

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR**  
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES TECHNOLOGIES**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU**  
**DIPLOME DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**  
**OPTIONM: COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES**

## **Thème**

**Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à**  
**base de machine synchrone à aimants permanents GSAP**

**Soutenu: Le 25 Mai 2017**

**Présenté par :** Mahdaoui Hamza

**Encadré par :** Dr. Harrouz Abdelkader

**Président :** Prof. Benatallah Ali

**Examineur :** Mr. Ouled Ali Omar

**2016 - 2017**



# Dédicace

*Au nom de Dieu, le tout clément, le tout miséricordieux.*

Je remercie Dieu le tout-puissant, de m'avoir permis de poursuivre mes études et d'en arriver là aujourd'hui, et sur tout, de m'avoir donné le courage, la patience d'affronter tous les aléas de la vie universitaire.

Je dédie ce travail à :

- ✓ La personne la plus chère à mon coeur, la personne à qui je ne pourrai rendre un seul instant du temps qu'elle m'a consacré, la lumière de mes yeux ma mère Kasmi Fatima Zohra.
- ✓ A mon père dont je porte si fièrement le nom Monsieur Mahdaoui  
Mohamed.
- ✓ A mes frères.
- ✓ A qui m'a dirigé pour avoir obtenu ce travail **Dr.Harrouz Abdelkader** A tous je leur présente mes sincères salutations en remerciant Dieu d'avoir écrit notre rencontre.

# Remerciement

A ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je saisi cette occasion pour remercier tout le monde particulièrement

**Mr. HARROUZ ABDELKADER** d'avoir accepté de m'encadrer et pour ses conseils précieuses et le soutien affectif dont j'ai bénéficié tout au long de la période d'élaboration de ce mémoire.

Et aussi les Membres de jury Mr. Benatallah Ali et Mr. Ouled Ali Omar de nous honorer d'avoir accepté de venir.

J'adresse également un remerciement à mes chers parents qui sans eux je ne serai là où je suis.

Je tiens aussi à remercier profondément mes collègues pour les services qu'ils m'ont rendus

également ma cousine Mahdaoui Meriem et Azzam Abdallah pour leur aide précieuse .

A tous mes professeurs du département de Sciences et Technologie, qui ont contribué à ma formation.

## **La liste des Figures**

### **Chapitre I: Généralités sur l'énergie renouvelable**

Figure.I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	9
Figure.I.2 Le développement de l'énergie (2000_2015) .....	14
Figure.I.3 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie .....	15
Figure.I.4 centrale d'énergie éolienne d'Adrar .....	16
Figure.I.5 Technologies des éoliennes .....	17
Figure.I.6 Principe de la conversion d'énergie .....	19
Figure.I.7 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW .....	19
Figure.I.8 Bilan des forces sur une pale .....	21
Figure.I.9 Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique .....	22
Figure.I.10 Machine synchrone entraînée par une turbine éolienne et reliée au réseau par un dispositif redresseur MLI – onduleur MLI .....	24

### **Chapitre II: Modélisation et simulation d'une génératrice à aimant permanent**

Figure.II.1 cycle d'hystérésis .....	28
Figure.II.2 courbe de désaimantation .....	28
Figure.II.3 Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques .....	31
Figure.II.4 Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent .....	31
Figure.II.5 Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial .....	32
Figure.II.6 Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe .....	32

Figure.II.7 Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator. ....33

Figure.II.8 Structure à flux axial avec double rotor et un stator. ....33

Figure.II.9 Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.....34

Figure.II.10 Machine équivalente au sens de Park. ....36

Figure. II.11 Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq) .....37

Figure.II.12 Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP).....41

Figure.II.13 Simulation de la GSAP à vide .....43

Figure.II.14 Bloc de la simulation de la GSAP en charge .....44

Figure.II.15 Simulation de la GSAP en charge.....46

**Chapitre III: Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien**

Figure.III.1 Structure du système éolien étudiée .....48

Figure.III.2 Structure de la chaîne éolienne.....49

Figure.III.3 Voilure à axe vertical de type Savonius .....51

Figure.III.4 Courbe caractéristique retenue pour les essais. ....52

Figure.III.5 Modèle du couple éolien sous Simulink.....52

Figure.III.6 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation .....53

Figure.III.7 Modèleducoupledelaturbineéolienne.....54

Figure.III.8 Schéma bloc de la turbine éolienne .....54

Figure.III.9 les résultats de la simulation de système éolien. ....57

Figure.III.10 La chaîne de conversion éolienne à base de GSAP.....58

Figure.III.11 Topologies de base d'un redresseur de tension. ....59

Figure.III.12 Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....61

Figure.III.13 Principe d'un MLI à hystérésis.....61

Figure.III.14 Modulateur MLI à échantillonnage périodique .....61

Figure.III.15 Modulateur MLI à porteuse triangulaire .....	63
Figure.III.16 Schémaderedresseur MLI connectéà la génératrice GSAP.....	63
Figure.III.17 Les différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI .....	64
Figure.III.18 Les courants de sortie du bus continue.....	66
Figure.III.19 Schémasous matlab-Simulink duredresseurMLIdansle repère fixe abc.....	76
Figure.III.20 Schémasous Matlab-SimulinkduredresseurMLIdansle repère tournantd-q .....	68
Figure.III.21 Schémaderégulationducourantpourle redresseur MLI.....	69
Figure.III.22 Boucle de tension.....	70
Figure.III.23 Modèle globale en boucle fermée pour la régulation de tension.....	70
Figure.III.24 Schéma sous matlab-Simulink du vitesse de vent.....	73
Figure.III.25 Vitesse de vent.....	73
Figure.III.26 Tension redressée .....	74
Figure.III.27 Zoom de la tension redressée .....	74
Figure.III.28 Vitesse de vent.....	75
Figure.III.29 Tension redressée.....	75

## **La liste des Tableaux**

### **Chapitre I: Généralités sur l'énergie renouvelable**

Tableau.II.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants.....	30
--	----

### **Chapitre III: Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien**

Tableau.III.1 les huit états possibles des interrupteurs.....	64
---	----

## Sommaire

La liste des Figures.....	i
La liste des Tableaux.....	iv
Abréviation.....	v
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Généralités sur l'énergie renouvelable</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Energies renouvelables dans le monde .....	4
I.2.1 Energie hydraulique .....	4
I.2.2 Energie solaire .....	5
I.2.3 Energie géothermie .....	6
I.2.4 Energie de la biomasse.....	6
I.2.5 Energie éolienne.....	6
I.3 Systèmes de Conversion d'Énergie éolienne .....	7
I.3.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne .....	7
I.3.2 Taille des aérogénérateurs.....	8
I.4 Définition de l'énergie éolienne .....	8
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	9
I.5.1 Avantages.....	9
I.5.2 Inconvénients .....	11
I.6 L'énergie éolienne en quelques chiffres .....	11
I.6.1 L'énergie éolienne pour quoi faire? .....	11
I.6.2 les statistiques de l'éolien dans le monde.....	12
I.6.3 Répartition continentale .....	13
I.6.4 Le développement de l'énergie au cours des dernières années .....	13
I.6.5 Futurs challenges et perspectives mondiales .....	14
I.7 L'éolienne en Algérie.....	14



I.7.1 Ferme éolienne d'Adrar.....	15
I.8 Différents types d'éoliennes.....	16
I.8.1 Eolienne à axe vertical .....	17
Avantages .....	17
Inconvénients.....	17
I.8.2 Eoliennes à axe horizontal .....	18
Avantages .....	18
Inconvénient .....	18
I.9 Constitution d'une éolienne .....	18
I.9.1 Principe .....	18
I.9.2 Constitution.....	19
I.10 Fonctionnement d'une éolienne .....	20
I.11 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne .....	20
I.11.1 Bilan des forces sur une pale .....	20
I.11.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	21
I.12 Application des éoliennes .....	22
I.13 Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne .....	23
I.13.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	23
I.13.2 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	23
I.14 Conclusion.....	25

**Chapitre II: Modélisation et simulation d'une génératrice à aimant permanent**

II.1 Introduction.....	27
II.2 Les aimants permanents.....	27
II.2.1 Caractéristiques générales des aimants permanents .....	28
II.2.2 Les différents types d'aimants permanents .....	29
II.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents .....	30
II.4 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents .....	32
II.4.1 Structures à flux radial (RFPM) .....	32
II.4.2 Structures à flux axial (AFPM) .....	33
II.5 Avantages des machines synchrones à aimants permanents .....	34
II.6 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents .....	34

II.7 Couple des machines synchrones à aimants permanents .....	35
II.8 Modélisation de la GSAP .....	35
II.8.1 Hypothèses simplificatrices .....	35
II.8.2 Les équations de tension et flux .....	36
II.8.3 Equation mécanique .....	37
II.8.4 Transformation de PARK .....	37
II.8.4.1 Passage triphasé au biphasé .....	38
II.8.4.2 Passage biphasé au triphasé .....	38
II.9 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park .....	39
II.9.1 Equations électriques .....	39
II.9.2 Calcul de puissance .....	39
II.9.3 Couple électromagnétique .....	40
II.10 Simulation et interprétation .....	41
II.10.1 Fonctionnement à vide .....	42
II.10.2 Fonctionnement en charge (Rch, Lch) .....	43
II.11 Conclusion .....	47
 <b>Chapitre III: Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien</b>	
III.1 Introduction .....	48
III.2 Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne .....	49
III.2.1 Modélisation du vent .....	49
III.2.2 Modélisation de la turbine éolienne .....	50
III.2.3 Modélisation mécanique du couplage turbine –génératrice .....	53
III.2.4 Modèle de la GSAP .....	55
III.2.5 Simulation .....	55
III.3. Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien .....	58
III.3.1 Redresseur à commande MLI .....	59
III.3.1.1 Description .....	59
III.3.1.2 Principe de fonctionnement de redresseur .....	59
III.3.2 Stratège du commande MLI .....	60

III.3.2.1 Description.....	60
III.3.2.2 Applications.....	60
III.3.2.3 Les techniques de commande MLI.....	60
III.3.2.3.1 MLI à Bande d’hystérésis.....	60
III.3.2.3.2 MLI vectorielle.....	62
III.3.2.3.3 MLI à échantillonnage périodique.....	62
III.3.2.3.4 MLI à porteuse triangulaire.....	62
III.4 Commande en courant de GSAP pour le redresseur MLI.....	63
III.4.1 Modélisation du redresseur MLI.....	63
III.4.2 Représentation du redresseur MLI dans le repère tournant d-q.....	68
III.4.3 boucle de courant.....	69
III.4.4 boucle de tension.....	69
III.5 Simulation.....	71
III.6 Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76
Bibliographie.....	79

$MS$	Machine synchrone
$MSAP$	Machine synchrone à aimants permanents
$GSAP$	Génératrice synchrone à aimants permanents
$(d, q)$	Indices du repère de Park lié au rotor
$R_s$	Résistance statorique
$L_d$	Inductance statorique directe
$(v_{sd}, v_{sq})$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
$L_q$	Inductance statorique quadratique
$\psi_f$	Flux d'excitation des aimants permanents
$(\psi_{sd}, \psi_{sq})$	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
$(I_{sd}, I_{sq})$	Composantes du courant statorique
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant
$P$	Nombre de paire de pôles
$J$	Moment d'inertie totale de la machine
$f$	Coefficient de frottement visqueux
$\omega$	Pulsation électrique statorique
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique du rotor
$\vec{F}$	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable
$V_1, V_2$	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
$\rho$	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
$S$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
$m$	Masse d'air traversant le rotor éolien en une(1) seconde
$P_m$	Puissance extraite par le rotor éolien
$P_{mt}$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$\lambda, TSR$	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
$\Omega_1, \Omega_2$	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
$P_{mg}$	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice
$\vec{v}$	Vecteur vitesse du vent

$P(\Theta)$	Transformation de Park
$P(\Theta)^{-1}$	Transformation inverse de Park
$i_{a,b,c}$	Courants des phases statoriques
$W_t$	Vitesse de la turbine
$V_{a,b,c}$	Tensions des phases statoriques
$v_{d,q}$	Tension statorique sur les axes d et q
$i_{d,q}$	Courant statorique sur les axes d et q
$f_p$	Fréquence de la porteuse
$i_{a,b,c}$	courants d'entrée
$U_{dc}$	Tension redressée
$i_{dc}$	Courant du bus continu
$MLI$	Modulation de largeur d'impulsions

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Depuis les anciennes civilisations, l'homme a découvert la notion de la force et il a compris qu'il peut puiser dans la nature pour s'en procurer afin de prospérer sur terre, et dompter les obstacles qu'il rencontre dans sa démarche quotidienne vers le progrès. Une de ces forces de la nature est le vent qui est appelée actuellement l'énergie éolienne.

L'homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moulinier les grains ou pomper l'eau. On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la Perse ancienne. Mais il ne l'a utilisée comme source d'énergie électrique que vers les années quarante du siècle passé. Car jusqu'alors l'électricité était produite à partir des énergies fossiles, du géothermique et de l'hydraulique. Arriva ensuite le nucléaire pour remplacer les ressources traditionnelles déjà en épuisement avec un rendement très important mais génère des déchets radioactifs très dangereux, et surtout des risques néfastes pour l'environnement et les personnes en cas d'accident ou de séisme ou même d'attaque sur les sites concernés.

Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres et sans danger.

De nos jours les efforts s'orientent tous vers le développement de la production de l'énergie solaire et éolienne soit à caractère local soit pour la production à grande échelle, suivant le potentiel du site exploité. Du fait de l'abondance de ces ressources et de leur caractère écologique (aucune émission de gaz ni déchets), elles sont considérées comme étant les énergies de l'avenir. Dans ce contexte notre travail va s'intéresser à la filière éolienne et aux outils de son exploitation et son développement.

La majorité des éoliennes installées étaient à vitesse fixe. Elles possèdent néanmoins de nombreux inconvénients: un faible rendement énergétique, dans la mesure où elles ne sont optimisées que pour un point de fonctionnement et une courte durée de vie à cause des efforts importants subis par leur structure. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau lors des rafales du vent.

Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes. Les fluctuations de puissance peuvent être atténuées avec un dispositif qui permet des vitesses de rotation variables et par conséquent d'emmagasiner l'énergie des rafales sous forme d'énergie cinétique dans les grandes masses tournantes. Ainsi la production annuelle d'une éolienne à vitesse variable est accrue de 5% à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe.

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique.

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et une meilleure contrôlabilité, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents à attaque directe. Nous allons également étudier des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau.

Pour aborder notre thème de recherche nous préconiserons la démarche suivante afin de nous permettre une meilleure approche de notre problématique

Nous repartirons ce travail en trois chapitres:

Le premier chapitre sera une description des différentes énergies renouvelables et leurs spécificités.

Il privilégiera également une étude sur l'énergie éolienne à partir d'un bref historique, ses diverses définitions, ses différents types, sa constitution, ses avantages et inconvénients et d'une analyse basée sur quelques chiffres à portée mondiale, nationale et en particulier la wilaya d'Adrar.

Cette partie présentera également les différents systèmes utilisés pour l'exploitation

Le deuxième chapitre abordera la modélisation et simulation d'une génératrice à aimant



permanent, il fera l'objet d'une présentation de MSAP, de ses différentes structures, de ses avantages et inconvénients, des types de couple de cette machine et de sa modélisation dans le repère de park et la simulation de la GSAP à vide et en charge pour observer le fonctionnement et la consistance de la machine.

Nous avons aussi procédé à une interprétation de résultats.

Le troisième chapitre est consacré à la commande de la machine synchrone à aimant permanent avec système éolien.

D'abord nous avons effectué une analyse de la modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne à partir de la modélisation de vent, la modélisation de la turbine éolienne et la modélisation mécanique du couplage turbine-génératrice.

Puis nous avons offert à une présentation de la structure globale de la chaîne de conversion éolienne à base de la GSAP avec une commande et modélisation détaillée des différents éléments d'un côté et de redresseur à commande MLI et ses diverses fonctions d'autre côté; À cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne s'ajoute un dispositif électronique de puissance qui permettra de transmettre l'énergie électrique produite dans les directions du réseau ou de la charge à alimenter.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur l'énergie renouvelable**

## **Chapitre I**

# **Généralités sur l'énergie renouvelable**

### **I.1 Introduction**

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, et la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles [1].

Pour autant, ces énergies ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité en notant que l'hydroélectricité représente 92,5% de l'électricité issue des EnR (la biomasse 5,5%, l'éolien 1,5%, géothermie 0,5% et le solaire 0,05%). Ainsi, la capacité totale de production d'électricité issue d'énergies renouvelables (hors grande hydraulique) s'élève à 160 gigawatts (GW), soit 4% de la capacité mondiale du secteur énergétique. Les pays en développement produisent 44% de cette capacité, soit 70 GW, [2].

Dans ce chapitre nous allons faire un état de l'art sur les énergies renouvelable

### **I.2 Energies renouvelables dans le monde**

#### **I.2.1 Energie hydraulique**

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité. Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en

batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. La puissance développée dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau [23].

### **I.2.2 Energie solaire**

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil ce dernier distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injecté dans le réseau.

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés.

On peut distinguer trois types d'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, le solaire passif et le solaire thermique [23].

- **Energie solaire photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont reliées entre-elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés, l'électrification rurale et le pompage de l'eau (50%), les télécommunications et la signalisation (40%) et les applications domestiques (10%) [23].

- **Energie solaire thermique**

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement

(comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turbo alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sècheurs solaires [23].

### **I.2.3 Energie géothermie**

Du grec Géo (terre) et thermos (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, Dans certaines roches et à certaines profondeurs circulent, des flux de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100m, A la surface de la terre, cette énergie est en moyenne 10000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil.

L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée.

### **I.2.4 Energie de la biomasse**

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. C'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tel le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique [23].

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre.

### **I.2.5 Energie éolienne**

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

- **Directe** : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,
- **Indirecte** : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [23].

### I.3 Systèmes de Conversion d'Énergie éolienne

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

#### I.3.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

Le vent, comme source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (depuis 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont

toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [2].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui obligea plusieurs pays à investir pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de 386 MW en 1985,[3].

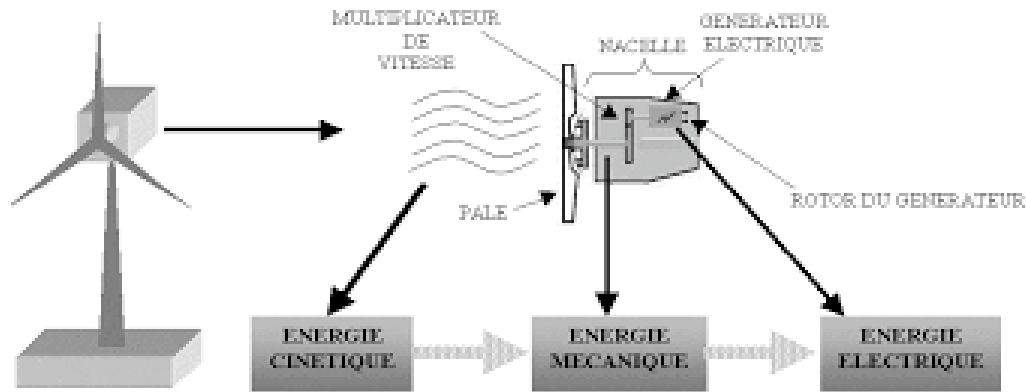
Après cela, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW, [4].

### **I.3.2 Taille des aérogénérateurs**

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure 3. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

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

L'éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure.I.1).



**Figure.I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [5]**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

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

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

## **I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

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

### **I.5.1 Avantages**

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

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure



qu'elle doublera pour 2050 [7]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus important des 10000 dernières années [7]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [7]. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO2 ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [7].

- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO2, 21 mille tonnes de SO2 et 17,5 mille tonnes de Nox [7]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [7].

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [7].

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [7].

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [7].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [7].

- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [9].

- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [9].

### **I.5.2 Inconvénients**

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

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [07].

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [7].

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [7] [8]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [7].

- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gestionnaires des réseaux électriques sont de plus en plus strictes [7].

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en termes de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [7].

## **I.6 L'énergie éolienne en quelques chiffres**

### **I.6.1 L'énergie éolienne pour quoi faire?**

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs.

Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5MW [1].

## **I.6.2 les statistiques de l'éolien dans le monde**

### 1. En Suisse:

Les 34 éoliennes installées en Suisse, totalisant 60 Mégawatts (MW) de puissance électrique, ont produit 110 millions de kilowattheures (kWh) en 2015.

La production annuelle moyenne est estimée à 108 millions de kilowattheures (kWh) C'est la consommation équivalent à 30'000 ménages suisses ou 0,2% de la consommation d'électricité totale de notre pays.

### 2. En Europe :

Fin 2015, la production continentale de l'énergie éolienne, correspondait à environ 11,4% de la consommation d'électricité totale

- a) En France : On recense 10'400 MW,
- b) En Allemagne : 45'000 MW
- c) En Italie : 9'000 MW
- d) En Autriche : On comptait 1119 éoliennes, soit 2'400 Mégawatts de puissance installée. Ces installations ont permis de fournir 1.5 millions de ménages en électricité propre.

### 3. Dans le monde

En 2015, l'énergie éolienne a couvert ~3% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 432'000 MW installés

#### 4. Leaders mondiaux

Au Danemark Cette part dépasse 40 %, en Espagne et au Portugal c'est plus de 20%.

La chine est une de six pays qui dominent le marché mondial de l'éolien tel que l'USA, l'Allemagne, l'Inde, l'Espagne et l'Angleterre et l'Asie semble être la plus porteuse.

. La part d'éolien dans le mix électrique est très élevée dans certains %.

- **Quelques chiffres**

- 7% de la consommation ou 4000 millions de kWh par an en 2050, tel est l'objectif pour l'éolien de la stratégie énergétique 2050 de la confédération. L'objectif intermédiaire est de 600 millions de kWh en 2020.

- une éolienne produit 40 à 85 fois plus d'énergie qu'il n'en a fallu pour la transporter, la construire, l'exploiter durant 25 ans et la démanteler.

- Une éolienne standard (2 à 3 MW) alimente 1000 à 1700 ménages suisses en électricité.

- 46% de la production électrique totale journalière a été couverte par l'éolien le 16 mars 2014, soient 543 millions de kWh. C'est le record atteint par les éoliennes des Allemands [10].

### **I.6.3 Répartition continentale**

En termes de répartition continentale, la plus forte progression de l'industrie éolienne se situe en Asie, et le centre de gravité de l'éolien mondial s'est encore éloigné de l'Europe et de l'Amérique du Nord [11].

L'Asie représente la plus forte part des nouvelles installations (54.6%), suivie de l'Europe (27.0%) et de l'Amérique du Nord (16.7%), L'Amérique Latine (1.2%), et l'Afrique (0.4%) n'occupent toujours qu'un rôle marginal pour les nouvelles installations [11].

### **I.6.4 Le développement de l'énergie au cours des dernières années**

La Figure qui suit montre le développement de l'énergie éolienne au cours des 15 dernières années (2000-2015)

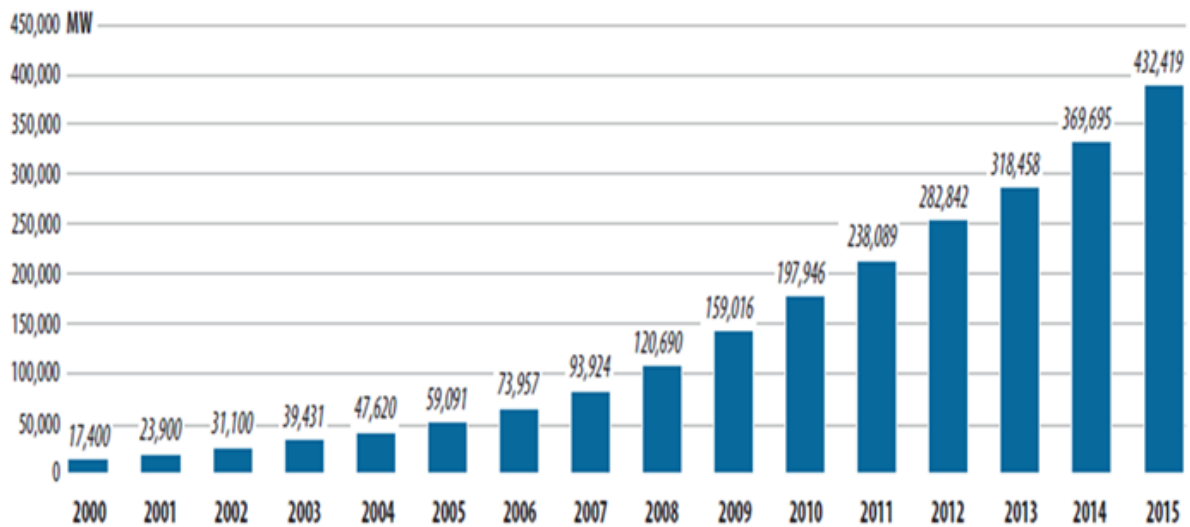


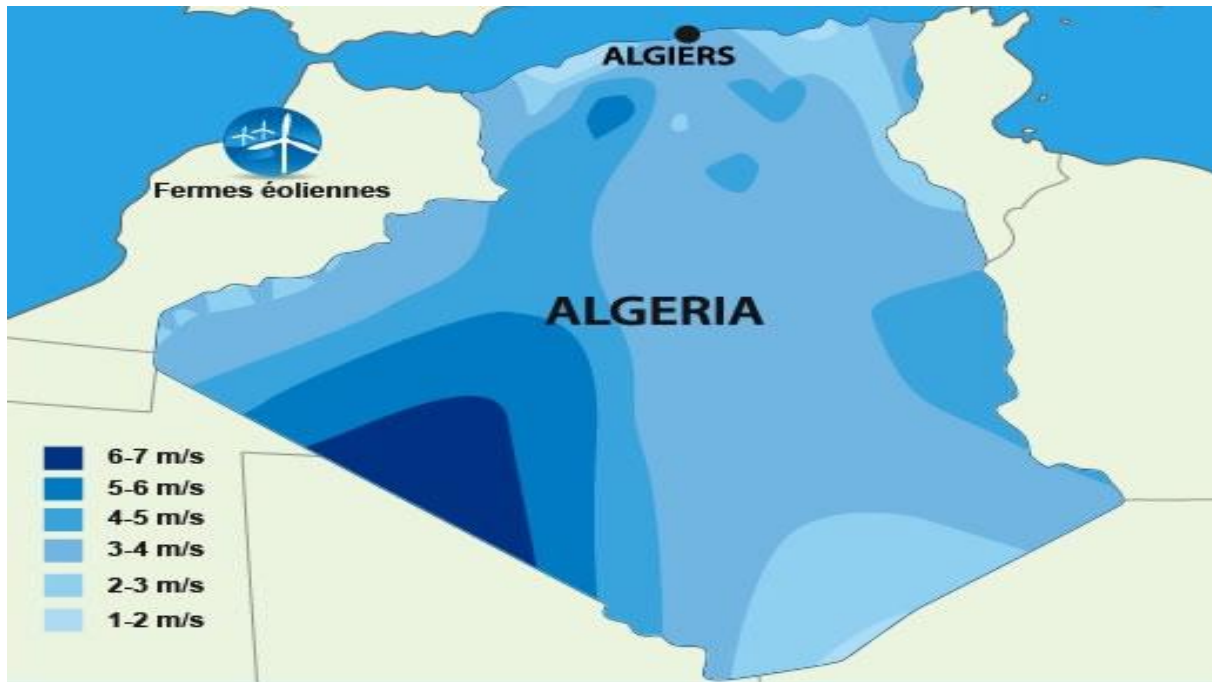
Figure.I.2 Le développement de l'énergie (2000\_2015) [12]

### I.6.5 Futurs challenges et perspectives mondiales

La capacité éolienne installée dans le monde est de 318 GW fin 2013, et devrait augmenter de plus de 400% et atteindre 1.107 GW en 2030. La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 [24].

### I.7 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar.



**Figure.I.3 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie [13]**

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes [14] :

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens.

### **I.7.1 Ferme éolienne d'Adrar**

Octobre 2011 que la ferme éolienne d'Adrar, qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024, a été mise en service par le ministre de l'Énergie, Youcef Yousfi.

Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune (pour une capacité globale de de 10 mégawatts), la ferme éolienne d'Adrar, implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya, a nécessité près de 32 mois travaux. Entamés en octobre 2011, les travaux de réalisation de la ferme éolienne d'Adrar confiés à la société française CEGELEC en partenariat avec un groupement composé de sociétés filiales de Sonelgaz, ETTERKIB et INERGA, en

l'occurrence pour un coût global de 2,8 milliards de dinars devaient être achevés au deuxième trimestre de l'année 2013.

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien.

En matière d'énergie renouvelables, le plan du gouvernement accuse un énorme retard. Le plan lancé en 2011 devrait être réalisé en trois phases. La première (2011-2013), consacrée aux études et au lancement de projets pilotes ; la seconde (2014-2015), à la réalisation des premières installations, et la troisième (2016-2020), au lancement de l'industrie à grande échelle.[15]



**Figure.I.4 centrale d'énergie éolienne d'Adrar**

### **I.8 Différents types d'éoliennes**

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [20].



a) Éoliennes à axe horizontal

b) Éoliennes à axe vertical

Figure.I.5 Technologies des éoliennes [6]

### I.8.1 Éolienne à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [20].

De nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [13] [20].

#### ➤ Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### ➤ Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.



- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

### **I.8.2 Eoliennes à axe horizontal**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [19] [20].

#### ➤ **Avantages**

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

#### ➤ **Inconvénient**

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

## **I.9 Constitution d'une éolienne**

### **I.9.1 Principe**

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [19] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Du fait de la non-maîtrise de l'énergie primaire, qui, de plus, est intermittente, il est difficile d'obtenir une conversion et une transmission de l'énergie régulières, puisque a priori la seule possibilité de stockage est inertielle, au prix d'une accélération de la turbine. Dans ces systèmes, la régularité de la transmission de l'énergie est donc tributaire d'un moyen de stockage en sus de l'inertie naturelle de la turbine.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure.I.6 L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

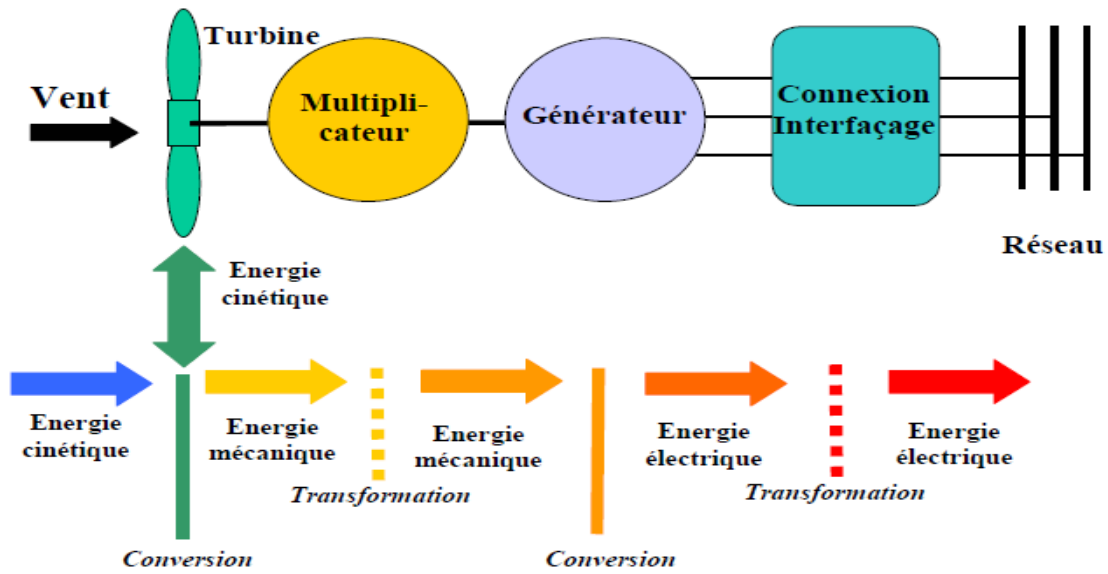


Figure.I.6 : Principe de la conversion d'énergie [20]

### I.9.2 Constitution

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présentés sur la Figure.I.7:

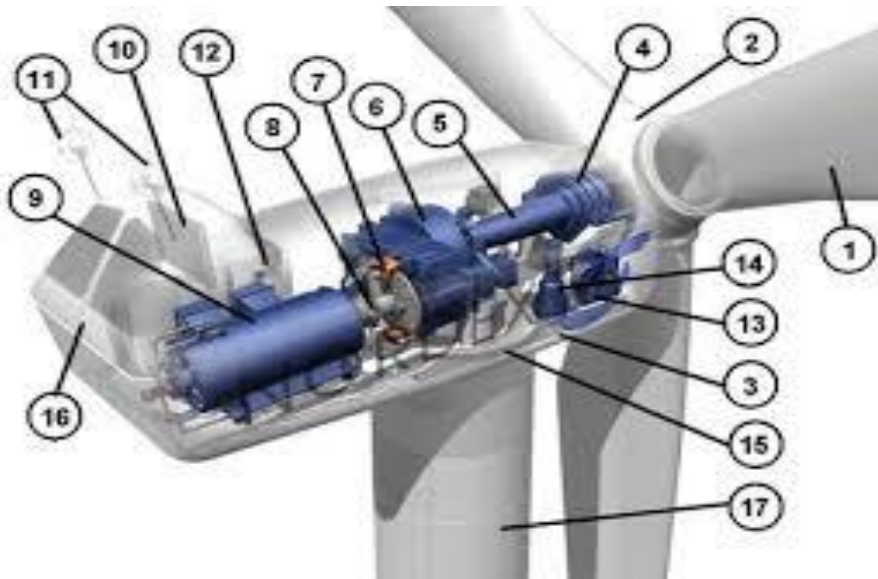


Figure.I.7 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW

- Les pales (1)
- Moyeu de la turbine (2)
- La nacelle (3)
- L'arbre lent (5)
- Frein mécanique à disque (7)
- Le multiplicateur de vitesse (6)
- Un accouplement flexible (8)

- Le générateur (9).
- Le système de refroidissement (10),
- Une girouette (11)
- Différents équipements électroniques de contrôle (12)
- Mécanismes d'orientation (13), (14), (15).
- Capot acier (16).
- La tour (17)

## I.10 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible.

Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant évacuation vers le réseau.

## I.11 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

### I.11.1 Bilan des forces sur une pale

La Figure.I.8 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $V$ . Le vecteur  $V_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $V_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $F_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $F_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $F_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

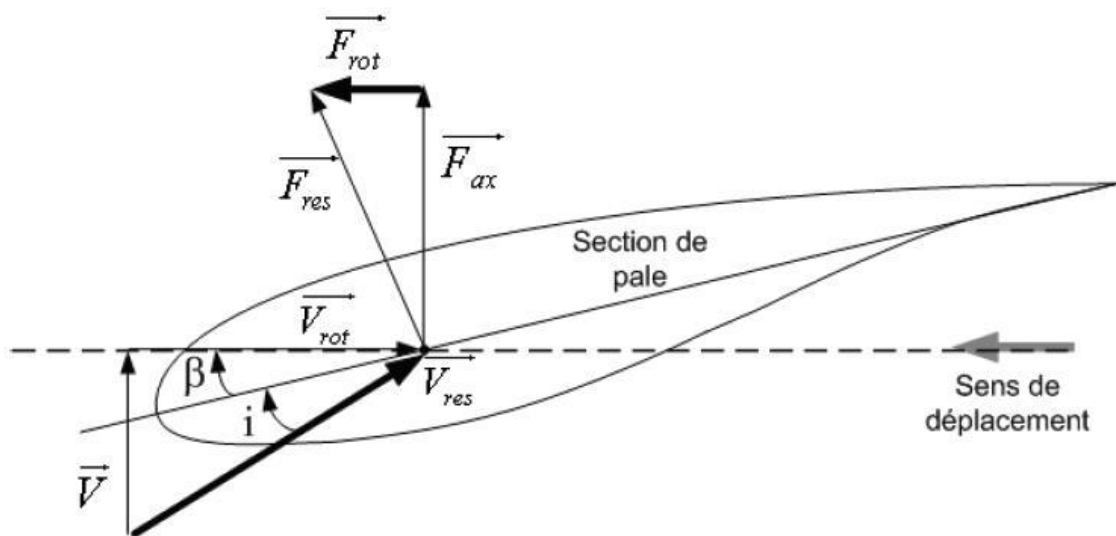


Figure.I.8 Bilan des forces sur une pale [21]

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

### I.11.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $V_n$ , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale  $\max V$  qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement, figure.I.9 [22]

- La zone I: le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- La zone II: la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- La zone III: la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$
- La zone IV: la vitesse du vent est trop importante. Pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta=90^\circ$ )

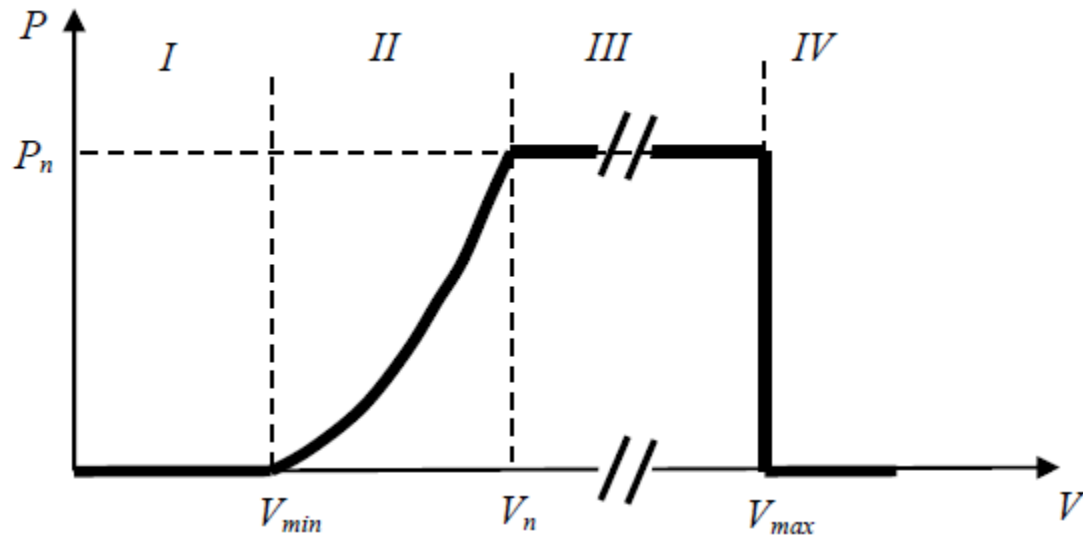


Figure.I.9 Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique

## I.12 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

### I.12.1 Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [25]. Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

### I.12.2 Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme,

par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

### **I.12.3 Systèmes Liés au Réseau**

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique

## **I.13 Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne**

### **I.13.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone**

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA...etc.) [26].

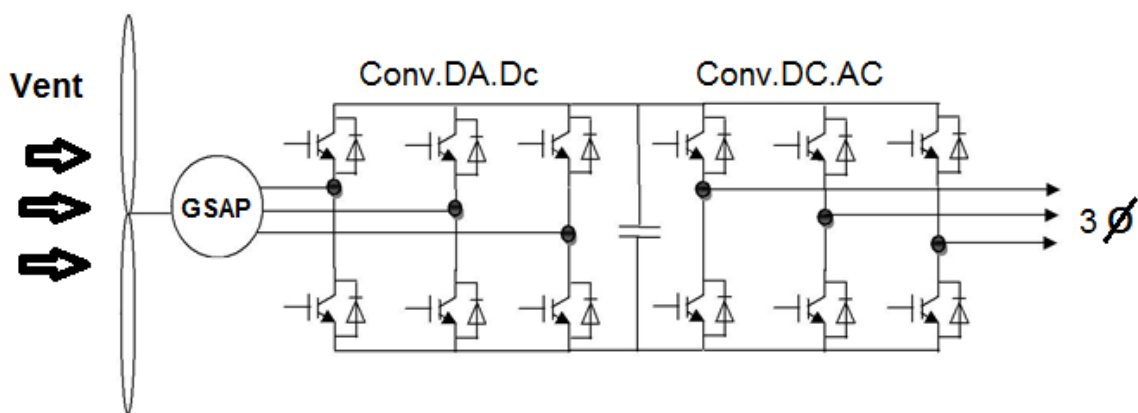
### **I.13.2 Systèmes utilisant la machine synchrone**

Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pôles est important [26].

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques.

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

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure.I.10) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.



**Figure.I.10 Machine synchronisée entraînée par une turbine éolienne et reliée au réseau par un dispositif redresseur MLI – onduleur MLI**

Dans le cas de la machine à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on le remplace souvent par des aimants permanents. 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 couple électromagnétique 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 la durée de vie de la connexion d'une machine synchronisée au réseau [26].

La liaison avec le réseau se fait via un convertisseur connecté au stator de la machine. C'est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les variations importantes de la tension sur les enroulements statoriques. Ce

redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes [27].

Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si elle possède un nombre suffisant de pôles, elle peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gearless). Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (MSAP) est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

Ces avantages sont la motivation principale du choix sur lequel se base ce travail, à savoir l'étude d'un système de génération d'énergie éolien utilisant une MSAP, d'une puissance de 600Watts.

Après la modélisation du système de production, l'étude portera sur l'optimisation de la puissance que peut fournir la turbine éolienne via une commande du coefficient de puissance qui caractérise cette dernière. Puis nous allons contrôler la puissance électrique produite de sorte à ce qu'elle soit optimale et constante d'une part puis variable tout en essayant de maintenir la puissance réactive égale à zéro mais capable de prendre une autre valeur en cas de besoin. Ces opérations de contrôle se feront grâce à des régulateurs de type PI puis IP afin de comparer les résultats obtenus. L'alimentation de la charge se fera via un onduleur à six bras commandables alimentés par la génératrice à travers un redresseur à MLI.

## **I.14 Conclusion :**

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles ; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Ce chapitre nous a permis d'étudier les solutions électrotechniques possibles pour la



production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits et les différents systèmes utilisés pour l'exploitation.

# **CHAPITRE II**

**Modélisation et simulation d'une  
génératrice à aimant permanent**

## **Chapitre II**

# **Modélisation et simulation d'une génératrice à aimant permanent**

### **II.1 Introduction**

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales.

Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone. Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique.

Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants.

### **II.2 Les aimants permanents**

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure.II.1) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [28,33]. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

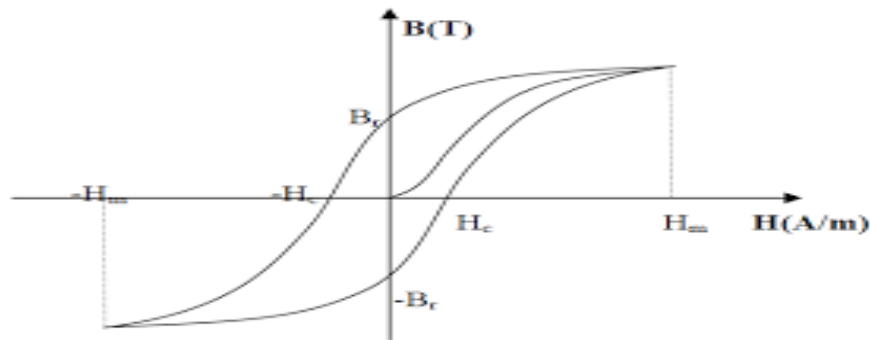


Figure.II.1 cycle d'hystérésis

### II.2.1 Caractéristiques générales des aimants permanents

L'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis (voir figure.II.2).

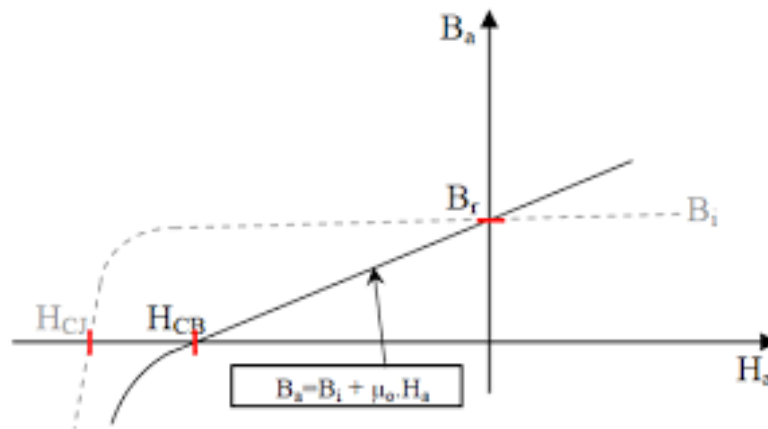


Figure.II.2 courbe de désaimantation

Les aimants permanents sont caractérisés par plusieurs paramètres qui sont déterminants pour les applications industrielles. Ces paramètres sont:

- L'induction résiduelle (ou rémanente),  $B_r$ , qui indique la puissance potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire au passage de flux utile pour le maintien du flux d'entrefer.
- le champ coercitif,  $H_{CB}$ , représentant le champ magnétisant capable d'annuler l'induction résiduelle et, dont la valeur est d'autant plus élevée que l'aimant est plus stable.
- le champ coercitif de polarisation,  $H_{CJ}$ , qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la démagnétisation est totale et irréversible.
- le produit d'énergie  $(B.H)_{max}$  : valeur énergétique de l'aimant par unité de volume. En plus des propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître les

propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix ainsi que le point de Curie (température au-delà de laquelle l'aimant perd ses propriétés magnétiques).

### II.2.2 Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [28,33]:

**Les Alnico:** aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt.

Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de part leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

**Les Ferrites:** aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie – prix.

**Les alliages métaux – terres rares:** ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium–cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau II.1 ci-dessous.

cType D'aimants	Densité d'énergie (BH) <sub>max</sub> (kJ/ m <sup>3</sup> )	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -H <sub>c</sub> (kA/m)	Température T <sub>max</sub> (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co <sub>5</sub>	140-200	1	2000	280	220
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

**Tableau.II.1 Exemples de propriétés magnétiques des aimants [28,32].**

### II.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La famille de la machine synchrone à aimant permanent regroupe en fait plusieurs sous familles :

- les machines synchrones à rotor bobiné
- les machines synchrones à réluctance
- les machines synchrones à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie. En effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé), la machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport a la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.

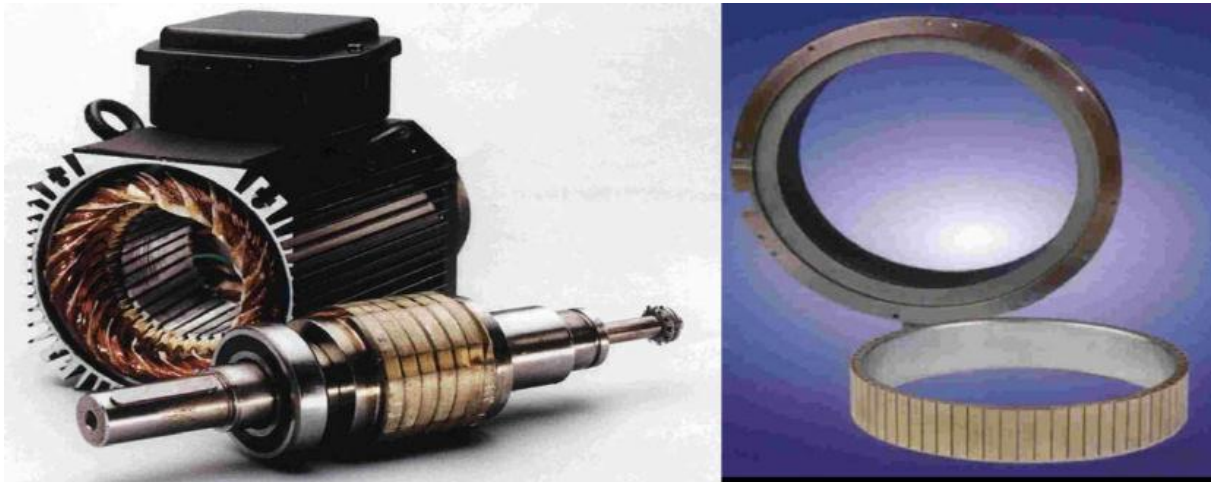


Figure.II.3 Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques [37]

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone. Il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $120^\circ$ .

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants.
- rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constant, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

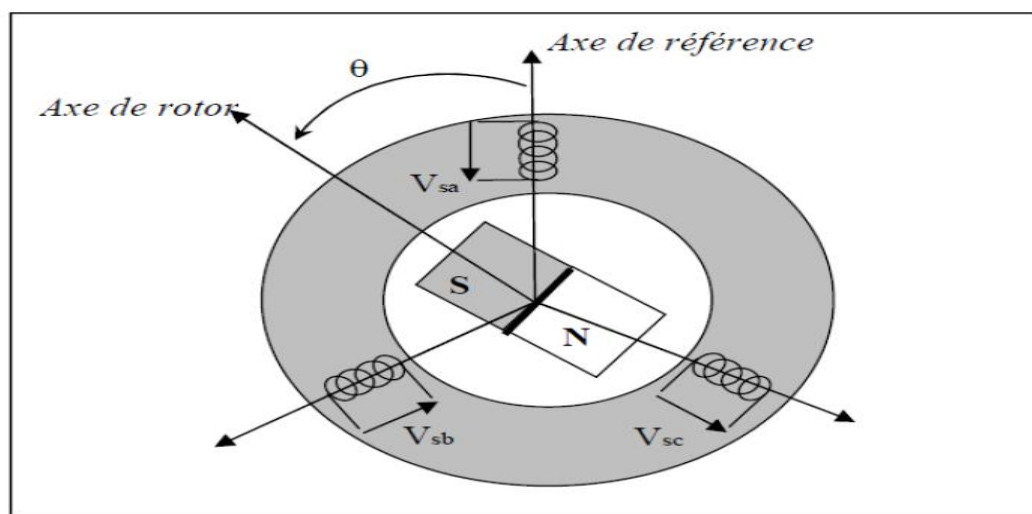


Figure.II.4 Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent

## II.4 Différentes structures de machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimants permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Celles-ci peuvent être alimentées, soit par des courants sinusoïdaux dans le cas des PMSM ou par des courants en créneaux dans le cas des BDCM. Une vue schématique des deux types de machines à aimants, à flux radial et à flux axial, est donnée par la figure II.5.

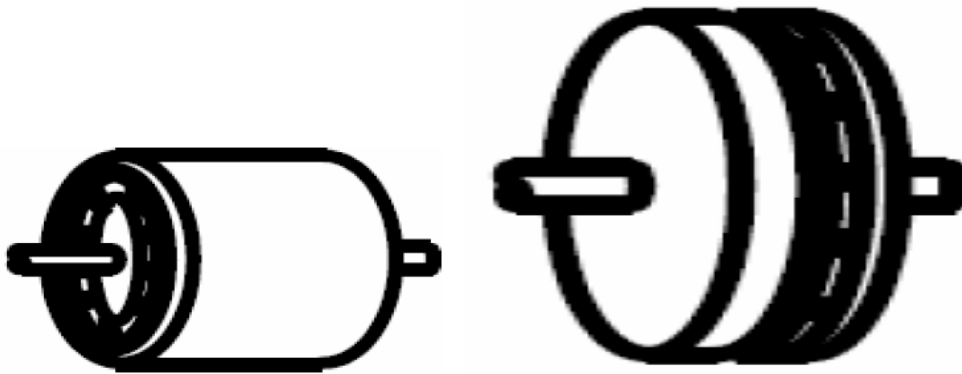


Figure.II.5 Vue schématique des machines : (a) à flux radial, (b) à flux axial

### II.4.1 Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure II.6). Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés.

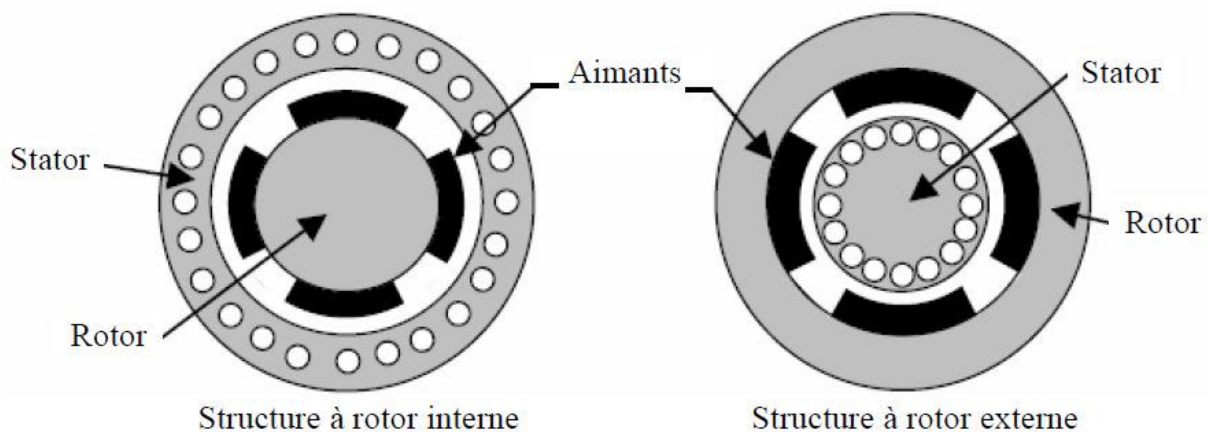


Figure.II.6 Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe[38].



## II.4.2 Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines dites « discoïdales » ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales [28, 29, 30]. Comparées à la structure à flux radial, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale. Différentes configurations à flux axial existent: celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure.II.7) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure.II.8) ou un seul rotor inséré entre deux stators (Figure.II.9). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [28,31].

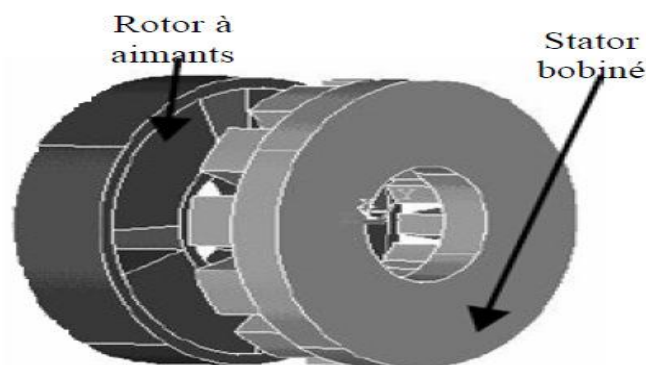


Figure.II.7 Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.

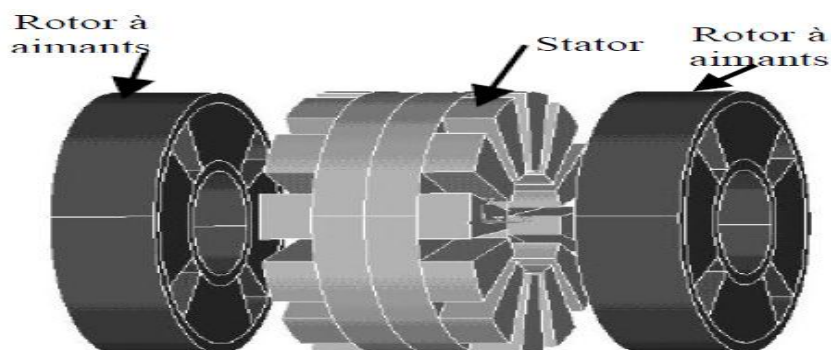


Figure.II.8 Structure à flux axial avec double rotor et un stator.

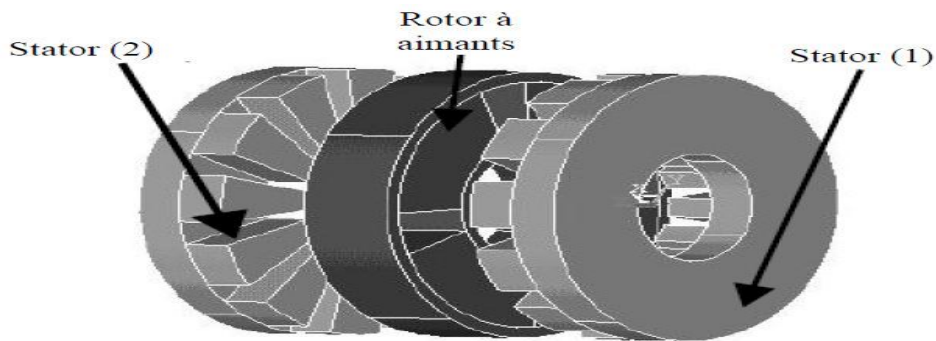


Figure.II.9 Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

## II.5 Avantages des machines synchrones à aimants permanents

Lors de la construction des machines synchrones à aimants permanents (MSAP), la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantages:

- Moins de pertes cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.
- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contact bague balais dans ces machines.

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants:

- Performance du moteur.
- Poids du moteur.
- Dimension du moteur.
- Rendement du moteur.
- Facteur économique.

## II.6 Inconvénients des machines synchrones à aimants permanents

- Le commutateur mécanique est remplacé par un autre électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu.
- Le prix des aimants le rend plus cher.
- La présence de pulsation de couple.
- Le risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation contrainte comme la température max, courant max...etc.

- Les pertes par courant de Foucault dans les aimants.

## II.7 Couple des machines synchrones à aimants permanents

On distingue trois types de couple:

- **Couple de détente**

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une réductance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente; pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches.

- **Couple réductance**

Appelé aussi couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements statorique en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés en surface, le flux d'induit rencontre la même réductance quelle que soit la position du rotor, il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réductance à prendre en compte.

- **Couple mutuelle**

Il est dû à l'interaction des deux champs statorique et rotorique.

## II.8 Modélisation de la GSAP

### II.8.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de faciliter l'étude, la modélisation de la machine nécessite les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'effet de la saturation du circuit ferromagnétique est négligeable
- Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont négligées.
- La distribution de la force magnétomotrice du stator est supposée sinusoïdale.
- L'effet de peau et celui de la température sur les résistances sont négligés.

La machine synchrone à aimants permanents est représentée par la figure (fig. II. 10). Elle se compose de trois enroulements statoriques décalés entre eux de  $(2\pi/3)$ , et des aimants permanents qui créent l'excitation au rotor.

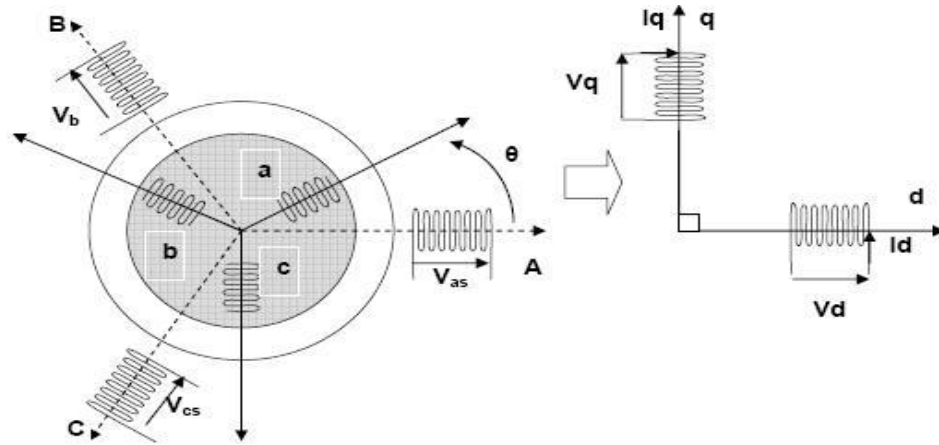


Fig.II.10 Machine équivalente au sens de Park.

### II.8.2 Les équations de tension et flux

En adoptant les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, les équations de la machine synchrone triphasée sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

La relation entre flux et courants sous forme réduite s'écrit :

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt} [\varphi_S] \quad (II.2)$$

Où :

$$R_S = R_a = R_b = R_c \quad (II.3)$$

S'écrit :

$$[\varphi_S] = [L_S] \cdot [I_S] + [\varphi_f] \quad (II.4)$$

### II.8.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = P ( C_m - C_{em} ) - F\omega \tag{II.5}$$

et 
$$\omega = P \cdot \Omega = \frac{d\theta}{dt} \tag{II.6}$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (couple moteur).

$C_m$  : Couple moteur appliqué sur la génératrice (couple résistant).

$F$  : Coefficient de frottement.

$J$  : Moment d'inertie.

$P$  : Nombre de paires de pôles.

On voit bien que les systèmes d'équations sont à coefficients variables en fonction de  $\theta$ . La résolution analytique dans ce repère reste très difficile.

### II.8.4 Transformation de PARK

Pour contourner cette difficulté, on introduit la transformation de PARK qui permet le passage d'une machine triphasée alimentée en alternatif et produisant un champ magnétique tournant à un modèle biphasé lié au rotor de grandeurs électriques continues permettant de produire le même champ (Fig. II -11) [42].

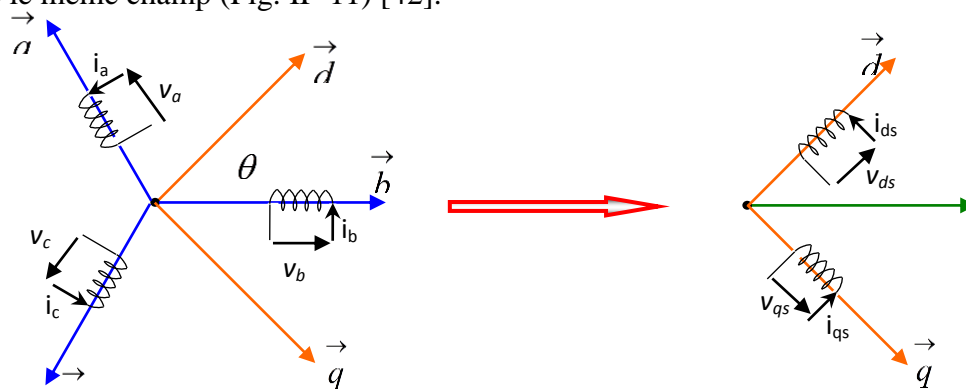


Fig. II.11 Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq).

On note que :

- d, q : Indices des composantes de Park directe et en quadrature.
- $P(\theta)$  : Matrice de passage de Park.

La matrice de passage notée  $P(\theta)$  est la suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

#### II.8.4.1 Passage triphasé au biphasé

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

#### II.8.4.2 Passage biphasé au triphasé

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La transformation inverse de PARK est la suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

## II.9 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

La transformation de PARK s'exprime par la relation suivante :

$$[X_{dqo}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II.11})$$

L'indice « O » désigne la composante homopolaire, direct et quadrature.

### II.9.1 Equations électriques

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle. Les équations électriques sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Où :  $L_d$  : Inductance suivant l'axe (d)

$L_q$  : Inductance suivant l'axe (q)

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans le repère de Park, on peut écrire l'équation (II -18) sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

### II.9.2 Calcul de puissance

La puissance instantanée  $P(t)$  qui s'écrit pour le stator dans le repère (d,q) :

$$P(t) = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (\text{II.14})$$

Par ailleurs, la puissance électrique absorbée s'exprime par

$$P(t) = R_s(I_d + I_q) + (I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt}) + (I_q \phi_d - I_d \phi_q) \omega \quad (\text{II.15})$$

- Le premier terme représente les pertes joules dans l'induit.
- Le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine.

### II.9.3 Couple électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique de la machine  $Cem$  est essentielle pour la commande de la machine. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$Cem = k P ( \phi_d I_q - \phi_q i_d ) \quad (II.16)$$

Où  $k$  prend les valeurs 1 ou 1,5, en fonction de la façon dont est réalisée la transformation de Park (pour notre cas,  $k=1.5$ ).

En utilisant la relation entre flux et courants :

$$\begin{cases} \phi_d = L_d \cdot I_d - \phi_f \\ \phi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (II.17)$$

Puis en remplaçant (II.17) dans (II.16), on trouve l'équation suivant:

$$Cem = \frac{3}{2} P [ ( L_q - L_d ) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q ] \quad (II.18)$$

En combinant les expressions (II.13) et (II.18), nous obtenons le schéma bloc de la (Fig.II.12).



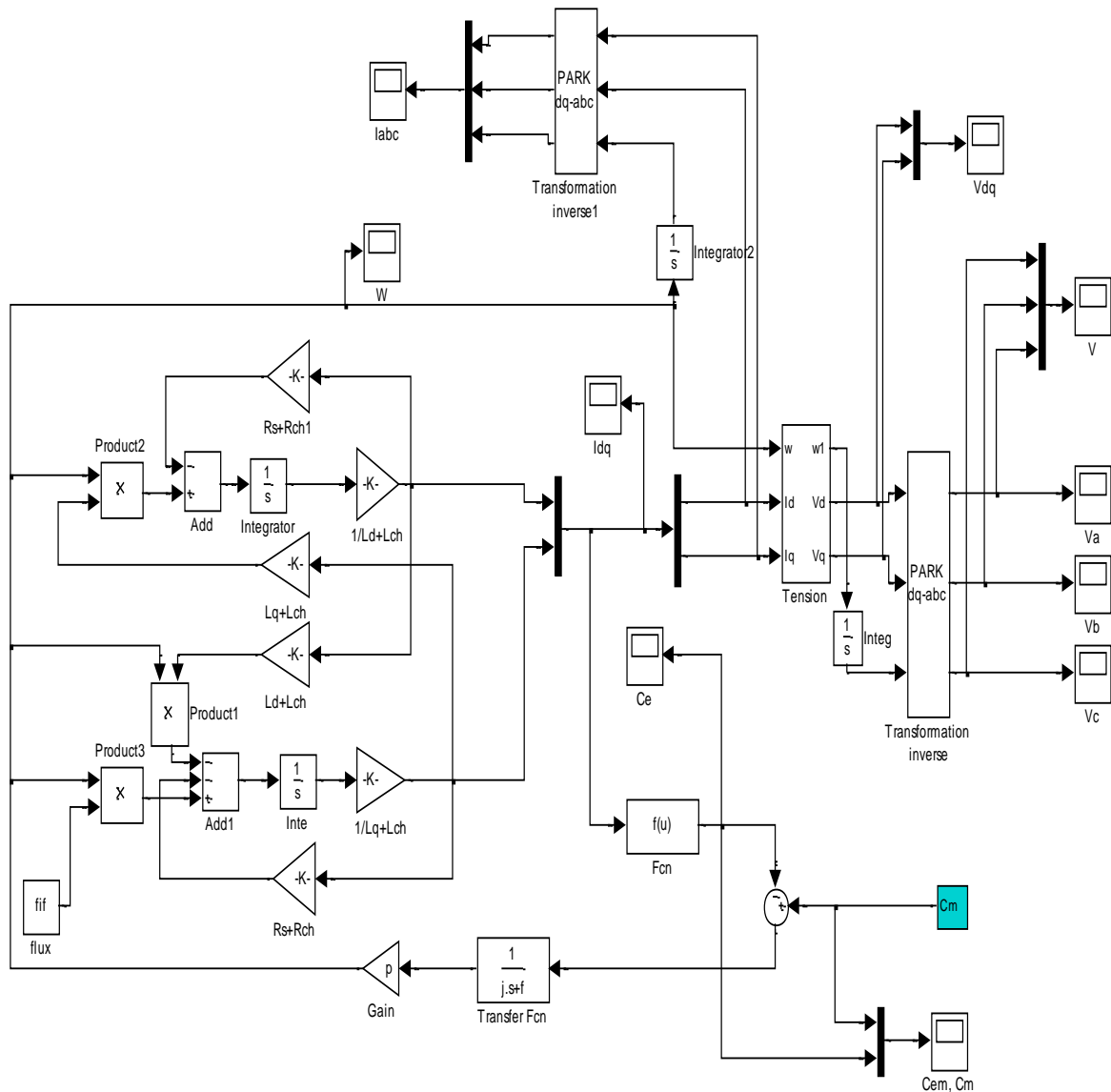


Fig.II.12 Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP)

## II.10 Simulation et interprétation

La figure (Fig.II.12) présente le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisé pour simulation en *MATLAB/SIMULINK*. Ce modèle sera exploité dans la commande de système éolienne étudiée. Les paramètres de la machine utilisée sont notés dans l'annexe.

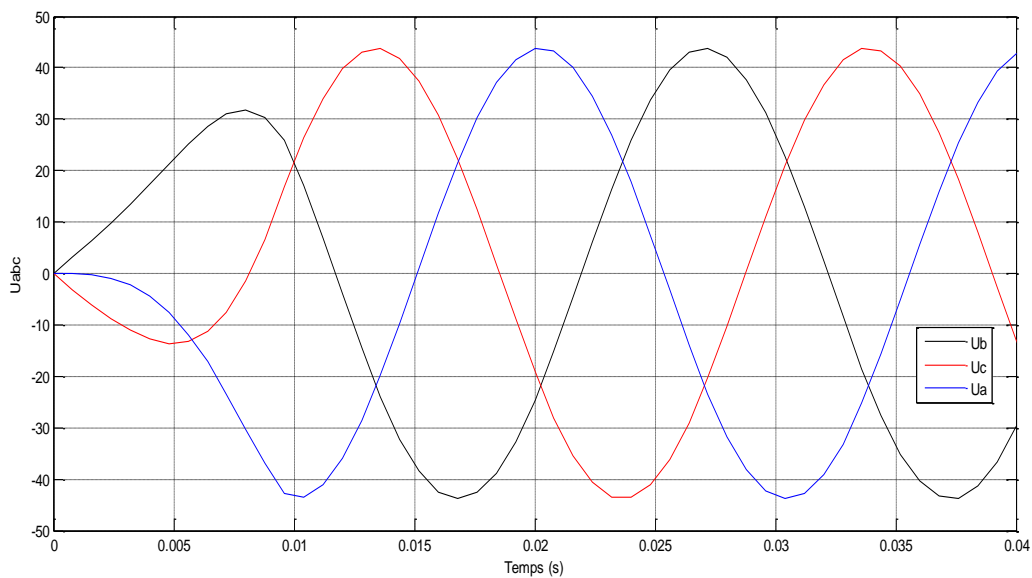
### II.10.1 Fonctionnement à vide

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls:

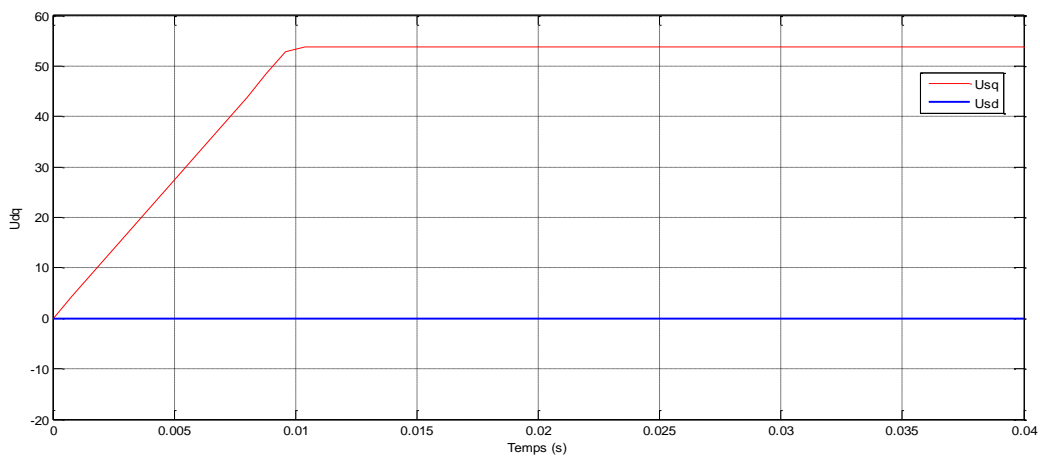
$$\begin{cases} I_{sd} &= 0 \\ I_{sq} &= 0 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Les expressions des tensions et celle du couple deviennent:

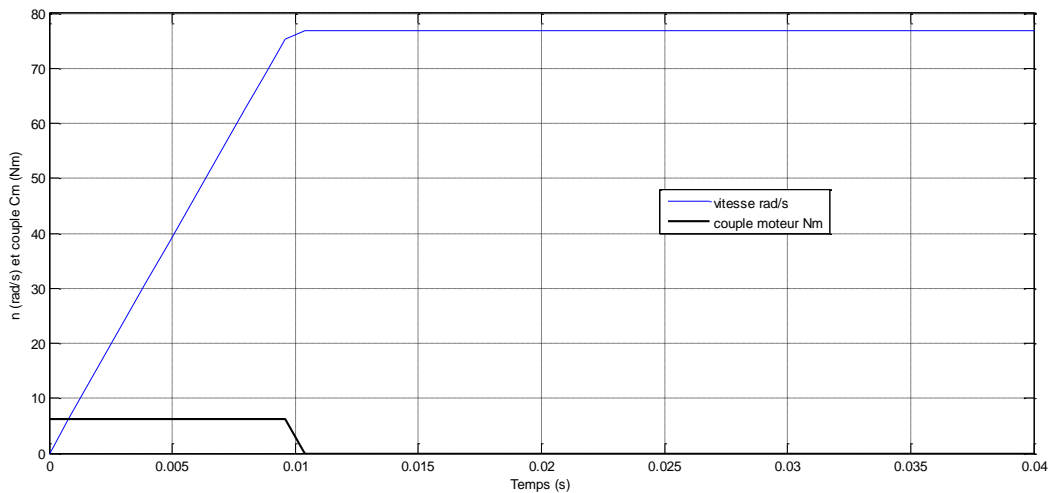
$$\begin{cases} V_{sd} &= 0 \\ V_{sq} &= \omega \cdot \phi_f \\ C_{em} &= 0 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$



(a) Tensions statoriques



(b) Composantes Usd, Usq



(c) Vitesse de rotation et couple moteur.

Fig.II.13 Simulation de la GSAP à vide

- *Interprétation des résultats*

On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 6.28 Nm. Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la figure (II.113c) qu'à la vitesse de 78.5 rad/s, les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une valeur crête de 55V et une fréquence de 50Hz.

**II.10.2 Fonctionnement en charge (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>)**

La génératrice alimente une charge électrique (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par ( ) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \quad (II.21)$$

D'autre part, l'application des tensions V<sub>d</sub> et V<sub>q</sub> sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot I_d + L_{ch} \frac{d I_d}{dt} - L_{ch} \omega \cdot I_q \\ V_q = R_{ch} \cdot I_q + L_{ch} \frac{d I_q}{dt} + L_{ch} \omega \cdot I_d \end{cases} \quad (II.22)$$

En remplaçant les expressions de V<sub>d</sub> et V<sub>q</sub> dans (II.22), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{d I_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_d + \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_q \right] \\ \frac{d I_q}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[ - (R_s + R_{ch}) \cdot I_q - \omega (L_q + L_{ch}) \cdot I_d + \omega \phi_f \right] \end{cases} \quad (II.23)$$

On cherche à obtenir un système d'équation d'état :

$$\begin{aligned} [\dot{X}] &= [A][X] + [B][U] \\ [X] &= [I_d \ I_q]^t, [U] = [0 \ \phi_f]^t \end{aligned} \quad (II.24)$$

On peut écrire la matrice [A] comme suit :

$$\begin{aligned} [A] &= [A_1] + \omega[A_2] \\ [A] &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (II.25)$$

Et la matrice [B] sous la forme :

$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

A partir des expressions (II.24 a II.26) et en faisant appel à l'expression du mouvement, on peut construire le bloc de simulation de la génératrice (fig.II.14).

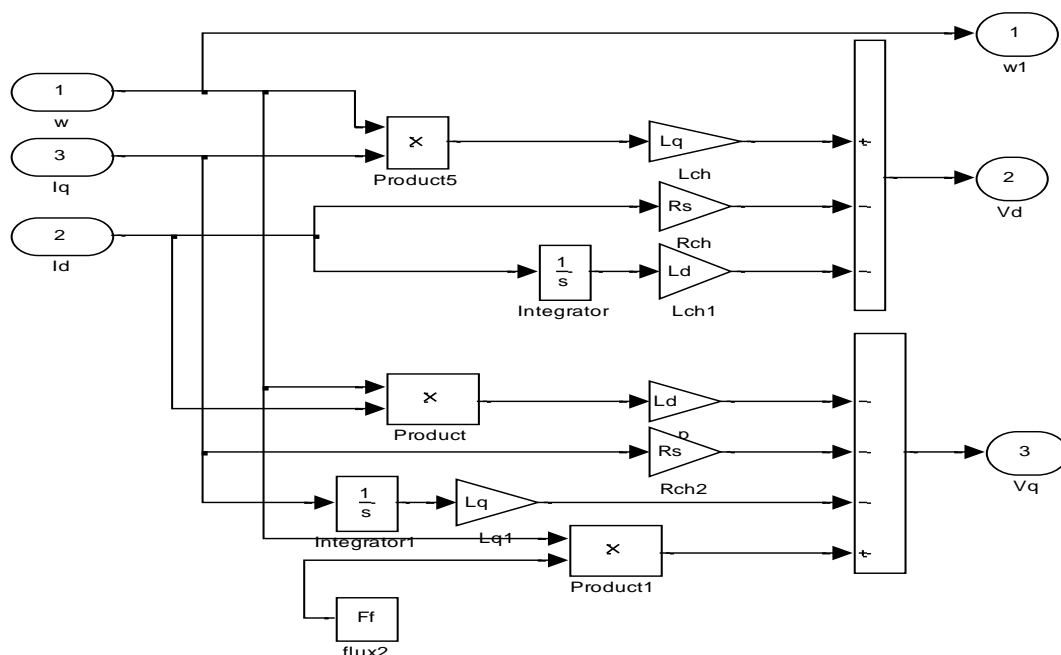
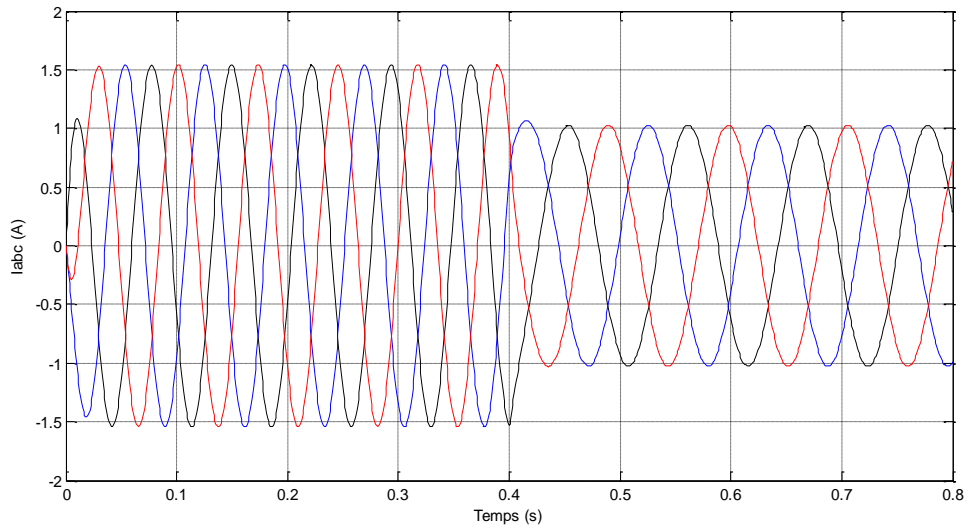
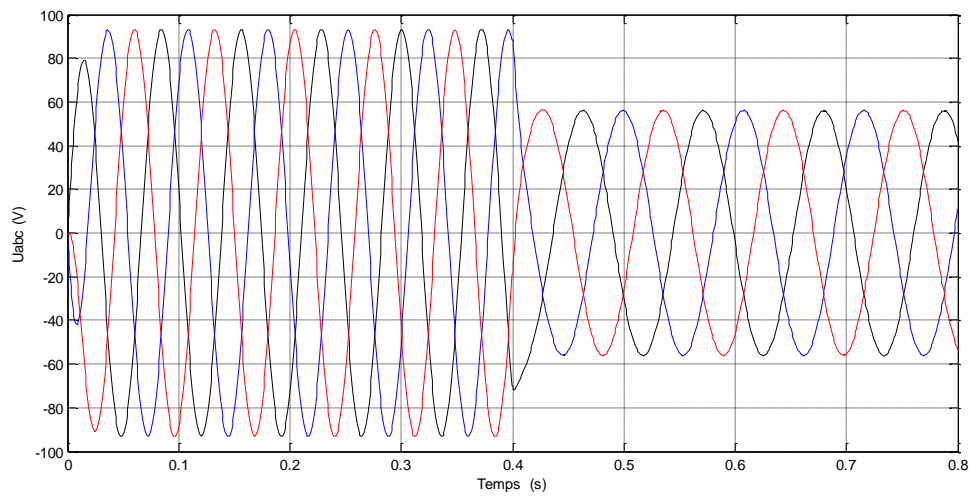


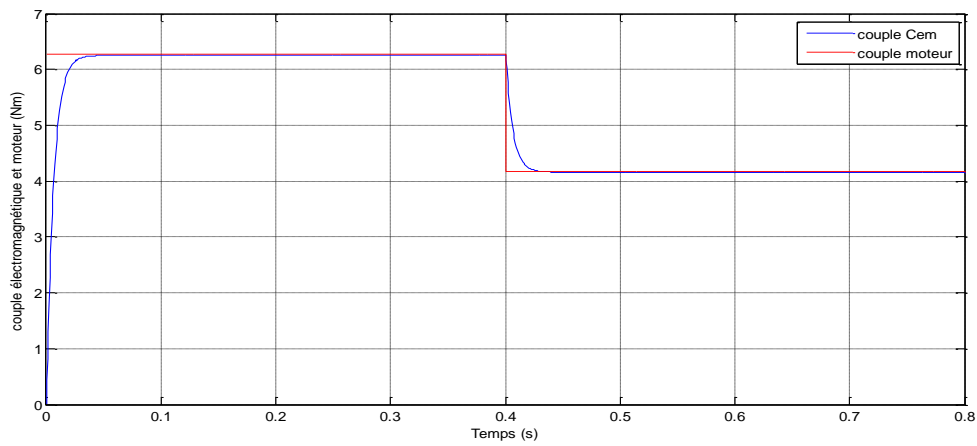
Fig.II.14 Bloc de la simulation de la GSAP en charge



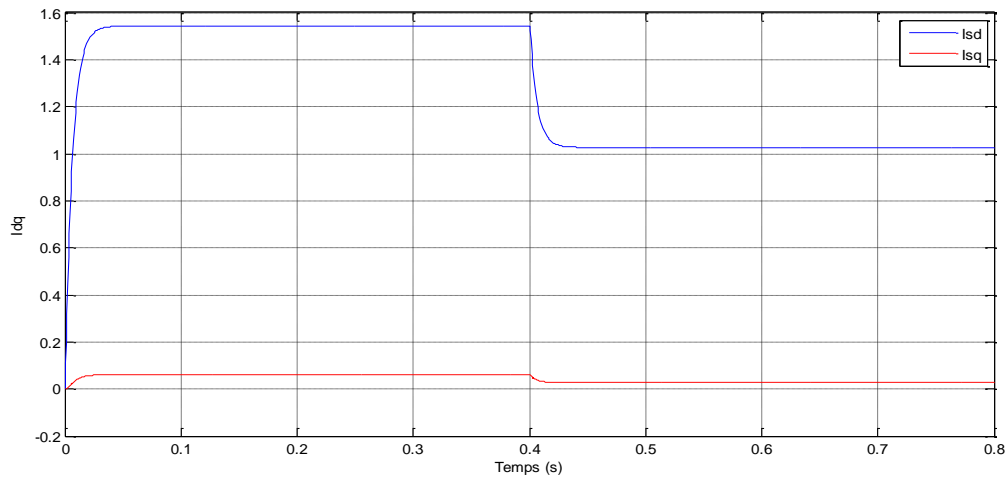
(a) Courants statoriques  $I_{abc}$



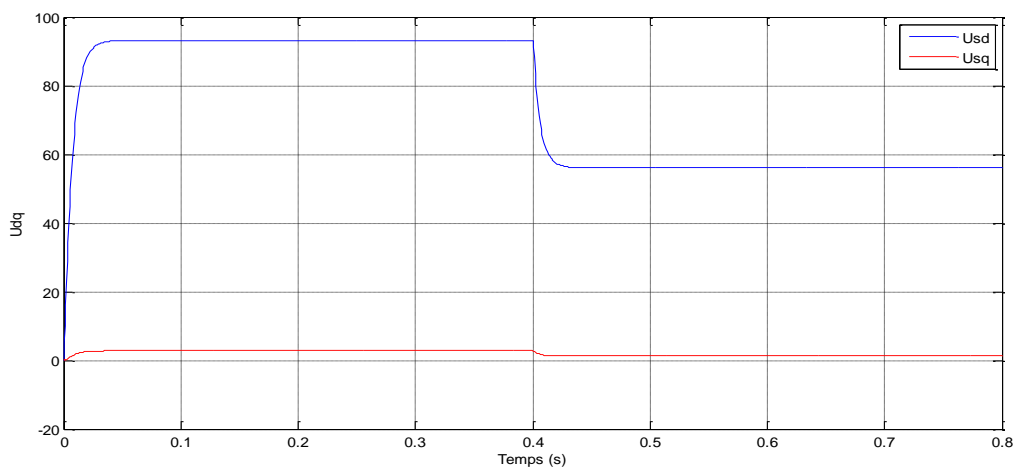
(b) Tensions statoriques  $U_{abc}$



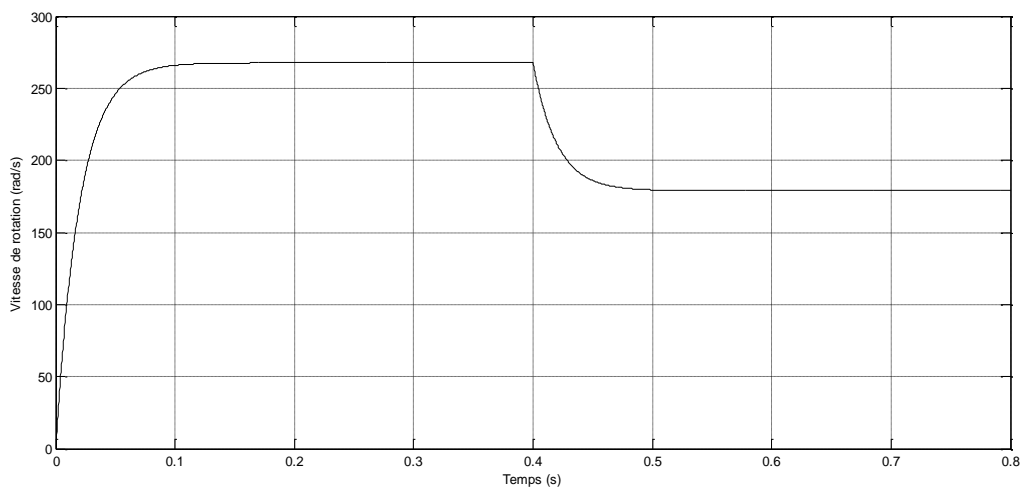
(c) Couples électromagnétique et moteur.



(d) Composants  $I_{sd}$ ;  $I_{sq}$ .



(e) Composants  $U_{sd}$ ;  $U_{sq}$ .



(f) Vitesse de rotation.

Fig.II.15 Simulation de la GSAP en charge.

### - *Interprétation des résultats*

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (fig.II.15). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figures (fig.II.15a) et (fig.II.15b). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.28Nm, à 4.2Nm, la vitesse mécanique varie de 267.60 rad/s jusqu'à 178.9 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17V à 51.6V et de 1.54A à 1.03A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

## **II.11 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes structures de la machine synchrone à aimants permanents. Le modèle triphasé est de nos jours rarement utilisé à cause de sa complexité et du fort couplage de ses équations. On y montre qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites au nombre de trois. Les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles. En fin, nous avons présenté la simulation de la génératrice GSAP à vide et en charge pour voir le fonctionnement et la robustes de la machine.

# **CHAPITRE III**

**Commande de la machine synchrone  
à aimant permanent associée avec le  
système éolien**



## Chapitre III

### Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien

#### III.1 Introduction

Poussé par de nouveaux impératifs environnementaux, le secteur de l'énergie éolienne a connu une forte croissance ces dernières années. Le développement et la recherche se font principalement du côté des éoliennes de grande dimension. Ces éoliennes sont regroupées en parcs éoliens, en mer ou sur la terre, et sont reliées aux réseaux de distribution d'électricité. Elles ont des pales mesurant plusieurs dizaines de mètres et une puissance de l'ordre du mégawatt. De l'autre côté du spectre, on retrouve des éoliennes de petite dimension, ayant des puissances allant de 100 watts à quelques dizaines de kilowatts, qui sont destinées à la production en réseau isolé. Elles sont principalement utilisées pour alimenter des installations trop éloignées du réseau de distribution d'électricité : des refuges, des chalets, des stations de télécommunication et des voiliers par exemple.

Voici le schéma de système éolien qui sera commandée :

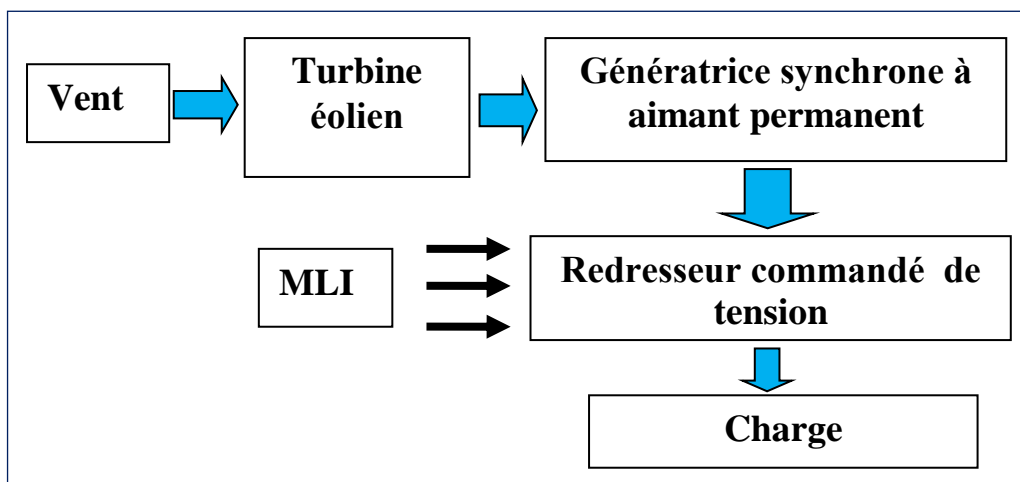


Figure.III.1 Structure du système éolien étudiée

## II.2 Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne

Dans cette partie, nous allons nous intéresser plus particulièrement à la modélisation des principales composantes d'une éolienne de petite taille adaptée à des régions sahariennes comme Adrar.

La chaîne de conversion éolienne est schématisée comme suit :

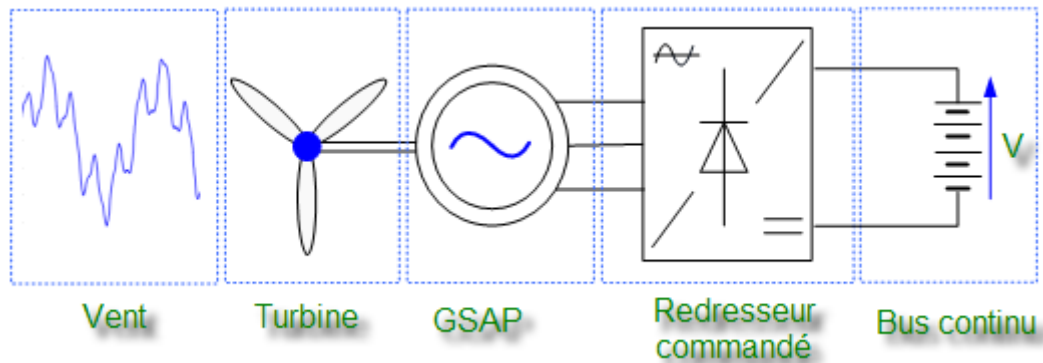


Figure.III.2 Structure de la chaîne éolienne.

Celle-ci est constituée d'une voilure couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes ; c'est la structure que nous retenons pour ce travail.

### III.2.1 Modélisation du vent

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Il est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité [40]. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent (cf. formule (III.2)). Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à la variation du vent en intensité, dans une seule direction afin de déterminer une séquence valable et représentative de vents réels [42], [41].

Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisé par une somme de plusieurs harmoniques [43] [44] [40]:

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (\text{III.1})$$

$a_k$  : amplitude des harmoniques

$\omega_k$  : fréquence des harmoniques

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) \\ + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{III.2})$$

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à [43, 44, 45,46].

### III.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (\text{III.3})$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m<sup>3</sup>. A est la surface balayée par la turbine en m<sup>2</sup>, V est la vitesse du vent en m/s. Cp (coefficient de puissance).

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical (voire Figure.III.3).

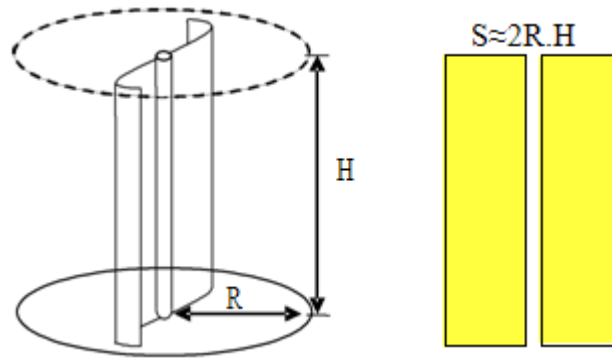


Figure.III.3 Voilure à axe vertical de type Savonius [46]

La surface "A " donnée par la formule suivant :

$$A = 2R.H \quad (\text{III.4})$$

où  $R$  représente le rayon de la voilure (m) et  $H$  sa hauteur (m).

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu:

$$P_m = C_p (\lambda). \rho. H. R. V^3 \quad (\text{III.5})$$

où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique  $\lambda$ ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit définie par :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \quad (\text{III.6})$$

où  $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relèves réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine [43, 45, 46], par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :

$$C_p(\lambda) = -0.12992 \lambda^3 - 0.11681\lambda^2 + 0.45406 \lambda \quad (\text{III.7})$$

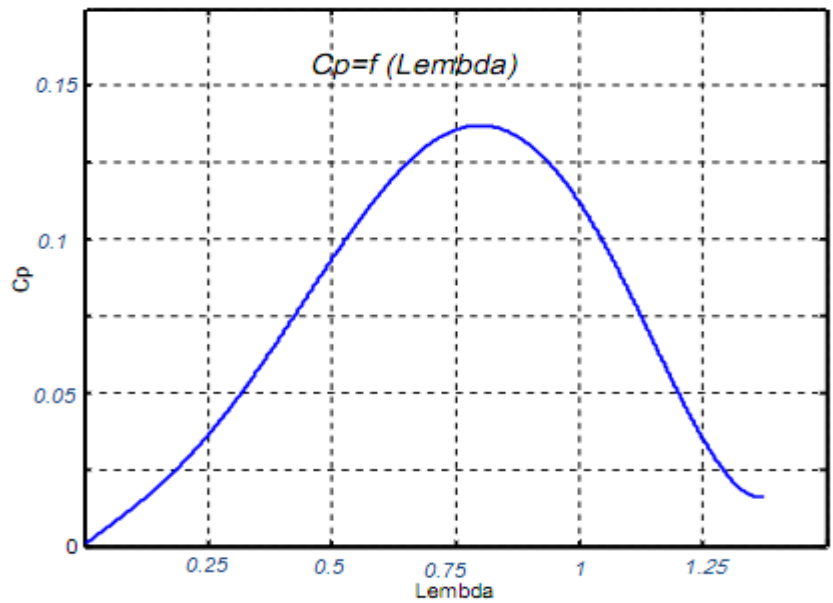


Figure.III.4 Courbe caractéristique retenue pour les essais.

La figure (Figure.III.4) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ . Il présente un facteur de puissance maximal  $Cp_{max} = 0.13$  pour  $\lambda_{max} = 0.85$ .

Le couple éolien noté :  $C_e$  est obtenu à partir de l'équation (III.5) et en utilisant l'expression (III.6) de la vitesse réduite :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{Cp(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V^2}{\lambda} \tag{III.8}$$

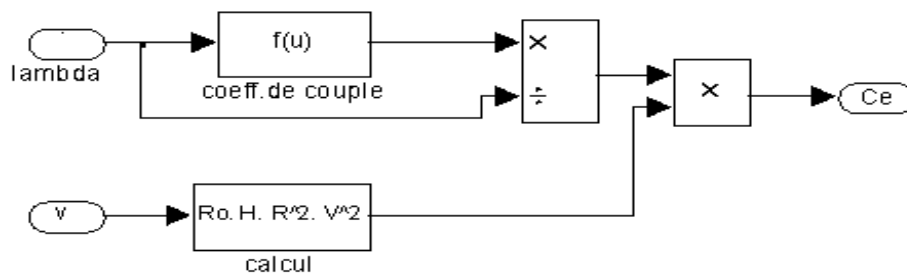
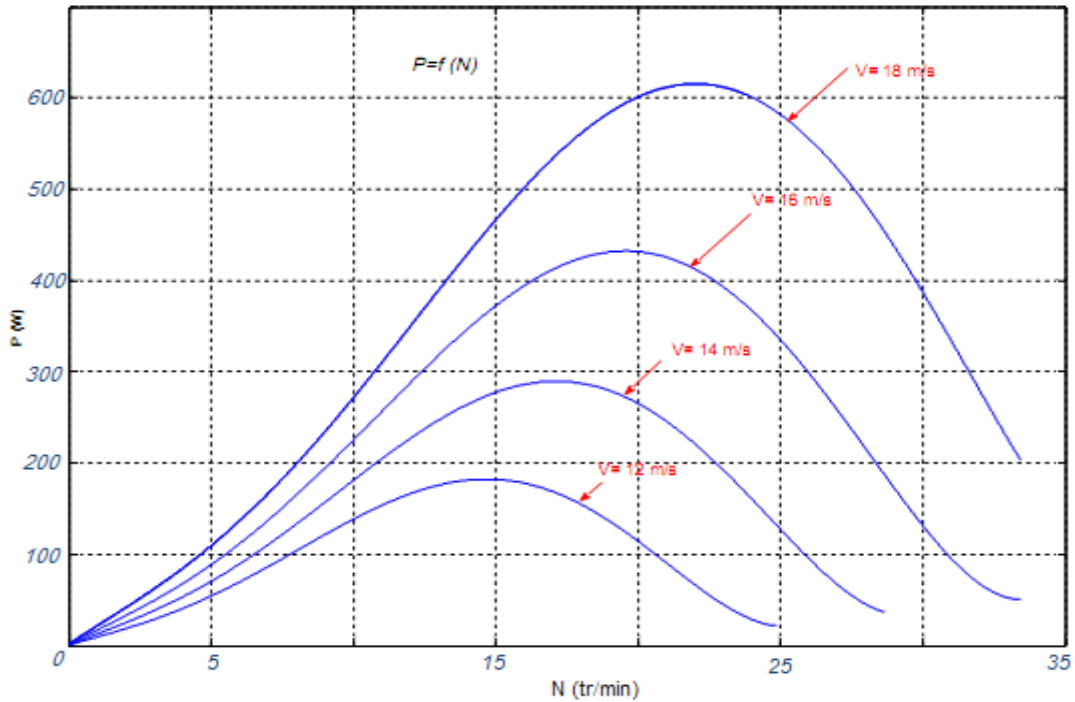


Figure.III.5 Modèle du couple éolien sous Simulink.

La figure (Figure.II.6) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolienne de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.



**Figure.III.6 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation**

On remarque à la figure (Figure.III.6) que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la vitesse angulaire mécanique est semblable à celle du  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ . On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande car la puissance est exprimée par la vitesse au cube du vent.

### III.2.3 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice

Le comportement dynamique (mécanique) de l'ensemble turbine et génératrice peut être représenté par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{em} - C_f \quad (\text{III.9})$$

où  $\Omega$  la vitesse sur l'arbre du générateur,  $C_f$  le couple de frottement,  $C_{em}$  le couple électromagnétique développé par le générateur,  $C_e$  le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur et  $J$  est le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J = J_{gen} + \frac{J_t}{i^2} \tag{III.10}$$

On note que :

$$C_f = f_m \cdot \Omega \tag{III.11}$$

où  $f_m$  est le coefficient de frottement visqueux en N.m.

Le couple éolien fourni par la turbine, permet d'entraîner la génératrice. En tenant compte des chutes de couple causées par le frottement et l'inertie de la turbine, nous pouvons établir le modèle électromécanique de la figure (Figure.II.7).

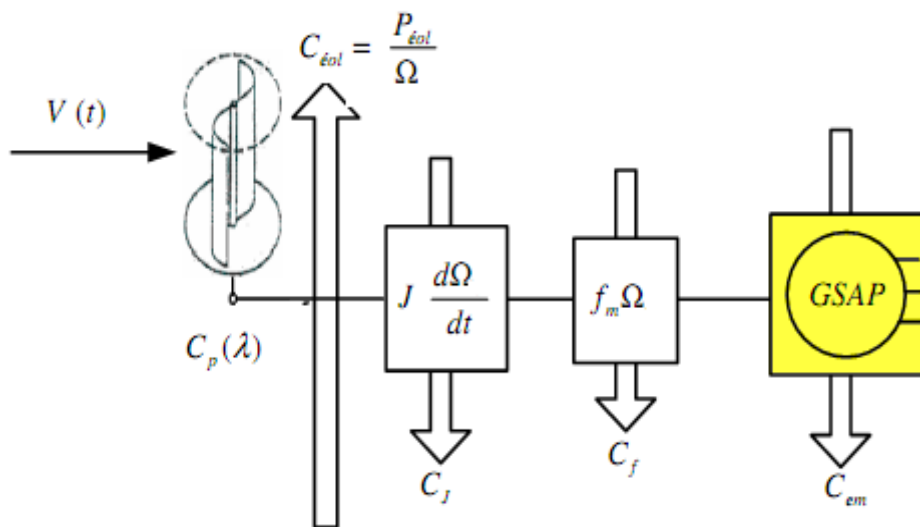


Figure.III.7 Modèle du couple de la turbine éolienne

On peut aussi, modéliser la turbine par le schéma bloc suivant:

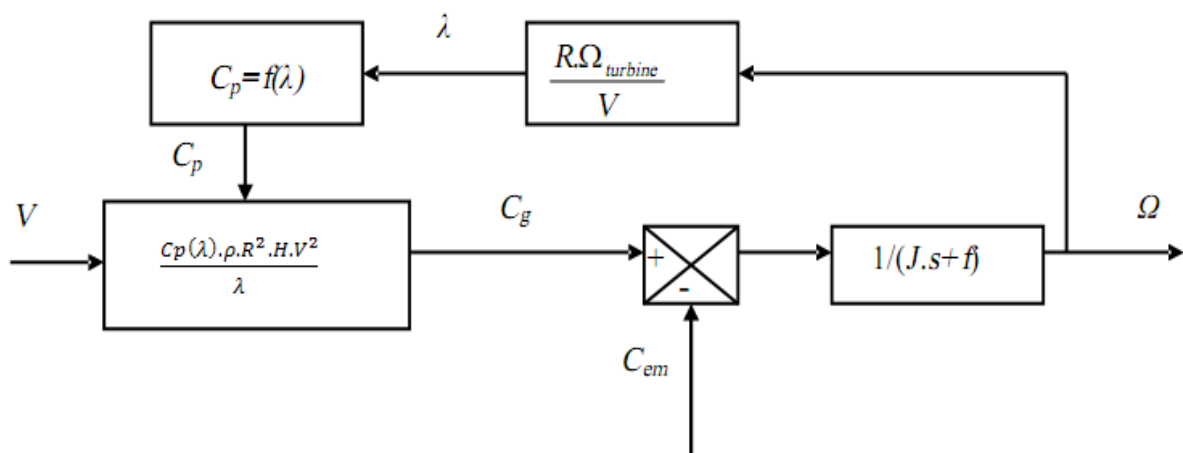


Figure.III.8 Schéma bloc de la turbine éolienne.

### III.2.4 Modèle de la GSAP

D'après le chapitre II, la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) est classiquement modélisée dans le repère de Park, donnant lieu à l'équation suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot I_d - L_d \frac{d I_d}{dt} + L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = -R_s \cdot I_q - L_q \frac{d I_q}{dt} - L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - F\Omega \\ C_{em} = \frac{3}{2} P [ ( L_q - L_d ) I_d \cdot I_q + \phi_f \cdot I_q ] \end{cases} \quad (III.12)$$

où :  $\theta$  est l'angle entre un axe de référence du stator et un axe du pôle nord du rotor,  $p$  - le nombre de paires de pôles,  $R_s$  la résistance d'une phase statorique,  $V_d$ ,  $V_q$  et  $I_d$ ,  $I_q$  sont les composantes sur les axes  $d$  et  $q$  de la tension, respectivement du courant statorique.

Aussi,  $\phi_f$  est le flux d'excitation produit par les aimants permanents,  $L_d$  et  $L_q$  sont les inductances équivalents sur les axes  $d$ , respectivement  $q$  (les inductances synchrones direct et quadratique).  $C_{em}$  est le couple électromagnétique,  $C_m$  est le couple moteur appliqué sur la génératrice avec  $F$  le coefficient de frottement,  $J$  : Moment d'inertie et  $p$  le nombre de paires de pôles.

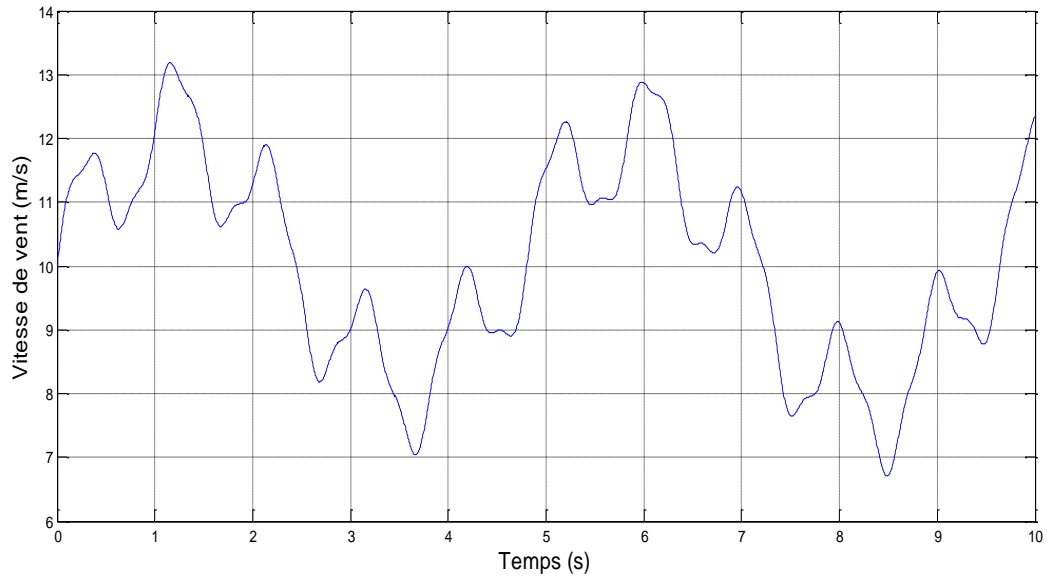
### III.2.5 Simulation

Le vent sera modélisé sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

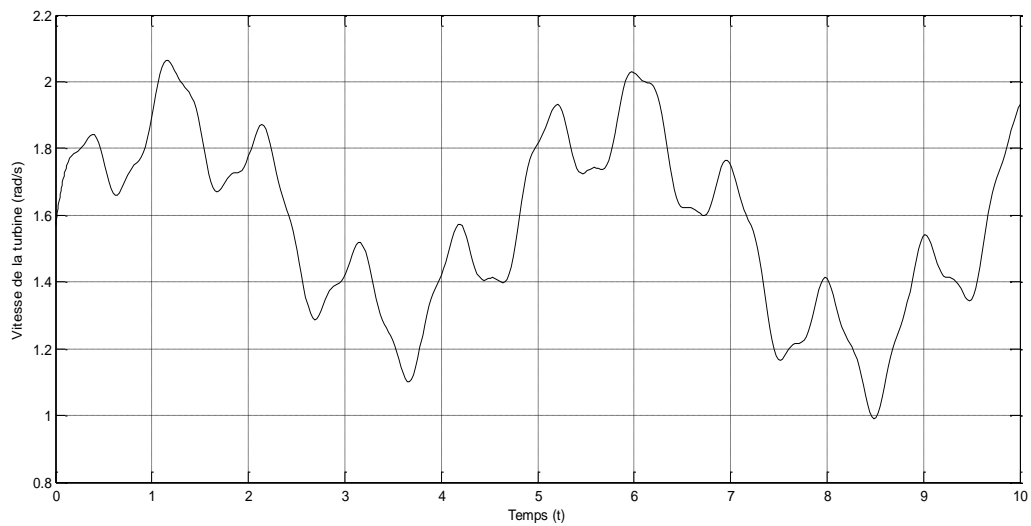
$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (III.13)$$

Les résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents associé à la turbine éolienne et avec la vitesse du vent simulée par l'équation (III.13) sont donnés par les figures qui suivent :

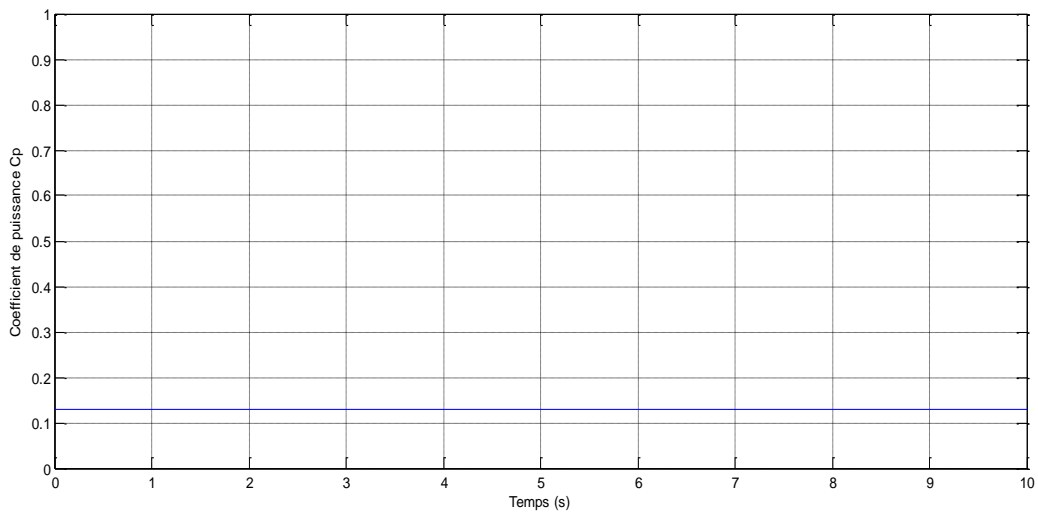




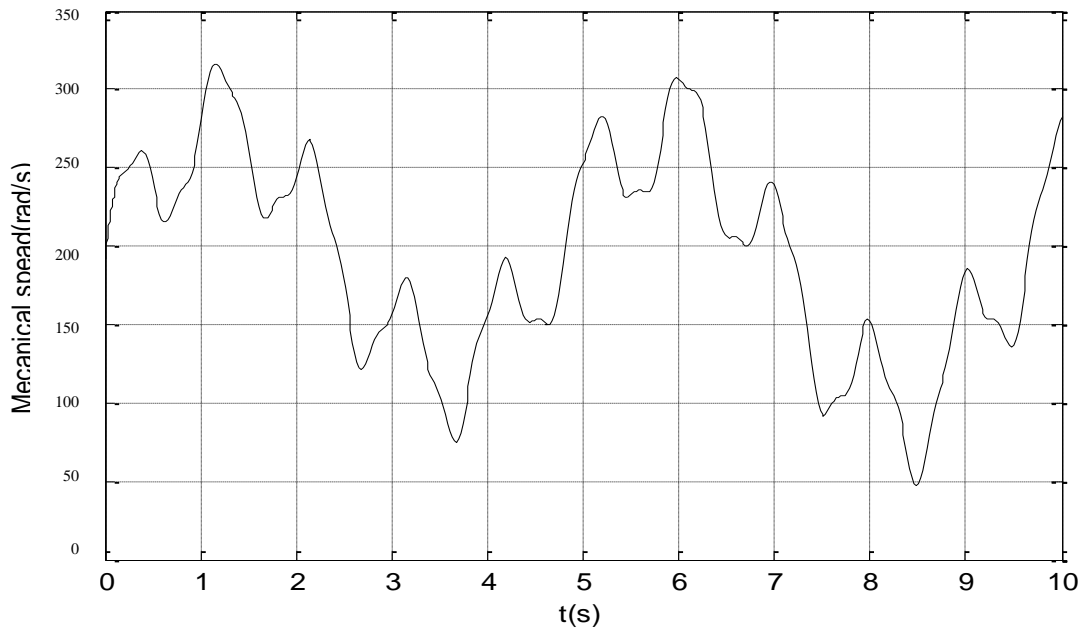
(a) La vitesse du vent en fonction de temps.



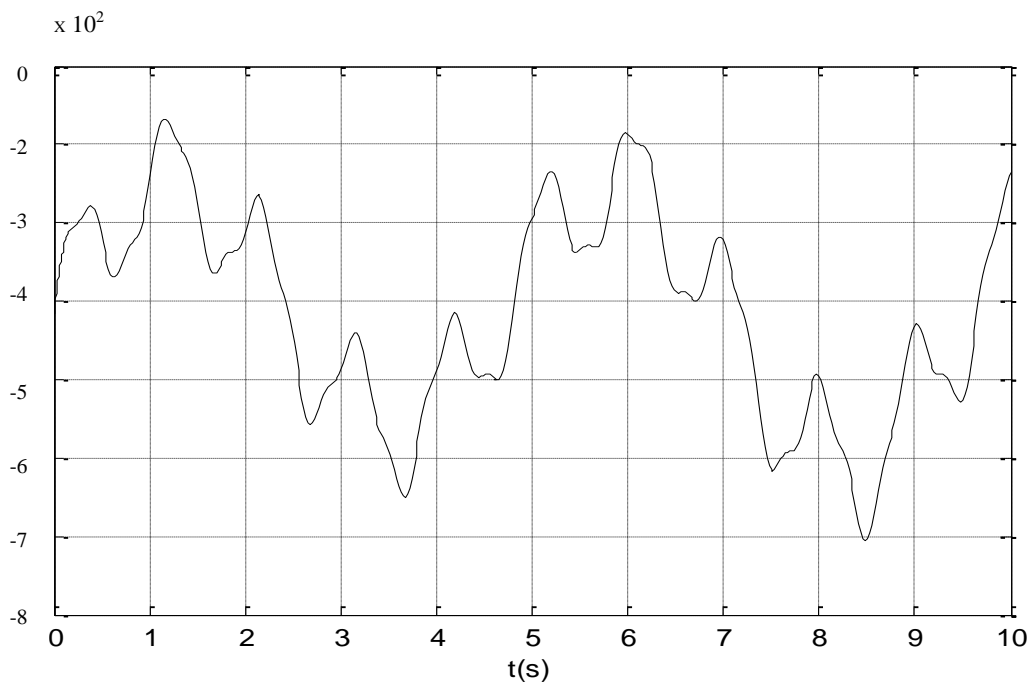
(b) La vitesse de la turbine en fonction de temps.



(c) Coefficient de puissance.



(d) La vitesse électrique de la GSAP en fonction de temps.



(e) La puissance active.

Figure.III.9 les résultats de la simulation de système éolien.

Nous remarquons que les résultats prennent la forme du vent, le coefficient de puissance est de 0,13 (c'est la valeur maximal pour avoir un maximum de puissance extraite du vent). La puissance active est de l'ordre de 400W. Mais notre système présent des

fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent pour cela le système nécessite une commande pour maintenir cette puissance à sa valeur nominale.

### III.3. Commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien

Après la modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne, cette deuxième partie sera consacré à la commande de système éolienne.

Aussi, nous allons présenter la structure globale de la chaîne de conversion éolienne (Figure.III-10) à base de la machine synchrone à aimants permanents avec une commande et modélisation détaillée des différents éléments.

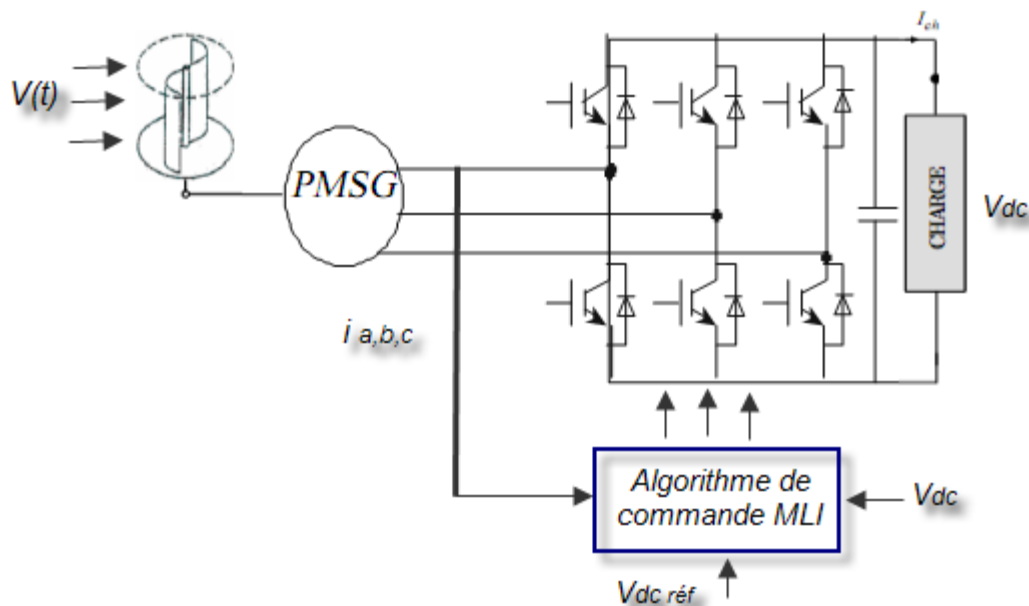


Figure.III.10 La chaîne de conversion éolienne à base de GSAP.

Dans un premier temps nous présentons le modèle de la liaison (alternateur-redresseur), qui comporte le model de redresseur commandé par MLI. Pour le modèle de la machine, il a été présenté dans le chapitre 2. Le contrôle de convertisseur sera décrit ainsi que le contrôle de bus continu. Enfin nous présentons les résultats de simulations du système global.

### III.3.1 Redresseur à commande MLI

#### III.3.1.1 Description

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [47, 48,49].

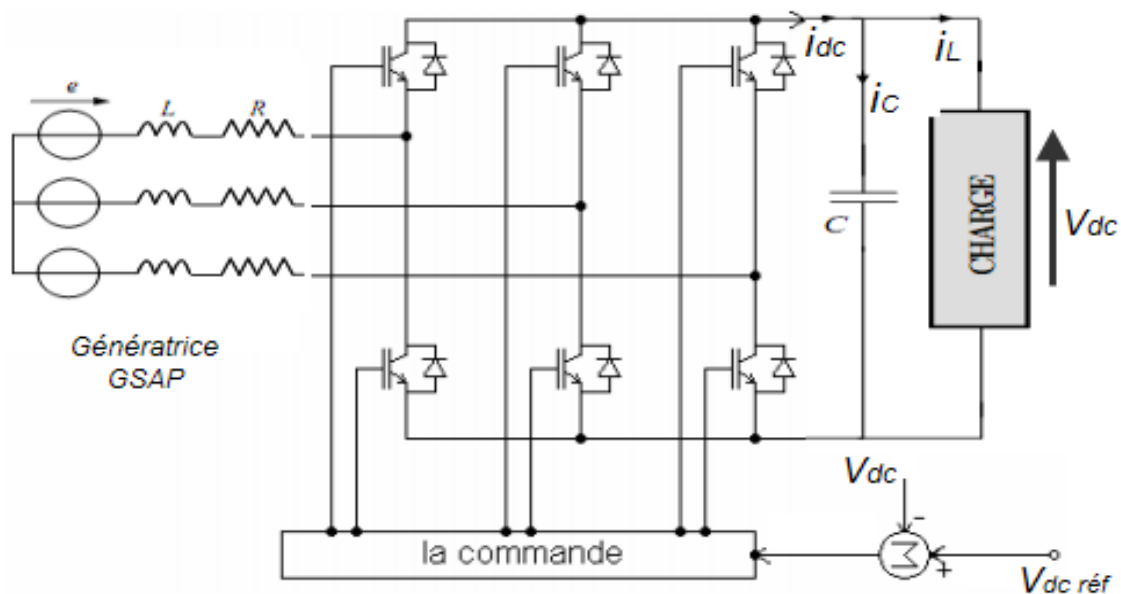


Figure.III.11 Topologies de base d'un redresseur de tension.

#### III.3.1.2 Principe de fonctionnement de redresseur

Le principe de fonctionnement de redresseur de tension c'est de garder la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure (Figure.III.11). Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $U_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $U_{dc-ref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture [40]. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $U_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur C.

Quand le courant  $i_L$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la

source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand  $i_L$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur  $C$  est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative [48,49].

### III.3.2 Stratège du commande MLI

#### III.3.2.1 Description

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux continus à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à états discrets.

Le principe générale est repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension a haute fréquence de commutation).

#### III.3.2.2 Applications

Les usages les plus fréquents sont :

- ✓ La conversion numérique-analogique
- ✓ Les amplificateurs de classe D, en audio
- ✓ Les alimentations à découpage, variateurs de vitesse, et plus généralement tous les dispositifs d'électronique de puissance utilisant des composants de type MOSFET, IGBT, GTO [51].

Il est aussi possible de faire de la transmission de données par cette méthode.

#### III.3.2.3 Les techniques de commande MLI

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis [44].

##### III.3.2.3.1 MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur, lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase [49].

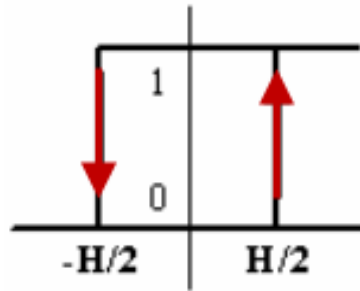


Figure.III.12 Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Fig. III.12, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

Dans ce travail, nous choisissons la technique à bande d'hystérésis (sinus-triangulaire), qui est caractérisée par la simplicité et le temps de réponse minimal aux perturbations. Cette méthode consiste à élaborer le signal MLI directement à partir de la grandeur à contrôler, par des décisions de type tout ou rien.

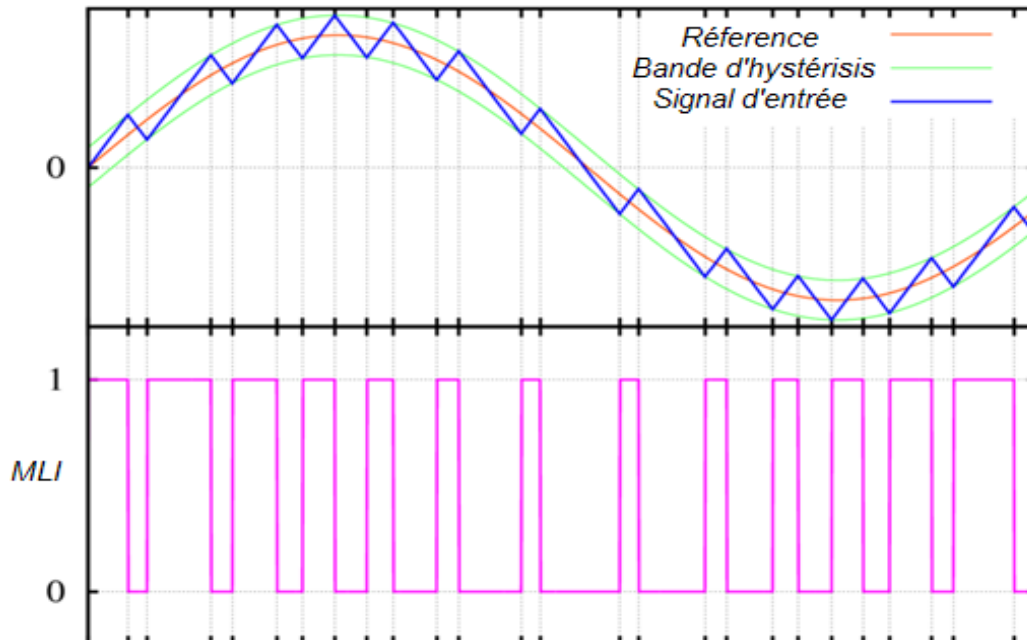


Figure.III.13 Principe d'un MLI à hystérésis.

### III.3.2.3.2 MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps [40].

### III.3.2.3.3 MLI à échantillonnage périodique

La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure (Figure.III.14), ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie.

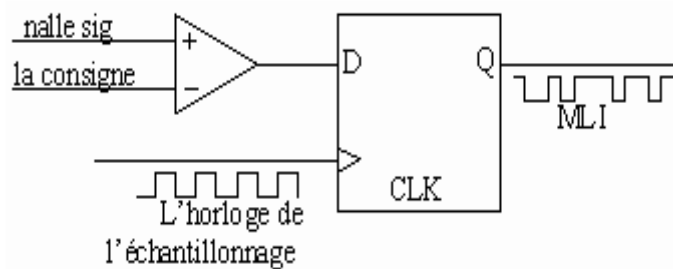


Figure.III.14 Modulateur MLI à échantillonnage périodique.

### III.3.2.3.4 MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire [49].

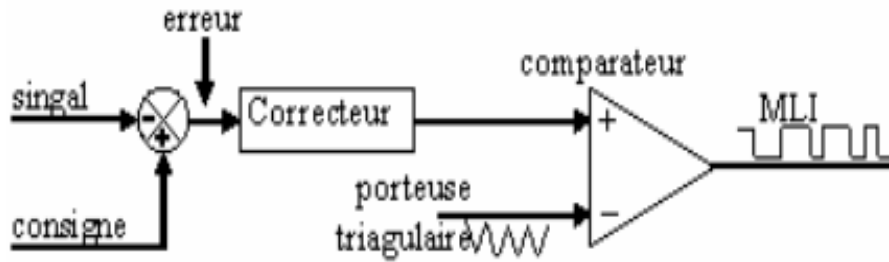


Figure.III.15 Modulateur MLI à porteuse triangulaire [49]

### III.4 Commande en courant de GSAP pour le redresseur MLI

#### III.4.1 Modélisation du redresseur MLI

La figure suivante présente le schéma d'un pont de redresseur commandé associé à la génératrice synchrone à aimant permanent. Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (Figure.III.16), qui sont présentées comme des interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée  $v$  est fonction des états de ces interrupteurs.

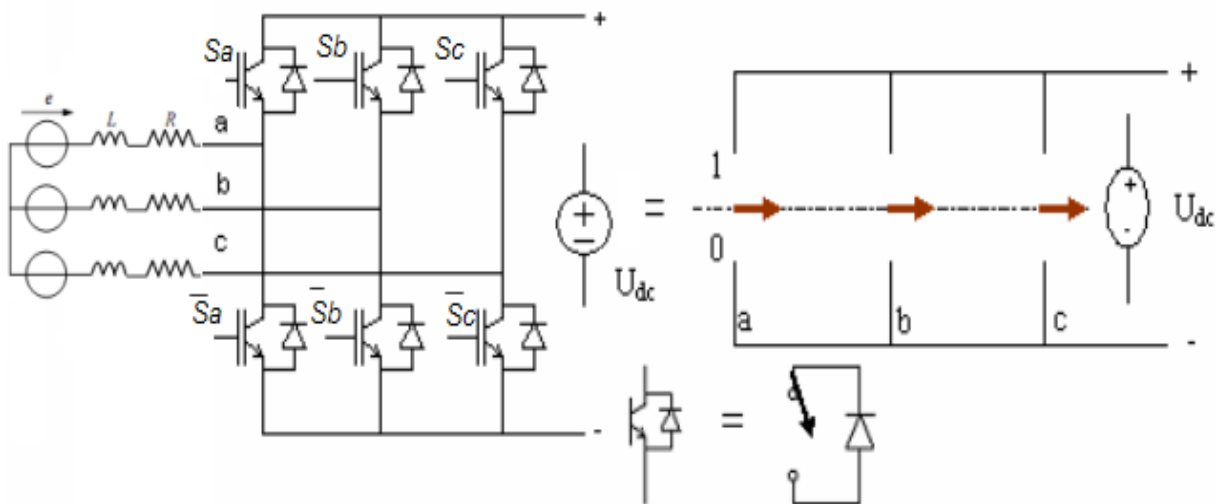


Figure.III.16 Schéma de redresseur MLI connecté à la génératrice GSAP.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.



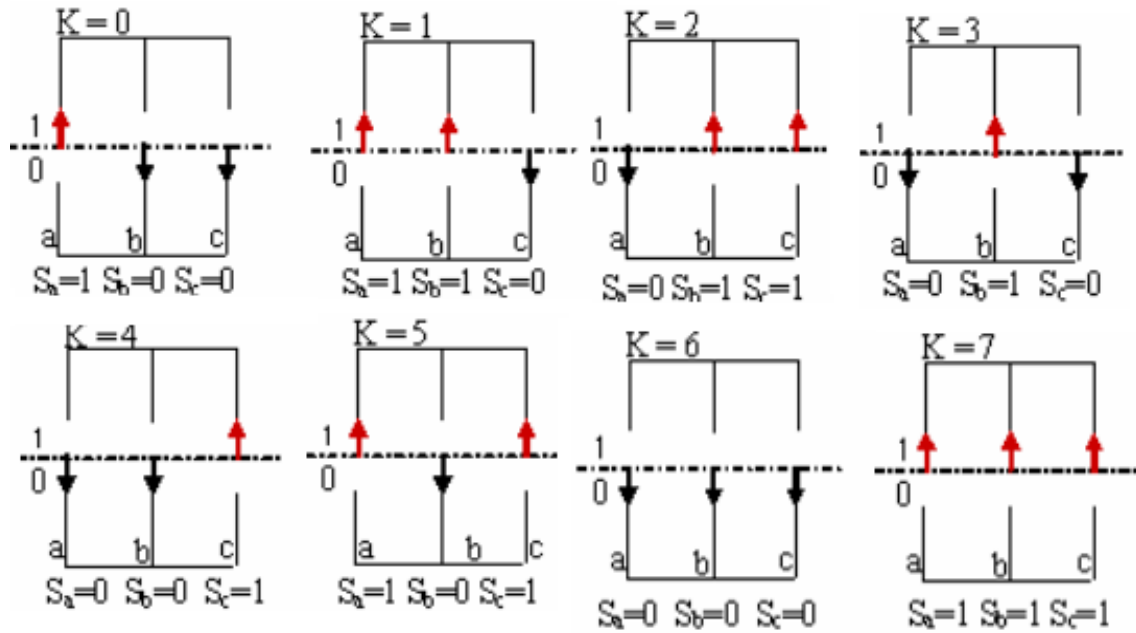


Figure.III.17 Les différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

Ensuite, d'après ces différents états de commutation des interrupteurs, on peut construire le tableau suivant :

<b>K</b>	<b>S<sub>a</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>c</sub></b>	<b>V<sub>ab</sub></b>	<b>V<sub>bc</sub></b>	<b>V<sub>ca</sub></b>
<b>0</b>	1	0	0	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
<b>1</b>	1	1	0	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
<b>2</b>	0	1	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0
<b>3</b>	0	1	1	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
<b>4</b>	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
<b>5</b>	1	0	1	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0
<b>7</b>	1	1	1	0	0	0

Tableau.III.1 les huit états possibles des interrupteurs

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur de ce tableau, peuvent être décrites par :

$$\begin{aligned} v_{ab} &= (S_a - S_b)U_{dc} \\ v_{bc} &= (S_b - S_c)U_{dc} \\ v_{ca} &= (S_c - S_a)U_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

D'autre part, les tensions simples peuvent être écrites :

$$\begin{aligned} v_a &= f_a U_{dc} \\ v_b &= f_b U_{dc} \\ v_c &= f_c U_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

Il y a une autre présentation pour la liaison entre le côté alternatif et le côté continu au travers les interrupteurs, leur état est défini par la fonction suivante [45]:

$$S_i = \begin{cases} +1, \bar{S}_i = -1 \\ -1, \bar{S}_i = +1 \end{cases} \quad \text{pour } i = a, b, c \quad (\text{III.17})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Considérant le schéma suivant qui met en œuvre les courants du bus continu :

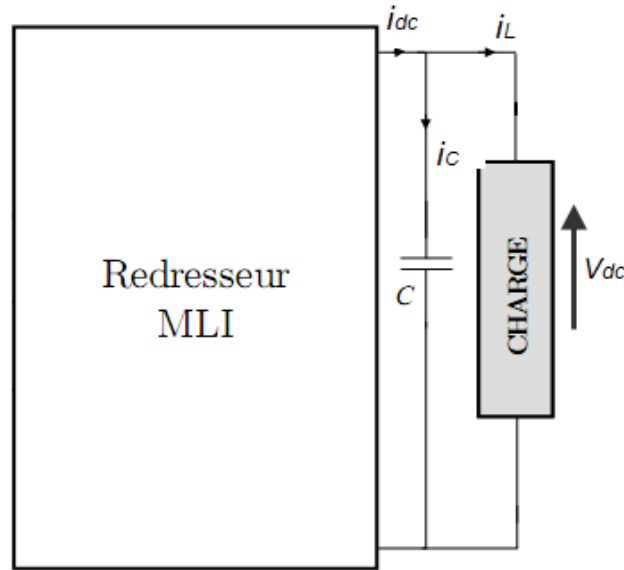


Figure.III.18 Les courants de sortie du bus continue

La figure (Fig.III.18), nous permet d'écrire alors :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_c \quad (III.19)$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_c = i_{dc} - i_L \quad (III.20)$$

Par ailleurs,

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) - i_L \quad (III.21)$$

Aussi, le coté alternatif du redresseur

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} \left\{ S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right\} \quad (III.22)$$

$$L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = e_b - U_{dc} \left\{ S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right\}$$

$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = e_c - U_{dc} \left\{ S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right\}$$

La combinaison des équations (III.21), (III.22) peut être représentée comme le schéma fonctionnel triphasé, montré dans la figure (Figure.III.19).

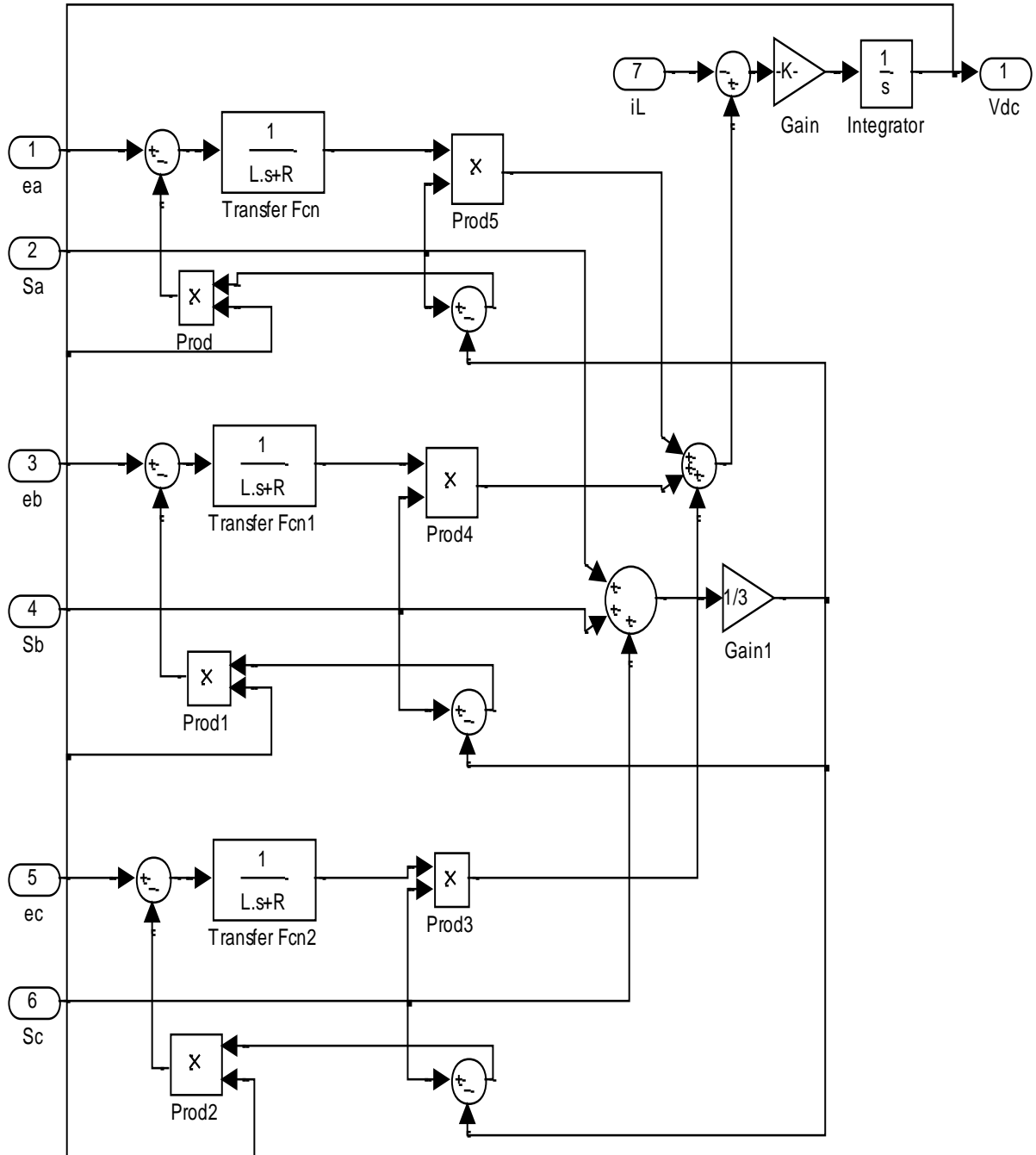


Figure.III.19 Schéma sous matlab-Simulink du redresseur MLI dans le repère fixe abc

### III.4.2 Représentation du redresseur MLI dans le repère tournant d-q

Les équations précédentes dans le repère tournant  $d-q$  (voire annexe B) sont :

$$e_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + v_d \tag{III.23}$$

$$e_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d + v_q$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_d i_d + S_q i_q) - i_L$$

Avec

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \sin(\omega t) \tag{III.24}$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c) \sin(\omega t)$$

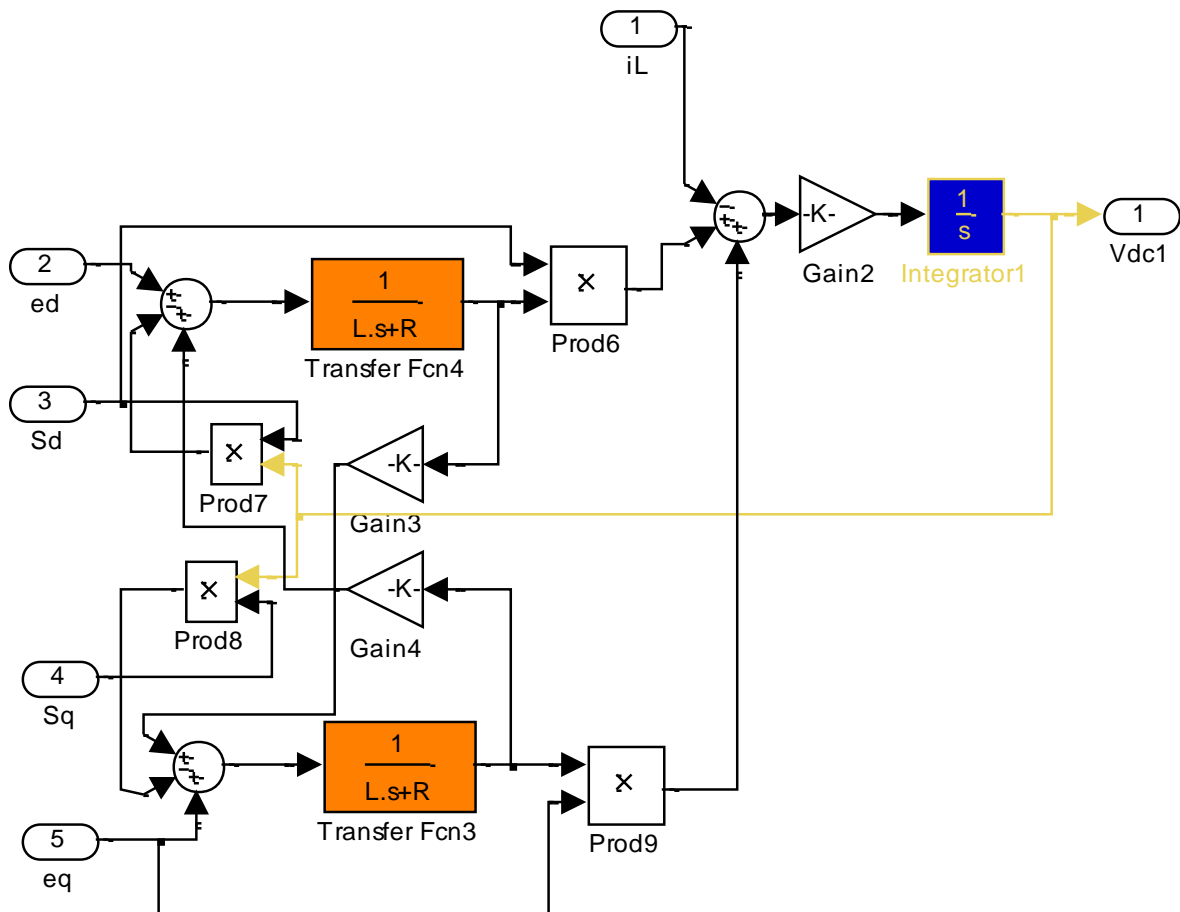


Figure.III.20 Schéma sous Matlab-Simulink du redresseur MLI dans le repère tournant d-q

### III.4.3 boucle de courant

Pour contrôler les courants de GSAP, considérons le schéma de la figure (Figure.III.21) qui représente un bras du redresseur et sa commande en courant de la génératrice synchrone à aimant permanent. La stratégie de contrôle consiste à introduire l'erreur de courant dans chaque phase dans un régulateur à partir duquel nous obtenons la tension à appliquer aux bornes de l'inductance de la phase correspondante pour obtenir le courant désiré [50].

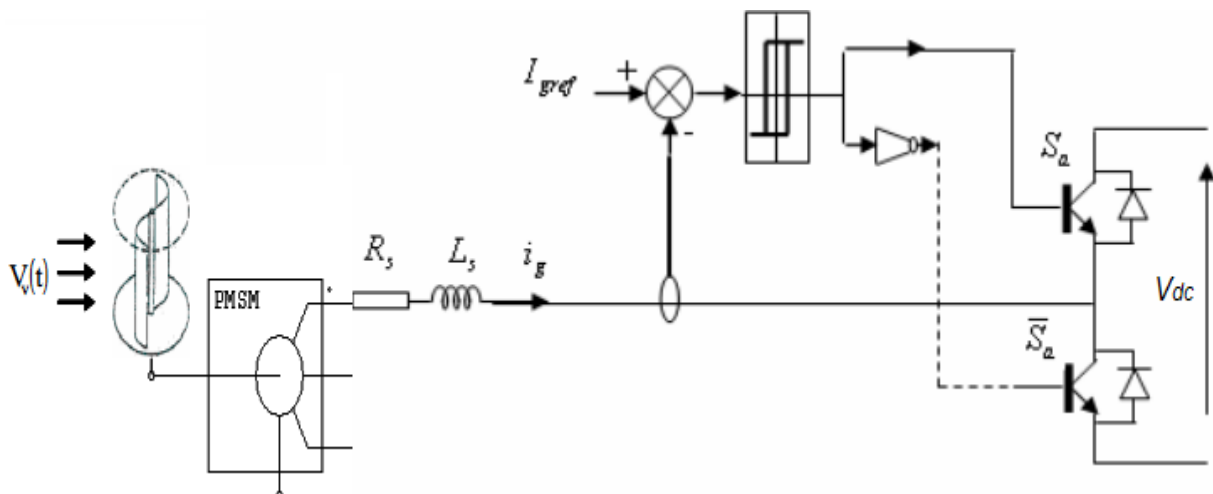


Figure.III.21 Schéma de régulation du courant pour le redresseur MLI.

### III.4.4 boucle de tension

La puissance du bus continue peut s'exprimer comme suit :

$$P_{dc} = V_{dc} i_{dc} \tag{III.25}$$

Si on part que le rendement est unitaire, alors la puissance est donné par :

$$P_{dc} = 3 e_g i_g = 3 e_g \frac{\hat{i}_g}{\sqrt{2}} \tag{III.26}$$

En considérant le schéma suivant :

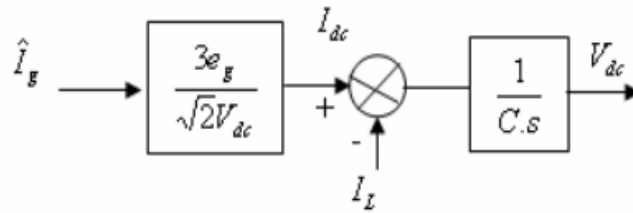


Figure.III.22 Boucle de tension

Alors,

$$i_{dc} = i_c + i_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (III.27)$$

La structure globale du système en boucle fermée est présentée à la figure (Figure.III.23):

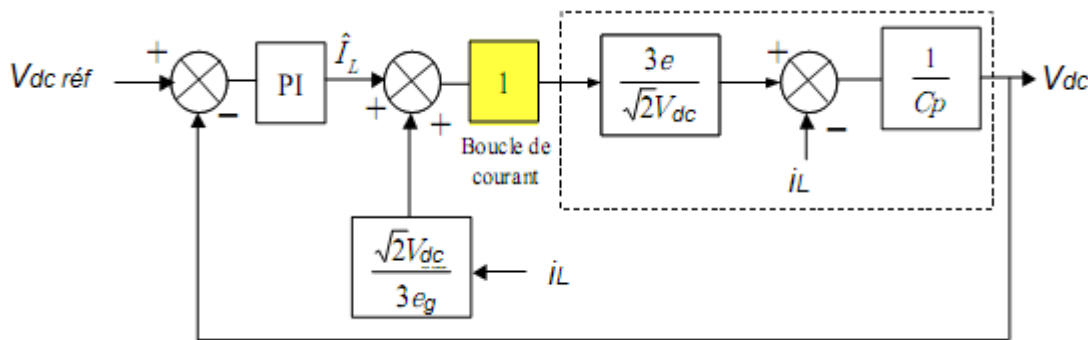


Figure.III.23 Modèle globale en boucle fermée pour la régulation de tension.

Le régulateur PI est défini par sa fonction de transfert

$$H_{PI}(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_C s} \right) \quad (III.28)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système vaut :

$$H_{BO}(s) = K_C \left( 1 + \frac{1}{T_C s} \right) \left( \frac{G}{C s} \right) \quad (III.29)$$

Avec

$$G = \frac{3e_g}{\sqrt{2}V_{dc}}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert du système est :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1+H_{BO}(s)} \quad (\text{III.30})$$

Après simplification, elle donne,

$$H_{BF}(s) = \frac{1+T_c s}{\frac{C T_c}{G K_c} s^2 + T_c s + 1} \quad (\text{III.31})$$

Pour déterminer les paramètres ( $K_c$ ,  $T_c$ ) du correcteur PI, on fait comparer la fonction (III.31) avec la fonction caractéristique :

$$H_{BF}(s) = \frac{1 + T_c s}{\frac{C T_c}{G K_c} s^2 + T_c s + 1} = \frac{1 + T_n s}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_n} s + 1}$$

donc :

$$K_c = \frac{2 C V_{dc} \omega_n}{3 e_g} \quad (\text{III.32})$$

$$T_c = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} \quad (\text{III.33})$$

La bande passante du régulateur de tension est fixée par rapport à la fréquence de la force électromotrice de la machine donc elle dépend directement de la vitesse de l'alternateur.

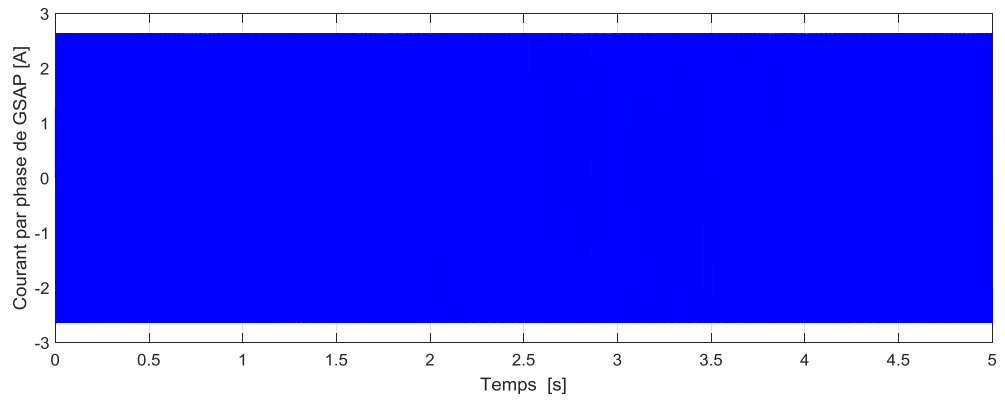
Typiquement on prend :  $\varepsilon = 0.7$  et  $\omega_n = 0.1 \omega_{mes}$

### III.5 Simulation

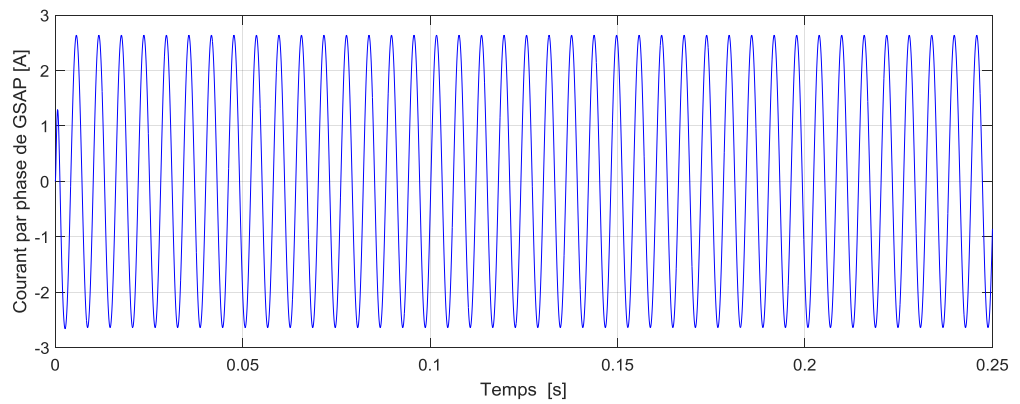
Le système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimant permanent commandé par redresseur MLI vectoriel a été étudié par simulation sous Matlab /Simulink.

Le courant a été commandé dans le repère  $abc$  par régulateurs à hystérésis, la référence de la tension à la sortie du redresseur est prise égale à 220 V.

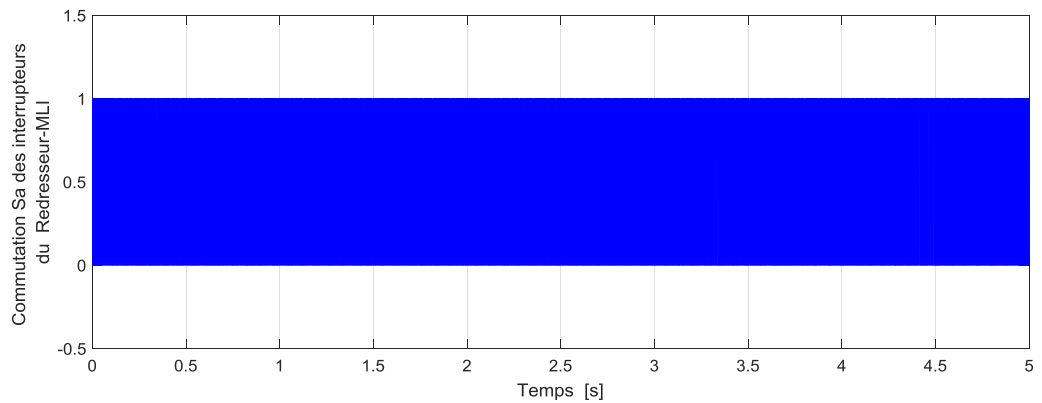




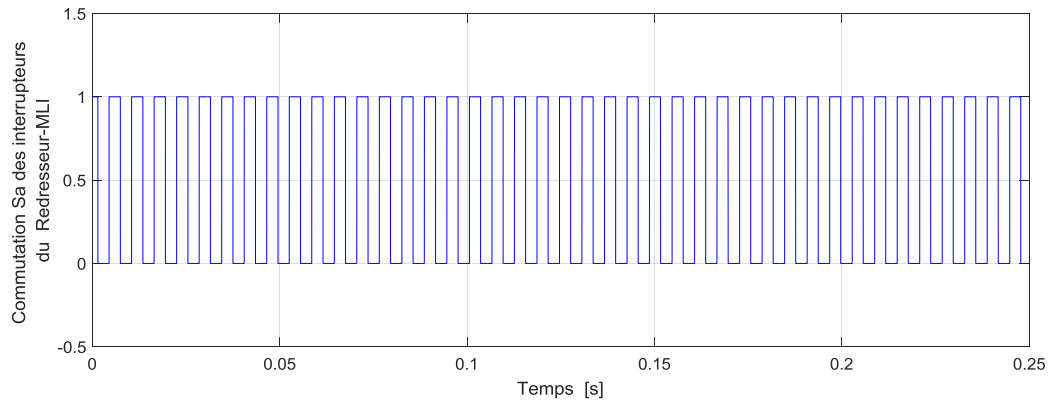
Courant par phase de générateur GSAP



Zoom de Courant par phase de générateur GSAP



L'état Sa de commutation des interrupteurs du redresseur MLI



Zoom de l'état Sa de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

Nous avons simulé le modèle de profil de vent en deux formes :

1. La vitesse du vent est présente sous Simulink par la figure (Figure.III.25).

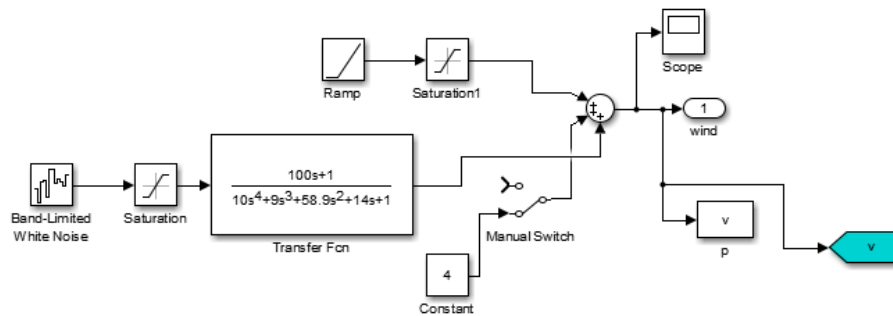


Figure.III.24 Schéma sous matlab-Simulink du vitesse de vent

En fonction de la position du commutateur manuel présent dans le schéma, la vitesse du vent est considérée comme une vitesse qui présente une composante de turbulence. Cette composante de turbulence est générée par le filtrage d'un bruit pseudo aléatoire.

La figure (Figure.III.26) montre respectivement la tension continue à la sortie du redresseur avec son référence proposée, on observe que la tension du bus continu reste en moyenne égale à 220 V. La figure (Figure.III.27) montre le zoom de la tension redressée.

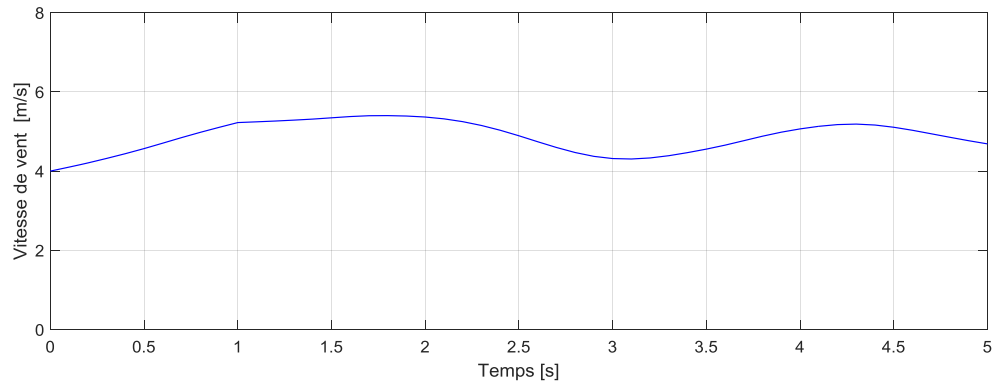


Figure.III.25 Vitesse de vent

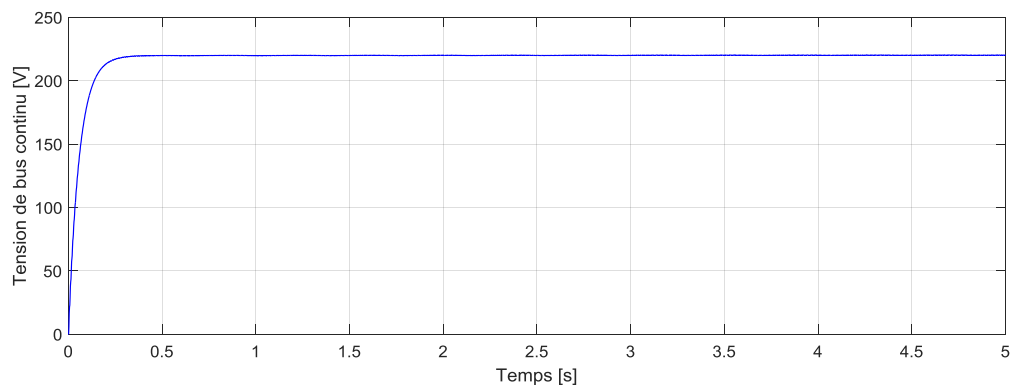


Figure.III.26 Tension redressée

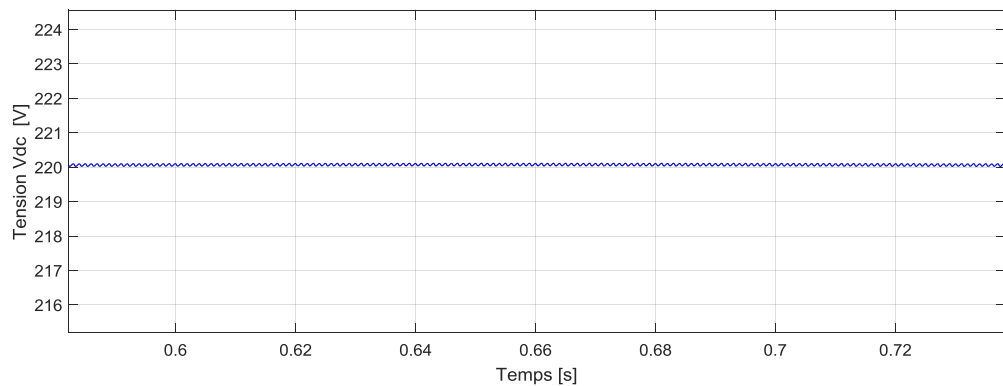


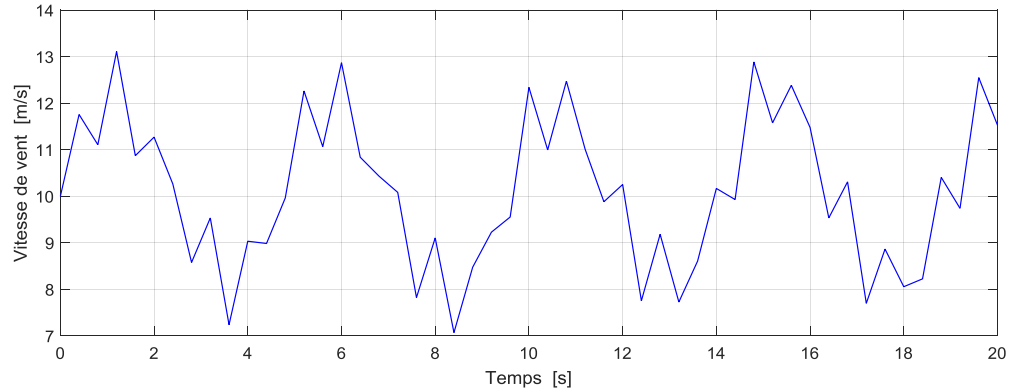
Figure.III.27 Zoom de la tension redressée

2. La variation de vitesse de vent représentée en figure (FigIII.28) sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [43, 44, 45,46] :

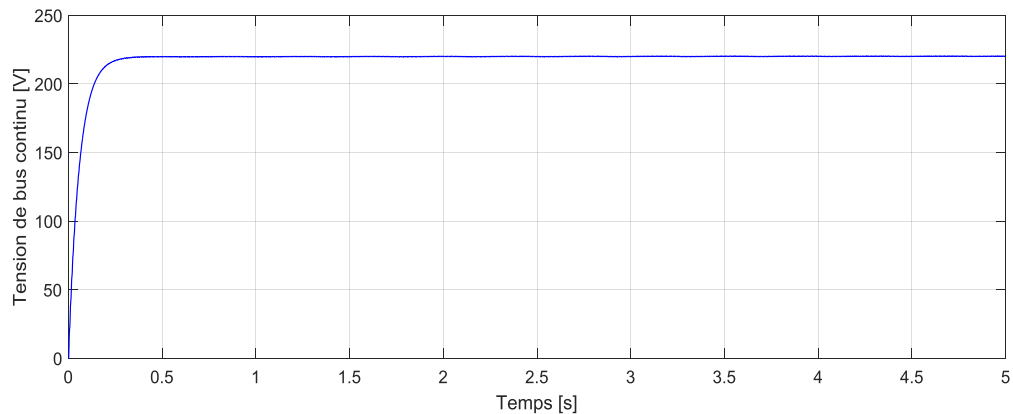
$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{III.34})$$

On observe que la tension du bus continu (FigIII.29) reste en moyenne égale à 220V.

Le profil de vitesse du vent est à l'origine des fluctuations de la tension du bus. En effet, lorsque la vitesse du vent varie la commande du redresseur doit suivre le changement du point de fonctionnement afin de stabiliser la tension du bus.



**FigIII.28** Vitesse de vent



**Figure.III.29** Tension redressée

Les résultats de simulation obtenus, montre que la réponse de la tension à la sortie de redresseur (redressée) à une variation de vitesse est relativement rapide et ne dépasse pas 1% de la valeur de référence, lors des perturbations.

On voit bien que l'application de la vitesse du vent avec les deux modèles proposées, l'allure de la tension du bus continue est établie à 220V avec un temps de réponse qui dépend de la commande du redresseur, de l'ordre de 0.5s dans l'exemple traité.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a établi un modèle globale de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associé à une turbine éolienne. La turbine utilisée est celle à axe vertical de type Savonius.

Ensuite, on a présenté la structure du système de conversion d'énergie éolienne. On a

décrit la commande de la liaison entre une GSAP, un redresseur commandé et la charge. La commande du système a été aussi détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien.

Enfin on a présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de production d'énergie éolienne.

**Conclusion**

**générale**

## **Conclusion générale**

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande floue optimisée d'une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

La production de l'énergie éolienne importe de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie motrice de développement durable.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Tout cela a été conçu autour d'une GSAP.

Dans le premier chapitre nous avons dressé un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones.

Le deuxième chapitre a été consacré sur la modélisation de la génératrice synchrones à aimants permanents. Nous avons donné des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel avant de donner les équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la GSAP. L'écriture de ces équations dans le repère de Park c'est pour effectuer la commande afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

Le troisième chapitre a été consacré sur la commande de la machine synchrones à aimant permanent associée avec le système éolien. Nous avons établi un modèle globale de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrones à aimants permanents

GSAP associé à une turbine éolienne; puis nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne et nous avons décrit la commande de la liaison entre une GSAP, un redresseur commandé et la charge. La commande du système a été aussi détaillée; et à la fin, nous avons présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de conversion d'énergie éolienne.

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

- Étude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel)...etc.
- Étudier la gestion des systèmes, c.à.d réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.



# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] [http:// www.fnh .org /français /doc/en-ligne/énergies/dossier art 1.htm](http://www.fnh.org/francais/doc/en-ligne/énergies/dossier_art_1.htm)
- [2] <http://www.notre-plantation.fr/environnement/energie.php>
- [3] LATRECHE Mohammed Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [4] TOUAL BELKACEM, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister, Université de Batna, 2010.
- [5] Frédéric Poitiers, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne», Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 19/12/2003.
- [6] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21,2002.
- [7] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [8] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [9] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [10] site : [www.suisse-ecole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/](http://www.suisse-ecole.ch/fr/energie-eolienne/statistiques/)
- [11] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [12] site : [www.google.dz/search?biw=1366&bih=629&tbm=isch&sa=1&btnG=بحث&q=Le+développement+de+l'énergie+eolienne#tbm=isch&q=Global+cumulative+installed+wind+capacity+2000-2015&imgsrc=PyjkO4JjFL4kzM%3A](http://www.google.dz/search?biw=1366&bih=629&tbm=isch&sa=1&btnG=بحث&q=Le+développement+de+l'énergie+eolienne#tbm=isch&q=Global+cumulative+installed+wind+capacity+2000-2015&imgsrc=PyjkO4JjFL4kzM%3A)
- [13] L. HAMANE « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11

- [14] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l’Energie Eolienne en Algérie ?, » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7.
- [15] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&ida=364>
- [16] METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d’une éolienne à base d’une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d’Alger, 2009.
- [17] ARMAND BOYETTE «contrôle commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [18] NICOLAS LAVERDURE «Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d’institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [19] N.laverdure, I. Valero, S. Bacha, L.Gerbaud, ' Optimisation de l'interfaçage de puissance dans les systèmes éoliens', GEVIQ'2002, merseille, 2002.
- [20] Aggoun Ghania , «Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'une système de génération éolien-ou» mémoire de magister, Université tizi-ouzou, 2010.
- [21] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [22] Vincent Courtecuisse, « supervision d'une centrale multi-sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », thèse de doctorat, université de Lille ; 2008.
- [23] [http://www.energies-renouvelables.org/energies\\_renouvelables.asp](http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp).
- [24] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-avenir-de-l-energie-eolienne>
- [25] Moussa siddo abdoulaziz "étude du générateur asynchrone pour l’utilisation dans la production de L’énergie éolienne",mémoire ingénieur école nationale polytechnique 2007.
- [26] A. Boyette, << Contrôle – commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienn >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [27] J-C. Sabonnadière, << Nouvelles technologies de l’énergie 1 >>, Lavoisier, 2006.
- [28] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012

- [29] R.Saou, "Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux", Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008
- [30] A.Parviainen., "Design of axial flux permanent magnet low speed machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines," thèse de Doctorat, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005.
- [31] B. Singh B.P. Singh, S. Dwivedi, "A State of Art on Différent Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines" IE(I) Journal–EL, pp. 63-73, vol87, Juni 2006.
- [32] Bernard MULTON, "Application des aimants aux machines électriques ", notes de cours version 2009. École normale supérieure de Cachan. <http://emecatronique.bretagne.ens.cachan.fr>
- [33] G.Lacroux, " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989.
- [34] B.Hacéne "Contribution à la Commande des Machines Synchrones a Aimants Permanents" Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine. Juin 1995.
- [35] A. Aissa "Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents dotée d'un Observateur d'ordre Complet à Mode Glissants", Mémoire de Magister, Université de Batna 2005.
- [36] F. Labrique, G. Séguier et R. Bausier, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance", Volume 4: La conversion continue Alternatif, Lavoisier, 1995.
- [37] Benbrahim Amel, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Mémoire de Magistère à université de Batna, juin 2009.
- [38] F. Khatounian " Contribution a la Modélisation, L'Identification et à la Commande d'une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entraînée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents " Thèse de Doctorat, De L'École Normale Supérieure de Cachan, France, 2006.
- [39] O. Ouledali,"Commande Directe du Couple d'un moteur Synchrone a Aimants Permanents sans capteur mécanique", Mémoire de magister, ENSET-Oran, 2009.
- [40] D.H. TRAN, "Conception Optimale Intégrée d'une chaine éolienne passive ; Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université TOULOUSE, septembre 2010.
- [41] J. D. LANGLOIS, "Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau ", Thèse Master à l'école de technologie Supérieurs, Montréal. 2006.

- [42] A. Harrouz, B. A Ali Harrouz, " Modalisation d'une Petite Eolienne Hors Réseaux Basé sur la Génératrice Synchrone a Aimant Permanent", International Conférence on Energy and Sustainable Développent, p 5, 2011.
- [43] A.Mirecki," Etude Comparative de chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance". Institut nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [44] A. Naima, "Étude et Modélisation de l'Entrainement Électrique d'un Système Éolien à base de la Machine synchrone à Aimant Permanents", Mémoire de Magister en électronique, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Décembre 2010.
- [45] S. BELAKEHAL, "Conception & Commande des Machines à Aimant permanent Dédiées aux Énergies Renouvelable", Thèse de doctorat, Université de constantine, Juin 2010.
- [46] A. Abdelli, "optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive", Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [47] H.Camblong, "Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Éolienne dans la Génération d'Électricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable" Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de bordeaux, Décembre 2003.
- [48] F. Kendouli; K. Abed et H. Benalla, "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation", Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1, pp-109,120, 2011.
- [49] A. Boulahia, "Étude des convertisseur statique destinés à la Qualité de l'Énergie Électrique", Mémoire de magister électrotechnique de l'Université de constantine, avril 2009.
- [50] B. Tounsi, "Étude comparative de groupe électrogènes embarqué à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanentes et conversion statique",Thèse de doctorat, Institut nationale polytechnique de Toulouse, Janvier 2006.
- [51] [www.Wikapidia.org](http://www.Wikapidia.org)