.53})$$

$$C_{em} = P[(L_d L_q) i_d i_q + i_q \Phi_f] \quad (\text{II.54})$$

Avec:

$$L_d = L_q = L_s \quad (\text{II.55})$$

Le couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = P \Phi_f i_q \quad (\text{II.56})$$

L'équation mécanique est exprimée comme suit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_g - C_{em} - f_v \Omega \quad (\text{II.57})$$

$J$ : Moment d'inertie.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$C_g$ : Couple de la génératrice.

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

$\Omega$ : Vitesse angulaire mécanique rotorique

## II.7 Modélisation du réseau électrique

La figure (II.11) représente un schéma de principe du réseau électrique.

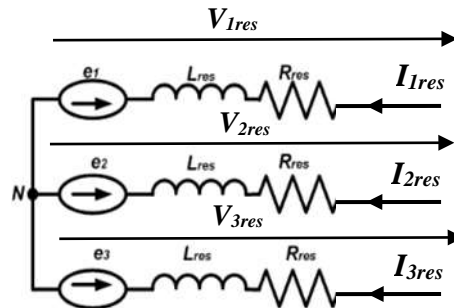


Figure II.11: Modèle du réseau électrique.

$$\begin{cases} V_{1res} - e_1 = R_{res} \cdot I_{1res} + L_{res} \cdot \frac{dI_{1res}}{dt} \\ V_{2res} - e_2 = R_{res} \cdot I_{2res} + L_{res} \cdot \frac{dI_{2res}}{dt} \\ V_{3res} - e_3 = R_{res} \cdot I_{3res} + L_{res} \cdot \frac{dI_{3res}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

La force électromotrice du réseau triphasé est définie par le système d'équations (II.59), ou  $U_{ef,res}$  est la tension composée efficace du réseau.

$$\begin{cases} e_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{ef,res} \cdot \mathbf{sin}(\omega \cdot t) \\ e_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{ef,res} \cdot \mathbf{sin}\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{ef,res} \cdot \mathbf{sin}\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

La résolution des équations différentielles présentées par le système d'équations (II.58) permet de déterminer les courants du réseau comme illustré par les systèmes d'équations(II.60).

$$\begin{cases} I_{1res} = \frac{V_{1res-e1}}{R_{res}+L_{res} \cdot s} \\ I_{2res} = \frac{V_{2res-e2}}{R_{res}+L_{res} \cdot s} \\ I_{3res} = \frac{V_{3res-e3}}{R_{res}+L_{res} \cdot s} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

Les expressions des puissances active et réactive injectées dans le réseau sont données par le système d'équations (II.61).

$$\begin{cases} P = V_{dres} \cdot I_{dres} + V_{qres} \cdot I_{qres} \\ Q = V_{qres} \cdot I_{dres} - V_{dres} \cdot I_{qres} \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de la chaîne de conversion éolienne. Nous avons d'abord décrit le système de conversion éolienne, puis procédé à la modélisation de la turbine et de l'arbre de la génératrice. Ensuite, nous avons modélisé les convertisseurs statiques côté machine (redresseur) et côté charge (onduleur), ainsi que le bus continu.

Nous avons également présenté la machine synchrone à aimants permanents, en précisant son type et en formulant quelques hypothèses simplificatrices. Nous avons établi les équations électriques, magnétiques et mécaniques dans le repère triphasé, puis dans le repère biphasé pour simplifier le modèle utilisé, et exprimé le couple électromagnétique.

Enfin, nous avons conclu ce chapitre par la modélisation du réseau électrique.

# *Chapitre III*

*Contrôle et simulation de la  
chaîne de conversion éolienne*

### III.1 Introduction

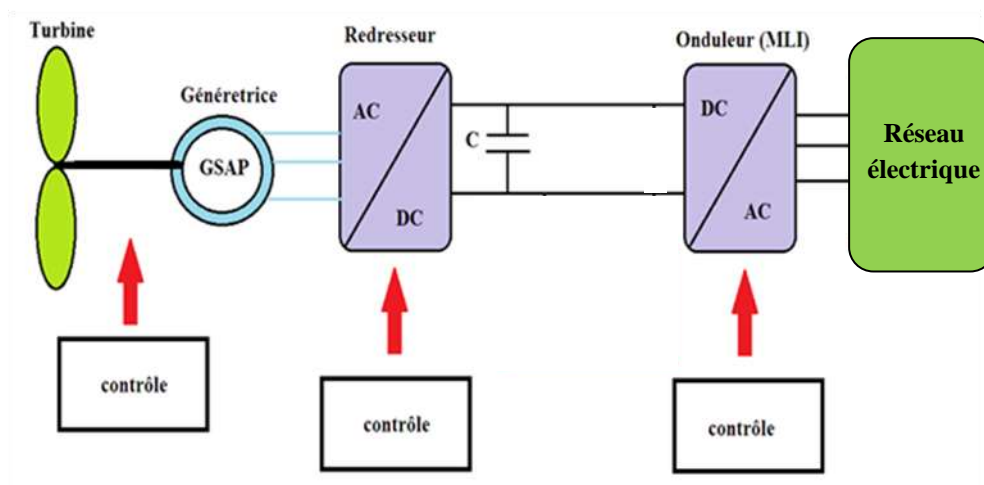
Après avoir expliqué le principe de la conversion d'énergie éolienne et modélisé les composants essentiels de cette chaîne, à savoir la turbine, la génératrice synchrone à aimants permanents, et le réseau électrique, nous aborderons dans ce dernier chapitre le contrôle et la simulation de la chaîne de conversion éolienne. Nous y introduirons l'algorithme de conductance incrémentale, utilisé dans le système éolien étudié.

Nous présenterons une étude détaillée de la stratégie de commande des convertisseurs côté machine et côté réseau, du contrôle de la vitesse de la MSAP, du bus continu, ainsi que de la stratégie de commande du système permettant de réguler les puissances active et réactive ( $P$  et  $Q$ ), et la tension du bus continu.

La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation et à l'interprétation des résultats de simulation de la chaîne de conversion complète obtenus sous MATLAB/Simulink.

### III.2 Stratégies de contrôle du système de production d'énergie éolienne

Le schéma complet de la chaîne de conversion éolienne comprend la turbine et son arbre, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), un redresseur MLI, un bus continu, un onduleur MLI, et le réseau électrique, comme illustré par la figure (III.1).



**Figure III.1:** Schéma de la chaîne globale de conversion éolienne.

## III.2.1 Contrôle MPPT

### III.2.1.1 conductance incrémentale

L'algorithme de conductance incrémentale est une méthode utilisée pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) d'une éolienne. Le MPPT est le point où la puissance produite par l'éolienne est maximale pour une vitesse de vent donnée. En suivant le MPPT, une éolienne peut produire la quantité d'énergie maximale possible.

L'algorithme de conductance incrémentale fonctionne en comparant la puissance actuelle de l'éolienne à la puissance générée à la dernière étape. Si la puissance actuelle est supérieure, la conductance (rapport de la tension au courant) est augmentée. Si la puissance actuelle est inférieure, la conductance est diminuée. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le MPPT soit atteint.

### III.2.1.2 Principe de l'algorithme de conductance incrémentale

L'algorithme de conductance incrémentale repose sur une boucle de rétroaction qui ajuste la tension appliquée à la génératrice éolienne en fonction de la puissance produite. Le principe fondamental est de comparer la puissance actuelle à la puissance générée lors de l'étape précédente.

- Si la puissance actuelle est **supérieure**, la conductance (le rapport entre la tension et le courant) est augmentée. Cela signifie que la tension appliquée à la génératrice est légèrement augmentée, ce qui stimule la production de courant et potentiellement de puissance.
- Si la puissance actuelle est **inférieure**, la conductance est diminuée. La tension appliquée est alors légèrement réduite, ce qui peut ramener le système vers le MPPT.

Ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que le MPPT soit atteint, c'est-à-dire lorsque la puissance actuelle est stabilisée à sa valeur maximale pour la vitesse de vent donnée.

### III.2.1.3 Avantages de l'algorithme de conductance incrémentale

**Simplicité** : Sa mise en œuvre est relativement simple et ne requiert pas de calculs complexes ni de paramètres spécifiques.

**Efficacité** : Il offre un suivi efficace du MPPT sur une large plage de vitesses de vent.

**Robustesse :** Il s'adapte bien aux variations de charge, garantissant une production d'énergie stable même en cas de fluctuations de la demande.

#### III.2.1.4 Inconvénients de l'algorithme de conductance incrémentale

**Sensibilité au bruit :** Le signal de puissance peut être perturbé par du bruit électrique, ce qui peut affecter la précision du suivi du MPPT.

**Instabilité à basse vitesse :** À basse vitesse de vent, l'algorithme peut présenter une certaine instabilité et peiner à converger vers le MPPT optimal.

**Imprécision dans des conditions de vent changeantes :** En cas de variations rapides de la vitesse du vent, l'algorithme peut avoir du retard à s'adapter et ne pas suivre le MPPT avec une précision optimale.

#### III.2.1.5 Variations de l'algorithme IC

L'algorithme de conductance incrémentale (IC) de base peut être modifié de différentes manières pour améliorer ses performances et s'adapter à des applications spécifiques. Voici quelques exemples :

- **Algorithme IC adaptatif :** Cette variante ajuste le pas de conductance incrémentale ( $\Delta G$ ) en fonction des conditions de fonctionnement, comme la vitesse du vent ou la puissance de sortie. Cela permet de réduire les oscillations et d'améliorer la précision du suivi du MPPT.
- **Algorithme IC flou :** Cette approche utilise la logique floue pour ajuster le pas de conductance incrémentale ( $\Delta G$ ) en fonction de divers facteurs, tels que la puissance de sortie, la vitesse du vent et le changement de puissance. Cela permet d'obtenir une meilleure adaptation aux conditions changeantes et une performance plus robuste.
- **Algorithme IC hybride :** Cette méthode combine l'algorithme IC avec d'autres algorithmes MPPT, comme l'algorithme de perturbation et observation (P&O), pour tirer parti des avantages de chaque approche. Par exemple, l'algorithme IC peut être utilisé pour le suivi initial du MPPT, tandis que l'algorithme P&O peut être utilisé pour le raffinement final.

#### III.2.1.6 Facteurs influençant les performances de l'algorithme IC

Les performances de l'algorithme IC peuvent être affectées par plusieurs facteurs, notamment :

- **Pas de conductance incrémentale ( $\Delta G$ ):** La taille du pas de conductance incrémentale ( $\Delta G$ ) détermine la vitesse de convergence de l'algorithme vers le MPPT. Un pas trop grand peut entraîner des oscillations, tandis qu'un pas trop petit peut ralentir la convergence.
- **Constantes de temps du filtre :** Les constantes de temps du filtre passe-bas, s'il est utilisé, influencent le lissage des fluctuations de puissance et la stabilité de l'algorithme. Un temps de filtre trop court peut laisser passer trop de bruit, tandis qu'un temps de filtre trop long peut ralentir la réponse de l'algorithme aux changements de conditions.
- **Paramètres de la turbine éolienne et de la charge :** Les caractéristiques de la turbine éolienne et de la charge peuvent affecter la précision du suivi du MPPT. Des variations dans ces paramètres peuvent nécessiter un ajustement de l'algorithme IC.

### III.2.1.7 Applications de l'algorithme IC

L'algorithme de conductance incrémentale est couramment utilisé dans les systèmes éoliens de petite et moyenne puissance, en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son faible coût. Il est particulièrement adapté aux applications où l'espace et le poids sont des contraintes importantes, comme les éoliennes domestiques ou les systèmes éoliens portables. L'algorithme IC peut également être utilisé dans d'autres applications de conversion d'énergie, telles que les systèmes photovoltaïques et les systèmes de stockage d'énergie par batterie.

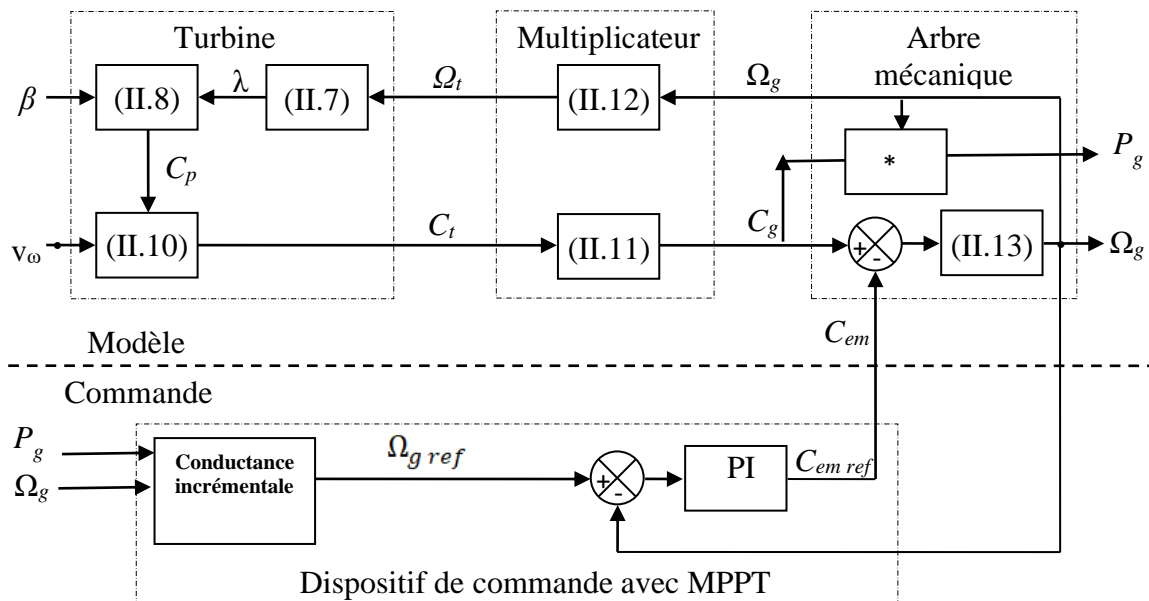


Figure III.2 : Contrôle MPPT basé sur l'algorithme conductance incrémentale.

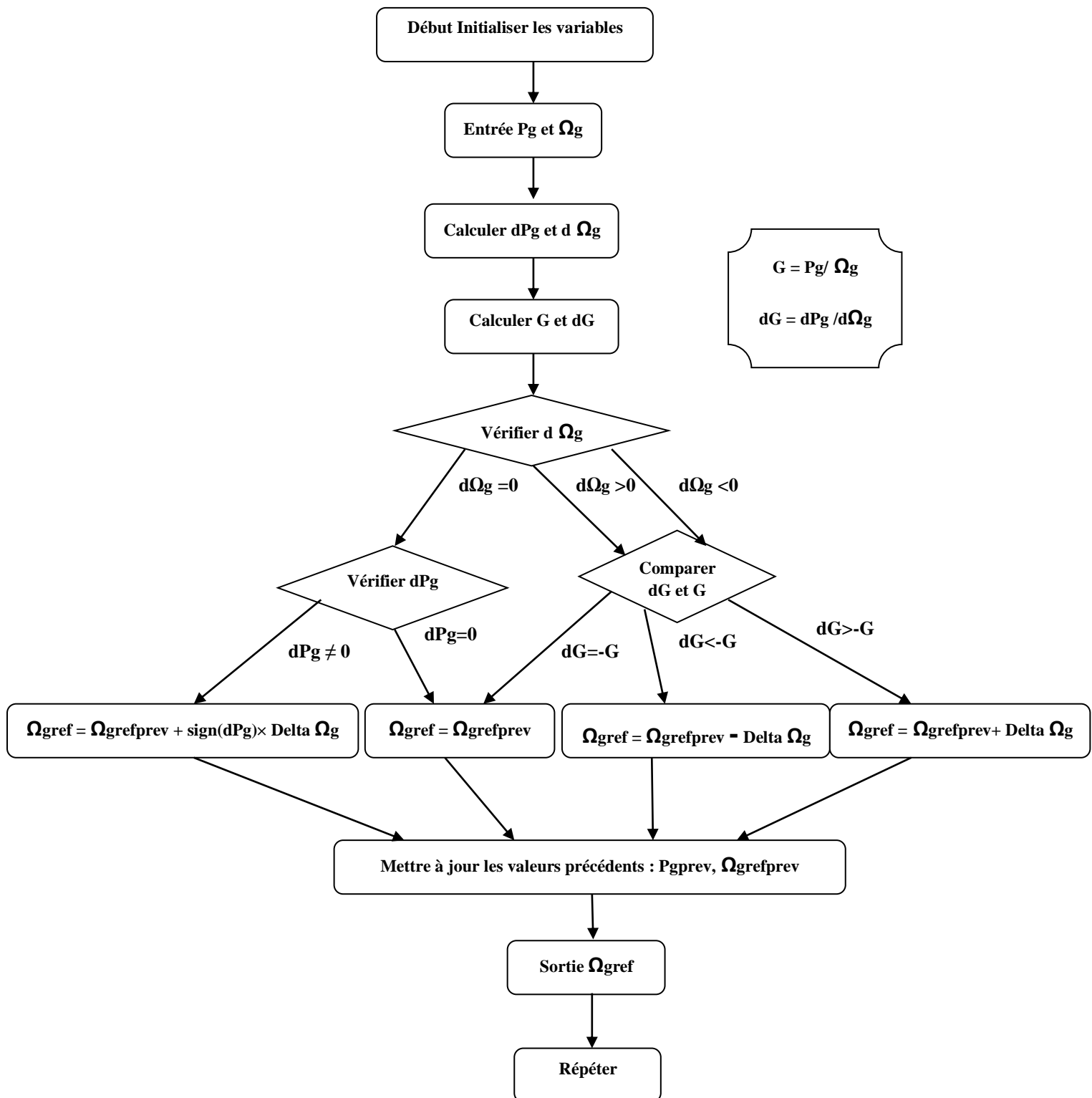


Figure III.3: Organigramme de l’algorithme conductance incrémentale



La dynamique de la boucle interne est rapide que le boucle externe  $t_{pr} > t_{ir}$  :

$$\begin{cases} K_{pp} = \frac{L_g}{t_{pr}} \\ K_{ip} = \frac{R_r}{t_{pr}} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

La puissance active  $P$  et réactive  $Q$ , sont des puissances instantanées de la charge, qu'on peut exprimer :

$$\begin{cases} P = V_{dg}I_{dg} + V_{qg}I_{qg} \\ Q = V_{dg}I_{dq} - V_{qg}I_{qg} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

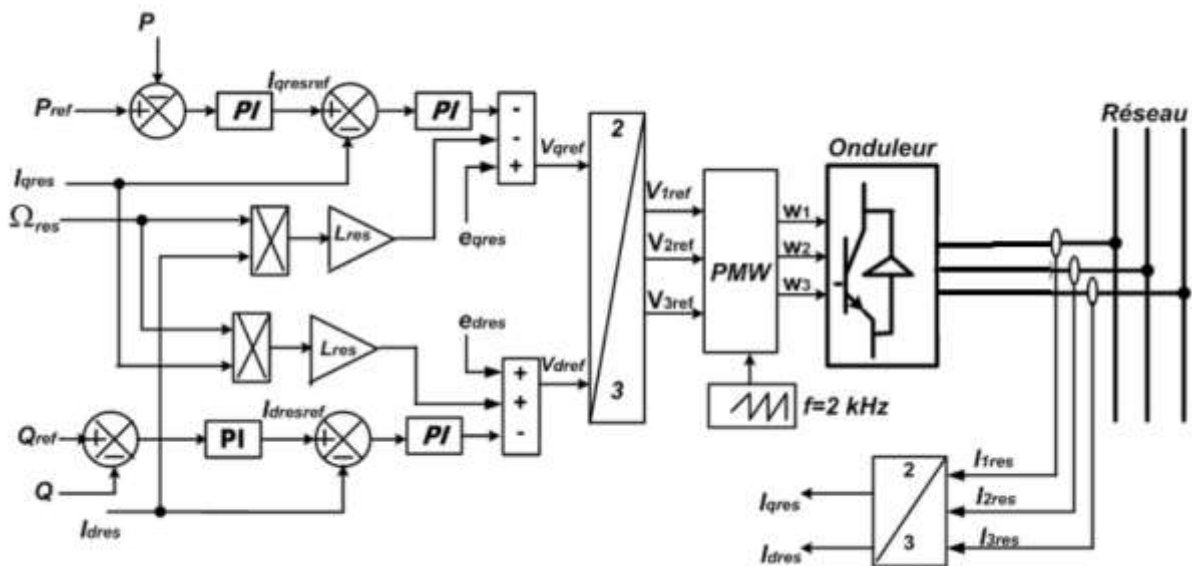


Figure III.5 : Stratégie de contrôle des puissances actives et réactives [43].

### III.3. Commande du convertisseur

#### III.3.1. Stratégie de la commande à MLI

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), son principe est la comparaison de deux signaux : Un signal triangulaire de haute fréquence  $f_p$  appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice" de fréquence  $f_m < f_p$  [44].

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- L'onde porteuse : qui est un signal à haute fréquence (généralement une onde triangulaire).

- L'onde modulatrice : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée (généralement une onde sinusoïdale).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- ✓ L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la tension de référence.

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{III.6})$$

- ✓ Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_{ref}$ ) et celle de la porteuse ( $u_p$ ).

$$r = \frac{V_{ref}}{u_p} \quad (\text{III.7})$$

### III.4 Résultats de simulation

Le système étudié a été simulé sous le logiciel MATLAB/Simulink afin de valider le schéma de simulation de la chaîne globale de conversion éolienne avec commande MPPT basé sur l'algorithme conductance incrémentale présenté ci-dessous (les paramètres sont données dans l'annexe A).

D'après ces résultats on remarque que la technique MPPT basé sur L'algorithme de conductance incrémentale est efficace pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne car il permet un ajustement dynamique et précis du point de fonctionnement afin de maximiser l'extraction de puissance. En réagissant aux changements de conditions de vent et de charge, il assure une performance optimale du système éolien..

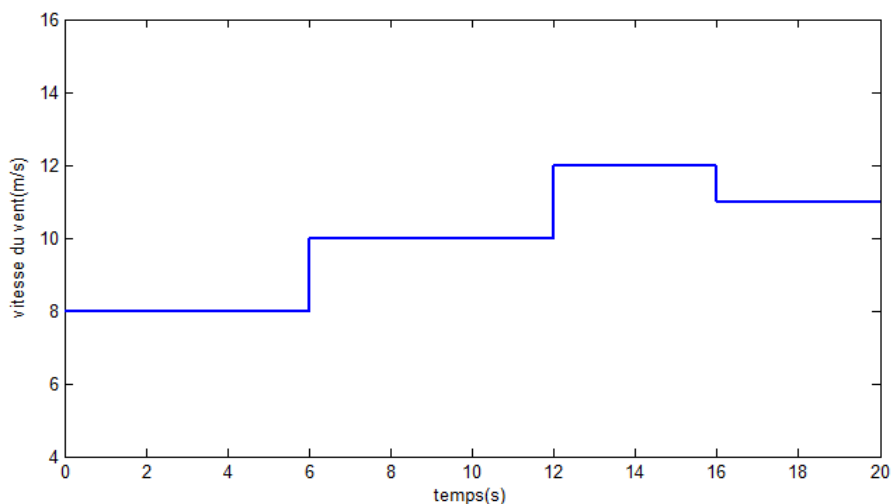
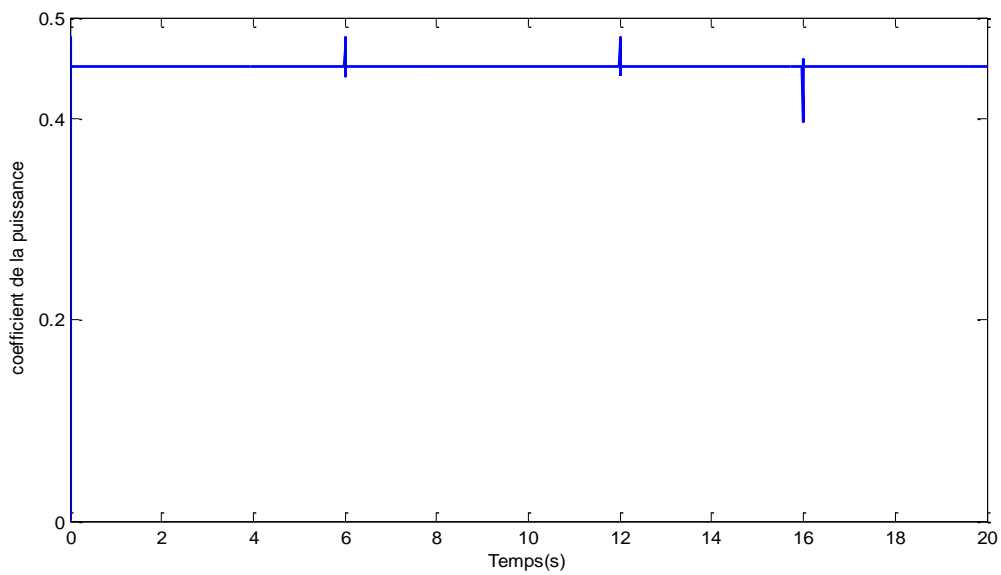
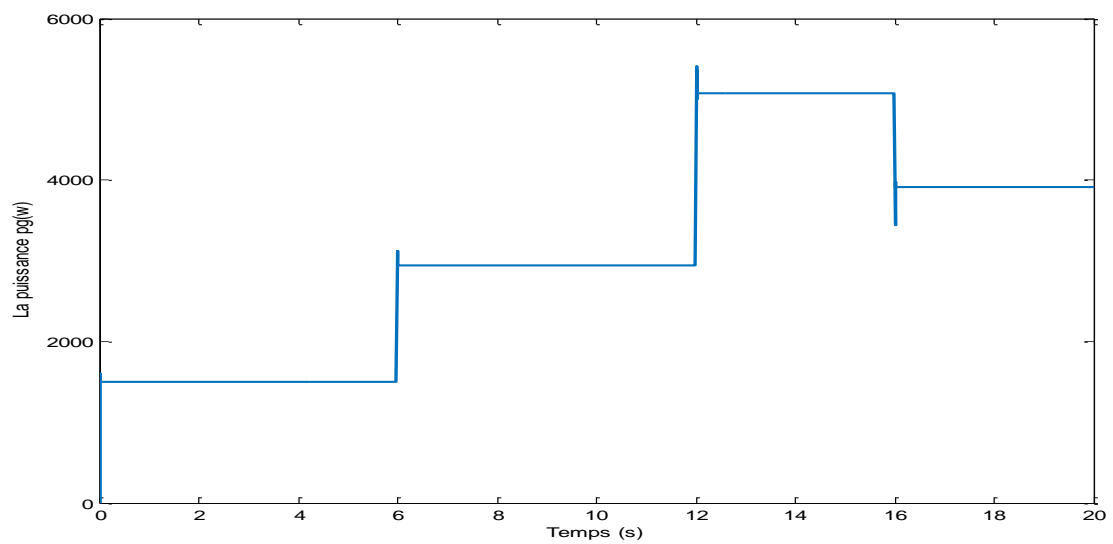


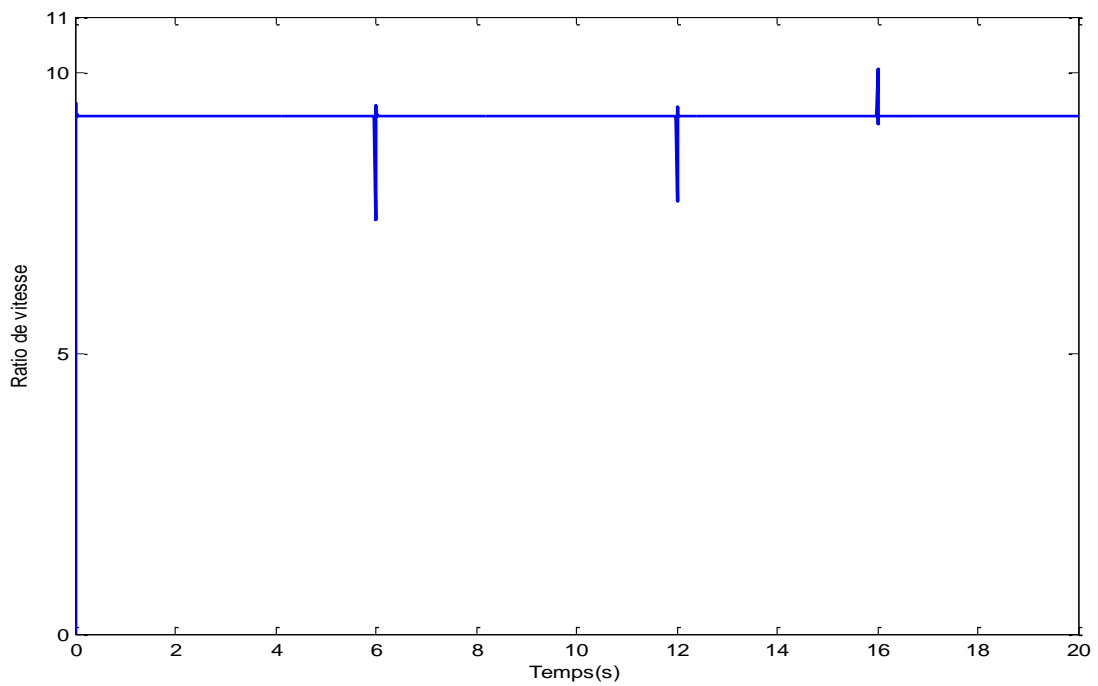
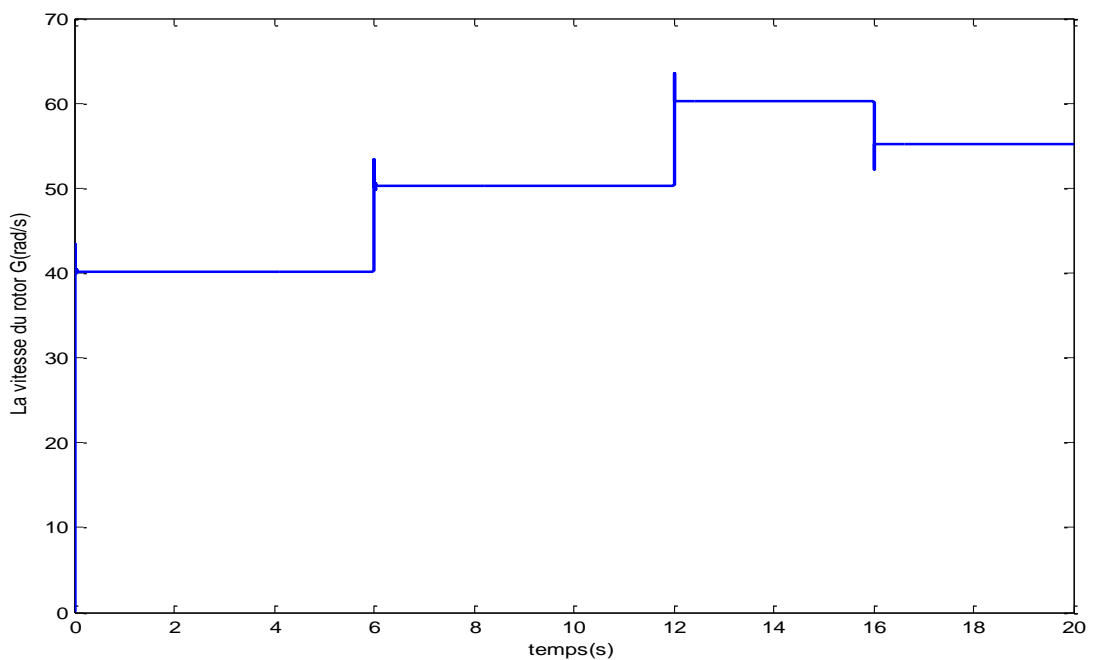
Figure III.6: La vitesse du vent

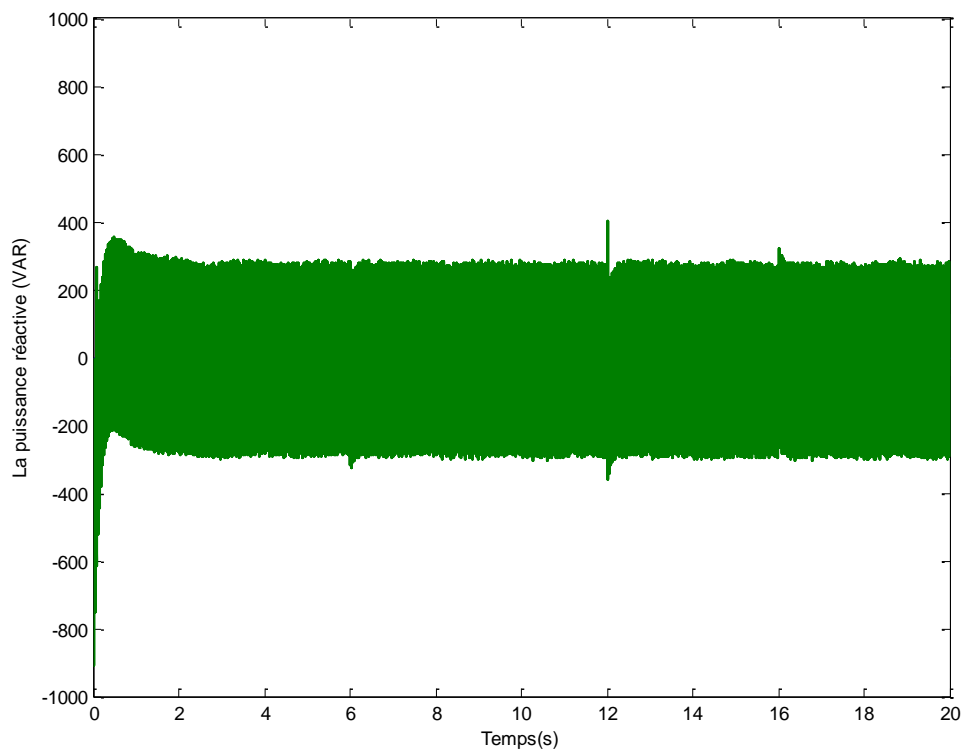


**Figure III.7 :** Le coefficient de la puissance

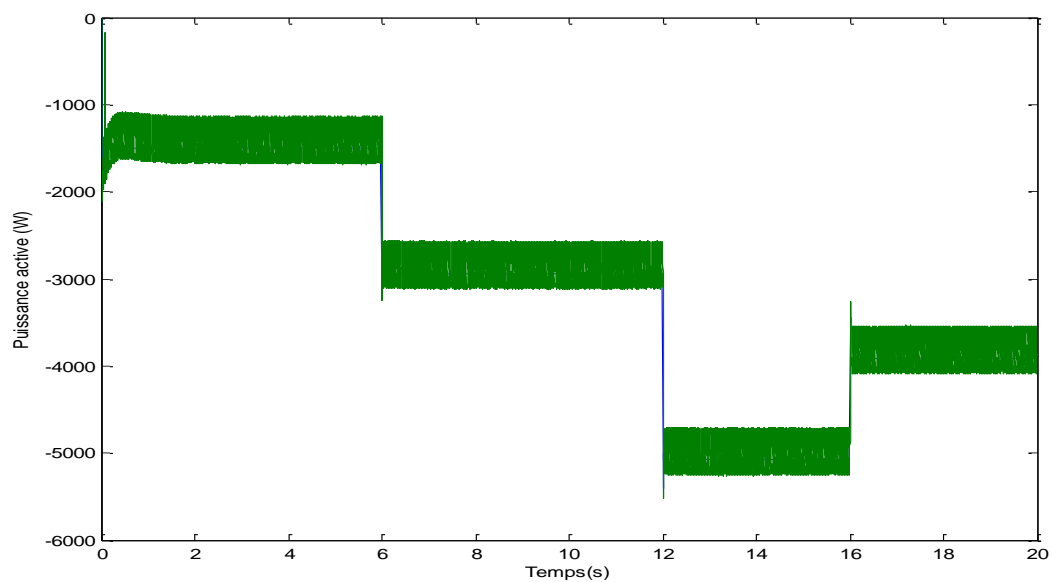


**Figure III.8 :** La puissance mécanique de la génératrice

**Figure III.9** : ratio de vitesse**Figure III.10** : La vitesse du rotor de la génératrice



**Figure III.11.a** : La puissance réactive



**Figure III.11.b** : La puissance active

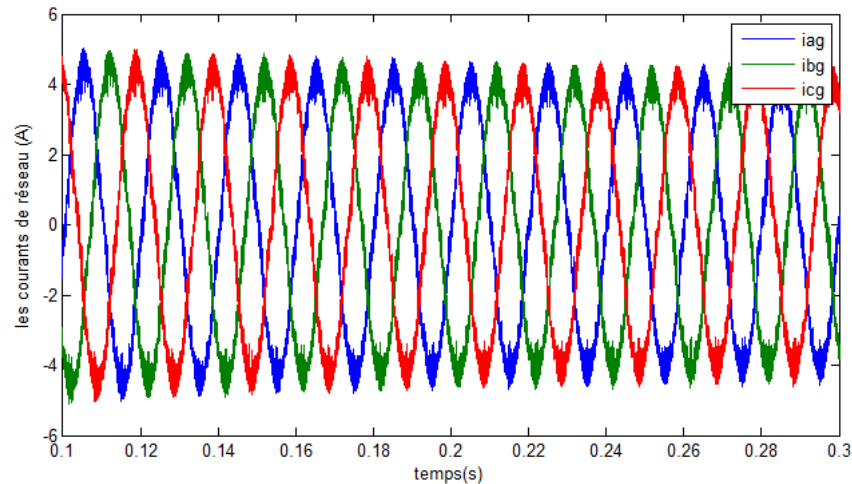


Figure III.12 : Les courants de réseau

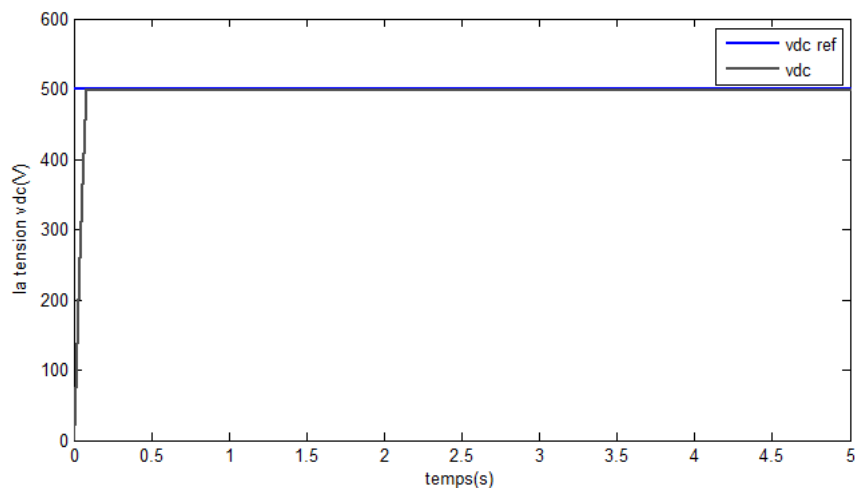


Figure III.13 : La tension  $V_{dc}$ .

#### ❖ Interprétations des résultats :

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande MPPT basé sur l'algorithme conductance incrémentale.

La figure (III.6) présent l'allure du profil du vent dans un intervalle de temps, Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance mécanique de la turbine est adaptée à la variation de la vitesse du rotor, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent.

Les figures (III.7), (III.8) et (III.9) présentent le coefficient de la puissance, la puissance mécanique et le ratio de vitesse successivement, on remarque qu'ils sont adaptés à la variation de la vitesse du vent.

D'après la figure (III.10), on remarque que la vitesse de rotation de la génératrice est variable selon la variation du profil du vent.

Les figure (III.11.a) et (III.11.b) représentent la puissance active et réactive fournit au réseau électrique, d'après ces résultats on remarque que :

- La puissance active est adaptée à la variation de la vitesse du rotor, elle est identique à la valeur de référence.
- La puissance réactive est de valeur égale 0 VAR, elle est identique à la valeur de référence.

Pour La figure (III.12) présente les courbes du courants de réseau, on remarque que les courants  $i_{ag}$ ,  $i_{bg}$  et  $i_{cg}$  sont de forme sinusoïdale.

La figure (III.13) représente la tension  $V_{dc}$ , on remarque elle est idéale avec la tension  $V_{dc}$  de référence.

### III.5 Conclusion

Après avoir exposé les différentes configurations des convertisseurs utilisés dans les structures d'éoliennes équipées de génératrices synchrones à aimants permanents, nous avons élaboré un modèle pour la chaîne de conversion éolienne. Ce modèle comprend une génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur triphasé MLI, et un bus continu reliant le tout à l'onduleur. Ensuite, nous avons étudié un dispositif de commande spécifique pour cette chaîne de conversion.

Le système global a ensuite été simulé avec une commande MPPT basée sur l'algorithme de conductance incrémentale. Dans ce chapitre, nous avons présenté le contrôle et la simulation de la chaîne de conversion éolienne avec cette commande MPPT, détaillant les stratégies de contrôle du système de production d'énergie éolienne, de la puissance active et réactive, ainsi que du bus continu. Nous avons également décrit la stratégie de commande du MLI et la commande de la turbine éolienne.

Finalement, après avoir analysé les résultats de simulation du système global avec la commande MPPT basée sur l'algorithme de conductance incrémentale, nous pouvons conclure que cette commande est très efficace et indispensable pour le bon fonctionnement d'une chaîne éolienne même si dans le vent variable.

*Conclusion  
Générale*

## Conclusion générale

L'énergie éolienne est en pleine expansion et repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité via des éoliennes. Elle est considérée comme une source d'énergie propre, ne produisant ni gaz à effet de serre ni polluants atmosphériques. En utilisant l'énergie éolienne, nous réduisons les émissions de carbone et atténuons le changement climatique. Cette technologie crée des emplois locaux, génère des revenus pour les collectivités et les propriétaires fonciers, et améliore l'efficacité énergétique. De plus, l'énergie éolienne est une ressource inépuisable et contribue à la diversification et à la sécurité énergétique mondiale.

L'énergie éolienne joue un rôle crucial dans la transition vers une production d'énergie plus durable et respectueuse de l'environnement. Sa croissance devrait se poursuivre à l'avenir, soutenant les objectifs de développement durable et de réduction des émissions de carbone à l'échelle mondiale.

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la simulation d'une chaîne éolienne et l'application de la commande MPPT basé sur l'algorithme Incrémental Conductance.

Dans le premier chapitre, nous avons retracé l'histoire des éoliennes et présenté les différents types existants, en détaillant leur fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons également exploré les diverses machines électriques utilisées dans cette chaîne énergétique, ce qui nous a conduit à opter pour la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). De plus, nous avons abordé les classifications des éoliennes et les algorithmes de commande MPPT.

Dans le deuxième chapitre, nous avons d'abord examiné les différents éléments de la chaîne de conversion, notamment la turbine, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et les convertisseurs statiques. Nous avons ensuite présenté le profil du vent, suivi par la modélisation de la turbine éolienne et la modélisation du réseau électrique.

Le troisième chapitre de l'étude a été consacré à la simulation de la chaîne de conversion éolienne. Nous y avons analysé le contrôle MPPT en utilisant l'algorithme de Conductance Incrémentale. Le système de commande de la chaîne de conversion a été proposé et implémenté à l'aide du logiciel MATLAB. Les simulations effectuées ont produit des résultats satisfaisants, permettant ainsi de valider les modèles mathématiques du système.

# *Annexes*

## Annexe A

Paramètres de la machine synchrone à aimants permanents [44] :

Paramètres de la MSAP	
Résistance de l'enroulement statorique	$R_s = 0.425 \Omega$
Inductances quadratique	$L_q = 0.00835 \text{ H}$
L'inductance directe	$L_d = 0.00835 \text{ H}$
L'inertie de la machine	$J=0.00141 \text{ Kg m}^2$
Coefficient de frottement	$F=0.001 \text{ Kg m}^2/\text{s}$
Flux des aimants permanents	$\Phi_f = 0.433 \text{ Wb}$
Nombre de paires de pôles	$P=5$

Paramètres de la turbine [45] :

Paramètres de la turbine	
Puissance nominale	$P_n = 5 \text{ KW}$
Rayon de la turbine	$R=8.14 \text{ m}$
Moment d'inertie	$J=7.856 \text{ Kg m}^2$
Vitesse spécifique optimale $\lambda_{opt}$	$\lambda_{opt} = 9.2$
Coefficient de puissance maximale $C_{pmax}$	$C_{pmax} = 0.45$
Gain	$G=1$
L'inertie de la turbine	$F=0.002 \text{ Kg m}^2/\text{s}$

Paramètres du réseau :

Paramètres du réseau	
Résistance du réseau	$R_g = 0.015 \Omega$
Inductance du réseau	$L_g = 0.002 \text{ H}$
$w_g$	$w_g = 314$
$v_g$	$v_g = 311$

Paramètres de l'onduleur MLI [46] :

Paramètres d'onduleur MLI	
Fréquence de référentiel	$f_r = 50\text{HZ}$
Indice de modulation m	$m=21$
Taux de modulation r	$r=0.8$

Paramètres du redresseur MLI [46] :

Paramètres du redresseur MLI	
Résistance	$R=0.075\Omega$
L'inductance	$L=0.00075\text{H}$

Paramètres du bus continu [46]:

Paramètres du bus continu	
Tension continu	$V_{dc} = 500\text{V}$
Capacité	$C=0.038\text{F}$

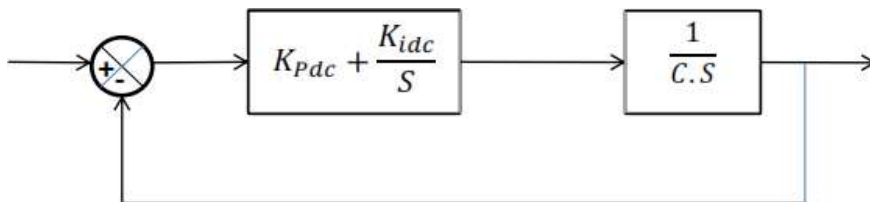
## Annexe B

### Calcul des régulateurs

Pour le système de réglage, nous choisissons d'utiliser des correcteurs de type Proportionnel Intégral (PI), étant donné qu'ils sont simples à mettre en œuvre. Ce type de correcteur assure une erreur statique nulle grâce à l'action d'intégration, tandis que la rapidité de réponse est établie par l'action proportionnelle.

#### A : Régulateur de la tension $V_{dc}$

La boucle de régulation de tension  $V_{dc}$  est représentée par la figure B.1 suivante :



**Figure B.1 :** Schéma fonctionnel de régulateur de tension  $V_{dc}$

Les fonctions de transferts en boucle fermée sont:

$$F.T.B.F = \frac{\frac{1}{C.S} \left( \frac{K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{S} \right)}{1 + \frac{1}{C.S} \left( \frac{K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{S} \right)} \quad (B.1)$$

$$= \frac{\frac{K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{C.S^2}}{\frac{C.S^2 + K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{C.S^2}} \quad (B.2)$$

$$= \frac{K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{C.S^2 + K_{Pdc}.S + K_{Idc}} \quad (B.3)$$

$$= \frac{\frac{K_{Pdc}.S + K_{Idc}}{C}}{S^2 + \frac{K_{Pdc}}{C}.S + \frac{K_{Idc}}{C}} \quad (B.4)$$

Le dimensionnement des régulateurs est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (B.4) est du deuxième ordre, nous

imposant deux pôles à partie réelle négative. Le dénominateur de la fonction de transfert de chaque régulateur est de la forme:

$$S^2 + 2\xi\omega_n \cdot S + \omega_n \quad (\text{B.5})$$

Donc, nous obtenons les paramètres des régulateurs, en fonction de l'amortissement  $\xi$  de la pulsation propre  $\omega_n$ .

Pour une erreur statique de 5%, le temps de réponse  $t_{dc}$  d'un système est exprimé en fonction de  $\xi$  et  $\omega_n$ .

L'amortissement est en générale choisie  $\xi = 0.707$  Par identification entre les équations (B.5) et (B.4), nous obtenons les paramètres suivants du régulateur PI:

$$\frac{K_{pdc}}{C} = 2\xi\omega_n \quad \rightarrow \quad K_{pdc} = 2\xi\omega_n \cdot C \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{K_{idc}}{C} = \omega_n^2 \quad \rightarrow \quad K_{idc} = C \cdot \omega_n^2 \quad (\text{B.7})$$

Avec :

$$\xi = 0.707 \quad (\text{B.8})$$

$$\omega_n = \frac{5}{\xi t_{dc}} \quad (\text{B.9})$$

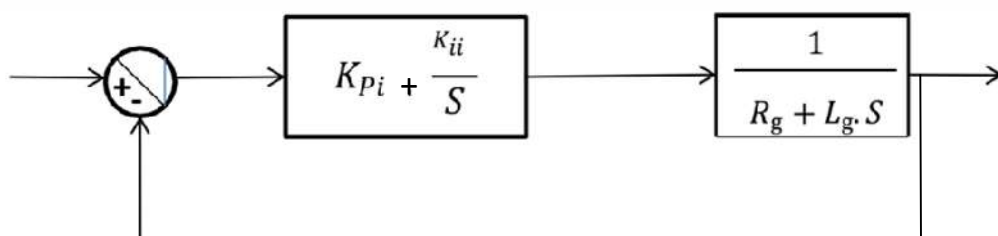
$\xi$  : L'amortissement.

$\omega_n$  : Pulsation propre du système.

$t_{dc}$  : Temps de repense 1 ms.

## B : Régulateur du courant

La boucle de régulation du courant est représentée par la figure B.2 suivante :



**Figure B.2** : Schéma fonctionnel de régulateur de courant

$$\frac{K_{pi}+K_{ii}}{S} = \frac{S+\frac{K_{ii}}{K_{pi}}}{\frac{S}{K_{pi}}} \quad (\text{B.10})$$

D'après le schéma fonctionnel on a :

$$\frac{\frac{1}{L_g}}{S+\frac{R_g}{L_g}} = \frac{1}{R_g+SL_g} \quad (\text{B.11})$$

Les fonctions de transferts en boucle ouvert sont:

On pose :

$$\frac{K_{pi}}{K_{ii}} = \frac{R_g}{L_g} \quad (\text{B.12})$$

D'où :

$$F.T.B.O = \frac{\frac{1}{L_g}}{\frac{S}{K_{pi}}} = \frac{K_{pi}}{S.L_g} \quad (\text{B.13})$$

$$F.T.B.F = \frac{\frac{K_{pi}}{S.L_g}}{1+\frac{K_{pi}}{S.L_g}} \quad (\text{B.14})$$

$$= \frac{\frac{K_{pi}}{S.L_g}}{\frac{SL_g+K_{pi}}{S.L_g}} \quad (\text{B.15})$$

$$= \frac{K_{pi}}{SL_g+K_{pi}} \quad (\text{B.16})$$

Selon la méthode de compensation de pole, donc on peut définir les paramètres de cetterégulateur comme suit :

On pose :

$$\frac{L_g}{K_{pi}} = \tau_{ir} \quad (\text{B.17})$$

Alors :

$$K_{pi} = \frac{L_g}{\tau_{ir}} \quad (\text{B.18})$$

$$K_{ii} = \frac{R_g}{L_g} \cdot K_{pi} \quad (\text{B.19})$$

$$K_{ii} = \frac{R_g}{\tau_{ir}} \quad (\text{B.20})$$

# *Bibliographies*

## Bibliographie

- [1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Observatoire\\_de\\_l%27%C3%A9nergie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Observatoire_de_l%27%C3%A9nergie) consulté le 22/01/2024
- [2] **S. El Aimani, B. François et B. Robins** – « Modélisation de générateurs éoliens à Vitesse variable connectés à un bus continu commun», Forum International sur les Energies Renouvelables, FIER, Tétouan-Maroc 2002.
- [3] **P.W.Carlin, A.S.Laxson, E.B.Muljadi**, « The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology », NREL Department of Energy Laboratory /TP-500-28607, U.S. Février 2001.
- [4] **Melle BRAHMI CYLIA** « Modélisation et commande d'un système éolien » Thèse de master univ Bejaïa, Algérie, Année Universitaire : 2019/2020.
- [5] [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr) énergie éolien : Transformer le vent en électricité. consulté le 12/01/2024.
- [6] **N.LAVERDURE**, « L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France,(2005).
- [7] Les éléments d'une éolienne source consulté le 27/01/2024.  
[https://energyeducation.ca/Encyclopedie\\_Energie/index.php/%C3%89olienne](https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/%C3%89olienne)
- [8] Site Internet consulté le 30/01/2024  
[https://energyeducation.ca/Encyclopedie\\_Energie/index.php/%C3%89olienne](https://energyeducation.ca/Encyclopedie_Energie/index.php/%C3%89olienne)
- [9] **H.Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ».Thèse de doctorat, ÉNSAM France,2003.
- [10]**M.SIDDO Abdoulaziz** «Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat. Ecole national polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie,2007.
- [11] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-sont-types-eoliennes-1226/> consulté le 16/02/2024.
- [12] Rotor de Savonius de: <https://www.ecosources.org/eolienne-verticale-savonius> consulté le 25/02/2024.
- [13]**A. MIRECKI**, Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse N°2213(2005), Institut national polytechnique de

Toulouse, France.

[14] <https://www.info-eolien.fr/les-differents-types-deoliennes/> consulté le 12/03/2024.

[15] capacité par pays | Statista <http://fr.statista.com> consulté le 15/05/2024.

[16] **S.NAIT SAADA** « Modélisation et commande non linéaire d'une éolienne par la stratégie MPPT » Thèse de master UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Algérie ,2016.

[17] <https://www.aps.dz/economie/161408-energie-des-perspectives-prometteuses-pour-l-eolien-offshore-en-algerie> consulté le 02/06/2024.

[18] **TOUAL Belkacem**, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Éolien à Vitesse Variable », mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, (2010).

[19] **Beltran. B** « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur »; Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, (2011).

[20] **Gaillard. A** « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service »; Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, France, (2010) .

[21] **KAHLA SAMI** « Modélisation et commande d'un système éolien » Thèse de Doctorat, Université de Guelma , Algérie, 2017/2018.

[22] **SAIDOUNE Abdelheq** « Commande MPPT basée sur l'algorithme perturbe and observe (P&O) à pas variable d'un système éolien » mémoire de master, Université de Chlef, Algérie, 2023.

[23] **M. Daniel ROYE M. Seddik BACHA** « Sur l'Intégration des Générateurs Eoliens dans les Réseaux Faibles ou Insulaires », Thèse Doctorat de l'NPG, Spécialisé : Génie électrique, France 09 décembre 2005.

[24] **DJERIRI YOUCEF**, « Commande Directe du Couple et des Puissances d'une MADA Associée à un Système Eolien par les Techniques de l'Intelligence Artificielle », Thèse Doctorat, Spécialité : Commande Electrique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 05 /11/2015.

[25] **F. Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de

l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Université de Nantes, France, 2003.

[26] Danish Wind Industry Association: <http://www.windpower.org/>. consulté le 02/06/2024.

[27] <https://www.youtube.com/@chouaiblbiiod6682> consulté le 02/06/2024

[28] **MEGHNI BILLEL**, « Contribution à l'Amélioration des Performances d'une Chaîne Énergétique Éolienne », Thèse Doctorat, Spécialité : Qualité et Gestion de L'Énergie Électrique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2005.

[29] **BOUDJEMA ZINELAABIDINE**, « Etude et Commande d'un Système de Production d'Électricité Renouvelable Locale (Énergie Éolienne et Photovoltaïque) », Thèse Doctorat, Spécialité : Commande électrique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2015.

[30] **SLITANE AHMED**, « Modélisation d'une Turbine Éolienne Reliée à une Génératrice Supraconductrice », Mémoire de Master, Spécialité : Machine Électrique, Université Saad Dahlab de Blida, 2017-2018.

[31] **MR MERNACHE HAMZA, Mr KASMI BELKACEM**, « Etude d'une Petite Éolienne en Fonctionnement Autonome », Mémoire de Master, Spécialité : Electromécanique, Université A. Mira-Bejaia, 2019/2020.

[32] **B.MERGHEM**, « Étude et Commande d'une Éolienne à Base d'une MSAP Pour la Production d'Énergie Électrique », Mémoire de Master, Spécialité : électrotechnique, Université Farhat Abbas Sétif, 2016.

[33] **TEBBAL ABDEREZZAK ET SEKHRI MILOUD**, « Commande Prédictive d'un Système Éolien à Base d'une Machine Synchrones à Aimant Permanent », Mémoire de Master, Spécialité : commande électrique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019.

[34] **MAYOUF MESSAAOUD**, « Etude Comparative des Architectures et Stratégies de Contrôle d'un Aérogénérateur Synchrones à Aimant Permanent », Thèse Doctorat, Spécialité : Electrotechnique, l'Université Hadj Lakhdar Batna, 20 Avril 2014.

[35] **M. EZZAT**, « Commande Non Linéaire sans Capteur de la Machine Synchrones à Aimant Permanent », Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2011.

[36] **R.ABDESSEMED, M.KADJOU DJ**, « Modélisation des Machines Électriques », Spécialité : machine électrique Presses de, l'Université de Batna 1997.

- [37] **B. N. MOBARKAH**, « Commande Vectorielle sans Capteur mécanique des Machines Synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification ‘en ligne’ des Paramètres », Thèse de Doctorat de l’Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001.
- [38] **MARC RAPIN, JEAN MARK NOËL**, Energie Éolienne Principes, Études de Cas, Agence de Environnement et de la Maitrise de l’Energie, Paris, 2010, pp 111-114.
- [39] **L. RADAOROZANDRY**, « Conception et Optimisation des Machines Synchrones Avec des Modèles Analytiques en Tenant Compte de la Saturation Magnétique », Mémoire de Master, Université Laval, Québec, Canada, 2007.
- [40] **LATRECHE MOHAMMED TAHAR**, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister, spécialité : Commande Electrique, Université Ferhat Abbas de Sétif UFAS –Algérie, /2012.
- [41] **MR. MAZOUZ FARES, MR. KORICHI MOHAND**, « Modélisation et Commande d’un Aérogénérateur Synchrone à Aimant Permanent », Mémoire de Master, Spécialité : Électromécanique, Université A. Mira-Bejaia ,2018/2019.
- [42] **MORLAYE SEKOU CAMARA** , « Modélisation et Commande d’une Génératrice Synchrone à aimant permanent pour la production et l’injection des Energies Offshores dans un Réseau », Université Le Havre, France 2014.
- [43] [https://www.researchgate.net/figure/Strategie-de-controle-des-puissances-active-et-reactive-injectees-dans-le-reseau\\_fig4\\_263851185](https://www.researchgate.net/figure/Strategie-de-controle-des-puissances-active-et-reactive-injectees-dans-le-reseau_fig4_263851185)] consulté le 6/6/2024.
- [44] **YACINE ABDERRAHMANE BENCHERIF**, « Modélisation et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la Production de l’Energie Eolienne», Mémoire d’Ingénieur, ENP d’Alger, 2008.
- [45] **RACHID ABDESSEMED**, << Modélisation et simulation des machines électriques >>, Ellipses Edition Marketing, S.A, 2011.
- [46] **Darkhan Zholtayev, Matteo Rubagotti, Ton Duc Do**, “Adaptive Super-Twisting sliding mode Control for Maximum Power Point Tracking of PMSG-Based Wind Energy conversion systems”, Nazarbayev University, Kabanbay Batyr Avenue 53, Nur-Sultan City, 010000, Kazakhstan, Renewable Energy 183, pp 877-889, 2022.
- [47] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061516307141> consulté le 17/6/2024

**ملخص:** تركز هذه المذكرة على تحسين التحكم في تتبع أقصى نقطة للطاقة بناءً على خوارزمية التوصيل التزايدية المطبقة على نظام طاقة الرياح. في البداية، يتم تقديم عرض عام لطاقة الرياح، يتناول الهياكل المختلفة لأنظمة الرياح وأنواع المولدات المستخدمة. في دراستنا، اخترنا استخدام آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم، مدعومة بمحولين ثابتين ثلاثي الطور، وهما العاكس والمقوم. بعد ذلك، قمنا بتفصيل تنفيذ التحكم في تتبع أقصى نقطة للطاقة استناداً إلى خوارزمية التوصيل التزايدية، والتي تهدف إلى ضمان التشغيل الأمثل لتوربينات الرياح وتعظيم الطاقة الملتقطة من الرياح. تم تقييم أداء وكفاءة هذا النهج باستخدام عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام برنامج الماتلاب. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسناً كبيراً في استخراج الطاقة، مما يؤكد أهمية هذه الطريقة في سياق أنظمة طاقة الرياح الحديثة.

**الكلمات الرئيسية:** تتبع أقصى نقطة للطاقة ، آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم ، التوصيل التزايدية ، طاقة الرياح

**Résumé :** Ce mémoire porte sur l'optimisation de la commande MPPT basée sur l'algorithme de conductance incrémentale (IC) appliqué à un système éolien. Tout d'abord, une présentation générale de l'énergie éolienne est faite, en abordant les différentes structures de systèmes éoliens et les types de génératrices utilisés. Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation d'une machine synchrone à aimants permanents, alimentée par deux convertisseurs statiques triphasés, à savoir un onduleur et un redresseur. Par la suite, nous avons détaillé la mise en œuvre de la commande MPPT basée sur l'algorithme de conductance incrémentale, qui vise à garantir le fonctionnement optimal des éoliennes et à maximiser la puissance captée du vent. Les performances et l'efficacité de cette approche ont été évaluées grâce à des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus démontrent une amélioration significative de l'extraction de la puissance, confirmant la pertinence de cette méthode dans le contexte des systèmes éoliens modernes.

**Mots clés :** MPPT : Suivi du Point de Puissance Maximum, GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents, IC : conductance incrémentale, énergie éolienne.

**Abstract :** This thesis focuses on the optimization of the MPPT control based on the incremental conductance (IC) algorithm applied to a wind system. First, a general presentation of wind energy is made, addressing the different structures of wind systems and the types of generators used. In our study, we opted for the use of a permanent magnet synchronous machine, powered by two three-phase static converters, namely an inverter and a rectifier. Subsequently, we detailed the implementation of the MPPT control based on the incremental conductance algorithm, which aims to ensure the optimal operation of wind turbines and to maximize the power captured from the wind. The performance and efficiency of this approach were evaluated through simulations carried out under MATLAB/Simulink. The results obtained demonstrate a significant improvement in power extraction, confirming the relevance of this method in the context of modern wind systems.

**Keywords :** MPPT : Maximum Power Point Tracking, IC : Incremental conductance, permanent magnet synchronous machine, wind system