

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي
والبحوث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure
et de la Recherche Scientifique



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Maintenance en Instrumentation

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme Master 2
Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation
Thème

Commande floue d'un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) intégré dans un système éolien

Présenté et soutenu par :

Nom : **HASSAINE**

Prénom : **Mohamed Nabil**

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Etablissement | Qualité |
|----------------------------|-------|---------------|-----------|
| LALAOUI MedEl Amine | MAA | IMSI | Président |
| BELKACEM Belkacem | MCB | IMSI | Encadreur |
| BOUHAMRI Nouredine | MCB | IMSI | Examineur |

Décembre 2020

Dédicace

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

Je dédie ce travail à :

❖ La personne la plus chère à mon cœur, la personne à qui je ne pourrai rendre un seul instant du temps qu'elle m'a consacré « ma charmante mère »

❖ A mon père dont je porte si fièrement le nom
Monsieur HASSAINE

❖ A mes frères.

Je leur dis tous, je vous aime infiniment. Enfin :

الحمد لله الذي بنعمه تتم الصالحات

Remerciements

Mes remerciements vont premièrement à Allah le tout puissant pour la volanter, la patiente la santé qu'il me donne durant tout d'étude

Je tiens d'abord à exprimer tout ma gratitude et ma reconnaissance envers mon encadreur : Belkacem pour m'avoir aidé par ses idées, ses conseils précieux et ses encouragements incessants durant la préparation de ce travail, et pour tous les efforts qui les a faits pour l'achèvement de ce mémoire, je ne l'oublierai jamais de toute ma vie.

Mes vifs remerciements vont à l'encontre des enseignants qui ont eu l'amabilité de juger ce travail.

Je remercie aussi toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Etat d'art sur l'énergie éolienne..... | 4 |
| I. Introduction :..... | 5 |
| II. Présentation de l'énergie éolienne : | 5 |
| 1. <i>Historique de l'énergie éolienne :.....</i> | 5 |
| 2. <i>Etapas de développement de l'éolien :.....</i> | 8 |
| 3. <i>État actuel du développement de l'éolien dans le monde :.....</i> | 10 |
| 4. <i>Aperçu sur le développement de l'éolien en Algérie :.....</i> | 12 |
| III.Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :..... | 13 |
| 1. <i>Définition de l'énergie éolienne :.....</i> | 13 |
| 2. <i>Fonctionnement d'un système éolien :</i> | 14 |
| 3. <i>Principe de fonctionnement d'une éolienne :.....</i> | 14 |
| 4. <i>Différents types d'éoliennes :</i> | 16 |
| 5. <i>Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :.....</i> | 19 |
| IV.Contrôle des puissances d'une turbine éolienne :..... | 24 |
| 1. <i>Action du vent sur une pale :.....</i> | 25 |
| 2. <i>Contrôle de la puissance captée par la turbine :</i> | 26 |
| V. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne :..... | 28 |
| 1. <i>Les systèmes à vitesse fixe :.....</i> | 28 |
| 2. <i>Les systèmes à vitesse variable</i> | 29 |
| VI.Modèle aérodynamique : | 32 |
| 1. <i>Modèle du vent :.....</i> | 32 |
| 2. <i>Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :</i> | 32 |
| 3. <i>Stratégies de MPPT pour une éolienne :.....</i> | 36 |
| 4.1 <i>Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique Cp :.....</i> | 36 |
| 4.2 <i>Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp :.....</i> | 37 |
| 5. <i>Modélisation du système éolien :.....</i> | 40 |
| VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :..... | 42 |
| 1. <i>Avantage :</i> | 42 |
| 2. <i>Inconvénients :.....</i> | 43 |
| Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimant permanente (MSAP)..... | 45 |

| | |
|---|-----------|
| I. Introduction : | 46 |
| II. Présentation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents MSAP : | 46 |
| 1. <i>Généralités :</i> | 46 |
| 2. <i>Principe de fonctionnement des MSAP :</i> | 48 |
| 3. <i>Fonctionnement en mode générateur GSAP :</i> | 49 |
| III. Modélisation de la MSAP : | 50 |
| 1. <i>Hypothèses simplificatrices :</i> | 51 |
| 2. <i>Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc :</i> | 51 |
| 3. <i>Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q) :</i> | 52 |
| IV. Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG : | 56 |
| V. Conclusion : | 56 |

Chapitre III Modélisation globale de la chaîne de conversion à base d'une GAPS..... 57

| | |
|--|-----------|
| I. Introduction : | 58 |
| II. Stratégie de commande de système de production : | 58 |
| III. Modélisation de l'onduleur trois niveaux de type NPC | 58 |
| 1. <i>Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :</i> | 61 |
| 2. <i>Modèle de la commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC :</i> | 63 |
| 3. <i>Fonction de connexions :</i> | 65 |
| 4. <i>Modélisation des valeurs instantanées :</i> | 65 |
| IV. Présentation du hacheur survolteur : | 67 |
| 1. <i>Introduction :</i> | 67 |
| 2. <i>Principe d'un hacheur parallèle ou survolteur (BOOST) de tension :</i> | 67 |
| V. Stratégie de contrôle du système par la logique floue : | 68 |
| 1. <i>Principe et éléments de la logique floue :</i> | 69 |
| 2. <i>Structure interne d'un système floue :</i> | 71 |
| 3. <i>Application de la logique floue pour la commande du hacheur :</i> | 72 |
| VI. Résultats de simulations : | 73 |
| VII. Conclusion : | 79 |

Conclusion générale..... 80

La liste des figures

CHAPITRE I : ETAT D'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE

FIGURE 1.1 exemples de moulins à vent

FIGURE 1.2 de Charles f et Paule Lacour

FIGURE 1.3 étapes de développement

FIGURE 1.4 capacité éolienne installée dans le monde

FIGURE 1.5 cartographie des vents

FIGURE 1.6 conversions de l'énergie cinétique du vent

FIGURE 1.7 éolienne de savonius

FIGURE 1.8 éoliennes de darrieus

FIGURE 1.9 éoliennes à axe HORIZONTAL

FIGURE 1.10 Type de montage de la voile

FIGURE 1.11 Exemples d'éoliennes

FIGURE 1.12 Différentes parties d'une éolienne

FIGURE 1.13. Tour d'un aérogénérateur

FIGURE 1.14 Constituants principaux d'une nacelle

FIGURE 1.15 a) et b) Le multiplicateur ; c) Vérification du frein à disque de l'arbre rapide ; d) Remplacement de la boîte de vitesse [25].

FIGURE 1.16 le moteur d'orientation de la nacelle

FIGURE 1.17 cabine de dispersion située au pied de la tour

FIGURE 1.18 moteur d'orientation de la nacelle

FIGURE 1.19 caractéristique puissance /vitesse de vent d'une éolienne

FIGURE 1.20 élément caractéristique d'une pale

FIGURE 1.21 forces appliquées sur un tronçon pale

FIGURE 1.22 Éolienne à vitesse fixe

FIGURE 1.23 Différentes configurations d'éoliennes à vitesse de vent variable

FIGURE 1.24 Schéma simplifié d'une éolienne

FIGURE 1.25 Tube de courant autour d'une éolienne.

FIGURE 1.26 Paramétrage d'une éolienne tripale pour différentes valeurs β

FIGURE 1.27 Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent

FIGURE 1.28 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse

FIGURE 1.29 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse

FIGURE 1.30 Représentation du système mécanique de l'éolienne

FIGURE 1.31. Modèle mécanique simplifié de la turbine

FIGURE 1.32 Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne

CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE À AIMANTS PERMANENTS (MSAP)

FIGURE II.11 Structure générale d'une machine synchrone à aimants

FIGURE II.2 Constituants d'une machine synchrone à aimants

FIGURE II.3 Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)

- FIGURE II.4 Principe de fonctionnement d'une GSAP
- FIGURE II.5 Structure du générateur éolien à base d'une GSAP
- FIGURE II.6 Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.
- FIGURE II.7 Représentation de la MSAP dans le repère d-q [50].

CHAPITRE III : MODELISATION GLOBALE DE LA CHAINE DE CONVERSION A BASE D'UNE GAP

- FIGURE III.1 **Structure** globale de la chaine de production éolienne.
- FIGURE III.2 Onduleur triphasé à trois niveaux
- FIGURE III.3 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.
- FIGURE III.4 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.
- FIGURE III.5 1ère configuration du 1er bras
- FIGURE III.6 2ème configuration du 1er bras
- FIGURE III.7 3ème configuration du 1er bras
- FIGURE III.8 Formes d'ondes de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à 3niveauxNPC
- FIGURE III.9 Schéma de principe d'un hacheur
- FIGURE III.10 Schéma de principe de la commande à logique floue
- FIGURE III.11 Schéma de principe de la commande à logique floue
- FIGURE III.12 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou
- FIGURE III.13 Représentation des variables booléenne classique
- FIGURE III.14 Représentation des variables floues
- FIGURE III.15 Structure interne d'un Régulateur de la logique floue
- FIGURE III.16 Schéma du régulateur flou (MPPT-FLC) sous Matlab-Simulink
- FIGURE III.17. Bloc Simulink global du système de production
- FIGURE III.18 Structure de l'onduleur de tension 3 niveaux
- FIGURE III.19 Fonctions d'appartenance pour la variable d'entrée $E_v(k)$
- FIGURE III.20 Fonctions d'appartenance pour la variable d'entrée $E_p(k)$
- FIGURE III.22 Résultat numérique fourni par le bloc d'inférence
- FIGURE III.23 Profil de la vitesse de vent Figure
- FIGURE III.24 Variation de la tension de l'hacheur
- FIGURE III.25 d'onde des tensions à la sortie de la GSAP
- FIGURE III.26 Formes d'onde des courants à la sortie de la GSAP
- FIGURE III.27 Allure des tensions à la sortie de l'onduleur trois niveaux
- FIGURE III.28 Allure des Courants à la sortie de l'onduleur trois niveaux
- FIGURE III.29 Puissance active à la sortie de la GSAP
- FIGURE III.30 Puissance active à la sortie de l'onduleur

Abréviation :

| | |
|--|---|
| <i>MS</i> | Machine synchrone |
| <i>MSAP</i> | Machine synchrone à aimants permanents |
| <i>GSAP</i> | Génératrice synchrone à aimants permanents |
| <i>(d, q)</i> | Indice du repère de Park lié au rotor |
| <i>Rs</i> | Résistance statorique |
| <i>Ld</i> | Inductance statorique directe |
| <i>(vsd, vsq)</i> | Composantes de la tension au stator dans le repère de Park |
| <i>Lq</i> | Inductance statorique quadratique |
| Ψf | Flux d'excitation des aimants permanents |
| <i>($\Psi_s d \psi sq$)</i> | Composantes du flux statorique dans le repère de Park |
| <i>(I_{sd}, I_{sq})</i> | Composantes du courant statorique |
| <i>Cem</i> | Couple électromagnétique |
| <i>Cr</i> | Couple résistant |
| <i>P</i> | Nombre de paire de pôles |
| <i>J</i> | Moment d'inertie totale de la machine |
| <i>f</i> | Coefficient de frottement visqueux |
| | Pulsation électrique statorique |
| Ω | Vitesse de rotation mécanique du rotor |
| <i>F</i> | Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable |
| <i>V1, V2</i> | Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne |
| ρ | Masse volumique de l'air en température ambiante (1) |
| <i>S</i> | Surface balayée par le rotor de l'éolienne |
| <i>m</i> | Masse d'air traversant le rotor éolien en une(1) seconde |
| <i>Pm</i> | Puissance extraite par le rotor éolien |
| <i>P(θ)</i> | Transformation de Park |
| <i>P(θ)⁻¹</i> | Transformation inverse de Park |
| <i>ia,b,c</i> | Courants des phases statoriques |
| <i>Wt</i> | Vitesse de la turbine |
| <i>Va,b,c</i> | Tensions des phases statoriques |
| <i>rd,q</i> | Tension statorique sur les axes d et q |
| <i>Id,q</i> | Courant statorique sur les axes d et q |
| <i>Fp</i> | Fréquence de la porteuse |

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie Électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Vu l'ampleur de l'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques de plus en plus gourmands en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue très importante. Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbures et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl à l'Ukraine du 26 avril 1986 qui reste gravée dans la mémoire commune), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés du domaine dans le monde sont respectivement : l'Allemagne, l'Espagne, les Etats-Unis, l'Inde, la Chine et le Danemark.

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

C'est dans ce cadre que le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines asynchrones spéciales, plus précisément les génératrices synchrones à aimants permanents – GSAP- dans un système éolien [1].

Le premier chapitre est consacré à des statistiques sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde, puis on s'intéressera à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs. Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de génératrices synchrones à aimants permanents – GSAP. Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

Pour atteindre ces objectifs, le second chapitre est consacré à l'étude des GSAP intégrée dans un système éolien, la topologie et les domaines d'utilisation de cette machine ainsi que la modélisation dans un repère biphasé(d, q) lié au synchronisme à l'aide de la transformation de PARK sont proposées.

Dans le troisième chapitre, on présentera la modélisation globale de la chaîne de conversion à base d'une GSAP. Nous allons tenter d'introduire un régulateur flou qui commandera un hacheur survolteur dont la tension de sortie sera débitée dans un onduleur de tensions à trois niveaux ; ceci dans le but du suivi du point maximum de puissance à travers la technique MPPT. La fin du chapitre est consacré à l'interprétation des différents résultats de simulations sur l'environnement MATLAB SIMULINK.

Enfin, on termine notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives d'études développées de notre système de génération d'énergie.

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

I. Introduction :

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, l'être humain étant de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [2] ; là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, on utilise des machines synchrones ou 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 [3].

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, à vitesse fixe et vitesse variable ...etc.), puis on passe à un état De l'art sur les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

II. Présentation de l'énergie éolienne :

1. Historique de l'énergie éolienne :

Durant l'Antiquité, les égyptiens furent les premiers à capter l'énergie éolienne issue du vent pour l'utiliser dans le domaine maritime. Cette énergie servait à la propulsion des bateaux à voile. Au Vème siècle Av JC, les Perses se servaient des éoliennes pour irriguer leurs champs (roues à aube) [4]. Le moulin à vent n'est apparu qu'à partir du VIIe siècle ; Les frères Banou Moussa, célèbres inventeurs persans, décrivent vers 850 des moulins à vent fonctionnant dans le désert de du Sistan où souffle un vent très régulier. Le plan du moulin est horizontal, des murs de maçonnerie canalisant le vent vers une attaque latérale, comme dans une turbine. L'axe de rotation, vertical, entraîne directement la meule du moulin ; les civilisations grecques et égyptiennes s'en servaient pour moudre du grain et pomper l'eau des puits.

Au Moyen Âge, les savants de l'époque cherchaient à exploiter au mieux les énergies qui ne font plus exclusivement appel aux muscles humains en développant des machines actionnées par ces sources d'énergie : l'eau et le vent. C'est en observant la nature et sans comprendre réellement les grands principes scientifiques que l'homme a peu à peu utilisé ces forces naturelles pour accomplir ses tâches quotidiennes.

Les premiers moulins à vent sont signalés en Europe à la fin du IXe siècle en Angleterre. Ils ne se généralisent pourtant dans toute l'Europe que vers le XIIe siècle. Le plan de la roue est devenu vertical et son axe peut être orienté face au vent grâce à une rotation de tout le moulin ou seulement du toit (Figure I.1) [5].

Les ailes, rigides ou non, ont une orientation de l'ordre de 15 degrés sur le plan de la roue. Mais pour actionner une meule horizontale, il est nécessaire d'avoir un renvoi à 90 degrés grâce à un engrenage généralement en bois, ce qui crée une perte notable d'énergie.

L'eau et le vent resteront pendant des siècles les sources d'énergie principales et les techniques, hydrauliques surtout, feront l'objet de recherches et d'améliorations constantes. C'est William Thomson, mieux connu sous le nom de Lord Kelvin, physicien et mathématicien



a) Moulin chandelier

b) Moulin tour

Figure I.1.Exemples de moulins à vent.

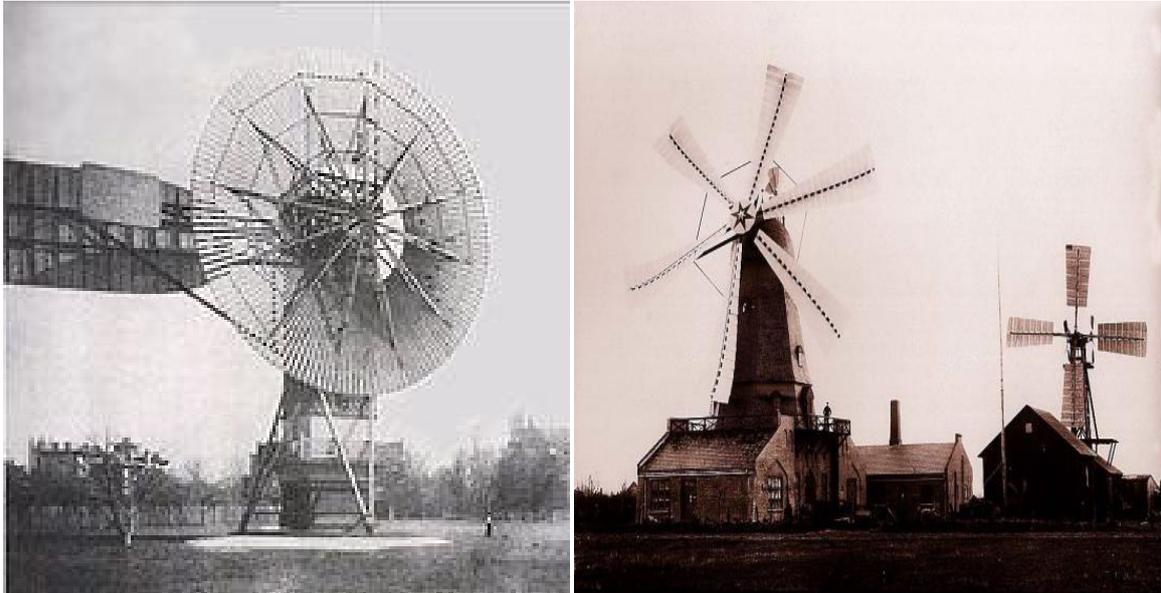
Britannique d'origine irlandaise qui eut le premier la brillante idée de coupler une génératrice électrique à un moulin à vent [6]. Après un demi-siècle de plus, Charles F. Brush,(USA, 1849-1929)l'un des fondateurs de l'industrie électrique américaine, inventa, entre autres, une dynamo à courant continu très efficace employée dans le réseau électrique public. Durant l'hiver de 1887-88, Brush construisit ce qui est aujourd'hui considéré comme la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Cette éolienne d'une puissance de 12 kW à ossature bois avait un diamètre de rotor de 17 m et 144 pales fabriquées en bois de cèdre [6].

Les performances de ces éoliennes furent jugées incomplètes ; ce n'est qu'en 1891 que Le Danois Paul La Cour (DENMARK, 1846-1908) qui est considéré comme le père de toutes les éoliennes modernes destinées à la production d'électricité ; découvrit que les éoliennes à rotation rapide, comprenant un nombre limité de pales, étaient bien plus efficaces pour la production d'électricité que celles à rotation lente composées de nombreuses pales. Il construisit la première éolienne destinée à la production d'électricité.

Paul La Cour [6] a longtemps travaillé dans le domaine de l'accumulation de l'énergie et utilisait le courant produit par ses éoliennes pour produire, par électrolyse, de l'hydrogène destiné à l'éclairage au gaz de son école. En 1904, Paul La Cour a fondé la toute première société des ingénieurs en électricité éolienne du monde, qui a compté jusqu'à 356 membres. En 1918, pas moins de 120 usines électriques possédaient au Danemark une éolienne dont la

Puissance moyenne était alors de 20 à 35 kW. La puissance globale installée de 3 MW couvrait alors environ 3% de la consommation danoise. Ce fut également Paul la Cour qui publia la première revue du monde consacrée à l'électricité [6].

A



a)Eolienne de Charles F. Brush en 1887 b) Eolienne de Paul La Cour en 1891

Darrius (France, 1888-1979) [7], Ingénieur en aéronautique, inventa l'éolienne à axe vertical, qui est robuste et indépendante de la direction du vent ; il en breveta la conception en 1927. En 1957, Johannes Juul (DENMARK, 1887-1969)[8], qui est un ancien élève de La Cour créa une turbine appelée Gedser qui sert encore de modèle aux éoliennes actuelles. Cette éolienne moderne est capable de produire du courant alternatif. En 1956-1957, il conçut et construisit la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser " de 200 kW qui fonctionna pendant onze ans et devint le modèle de référence pour le développement futur de tous les autres aérogénérateurs (éoliennes équipées d'un générateur électrique). L'éolienne Gedser(figureI.3) fonctionnera pendant 11 ans sans travail de maintenance important. L'invention de Juul consistant en une éolienne à trois pales équipée d'un régulateur de vitesse de rotation (orientation des pales), et d'un générateur asynchrone est maintenant connue comme le Concept Danois, qui est très performant et est l'équivalent du moteur à explosion à quatre temps pour l'industrie automobile [8].



Figure I.3 : Etapes de développement des éoliennes

Elle fut remise en marche trois ans durant à partir de 1977 à la demande de la NASA, dans le cadre de ses projets dans le domaine des grandes turbines électriques. Le développement des éoliennes sera freiné par la suite en raison de la grande consommation en énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon.

2. Etapes de développement de l'éolien :

Durant les années 30, Des milliers de petites éoliennes sont construites dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une capacité de 1 à 3 KW. Les éoliennes sont par la suite utilisées pour alimenter des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme. Les fermes canadiennes utilisent les éoliennes pour produire de l'électricité et pour pomper l'eau des puits.

Pendant la quatrième décennie du XX siècle, et avec la chute de prix du carburant fossile après la Seconde Guerre mondiale et l'électrification des régions rurales, les petites éoliennes soulèvent de moins en moins d'intérêt aux États-Unis et au Canada [9].

En 1971, le premier parc d'éoliennes en mer débute ses activités au large du Danemark. Ce parc a une capacité de 05 MW[9].

Suite au premier choc pétrolier de 1973, La production d'électricité à partir d'éoliennes prend beaucoup d'intérêt et incite plusieurs pays dépendant des énergies fossiles à financer des projets de recherche sur l'énergie renouvelable. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. Des parcs d'éoliennes sont construits durant les années 1970 aux États-Unis et en Europe [9].

Durant les années 80, le prix du pétrole étant revu à la baisse ; le marché des éoliennes commerciales se transforme aux petites machines de 1 à 25 KW, regroupées à des parcs d'éoliennes utilisées principalement pour l'agriculture. En Californie, une série de mesures réglementaires et la présence de vent dans les montagnes favorisent l'installation de 17000

éoliennes entre 1981 et 1990. Ces éoliennes peuvent produire entre 20 et 350 kilowatts chacune. L'augmentation des coûts de l'électricité et l'abondance de vent ont favorisé la construction d'éoliennes en Europe [9].

Les enjeux environnementaux liés à la pollution de l'air et les changements climatiques, ne cessent de préoccuper les nations et les gouvernements pour s'intéresser à l'utilisation d'énergie renouvelable pour réduire les gaz à effet de serre et les autres émissions polluantes. Depuis le début des années 2000, la capacité de production d'énergie éolienne augmente de 37 % pour passer à environ 24800 MW. L'Inde augmente sa capacité de production d'énergie éolienne de 300 mégawatts pour s'établir à 1500 MW. Les États-Unis augmentent de 1700 MW leur capacité de production d'énergie éolienne. Des éoliennes sont construites partout dans le pays et des projets majeurs voient le jour au Texas, au Kansas et en Oregon. L'industrie éolienne mondiale représente un chiffre d'affaires d'environ 7 milliards de dollars [9].

À la fin de 2003, les États-Unis (avec plus de 6300 MW) et l'Europe sont au premier rang en ce qui concerne le développement et l'exploitation de l'énergie éolienne. Avec plus de 28000 MW, l'Europe détient en ce temps 70% de la capacité éolienne mondiale. Cette performance est due en partie à des lois visant à encourager sa croissance en Allemagne, au Danemark et en Espagne. L'Allemagne occupe le premier rang au chapitre de l'énergie éolienne avec une capacité de plus de 14000 MW. L'industrie éolienne de ce pays emploie 35000 personnes et fournit 3,5% de l'électricité. C'est au Danemark que l'on retrouve la plus grande proportion d'électricité générée par le vent (plus de 20%). Les manufacturiers danois détiennent près de 40% du marché mondial des éoliennes.

L'augmentation de la production électrique éolienne pour l'année 2005 dans le monde a été de 11769 MW, ce qui révèle une progression de 43,4%. La puissance totale installée dépasse les 59000 MW à la fin 2005 : son rythme de développement annuel est supérieur à 20% depuis deux ans. Les premières éoliennes de 5 MW sont installées en Ecosse (2 en offshore), en Allemagne (1 unité). 48 pays ont d'ores et déjà mis en place des lois et des règlements afin de permettre le développement des énergies renouvelables [10].

Les pays possédant les plus fortes capacités de production sont l'Allemagne, l'Espagne, les USA, l'Inde et le Danemark. L'Inde s'est emparée en 2005 de la 4ème place au détriment du Danemark. En termes d'augmentation des installations, les États-Unis occupent la première place au détriment de l'Allemagne, suivie de l'Espagne, l'Inde, le Portugal et la Chine [10].

En 2008, plus de 27 000 MW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées dans le monde, et les 100 000 MW installés ont été dépassés début 2008. L'éolien représente désormais 260 millions de MWh de production électrique par an, soit 1,3 % de la consommation totale d'électricité dans le monde [10] et a attiré un total d'investissements de 47,5 milliards de dollars.

3. État actuel du développement de l'éolien dans le monde :

L'énergie éolienne a été la première source de nouvelle capacité de production électrique en Europe et aux États-Unis en 2015, et la deuxième en Chine. L'augmentation mondiale de la capacité éolienne de 63 GW constitue un record, le montant total étant d'environ 433 GW ; la Chine occupe la première place. De nouveaux marchés ont émergé en Afrique, en Asie et en Amérique latine. Les entreprises et les acteurs privés ont continué d'opter pour l'énergie éolienne lorsqu'ils souhaitent assurer une électricité fiable et économique, et plusieurs grands investisseurs ont été séduits par son rendement constant [11].

L'année a été exceptionnelle pour le secteur en mer, avec 3,4 GW raccordés aux réseaux selon les estimations, principalement en Europe, pour un montant total mondial supérieur à 12 GW. L'énergie éolienne contribue fortement à la satisfaction de la demande en électricité d'un nombre croissant de pays tels que le Danemark (42 % de la demande en 2015), l'Allemagne (plus de 60 %) et l'Uruguay (15,5 %).

L'industrie a de nouveau connu une année exceptionnelle, et la plupart des plus grands fabricants de turbines ont battu leurs propres records en termes d'installations annuelles. De nouvelles entreprises ont vu le jour, ou sont en cours d'établissement, à travers le monde, pour faire face à la demande croissante.

En 2016, le marché éolien mondial n'a pas tout à fait atteint les espérances en raison de la croissance moins forte que prévue de cette énergie en Chine mais aussi dans certains pays qualifiés de « marchés émergents » comme l'Afrique du Sud, le Brésil, le Canada ou le Mexique. Au total, la puissance installée du parc éolien mondial a augmenté de 54,6 GW en 2016 (contre plus de 60 GW en 2015) pour atteindre 486,8 GW en fin d'année.

Le marché éolien mondial est tiré par l'Asie, la Chine en tête, pour la 8^e année consécutive selon le **GWEC** (Conseil mondial de l'énergie éolienne). Le géant chinois a renforcé sa position de leader sur ce marché, mais le rythme des nouvelles capacités éoliennes connectées au réseau dans ce pays en 2016 (+ 23,4 GW) s'est ralenti de 24% par rapport à 2015. Avec près de 241 TWh produits en 2016, le parc éolien chinois a compté pour près de 4% de la production électrique totale de ce pays l'an dernier.

Après la Chine, viennent en deuxième rang les États-Unis, avec 8,2 GW installés en 2016 (82,2 GW en fin d'année). Le parc éolien a généré près de 5,5 % de la production électrique totale des USA en 2016 (environ 226 TWh) ; une première ferme commerciale offshore au large des côtes américaines a par ailleurs été mise en service fin 2016.

L'Union Européenne reste également une zone centrale d'implantation des éoliennes ; avec presque 300 TWh produits en 2016, et avec 12,5 GW de nouvelles capacités éoliennes installées sur cette période. L'éolien aurait couvert 10,4% de la demande d'électricité au sein de l'Union européenne l'an dernier selon le GWEC. Certains détracteurs de la filière éolienne soulignent toutefois que cette production n'est pas nécessairement corrélée aux heures de consommation, d'où l'importance de solutions de stockage et d'une gestion « intelligente » des réseaux électriques.

L'Inde est le 4ème pays le plus dynamique en matière d'implantation d'éoliennes, avec 3,6 GW de nouvelles capacités installées en 2016. Cela porte la puissance du parc éolien indien à 28,7 GW à fin 2016, soit près de la moitié de l'objectif de développement que s'est fixé le pays à l'horizon 2022 (60 GW de capacités éoliennes et 100 GW de capacités solaires installées).

Enfin, la baisse des coûts de production de l'énergie éolienne, ainsi que les problématiques de stockage de l'énergie, sont des enjeux centraux pour la filière. D'après le **GWEC**, l'éolien, en raison de la baisse des coûts de production, pourrait connaître une croissance soutenue dans les années à venir (entre 10% et 12% de capacités supplémentaires installées chaque année dans le Monde). En 2021, la capacité totale installée d'éolien pourrait atteindre 817 GW selon les prévisions du GWEC, ce qui représenterait 67,8% de plus qu'en 2016. Le **GWEC** mise également sur « l'énorme potentiel » de l'éolien offshore, dont le développement a jusqu'ici été freiné par ses coûts de production. L'organisation voit « la technologie continuer à s'améliorer et s'étendre au-delà de sa base européenne dans les 10 ou 15 années à venir ».

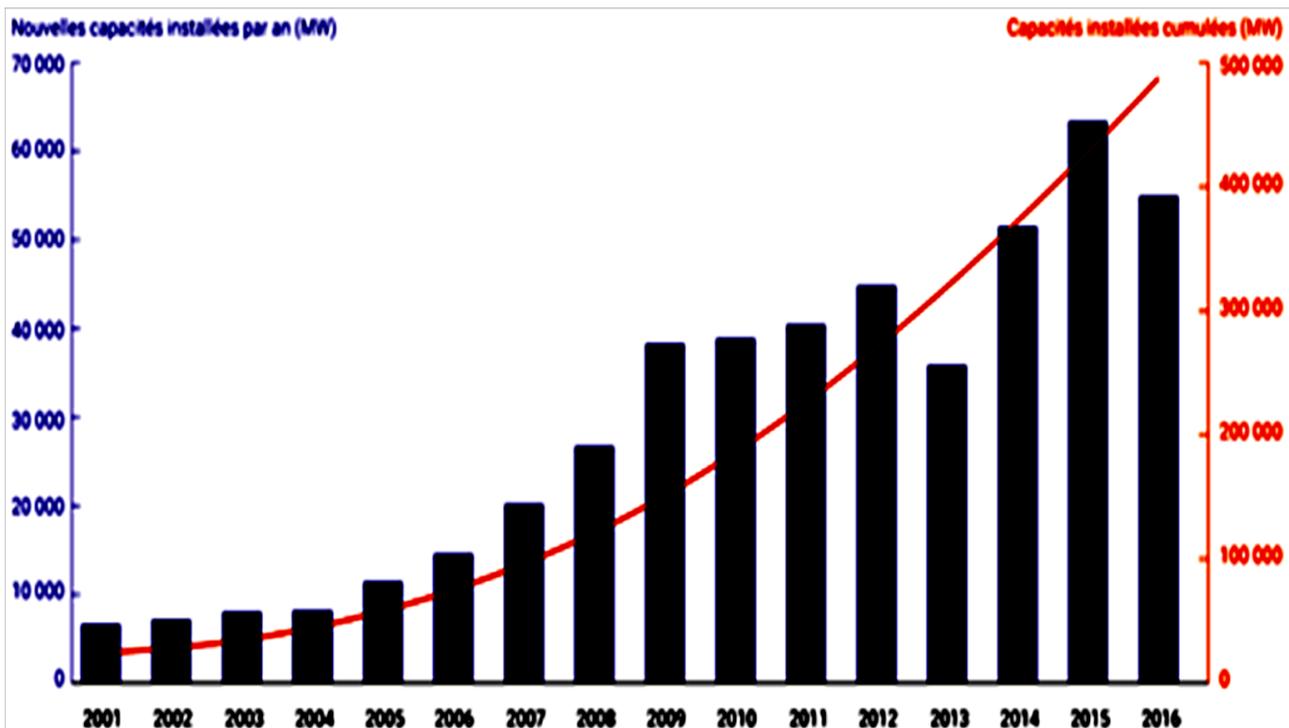


Figure I.4. Capacités éoliennes installées dans le monde

4. Aperçu sur le développement de l'éolien en Algérie :

En Algérie, les premières tentatives d'utilisation des éoliennes remontent à 1957, l'ingénieur français Andreau fabriqua un aérogénérateur de 100 kW qui fut installé sur le site des Grands Vents (Alger) [12].

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale.

Pour ce qui est de l'utilisation de l'énergie éolienne, pour le pompage de l'eau, La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [5]. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.

Actuellement, l'énergie éolienne n'est pas encore au stade d'exploitation, en effet le gisement éolien dont dispose l'Algérie n'est pas valorisé [13].

A travers un programme national pilote de transition vers les énergies renouvelables, l'Algérie envisage de produire, à partir des énergies renouvelables une puissance globale en de 22GW, pour atteindre à l'horizon 2030 une part de près de 40% de la production nationale d'électricité à travers des sources renouvelables.

Dans ce cadre de projet, et vers la fin de l'année 2010, le groupe Sonelgaz représenté par deux de ses filiales (ETTERKIB et INERGA) a attribué au consortium Algéro-Français (CEGELEC), la réalisation d'une première ferme éolienne située à Adrar d'une capacité de 10MW. Cette ferme se compose de douze éoliennes ayant chacune une puissance 850 KW ; le système de génération est constitué par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) pilotées par des turbines de type « G52/850/50-60Hz », fournies par le constructeur espagnol GAMESA. La wilaya d'Adrar ambitionne de réaliser huit nouvelles centrales électriques à base des énergies renouvelables, pour une production globale de plus de 270 mégawatts [14]. Deux autres fermes éoliennes de 20MW chacune devraient être réalisées, des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1.7GW [15].

Pour alimenter en électricité les villes et les villages isolés, l'alternative d'utilisation et de développement de l'énergie éolienne s'avère rentable d'un point de vue économique.

Le gouvernement algérien a initié un programme de développement des régions sahariennes, dans le but de stabiliser les populations locales et ainsi satisfaire leurs demandes en électricité. Le potentiel éolien en Algérie, (figure II.5) diffère selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux. Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus

particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [15].

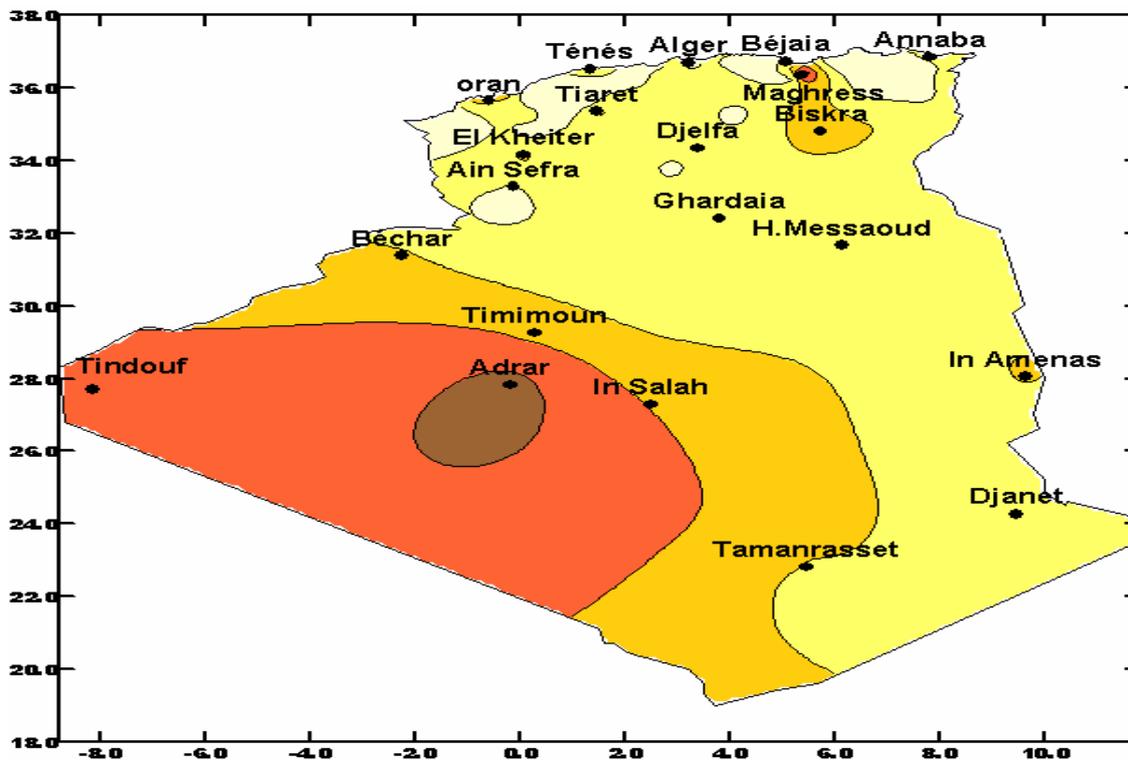


Figure I.5. Cartographie annuelle des vents (m/s) à 10m du sol [15].

III. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

1. Définition de l'énergie éolienne :

Le principe de production de l'énergie éolienne est assez simple. L'énergie cinétique générée par la force du vent est transmise à une turbine (aérogénérateur) ; cette force fait tourner les pales d'un rotor ; L'énergie mécanique produite est ainsi transformée en énergie électrique. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, 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) [16]. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable aux autres énergies sans pour autant prétendre les 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.

On peut classer ces éoliennes selon leur puissance nominale :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW.

2. Fonctionnement d'un système éolien :

Un aérogénérateur a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système est connu sous l'appellation anglaise Wind Energy Conversion Systems (WECS), (Figure I.6). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Pour parvenir à cet objectif, idéalement. Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet un contrôle mécanique (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système capable de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

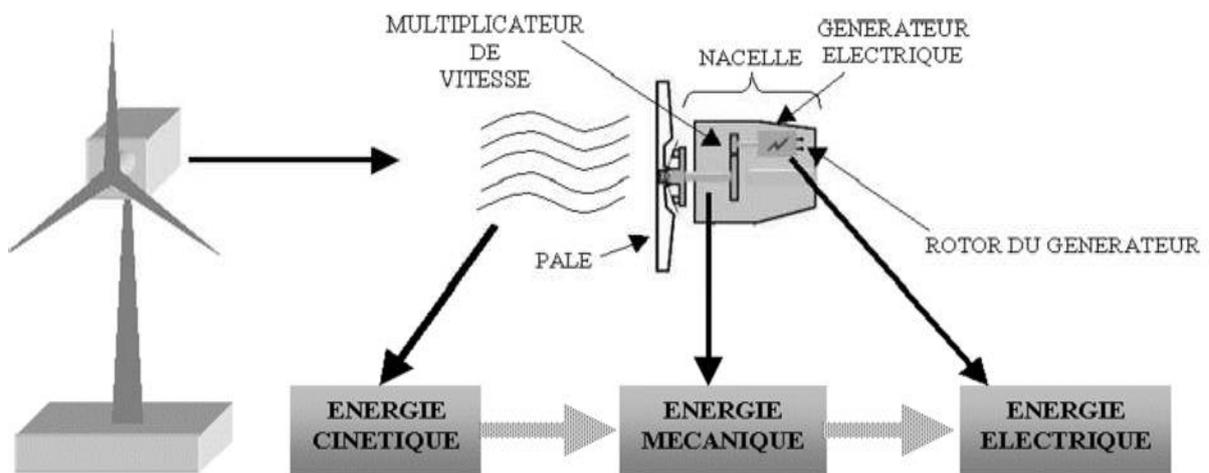


Figure I.6. Conversion de l'énergie cinétique du vent [17].

3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est conçue pour transformer l'énergie du vent en une énergie électrique. Plusieurs étapes sont nécessaires pour cette transformation [18] :

- Les pales sont fixées sur un moyeu, portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical, elles fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force

aérodynamique, la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique fera tourner le rotor.

- La vitesse de rotation des pales est relativement lente (5 à 15 tr/min), d'autant plus lente que l'éolienne est grande. Pour pouvoir produire de l'électricité, les générateurs ont besoin d'une vitesse (de 1000 à environ 3000 tr/min). Ce problème est réglé par l'installation d'un multiplicateur pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par. Quelques modèles d'éoliennes n'ont pas besoin du multiplicateur, elles sont équipées de machines synchrones (génératrices annulaires).
- Le rotor d'un générateur reçoit l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur, une énergie électrique est par conséquent produite. Dans les grandes éoliennes, la tension générée est d'environ 690 V.
- L'ensemble est fixé sur une nacelle. Un système d'orientation permet de guider la nacelle pour que les pâles soient toujours face au vent.
- L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis grâce à un transformateur sa tension est élevée à 20000 V. L'électricité est alors acheminée à travers un câble souterrain jusqu'au poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique.

Pour pouvoir produire de l'électricité par une éolienne, plusieurs paramètres sont à considérer :

- La longueur des pales : la puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande.
- La vitesse du vent : la puissance générée croît avec le cube de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8
- La densité de l'air : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid.

Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent (à hauteur de nacelle) généralement comprises entre 14 et 90 km / h. Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h (2,8 m/s), l'éolienne est arrêtée car la rentabilité est à un très bas niveau. Cela arrive que 15 à 20 % du temps. Entre 10 et 36 km/h (2,8 et 10 m/s), la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement. A partir de 36 km/h (10 m/s), l'éolienne approche sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production. A 45 km/h (12,5 m/s), l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h (25 m/s) ; à partir de cette vitesse, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. La probabilité d'apparition de vents violents reste néanmoins faible, pour cette raison on ne peut fabriquer ses machines pour produire à des vitesses de vents supérieures à 25 m/s, faute de rentabilité économique.

Une éolienne est équipée d'un système de freinage afin d'assurer l'arrêt rapide de la

machine et son immobilisation lors de la maintenance [19].

4. Différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

4.1. Eoliennes à axe vertical :

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

4.1.1. Éolienne de Savonius :

L'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre. Le vent se submerge dans l'un des demi-cylindres et le pousse, il continue sa course dans l'autre demi-cylindre, qu'il pousse à son tour. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur. En 1929, Sigurd Savonius (Finlande, 1884 - 1931) fut breveté pour ce système.

Les avantages de cette éolienne se résument sur :

- La possibilité d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, ils seront donc facilement accessibles,
- Il est possible de l'installer sur une toiture.
- Contrairement au système Darrieus, l'éolienne Savonius peut fonctionner même avec un vent faible, quelle que soit sa direction (Figure I.7) [20].

4.1.2. Éolienne de Darrieus :

Ce sont des éoliennes à variation cyclique d'incidence. La structure la plus répandue est celle de Darrieus. C'est une éolienne verticale qui produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différents types (hélicoïdal, H, cylindrique), et qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes. On trouve désormais des éoliennes à axe vertical développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont en effet des machines de faible puissance, elles sont destinées à des utilisations permanentes et peuvent être installées dans des zones très ventées (dépassant les 220 km/h). L'éolienne verticale type Darrieus émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place, on peut l'installer directement sur le toit ; de plus son générateur est facilement accessible puisqu'il est installé en bas, La vérification et l'entretien de celui-ci est à portée. La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité.

On peut toutefois citer quelques inconvénients des éoliennes à axe vertical Darrieus, tel qu'un faible rendement et un démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator.

4.2 Éoliennes à axe horizontal :

Les aérogénérateurs à axe horizontal ont été inspirés des moulins à vent. Cette technologie ancestrale est devenue largement dominante de nos jours, car la plupart des éoliennes commerciales et industrielles installées sont à axe horizontal. [21]

Leur principe de fonctionnement est similaire à celui des turbines hydrauliques : la puissance mécanique du vent fait tourner des pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ; ces pales sont couplées à un rotor, ce qui va générer un couple moteur entraînant sa rotation.

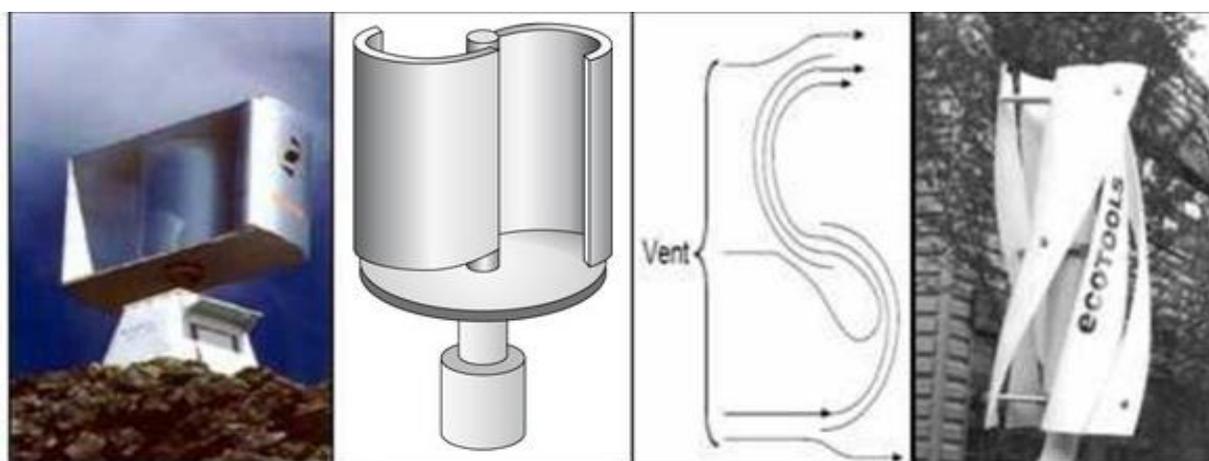


Figure I.7. Éoliennes de Savonius [20]

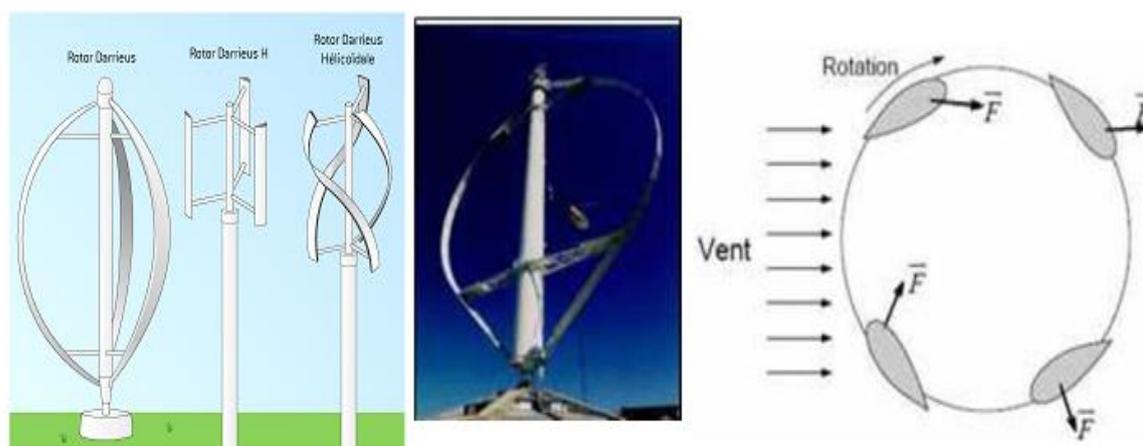


Figure I.8 : Éolienne de Darrieus [20]

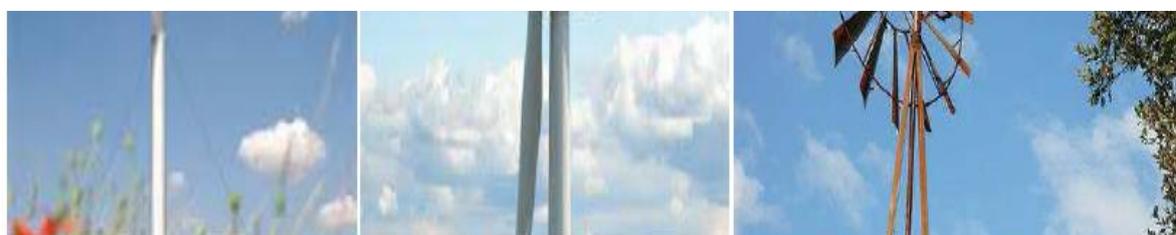


Figure I.9. Éoliennes à axe horizontal [20]

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Le tableau I.1 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

| <i>Echelle</i> | <i>Diamètre de l'hélice</i> | <i>Puissance délivrée</i> |
|----------------|-----------------------------|---------------------------|
| <i>Petite</i> | <i>Moins de 12 m</i> | <i>Moins de 40 KW</i> |
| <i>Moyenne</i> | <i>12 à 45 m</i> | <i>40 à 1 MW</i> |
| <i>Grande</i> | <i>46 m et plus</i> | <i>1 MW et plus</i> |

Tableau I.1 : Classification des turbines [20]

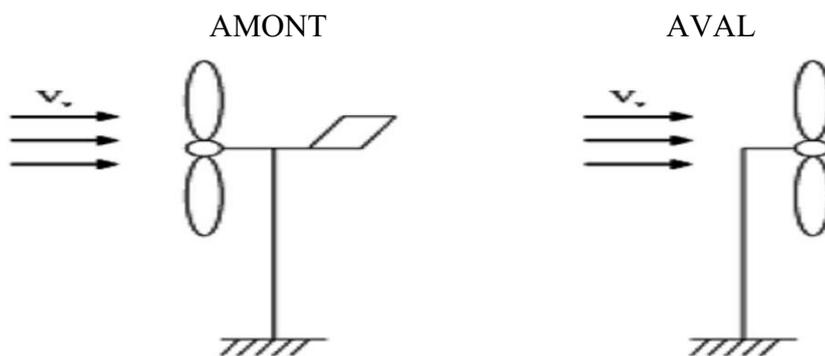


Figure I.10. Type de montage de la voilure



Ferme Onshore Parc Offshore
Figure I.11. Exemples d'éoliennes [22]

5. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

Tous les éléments constituant une éolienne sont représentés sur la figure I.12 [20]. On peut classer une éolienne en plusieurs éléments principaux :

5.1. La tour(ou le mât):

La tour sert de support à la nacelle et au rotor, elle permet à l'éolienne d'avoir une hauteur où la vitesse moyenne du vent est plus élevée et plus constante qu'au sol. Elle peut être tubulaire (tube en béton ou en acier) ou en treillis (voir Fig. I.13). La première structure offre plusieurs avantages : les oiseaux la voient de loin et la définissent comme quelque chose à éviter ; ils ne peuvent pas y faire de nid. La nuisance sonore est presque éliminée pour une tour en tubulaire.

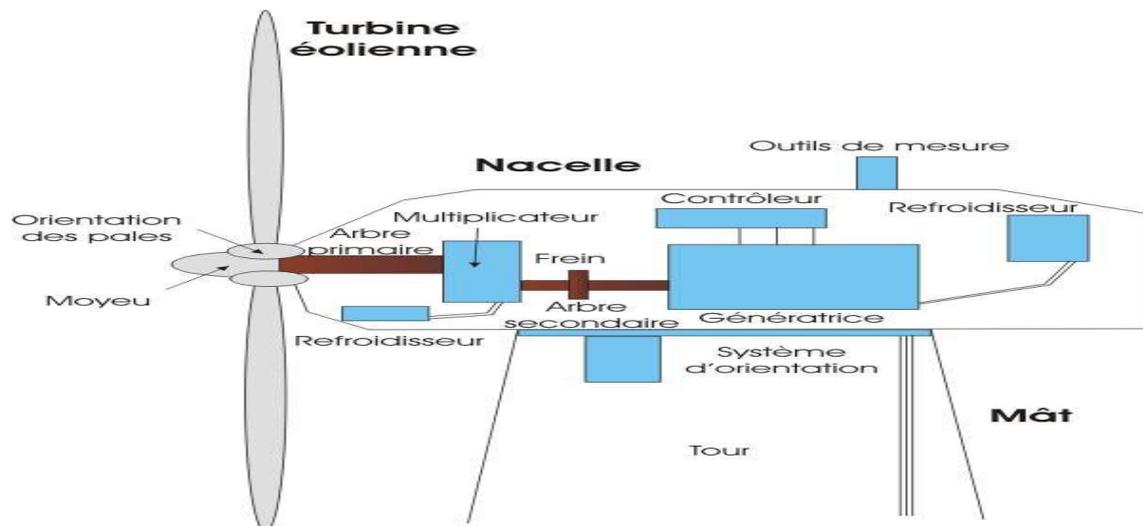


Figure I.12 : Différentes parties d'une éolienne [25]

5.2. La nacelle :

La nacelle est placée au sommet de la tour, elle regroupe tous les éléments électroniques et mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disques, différent du frein aérodynamique (permettant d'arrêter le système en cas de surcharge), le générateur et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) ; à cela vient s'ajouter le système de refroidissement, enfin un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. La girouette et les pales (rotor) tenues par la nacelle sont à l'extérieur.

Dans les éoliennes modernes et de grandes puissances, le chargé de la maintenance peut se tenir debout dans la nacelle.



a) Tour tubulaire b) Tour en treillis

Figure I.13. Tour d'un aérogénérateur

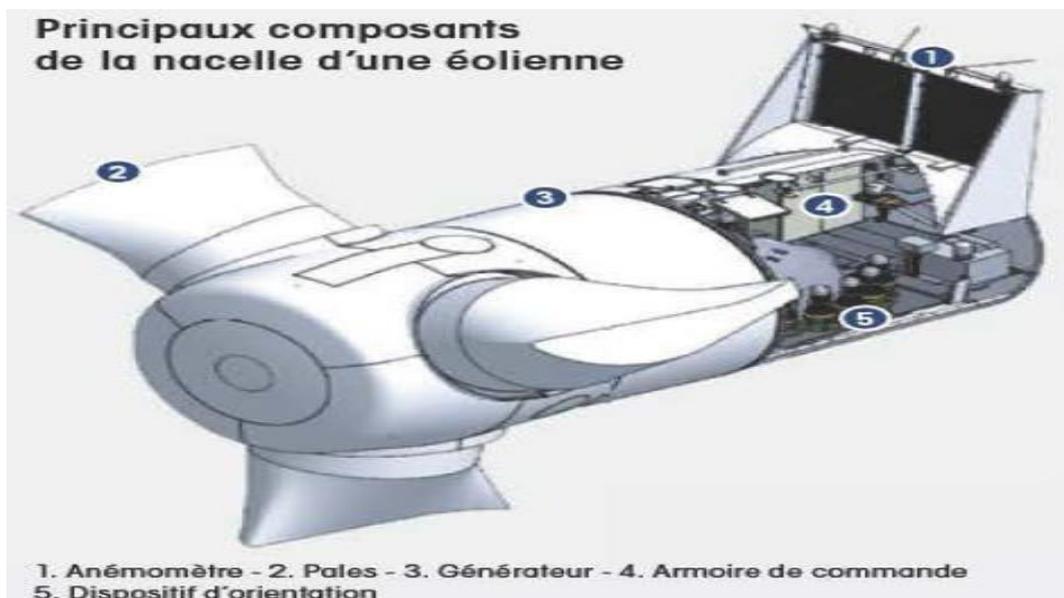


Figure I.14. Constituants principaux d'une nacelle [23]

5.3. Le rotor :

Le rotor est composé des pales et du moyeu. Cet ensemble assure la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui sera transmise au reste de l'éolienne via l'arbre lent. Le moyeu est la pièce qui reçoit les pales. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. Les pales sont

montées sur l'axe du moyeu et servent à capter la puissance du vent. Leur profil ressemble à celui d'une aile d'avion. En général sur les éoliennes modernes le rotor tripale (concept danois) est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [24].

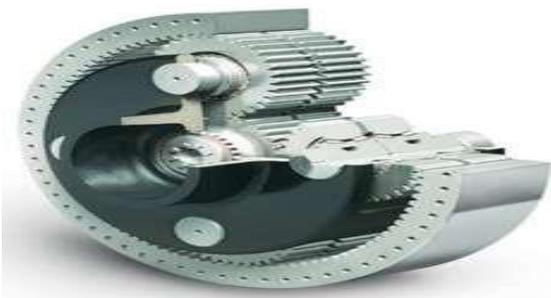
Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface de régulation électronique entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone et matériaux composites, sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.

5.4. Le multiplicateur :

Les vitesses de rotation des rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m sont trop faibles pour pouvoir entraîner directement un générateur ; un multiplicateur (boîte à vitesses) serait indispensable pour pouvoir accroître la vitesse entre l'aéromoteur et l'alternateur.

Il existe plusieurs types de multiplicateurs pouvant être utilisés :



a)



b)



c)



d)

Figure I.15. a) et b) Le multiplicateur ; c) Vérification du frein à disque de l'arbre rapide ; d) Remplacement de la boîte de vitesse[25].

- Un multiplicateur à engrenages ayant un ou plusieurs trains de roues cylindriques dentées ; cette réalisation étant économique mais tout de même encombrante pour un rapport de multiplication élevé.
- Un multiplicateur à trains planétaires, celui-ci permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Un réducteur à couple conique où l'arbre de sortie est perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

L'arbre rapide est muni d'un frein à disque, utilisé uniquement qu'en cas d'extrême urgence. La génératrice reçoit l'arbre rapide afin de transformer son énergie mécanique en énergie électrique.

5.5. La génératrice :

Les génératrices utilisées dans les éoliennes, permettent de transformer l'énergie mécanique présente dans l'arbre rapide qui est accouplé au rotor, en énergie électrique. Différentes technologies des générateurs peuvent être utilisées :

- Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil « GAS »,
- Les générateurs synchrones à rotor bobiné « GSRB »,
- Les générateurs synchrones à aimants permanents « GSAP »,
- Les générateurs asynchrones à rotor bobiné à double alimentation « GADA ».

5.6. Le système de contrôle-commande (Le contrôleur électronique) :

Le contrôleur électronique est considéré comme le cerveau de l'éolienne, il gère tous les paramètres (de 100 à 500) ; un ordinateur surveille en permanence l'état de l'éolienne et enregistre chaque changement. Si un défaut surgit, le système stoppe immédiatement l'éolienne, un signal de défaut est transmis à l'opérateur. Le contrôleur électronique est aussi chargé de gérer :

- Le système d'orientation des pales, et de la nacelle qui à travers une couronne dentée entraînée par des moteurs électriques permet de l'orienter face au vent, et de la
- Verrouiller en cas d'un vent très fort grâce à un frein.
- Le système de refroidissement qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile ou à eau froide pour le multiplicateur.
- Une armoire de commande qui comporte tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle ; ainsi que les appareils de protection et de mesure.

- le système de mesure (anémomètre, girouette), ces deux capteurs mesurent successivement la vitesse et la direction du vent ; les signaux mesurés sont aussitôt envoyés au système de contrôle, qui arrête l'éolienne aux limites d'un vent trop faible ou quand il est très fort.



Figure I.16. Moteurs d'orientation d'une nacelle [25].



Figure I.17. Cabine de dispersion située au pied de la tour [25].



Figure I.16 : les moteur d'orientation des nacelle

5.7. La cabine de dispersion :

Elle est située au pied du mat ; cette cabine abrite un transformateur BT/HT pour connecter l'éolienne au réseau. Pour les grandes éoliennes l'armoire de commande peut se situer sur la cabine de dispersion.

IV. Contrôle des puissances d'une turbine éolienne :

Une éolienne industrielle se doit d'être protégée contre les vents forts afin de délimiter la puissance fournie, et de ne pas dépasser une puissance nominale P_n . Au-delà d'une vitesse de vent nominale v_n , les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m au risque d'endommager la turbine. Quatre zones de fonctionnement sont donc à définir [26] :

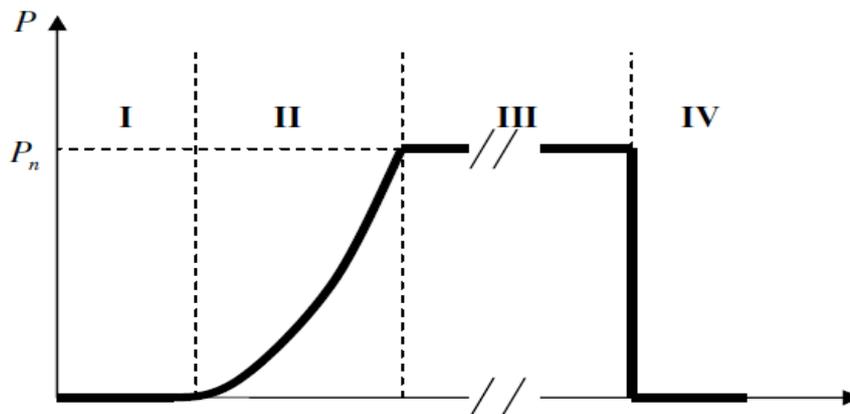


Figure I.17 : caractéristique puissance /vitesse de vent d'une éolien

- ❖ **Zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine, l'éolienne est à l'arrêt.
- ❖ **Zone II** : Pour des vitesses moyennes, le système de contrôle de l'aérogénérateur intervient pour contrôler la puissance électrique à générer.
- ❖ **Zone III** : La vitesse du vent devient progressivement très élevée, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale P_n , par le dispositif de régulation.
- ❖ **Zone IV** : la vitesse de vent est trop importante, elle dépasse la valeur maximale admissible par l'éolienne v_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$) ; au risque d'endommagement du système turbine-générateur, la turbine s'arrête et la puissance générée sera nulle.

1. Action du vent sur une pale :

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface des pales (Figure I.20)[27].

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation) β .
- Extrados : dessus des pales.
- Intrados : dessous des pales.

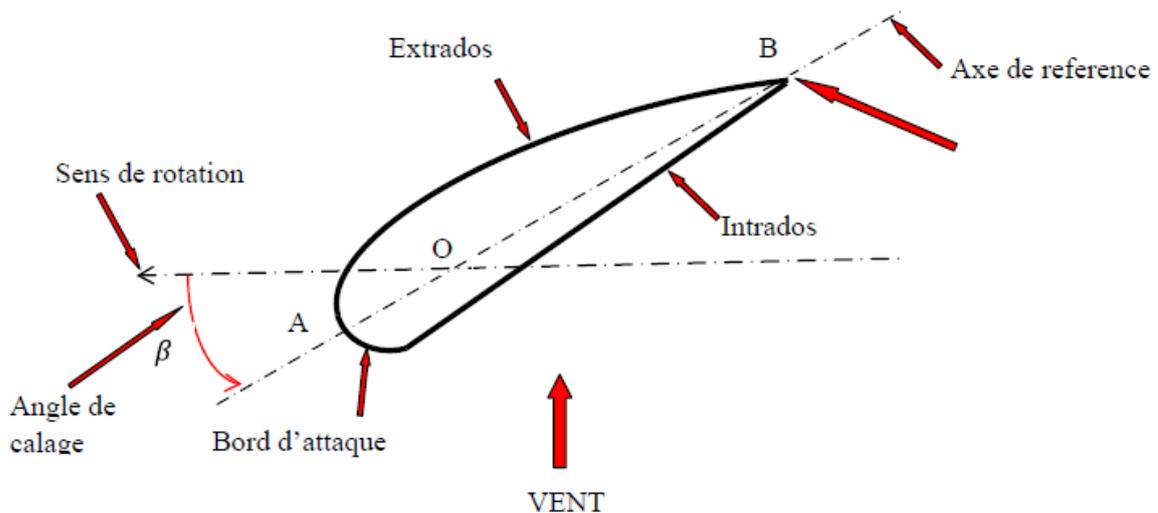


Figure I.18 : élément caractéristique d'une pale

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis [27].

La résultante du vent (apparent) : $\vec{W} = \vec{U} + \vec{V}$ (I.1)

La vitesse du vent apparent \vec{W} fait un angle d'attaque ψ avec le plan de rotation. Cet angle vaut :

$$\psi = \tan^{-1} \frac{V}{U} \quad (\text{I.2})$$

On introduit un angle dit d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent : $\alpha = \psi - \beta$ (I.3)

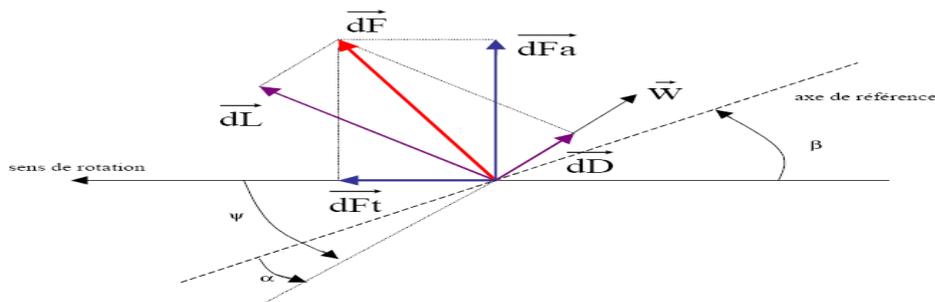


Figure I.21. Forces appliquées sur un tronçon de pale [27]

On peut décomposer la force résultante $d\vec{F}$ de la manière suivante :

- La portance $d\vec{L}$, normale à la direction du vent apparent.
- La force de traînée $d\vec{D}$, parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- La poussée axiale $d\vec{F}_a$, perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle $d\vec{F}_t$, dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée :

$$\begin{cases} dF_t = dL \cdot \sin\psi - dD \cdot \cos\psi \\ dF_a = dD \cdot \sin\psi + dL \cdot \cos\psi \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

C'est le couple résultant des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces dL et dD sont données par :

$$\begin{cases} dL = \frac{1}{2} \rho w^2 \cdot dA C_L \\ dD = \frac{1}{2} \rho w^2 \cdot dA C_D \end{cases} \quad \text{Avec : (I.5)}$$

- dA : Surface du « tronçon » de la pale.
- C_L : Coefficient de portance (sans dimension)
- C_D : Coefficient de traînée (sans dimension)
- w : Module du vent apparent

Les coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α . Pour des angles faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance ; c'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmentera jusqu'au point où l'écoulement deviendra turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles d'incidence importants.

2. Contrôle de la puissance captée par la turbine :

Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance des pales qui dépend principalement de l'angle d'incidence. Le réglage de la puissance va donc se faire par action sur α .

Trois méthodes de contrôle des pales sont décrites ci-dessous. Elles servent principalement à limiter la puissance captée au moment où les vents sont très forts [28].

2.1 Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall ») :

L'angle de calage β est fixe, l'angle d'incidence augmente naturellement avec la vitesse du vent incident pour une vitesse mécanique pratiquement constante. Cette augmentation provoque l'augmentation de la traînée (coefficient C_p) et par suite un décrochage progressif de la pale, le couple est maintenu à peu près constant jusqu'au décrochage (chute brutale de C_L et augmentation importante de C_D) où il chute rapidement. La puissance est donc bien limitée.

De par sa simplicité et l'absence de tout système électrique ou mécanique, ce système montre des insuffisances :

- la puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation.
- Nécessité de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage, même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine lui-même (couple de freinage très élevé) [29].

2.2 Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« active stall » ou « combi stall ») :

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3 à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total où il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Parmi les avantages de ce système :

- Possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation.
- les actionneurs, électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite,
- les mouvements de rotation des pales restant de faible amplitude,

Comme inconvénients, on peut citer :

- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine.
- Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite des contacts glissants (bagues/charbons) sujets à l'usure et nécessitant un entretien [29].

2.3 Contrôle par angle de calage variable (Pitch control)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch control".

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis,

pour les fortes vitesses de vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position " en drapeau " à la vitesse maximale.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants :

- Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sûr en dessous de la limite de sécurité).
- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

Ce système présente néanmoins des inconvénients :

- Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent.
- L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien [29].

V. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne:

1. Les systèmes à vitesse fixe :

Les premiers modèles d'éoliennes commercialisées ont été équipées d'une machine asynchrone à cage couplée directement au réseau électrique (Fig. I.6) ; qui est entraînée par un multiplicateur à une vitesse qui sera maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales.

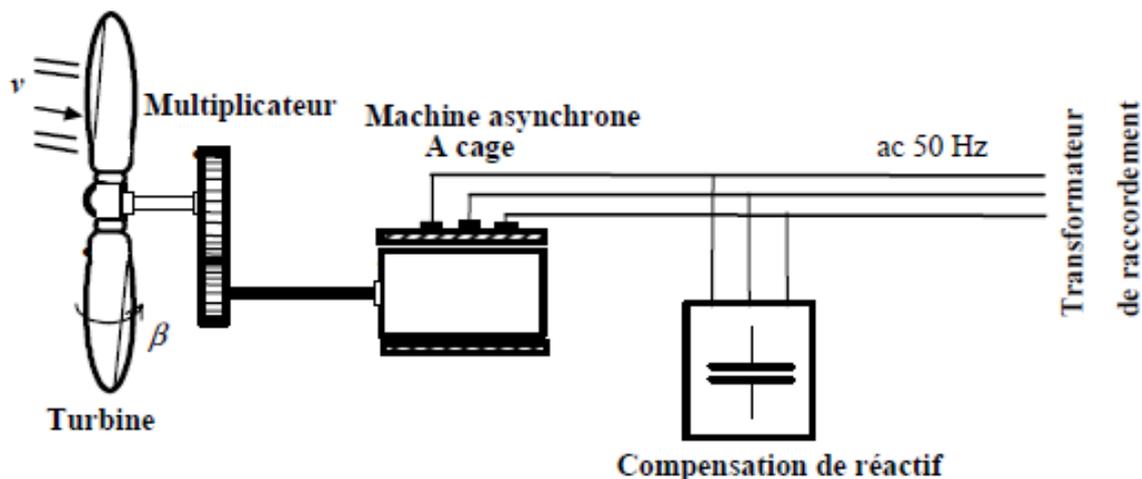


Figure I.22. Eolienne à vitesse fixe [30].

Aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines des parties de ces turbines éoliennes se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes [30]. On pourra en conséquence observer une sérieuse variation de la puissance électrique générée, en présence de rafales de vent. Les possibilités de réglages de la puissance générée par ce type d'éoliennes resteront toutefois quasiment impossibles.

Pour pallier au problème de vents violents, Certaines modèles sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales dit « Stall control ». L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. La structure de ces éoliennes demeure ainsi plus simple, et présente des inconvénients tels que : [31].

- La nécessité d'un dispositif consommateur d'énergie réactive à la magnétisation de la machine asynchrone,
- La présence de bruyance, à cause de la modification du système d'orientation des pales,
- Les variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau,
- L'impossibilité de réglage de la puissance générée.

2. Les systèmes à vitesse variable

IV.3.2.1. Système basé sur les machines asynchrones

Il existe plusieurs variantes d'éoliennes à vitesse variable, La configuration de la figure (Fig. I.23.a) est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La machine est couplée à la turbine via un multiplicateur, sa vitesse de rotation est maintenue constante grâce au système mécanique d'orientation des pales.

IV.3.2.2. Système basé sur les machines synchrones :

Il existe deux possibilités de coupler la machine synchrone à la turbine :

- **Couplage direct** (Fig. 1.23.b) :

Certains constructeurs se sont spécialisés dans la réalisation d'éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné couplées directement à la turbine, et ayant un grand nombre de paires de pôles, L'avantage de ce système étant d'éviter l'installation du multiplicateur, source de bruit. L'inconvénient d'utilisation des bagues et de balais serait exclu, si la génératrice était à aimants permanents. L'ennui de cette structure, est qu'elle nécessite pour une connexion au réseau des convertisseurs de puissance doivent être

dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

- **Couplage via un multiplicateur** (Fig. I.23.c) :

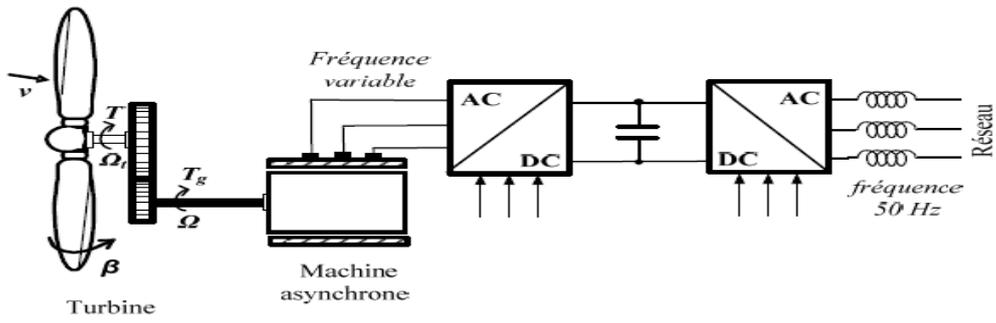
On trouve également chez certains constructeurs des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent généralement sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la Figure I.22.c.

- **Système basé sur les machines asynchrones doublement alimentées :**

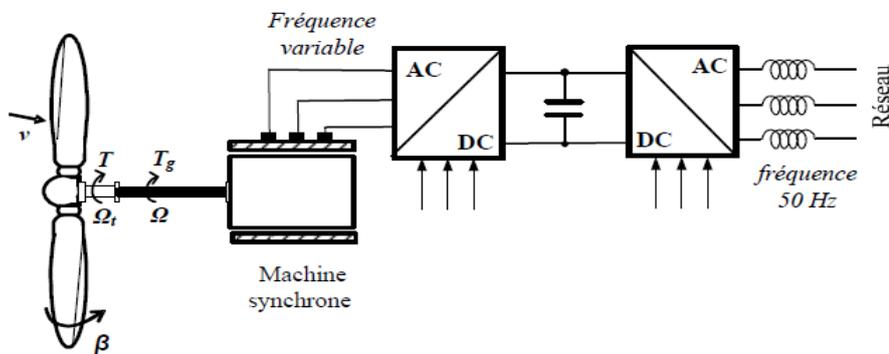
Une des configurations qui se développe dans le marché des turbines éoliennes est sans doute la machine asynchrone doublement alimentée, utilisée en génératrice (GADA). Le stator est relié directement au réseau, tandis que le rotor est connecté via un convertisseur de tension en « back-to-back », utilisé comme variateur de fréquence. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure I.23.d).

Les avantages de cette configuration sont :

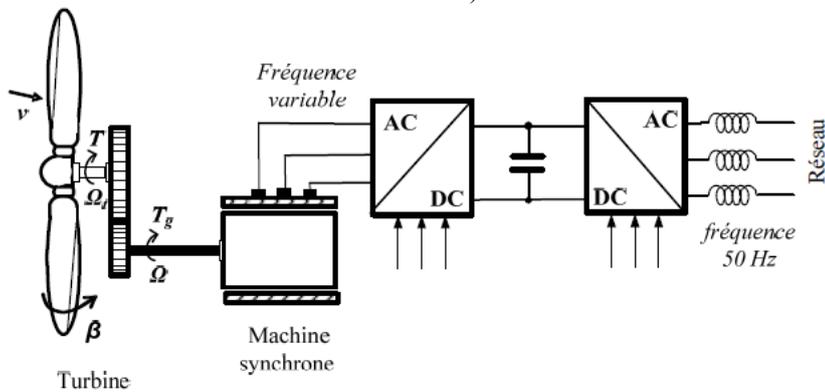
- Aptitude de réguler la puissance réactive, par conséquent un découplage de la commande des puissances active et réactive peut se réaliser.
- Magnétisation à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux,



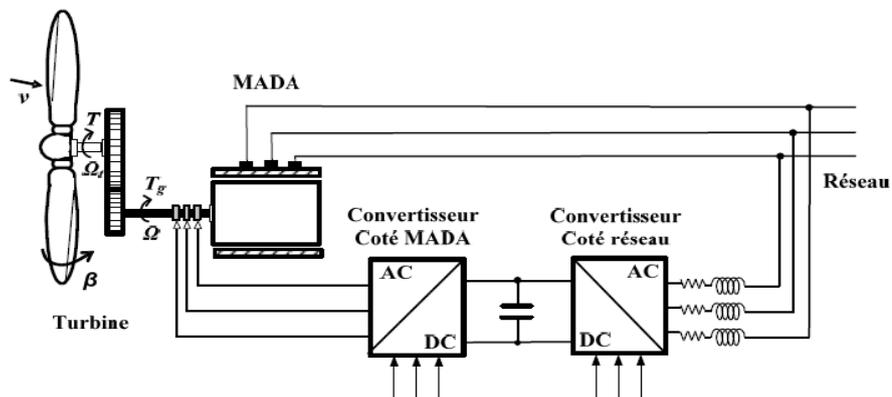
a) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.



b) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.
c)



d) Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.
e)



f) Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.
g)

Figure I.23. Différentes configurations d'éoliennes à vitesse de vent variable [30,31]

VI. Modèle aérodynamique :

1. Modèle du vent :

Le vent est l'énergie source de l'aérogénérateur, c'est la variable d'entrée du système éolien. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine. Le vecteur de vitesse évolue dans les plans horizontaux, alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \quad (\text{I.6})$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne et une somme de plusieurs harmoniques [27], [37]:

$$V_v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^i (a_i \sin(w_i t + \varphi_i)) \quad \text{où : } (\text{I.7})$$

a_i, w_i, φ_i : sont respectivement l'amplitude, la pulsation et phase initiale de chaque harmonique

2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté dans la figure (I.24), sur lequel on a représenté respectivement les vitesses du vent v_1 en amont et v_2 en aval de l'aérogénérateur. L'énergie cinétique d'une particule de masse m dans l'air qui se déplace avec une vitesse v est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 (\text{I.8})$$

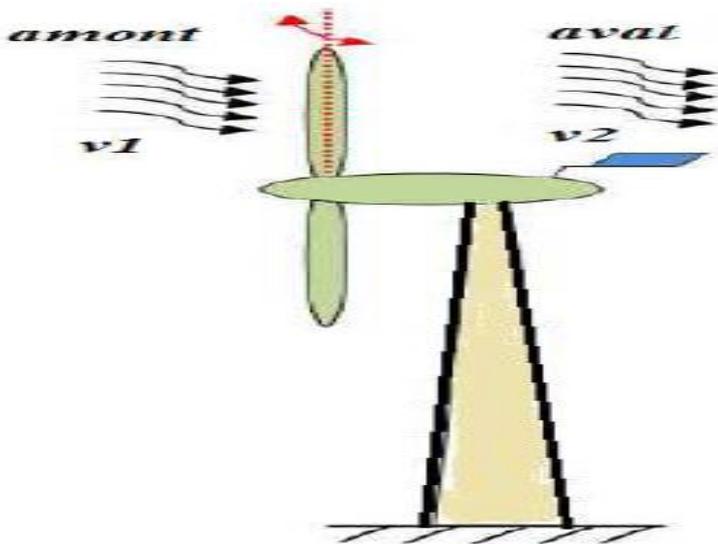


Figure I.24. Schéma simplifié d'une éolienne.

A partir de la définition mécanique d'une masse ; on sait que la densité d'un tel matériel est multipliée par son volume ce qui donne :

$$m = \rho \cdot V \text{ avec } \rho = 1,225 \text{ kg/m}^3 \text{ masse volumique de l'air (I.9)}$$

On dérive par rapport au temps, on obtient:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot S \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot S \cdot v \text{ (I.10)}$$

Sachant que le volume est obtenu en multipliant la surface par la longueur x , et en considérant seulement une seule dimension car la quantité d'air varie le long d'un seul axe, on aura :

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \text{ (I.11)}$$

Si on suppose que la vitesse du vent est constante, la puissance du mouvement d'air sera donnée par :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2}m \cdot v^2)}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \text{ (I.12)}$$

On remplace \dot{m} par sa valeur dans l'équation (I.11), la puissance du vent sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \text{ (I.13)}$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = P_{vent1} - P_{vent2} = \frac{1}{2} (\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1^3 - \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2^3) \text{ (I.14)}$$

Selon la loi de conservation de la masse, la quantité de masse d'air avant et après contact avec la turbine reste constante:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \text{ (I.15)}$$

La masse volumique de l'air étant constante, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ on trouve donc :

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \text{ (I.16)}$$

L'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur sera donnée par :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho (S_1 \cdot v_1^3 - S_2 \cdot v_2^3) = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1^2 - v_2^2) \text{ (I.17)}$$

Et selon la deuxième loi de Newton :

$$F = \frac{d}{dt} (m \cdot v) = \frac{dm}{dt} \cdot v + m \cdot \frac{dv}{dt} \text{ (I.18)}$$

Lorsqu'on considère la vitesse constante, on obtient la relation suivante de la force exercée :

$$F = \dot{m} \cdot v \text{ (I.19)}$$

On remplace (\dot{m}) de l'équation (I.11) on trouve:

$$F = \rho \cdot S \cdot v^2 \text{ (I.20)}$$

La variation de la force entre les deux côtés de l'aérogénérateur est exprimée par la relation suivante :

$$P_{aero} = \Delta F \cdot v = (\dot{m}_1 v_1 - \dot{m}_2 v_2) \cdot v \text{ (I.21)}$$

On remplace \dot{m} par sa valeur, on obtient la relation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 (v_1 - v_2) \cdot v \quad (\text{I.22})$$

On remarque que la relation de la puissance est définie par la vitesse du vent avant et après la turbine et une vitesse du vent v au bord de l'hélice. Pour déterminer la valeur de cette dernière, on compare entre les deux relations de la puissance absorbée par l'aérogénérateur c'est-à-dire (I.22) et (I.17), on trouve :

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (\text{I.23})$$

On considère le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.25) sur lequel on a représenté la vitesse du vent v_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval ; v est la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, S_1 et S_2 sont les sections en amont et en aval du tube d'air et S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{I.24})$$

En remplaçant l'expression de v (I.23) dans la relation (I.24) ; on obtient :

$$P_t \cong P_{aero} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{I.25})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit la vitesse v_1 , la puissance P_{vent} correspondante serait alors :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad (\text{I.26})$$

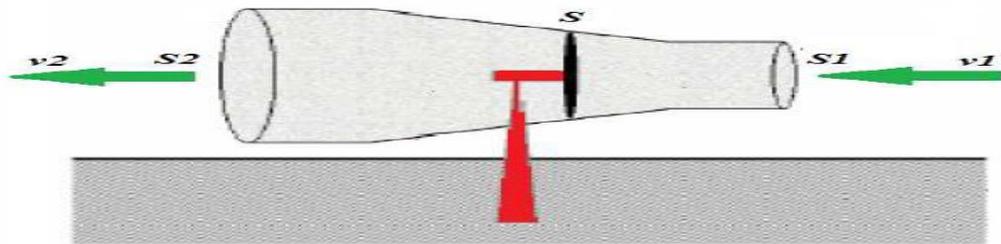


Figure I.25. Tube de courant autour d'une éolienne.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est défini comme étant le coefficient de puissance, il a pour valeur :

$$C_p = \frac{P_t}{P_{vent}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (\text{I.27})$$

λ est définie comme étant la vitesse spécifique relative tel que :

$$\lambda = \frac{v_2}{v_1} = \frac{r \cdot \Omega_t}{v_1} \quad (\text{I.28})$$

Avec : r : rayon de la turbine, et Ω_t : vitesse angulaire de rotation de la turbine, Alors :

$$P_t = C_p \cdot P_{vent} \cong P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{I.29})$$

C'est exactement la puissance absorbée par l'aérogénérateur. Le couple mécanique est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} C_p = \frac{1}{2} \frac{C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3}{\Omega_t} \quad (\text{I.30})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, qui n'est jamais atteinte en pratique ; en effet la vitesse des masses d'air derrière l'aéromoteur n'est pas nulle, une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e . L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation (I.27). A partir de l'équation (I.24), et en définissant la puissance disponible maximale P_{e-max} ; on montre que :

$$P_{e-max} \leftrightarrow \frac{dP_e}{dv_2} = 0 \rightarrow v_1 = 3 \cdot v_2 \rightarrow P_{e-max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad (\text{I.31})$$

Cette relation constitue la formule de Betz. La valeur maximale du coefficient de puissance est :

$$C_{p-max} = \frac{P_{e-max}}{P_e} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{I.32})$$

59% au maximum de la puissance reçue sera disponible ; Le maximum de prélèvement d'énergie, dépendra des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion, ne dépassera jamais cette limite.

Chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique relative λ qui représente les performances aérodynamiques de cette éolienne [20].

Le rendement aérodynamique η_a traduit la qualité aérodynamique de l'éolienne dans les meilleures conditions de réglage, on l'exprime par :

$$\eta_a = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{C_{p-max}} \quad (\text{I.33})$$

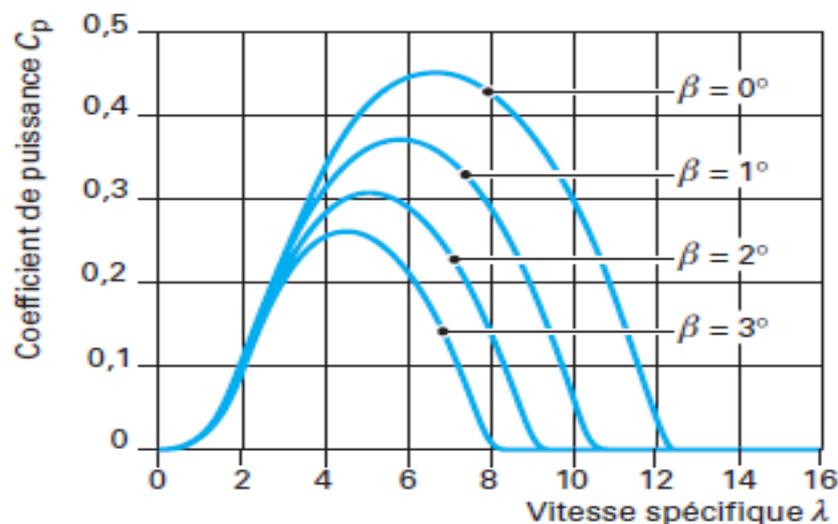


Figure I.26. Paramétrage une éolienne tripale pour différentes valeurs β [33]

3. Stratégies de MPPT pour une éolienne :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche. La puissance capturée par une turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , qui dépend fortement de la vitesse de la génératrice.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice.

Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (MPPT) peut être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles [22], [34], [35]:

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue ;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

4.1 Maximisation de la puissance sans connaissance de la caractéristique C_p :

En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance et de vitesse.

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Le système doit trouver pour chaque vitesse de vent, la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure I-27 illustre les courbes caractéristiques de la puissance l'éolienne en fonction de différentes vitesses de rotation de la turbine.

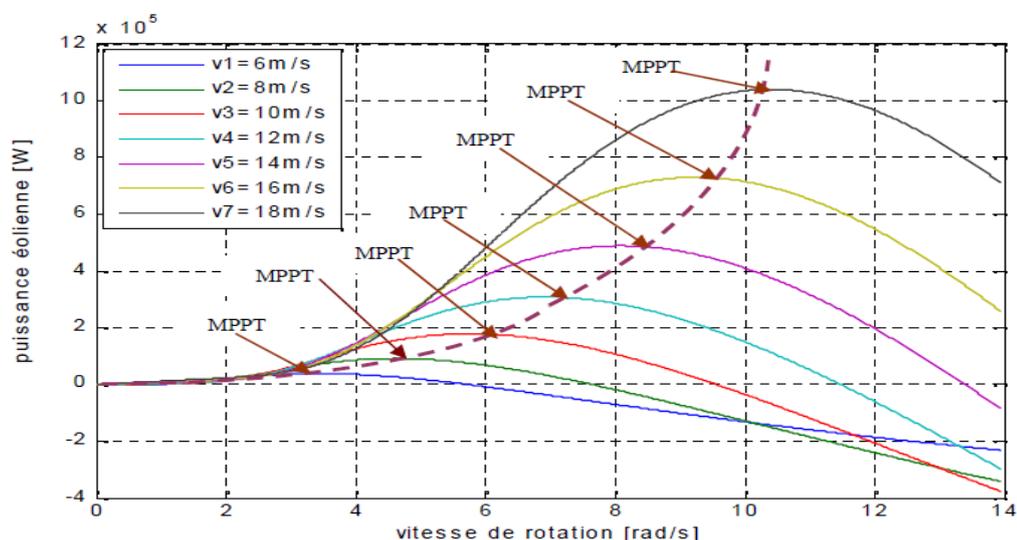


Figure I.27. Caractéristiques d'une éolienne en fonction de la vitesse de vent

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques qui sont les points optimaux recherchés, conduisent à une courbe (en pointillé) dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{I.34})$$

4.2 Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp :

Une autre façon de procéder consiste en une recherche du point maximal de puissances connaissant la courbe caractéristique Cp. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples de vitesse de rotation, sans (ou avec) l'obligation d'utilisation des capteurs de vitesse du vent [22], [34]. CES techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence [29] :

- Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.

4.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse :

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser pour deux raisons :

- L'anémomètre étant situé derrière la turbine, les perturbations à ce niveau de la nacelle causent des erreurs de lecture de la vitesse du vent.
- Etant donné le grand diamètre de la surface balayée par les pales (70 m pour les éoliennes de 1.5 MW), l'utilisation d'un seul anémomètre conduit à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une fausse mesure de la vitesse conduit donc à imposer une consigne non adaptée d'où une dégradation de la puissance captée.

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur on obtient [35] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = 0 = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{I.35})$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul.

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux $C_f = 0$, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (\text{I.36})$$

Le couple électromagnétique de référence est donc estimé à partir du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{I.37})$$

Le couple éolien peut être estimé à partir de la vitesse du vent et de la vitesse de la turbine :

$$C_{aer-estimé} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v_{estimé}^3}{2 \cdot \Omega_t} \quad (\text{I.38})$$

Lavitesse de la turbine $\Omega_{t-estimé}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{t-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{I.39})$$

La mesure de la vitesse du vent étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$v_{estimé} = \frac{R \cdot \Omega_{t-estimé}}{\lambda} \quad (\text{I.40})$$

On obtient donc une relation globale de contrôle :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2}{2 \cdot \lambda^3 \cdot G^3} \quad (\text{I.41})$$

Pour extraire le maximum de puissance générée, il faut fixer le rapport d'avance à λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad (\text{I.42})$$

A partir de la valeur référence du couple électromagnétique, il est aisé de déterminer la valeur de la puissance électromagnétique de réglage :

$$P_{em-ref} = C_{em-ref} \cdot \Omega_{mec} = \frac{C_{p-max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot G^3} \quad (\text{I.43})$$

Il est à noter que l'expression de la puissance électromagnétique de référence est proportionnelle au cube de la vitesse de génératrice. La représentation sous forme de schéma blocs du dispositif de commande est illustrée dans la figure (I.28) [36].

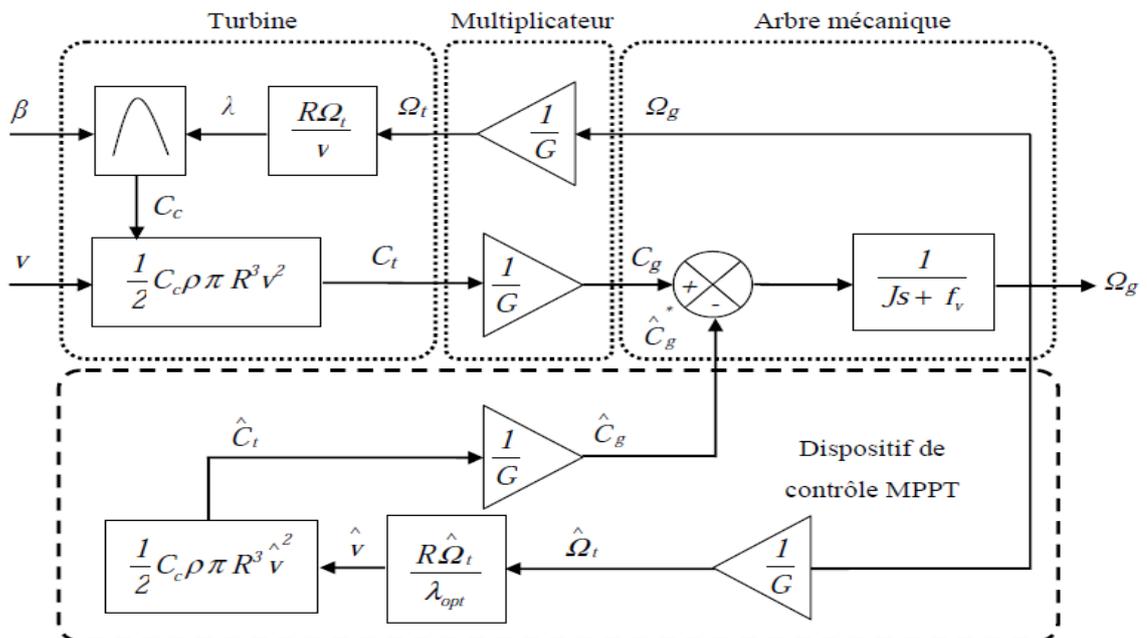


Figure I.28. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse

4.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

Cette stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique de la génératrice de manière à fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), la puissance mécanique est maximale si la valeur maximale du coefficient C_p est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} . Par conséquent, la vitesse de rotation de référence de la MADA Ω_{g-ref} est obtenue à partir de l'équation (2.18) comme suit :

$$\Omega_{g-ref} = G \cdot \Omega_{t-ref} = G \cdot \frac{v \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (I.44)$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'avoir une vitesse de rotation de référence Ω_{g-ref} obtenue en sortie d'un régulateur de vitesse de type proportionnel-intégral (PI) ; qui va permettre d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la MADA C_{mec} considéré comme une perturbation. Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure I.29 [30], [36].

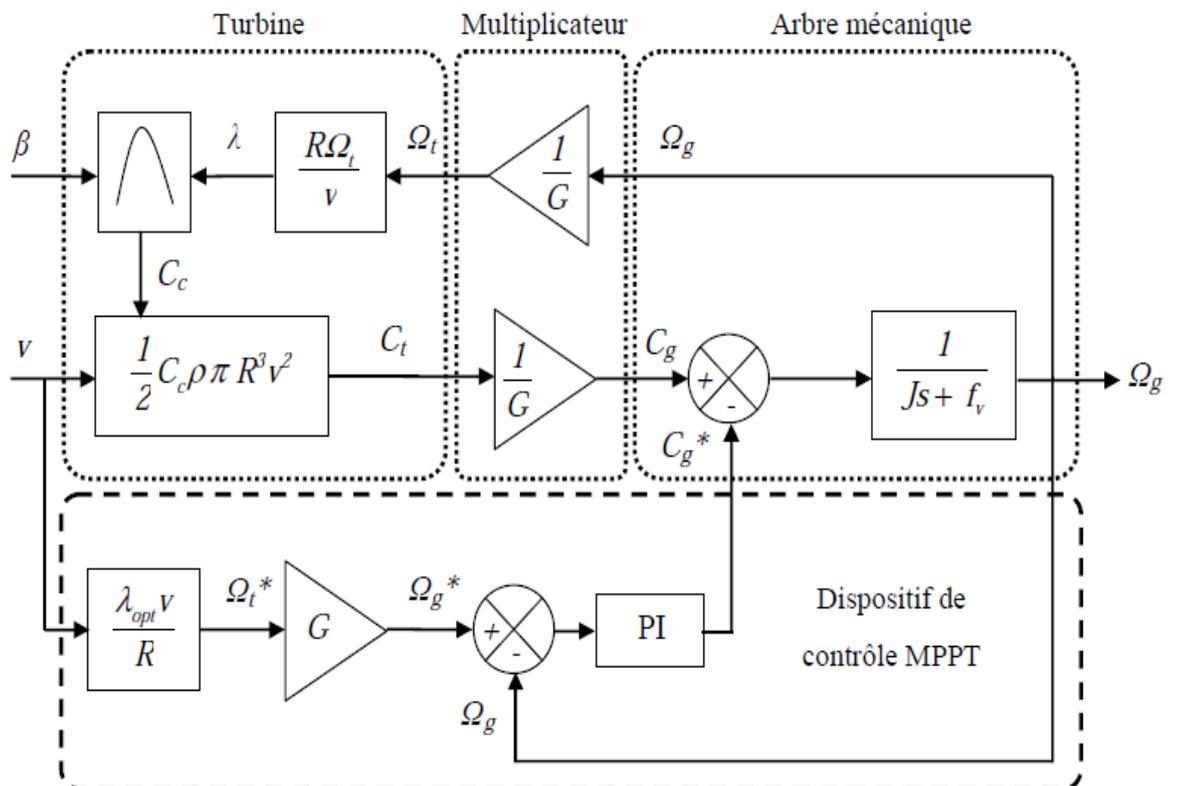


Figure I.29. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse

5. Modélisation du système éolien :

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Les facteurs déterminant la puissance mécanique, sont la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Ce système peut être représenté sur la figure (I.30), il comporte :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :
 - la même inertie J_{pale}
 - la même élasticité K_b
 - le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement f_{pale} par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\beta_{b1}, \beta_{b2}, \beta_{b3}$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [23].

- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par : son inertie (J_h), son élasticité (K_h) et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur (D_h). Le rotor de la génératrice possède aussi son inertie (J_g), et son coefficient de frottement par rapport à l'air (d_g) ; ce rotor transmet un couple (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

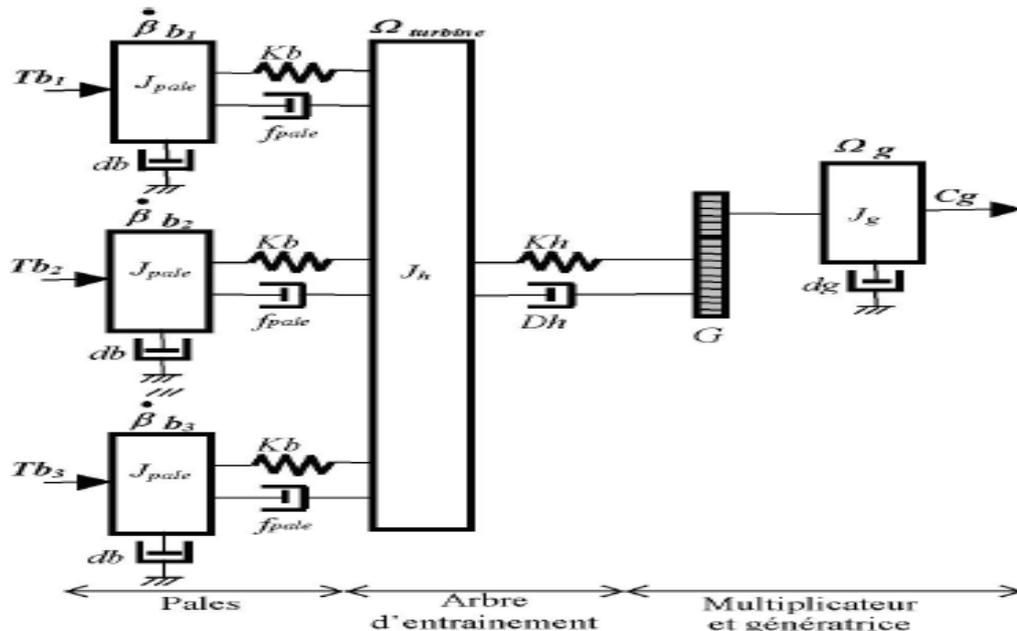


Figure I.30. Représentation du système mécanique de l'éolienne [18].

5.1 Modèle de la turbine :

On peut simplifier le schéma de la figure I.30, si l'on considère les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$), puisque qu'on a une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales. L'ensemble des trois pales peut être simplifié comme un seul système. Le coefficient de frottement des pales, (d_B) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique simplifiée (figure I.31) [18].

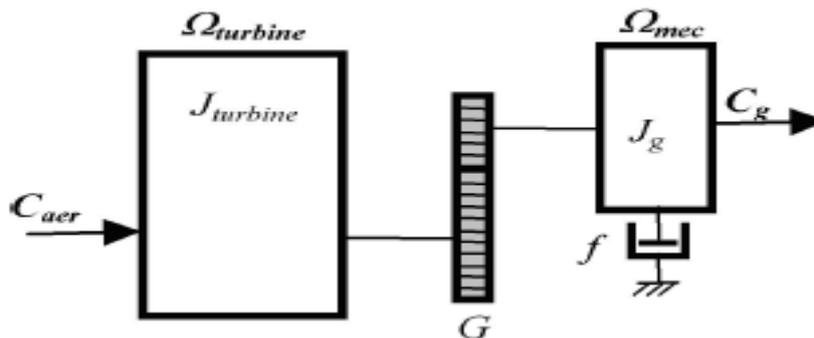


Figure I.31. Modèle mécanique simplifié de la turbine [23].

5.2 Modèle du multiplicateur :

L'aérogénérateur tourne généralement à une vitesse nominale. Le multiplicateur a pour rôle d'ajuster cette vitesse à celle du générateur électrique à travers un coefficient appelé le gain G [18].

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (\text{I.45})$$

Ω_{mec} Représente vitesse angulaire de rotation du générateur, toutefois le gain peut s'exprimer en fonction de :

$$G = \frac{C_{mec}}{C_t} \quad (\text{I.46})$$

Où C_{mec} est le Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m)

5.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission :

D'après la figure (I.31), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique du générateur (modèle de l'arbre) par [24] :

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_T \\ \text{Transformée de Laplace} \rightarrow \Omega_{mec}(s) = J \frac{1}{Js+f} + C_T(s) \end{array} \right. \quad (\text{I.47})$$

Où :

- C_T Étant le couple total de l'éolienne (N. m), donné par :

$$C_T = C_{mec} - C_{em} \quad (\text{I.48})$$

- J : Inertie totale des parties tournantes ($kg.m^2$) : qui est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{I.49})$$

la figure (I.32) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de

la turbine éolienne [25]. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation mécanique Ω_{mec} qui entraîne le générateur, peut être contrôlée de deux manières différentes : soit par la Variation de l'angle de calage des pales, soit par contrôle du couple électromagnétique C_{em} .

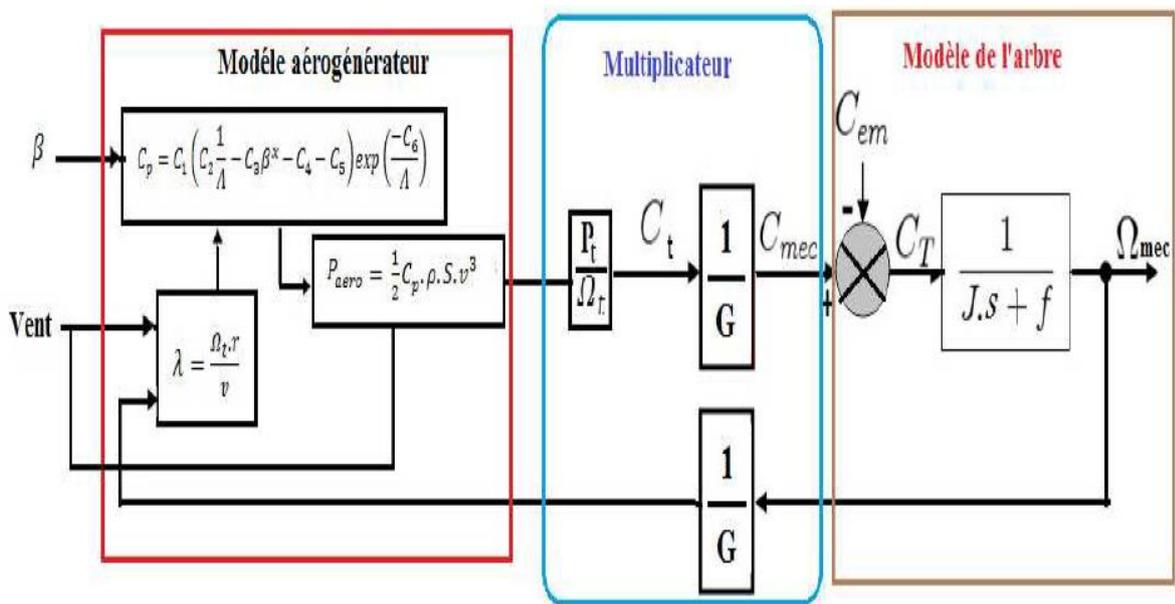


Figure I.32. Modèle aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne.

VII. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est classée parmi les filières qui ont un bilan très positif, c'est une des techniques de production d'énergie les plus prometteuses aujourd'hui, et bien au-delà [34].

1. Avantage :

- C'est une énergie propre qui n'engendre aucune pollution, qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs, comme d'autres sources de production d'électricité.
- Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle des temps. En effet le vent est inépuisable et abondant ; il constitue donc une véritable ressource renouvelable.

- Elle est désormais la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Les avancées technologiques de pointe en matière d'aérodynamique, de résistance des matériaux et de météorologie ont contribué à une diminution des coûts de cette énergie.
- L'énergie éolienne est fiable, puisque le facteur de disponibilité de ce moyen de production est bien supérieur à d'autres moyens de production d'électricité. Les opérations liées à la vérification et la maintenance se font quelquefois.
- Lorsque le temps de fonctionnement d'une ferme éolienne est écoulé (environ 20 ans), les fondations sont entièrement démantelées, elles peuvent être réutilisées.
- 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.
- La ressource de production éolienne peut jouer de complément à d'autres types d'énergies, notamment durant des pics de consommation.
- L'énergie éolienne est créatrice d'emploi, l'industrie éolienne offre de plus en plus d'emplois de diverses spécialités. C'est une source de richesse pour les pays qui ont le savoir technologique de cette filière.

2. Inconvénients:

L'énergie éolienne dévoile également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne redeviennent pas un frein à son développement [35], [36] :

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire ; aussi la vitesse du vent peut être affaiblie par de nombreux facteurs, qui peuvent influencer la rentabilité du système de production.
- Impact visuel : Les premiers parcs éoliens installés sur terre étaient très denses et dénaturaient le paysage, cependant, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grande taille et puissance, ils ont donc perdu leur aspect fourmillant qui commence à se perdre. L'apparition des fermes offshore tend aussi à exclure ce problème.
- L'influence des éoliennes est connue au niveau des impacts sur la biodiversité et particulièrement sur les oiseaux. Cela peut être maîtrisé par une réflexion appropriée au niveau de l'implantation.
- Les éoliennes constituent un obstacle à la propagation des ondes. Les radars météorologiques ou militaires les perçoivent comme des interférences. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, un radar note leur vitesse de déplacement, et peut les voir comme cible [37].
- Une éolienne a une durée de vie limitée entre 20 et 30 ans, le rendement moyen de production se limite entre 20 et 60%.

- Le bruit que génèrent les éoliennes peut être d'origine mécanique (rotation du rotor et fonctionnement de la génératrice) ou d'origine aérodynamique (lorsque les pales disjoignent l'air). Même si les éoliennes actuelles sont relativement silencieuses, une étude de l'impact sonore sur les habitations doit être effectuée avant l'implantation des parcs éoliens. En fonction du résultat, cette implantation peut être modifiée afin de respecter la réglementation (émergence maximale de 5 dB le jour et 3 dB la nuit). La distance entre les éoliennes et les habitations est généralement de 300 m à environ 500 m, elles sont inaudibles ou très peu audibles et leur bruit est généralement couvert par le bruit du vent.

VII. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un rappel des notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Après ce rappel descriptif, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations qui sont utilisées dans le domaine éolien. L'évaluation a été faite sur la base des principales exigences d'un système de conversion d'énergie éolienne.

Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimant permanente (MSAP)

I. Introduction :

Ces dernières années, avec le développement des matériaux magnétiques, l'utilisation de machines synchrones à aimants permanents (MSAP) devient de plus en plus concurrentielle. Les machines sont à grand nombre de pôles et permettent ainsi de développer des grands couples mécaniques. La caractéristique d'auto-excitation du générateur synchrone à aimant permanent lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend favorable pour des applications tels que les systèmes de production d'énergie électrique du type éolien [Ackermann, 2006]. Dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (qui est dimensionné avec toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

Avec l'avènement de l'électronique de puissance, Le choix des machines synchrones à aimants permanents devient avantageux, ce qui en fait un concurrent des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants permanents. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles [Belakehal et al., 2009].

Le modèle mathématique des MSAP regroupe tous les paramètres et permet ainsi de mettre en évidence certains phénomènes qui apparaissent lors de leur fonctionnement en régime permanent ou en régime transitoire. Ce modèle présente un bon compromis entre la simplicité et les résultats proches au réel.

L'inconvénient majeur de l'utilisation du générateur synchrone à aimants permanents est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux [11].

Dans ce qui suivra, on s'intéressera aux MSAP utilisées comme génératrices, puisqu'elles serviront de transformer l'énergie mécanique issue des éoliennes en énergie électrique.

II. Présentation de la Machine Synchrone à Aimants PermanentsMSAP :

1. Généralités :

Les machines synchrones en général, sont alimentées au stator par des enroulements triphasés et au rotor par une tension continue. Alimentée à fréquence constante, sa vitesse est synchrone avec le champ tournant et ne dépend que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine.

Au rotor, la bobine d'excitation peut être remplacée par des aimants permanents,

lamachine est dite alors machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ce type demachines possède un bon rendement puisque les pertes Joule sont localisées au stator. Entoure, la compacité du rotor conduit à un bon rapport couple/inertie, autorisant des accélérations élevées.

Inversement, lorsque l'arbre du rotor est entraîné à une certaine vitesse, le moteur fonctionne en mode générateur et génère des tensions triphasées au stator à une fréquence proportionnelle à la vitesse d'entraînement [SMI 00].

Suivant sa structure, la machine synchrone à aimant permanent peut être divisée en plusieurs groupes :

- 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, plus grande énergie stockée), lamachine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.

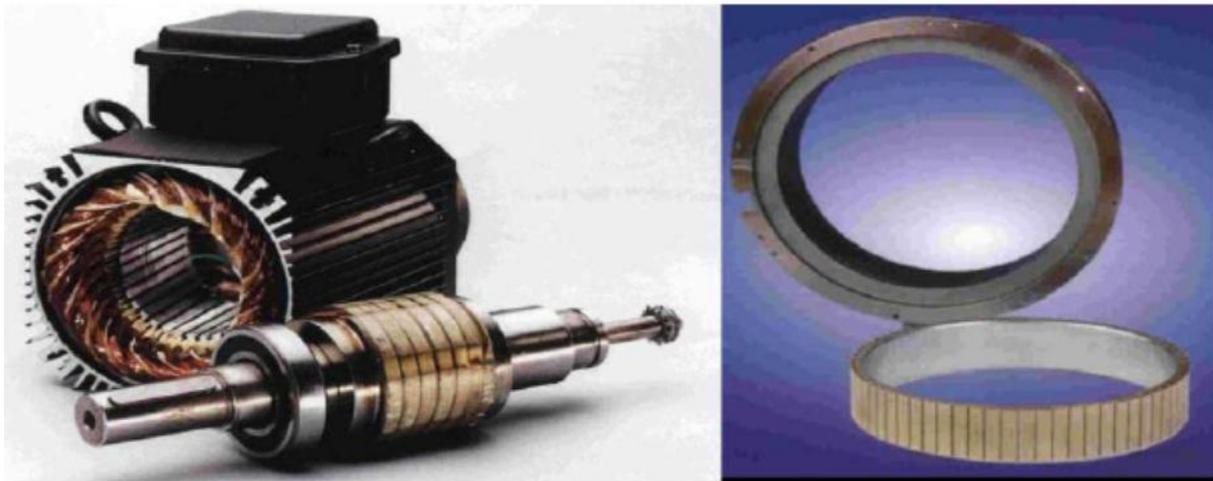


Figure.II.1 Structure générale d'une machine synchrone à aimants [37]

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

2. Principe de fonctionnement des MSAP :

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor qui tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Les trois enroulements identiques, à p paires de pôles sont logés sur des encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à : $\frac{2}{3p}$ [15].

La structure du rotor est réalisée par un enroulement monophasé excité en courant continu, ou par un aimant permanent. La roue est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants. Il sera admis que pour cette dernière structure, la machine pourrait être munie d'enroulements amortisseurs qui ont pour rôle de permettre à la machine de s'opposer à des régimes de déséquilibres ; et d'augmenter le couple électromagnétique.

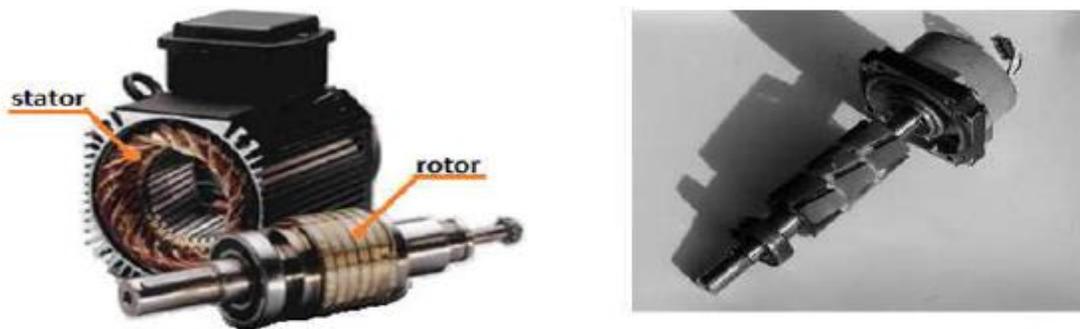


Figure.II.2.Constituants d'une machine synchrone à aimants [37]

Le nombre de pôles d'un MSAP est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire, cette dernière est donnée par $f = \frac{p\Omega_t}{120}$ [17] ; Avec :

Ω_t : Vitesse mécanique (rad/s).

La GSAP, est une machine synchrone fonctionnant en mode générateur, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique alternative, et dans laquelle les champs magnétiques statorique et rotorique sont en rotation synchrone, c'est-à-dire à la même vitesse, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance.

L'excitation de la GSAP est faite par des aimants permanents liés au rotor (inducteur). Il y a des structures de génératrices à aimants permanents à rotor interne et stator externe d'une part, et des structures d'alternateurs à stator interne et rotor externe, d'autre part, figure II.3.

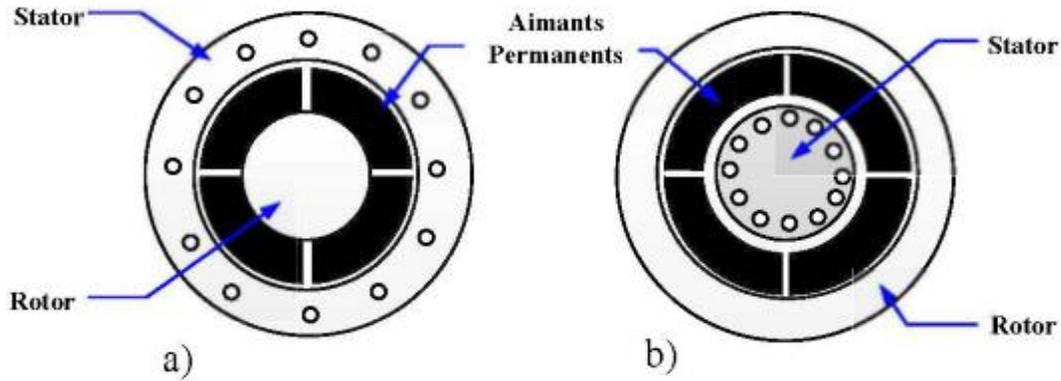


Figure II.3. Structure à rotor interne a) Structure à rotor externe b)

3. Fonctionnement en mode générateur GSAP :

Ce type de machines est parmi les plus utilisés dans les systèmes de reproduction d'électricité, (centrales électriques, énergie éolienne,). L'inducteur de la génératrice synchrone, mécaniquement entraîné, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques, les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle de champ inducteur.

Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant [9].

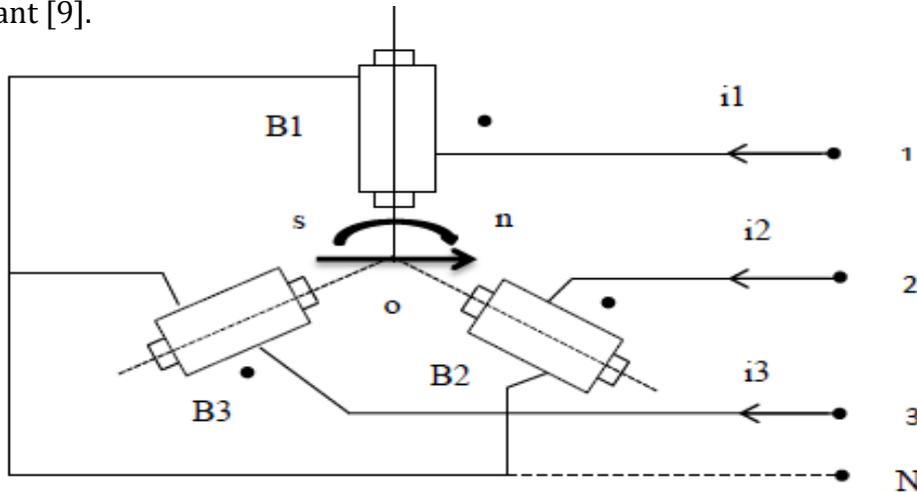


Figure II.4. Principe de fonctionnement d'une GSAP

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui la rend favorable pour des applications telles que la production d'énergie éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font un choix moins compétitif [1].

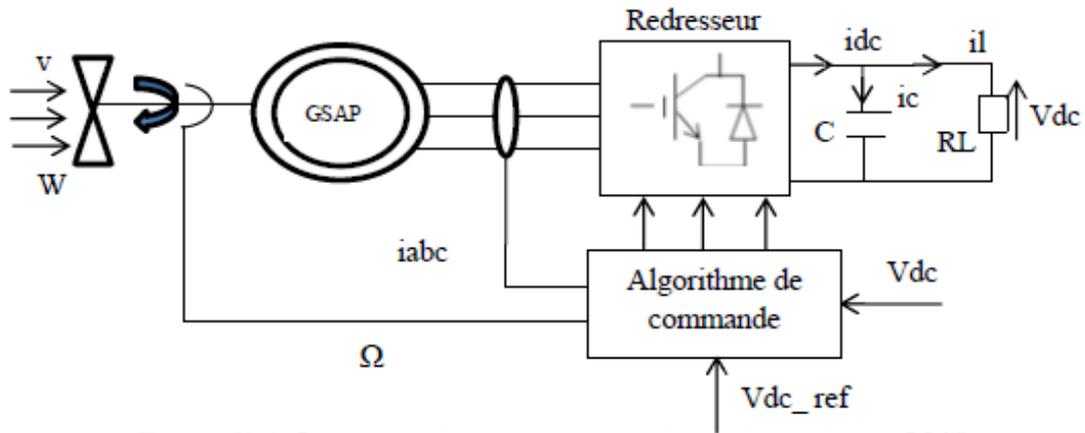


Figure II.4. Structure du générateur éolien à base d'une GSAP

Au regard des qualités générales des différents types de machines, le générateur synchrone à aimants permanents est réputé par ses caractéristiques principales qui lui permettent d'être un générateur à fort couple massique et possédant un bon rendement facilement adaptable aux applications spécifiques. Ses principaux inconvénients sont le coût lié à celui des aimants et sa faible aptitude aux fonctionnements en survitesse.

III. Modélisation de la MSAP :

Dans la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants permanents. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte trois enroulements statoriques triphasés (a, b, c) décalés entre eux par un angle de $(2\pi/3)$. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ils sont modélisés par un enroulement alimenté par une source du courant continu ' i_f ' qui produit un champ magnétique constant, (figure II.5).

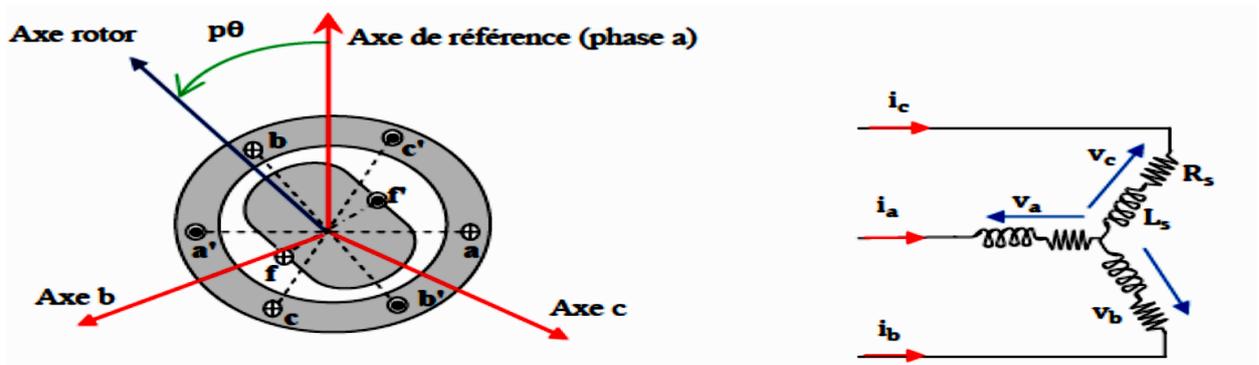


Figure II.5. Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents.

1. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [36]:

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements ;
- Les forces magnétomotrices (fmm) sont à répartition sinusoïdale dans l'entrefer de la machine, ce qui induit une asymétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements ;
- L'effet d'encoche est négligé ;
- On ne tient pas compte de l'hystérésis, des courants de Foucault et de l'effet de peau dans les parties magnétiques.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

2. Modèle de la MSAP dans le repère triphasé abc :

2.1. Equations électriques :

Les équations électriques qui régissent le fonctionnement d'une machine synchrone dans un repère fixe lié au stator (a,b,c) s'énoncent sous la forme suivante [48]:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (II.1)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \text{Vecteur des tensions statoriques.}$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \text{Vecteur des courants statoriques.}$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \text{Vecteur des flux totaux statoriques.}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{Matrice des résistances statoriques.}$$

2.2. Equations magnétiques :

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale des fmm, Le vecteur des flux totalisés des phases statoriques s'écrit dans le repère lié au stator (a, b, c) par la relation :

$$[\Phi_s] = [L][i] + [\Phi_{sr}] \quad \text{Où :} \quad (II.2)$$

- $[\Phi_{sr}] = [\Phi_{sra} \ \Phi_{srb} \ \Phi_{src}]^T \quad (II.3)$

- $[L]$ Étant la matrice inductance statorique (propre et mutuelle).
- Φ_{sr} : Flux de l'aimant permanent.

$$[\Phi_{sr}] = \Phi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \text{Où :} \quad (\text{II.4})$$

- $\theta_r = p\theta_m$: Position angulaire électrique ;
- p : Nombre de paires de pôles ;
- θ_m : Position angulaire mécanique ;
- Φ_m : Flux maximum produit par l'aimant dans les enroulements statoriques.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} (\text{II.5})$$

On remplace dans l'équation II.1, on obtient alors :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + [L] \frac{d}{dt} [I_s] + [\Phi_{sr}] (\text{II.6})$$

2.3 Equations mécaniques :

A travers la dynamique du rotor, on définit l'équation électromécanique comme étant :

$$C_{em} - C_r - C_f = J \frac{d}{dt} \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d}{dt} \Omega \text{Où :} \quad (\text{II.7})$$

- C_{em} : Couple électromagnétique [N.m] ;
- C_r : Couple résistant [N.m] ;
- J : Moment d'Inertie de la partie tournante de la machine ;
- f : Coefficient de frottement visqueux ;
- Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor.

3. Modèle de la MSAP dans le repère de Park (d, q) :

La mise en équation des moteurs synchrones triphasés aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. La résolution analytique dans ce repère reste très difficile. Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère ; on utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. On obtient un système équivalent formé de trois enroulements orthogonaux, deux d'entre eux sont situés dans le même plan que les enroulements a, b, et c. Le troisième enroulement est situé dans le plan orthogonal au plan formé par les axes de phases a, b, et c et représente la composante homopolaire, en se basant sur les hypothèses simplificatrices, et en appliquant la transformation de Park au rotor, [31]. Cette transformation mathématique, transforme ainsi les trois bobines statoriques fixes

déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.6).

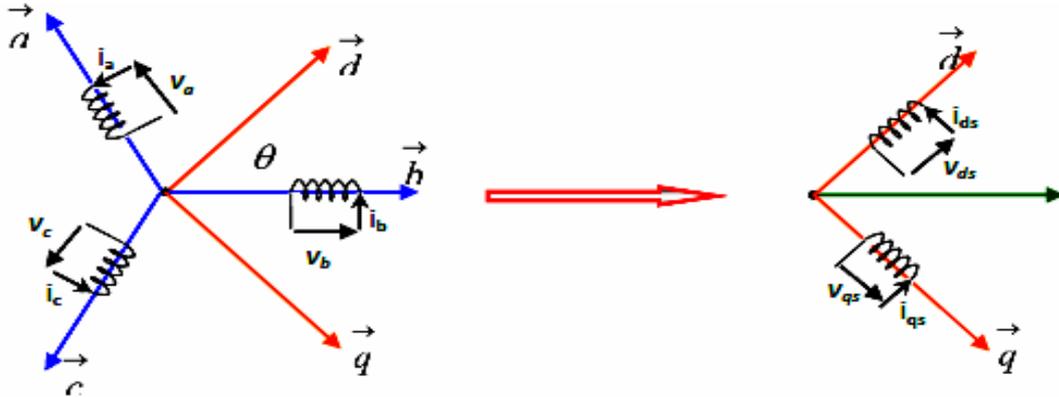


Figure II.6. Représentation de la MSAP dans le repère d-q [50].

Pour passer d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (dq) (ou vice versa), on utilise les relations par la transformation de Park qui est définie comme suit :

$$\begin{cases} [X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dqo}] \end{cases} \quad (II.8)$$

$[P(\theta)]$ Est définie comme étant la matrice de transformation de Park, sa valeur vaut :

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

La matrice inverse de Park, vaut :

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

Dans le cas particulier où : $(\theta = 0)$ ceci nous mène à la matrice appelé de Concordia qui va permettre le passage entre les deux référentiels abc et $\alpha\beta$ qui est un repère biphasé orthogonal fixe :

$$\begin{cases} [X_{\alpha\beta o}] = [T][X_{abc}] \\ [X_{abc}] = [T]^{-1}[X_{\alpha\beta o}] \end{cases} \quad (II.9)$$

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ et } [T]^{-1} = [P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Le passage de la transformation $\alpha\beta$ à la transformation dq est assuré par la matrice de rotation $[R(\theta)]$ définie par :

$$\begin{cases} [X_{dq}] = [R(\theta)][X_{\alpha\beta}] \\ [X_{\alpha\beta}] = [R(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} [R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ [R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

En se basant sur les hypothèses simplificatrices, on peut exprimer l'ensemble des relations de la machine dans le repère de Park (d, q, o) qui est à priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire [29] [26].

3.1 Expressions des tensions :

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (II.1), on aboutit à :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][I_s] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.12})$$

De la même façon, On peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle :

$$[V_{dq0}] = [P(\theta)][v_s] = [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1}[i_{dq0}] + [P(\theta)][P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq0}] + [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) [\Phi_{dq0}] \quad (\text{II.13})$$

En remarquant que la matrice $[R_s]$ est diagonale, donc :

$$\begin{cases} [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1} = [R_s] \\ [P(\theta)] \left(\frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Après toutes ces transformations, et en posant : $\frac{d\theta}{dt} = \omega$; on obtient les équations statoriques de la GSAP exprimées dans le référentiel de Park lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega \Phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \omega \Phi_d \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

3.2 Expressions des flux :

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta)][\Phi_s] = [P(\theta)][L].[P(\theta)]^{-1}[i_{dqo}] + [\Phi_{sr}] \quad (\text{II.16})$$

On obtient donc les équations des flux statoriques de la GSAP, exprimées dans le référentiel de Park :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} \text{Où :} \quad (\text{II.17})$$

- (L_d, L_q) Sont les inductances d'axes directe et en quadrature.

La machine étant supposée à pôles lisses, ce qui signifie que $(L_d = L_q)$

Le modèle de la MSAP (I.15) est enfin donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \Phi_{sr}) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

3.3 Expressions de la puissance et du couple :

La puissance électrique absorbée par la machine est exprimée dans le référentiel triphasé et celui de Park par :

$$\begin{cases} P(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ P(t) = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Le système étant équilibré, alors : $\begin{cases} i_0 = 0 \\ V_0 = 0 \end{cases}$

En remplaçant les valeurs des tensions et des courants par leurs similaires dans l'équation II.19, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de Park s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) + (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega \right] \text{où :} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} R_s (i_d^2 + i_q^2) : \text{Pertes par effet joule,} \\ \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} \right) : \text{Variation de l'énergie magnétique emmagasinée,} \\ (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega : \text{Puissance électromagnétique.} \end{cases}$$

Les pertes par effet Joule étant négligeables du fait de la faible valeur de la résistance statorique ; en régime permanent le flux étant constant, il en résulte :

$$\begin{cases} P(t) = \frac{3}{2} (i_q \Phi_d - i_d \Phi_q) \omega = \omega C_{em} \\ P(t) = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

L'expression du couple en fonction des courant statoriques ($i_d i_q$) et du flux d'induction maximum des aimants permanents (ψ_m) de la MSAP est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [i_q \Phi_{sr} + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (II.22)$$

Pour une MSAP bipolaire ($p=1$), à rotor lisse ($L_d = L_q$) on aura le couple suivant :

$$C_{em} = \frac{3}{2} i_q \Phi_{sr} = \frac{3}{2} i_d \Phi_{sr} \quad (II.23)$$

IV. Modèle généralisé de la MSAP en mode générateur PMSG :

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents est donné par les systèmes d'équations suivants :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

En appliquant les transformations de Park, comme auparavant :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - \frac{d\Phi_d}{dt} + \omega \Phi_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega \Phi_d \end{cases} ; \begin{cases} \Phi_d = L_d i_d + \Phi_{sr} \\ \Phi_q = L_q i_q \end{cases} ; J \frac{d\Omega}{dt} - C_f = C_m - C_{em} \quad (II.25)$$

V. Conclusion :

Ce chapitre était consacré à la modélisation des différents composants de la machine synchrone à aimant permanent, fonctionnant en génératrice. Dans le but d'entreprendre une étude fiable qui peut traduire les phénomènes physiques en équations mathématiques, un modèle généralisé de la MSAP a été établi, ce qui facilitera l'étude globale du système de production qu'on traitera ensuite.

Chapitre III : Modélisation globale de la chaîne de conversion à based'une GAPS

I. Introduction :

Après avoir présenté le principe de la conversion d'énergie éolienne, et modéliser les parties essentielles dans la chaîne de conversion éolienne, qui sont la turbine et la génératrice ; on se fixe maintenant, à présenter la chaîne globale de production avec une modélisation détaillée des différents éléments et par suite une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique.

L'énergie résultant du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine accouplée à la GSAP permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que les convertisseurs statiques et l'élément de filtrage disposés en aval de la génératrice, ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale.

II. Stratégie de commande de système de production :

Dans une optique d'étudier le système de production d'énergie éolienne et de tester l'algorithme de commande MPPT sur une plateforme de simulation, il est nécessaire de décrire le système d'étude constitué de l'éolienne, la génératrice synchrone à aimants permanents un redresseur triphasé à diodes et d'un hacheur Boost débitant sur un onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC conformément au schéma synoptique de la figure Fig III.1.

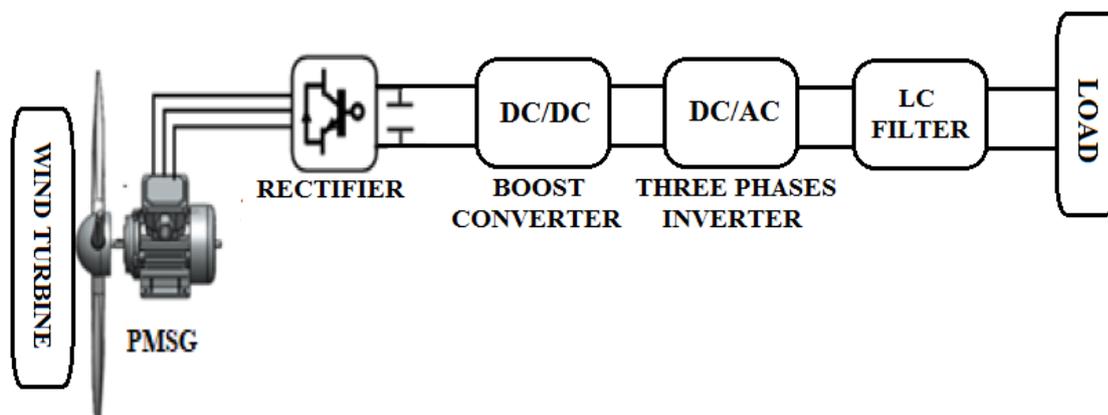


Figure.III.1 Structure globale de la chaîne de production éolienne.

III. Modélisation de l'onduleur trois niveaux de type NPC

Un onduleur est un convertisseur de tension (courant) continu / alternatif, l'onduleur de tension représente un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autre de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau. Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquencement imposé à l'interrupteur statique qui réalise la modulation de la largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements statoriques de la machine.

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Dans l'hypothèse de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblé en parallèle, forme un interrupteur (demi-bas) bi commandable (commande à l'ouverture et à la fermeture), Ainsi que chaque demi-bas possède son complémentaire.

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte.

L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisés est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche. Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice E (voir figure III.2).

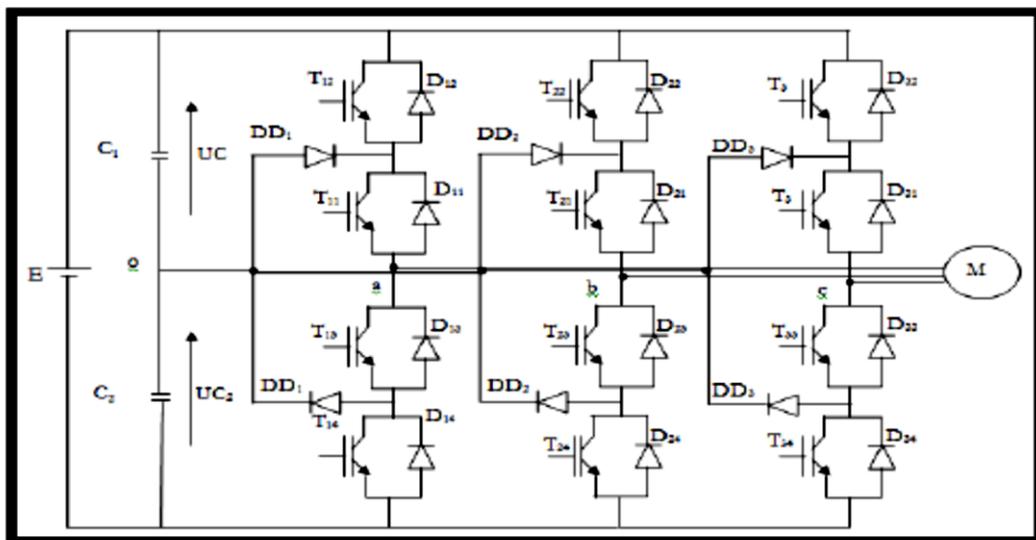


Figure III.2. Onduleur triphasé à trois niveaux

A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ($E/2$), qui sont connectées entre eux en un point neutre noté o ; ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ($C1=C2$ c'est-à-dire $Uc1=Uc2$). Le point O est connecté avec les deux diodes médianes (DDK1, DDK2) [51].

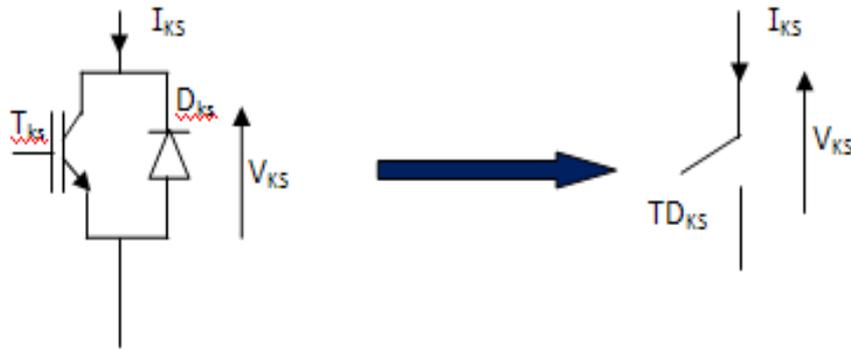


Figure III.3. Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, on présente chaque paire (Transistor -diode) par un seul interrupteur bidirectionnel TDKS, avec une configuration d'un seul bras (Figures III.3 et III.4).

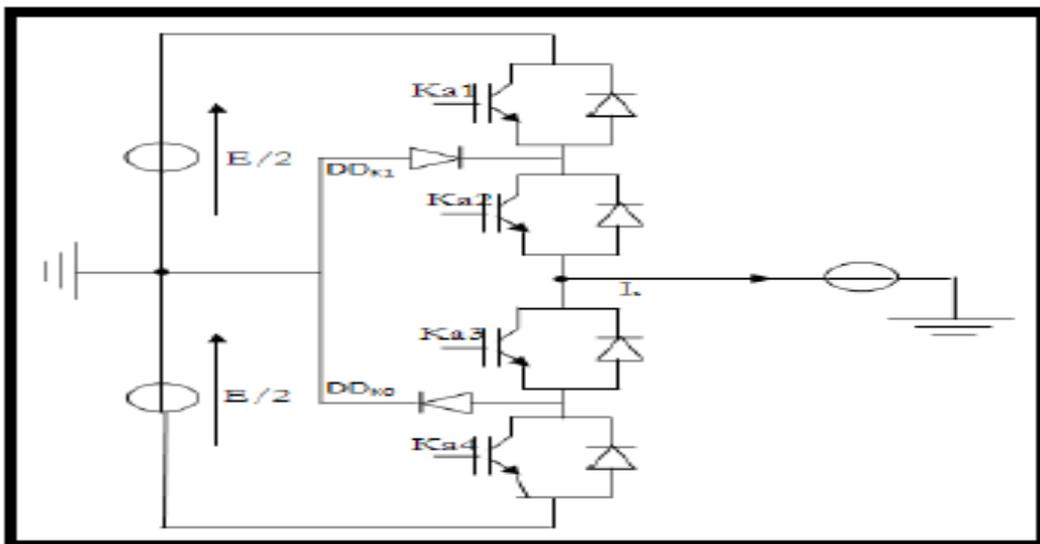


Figure III.4. Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe BKS (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel TKS).
- Une commande interne définie par les signes du courant du bras.

Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court-circuit aux bornes des sources continues et par conséquent le risque de distorsion des condensateurs et des composants semi-conducteurs par surintensité et qui peut engendrer la distinction par surtension des interrupteurs lors d'ouvertures simultanées de ces derniers, on adopte la solution classique de devoir réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur.

1. Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} du bras.

Sur les $2^4 = 16$ configurations possibles, seules trois configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des courts-circuits des sources de tension continue, soit la déconnexion de la charge[52].

a. Première configuration {1100} :

K_{a1} , K_{a2} sont passants et K_{a3} et K_{a4} sont bloqués (figure III.6), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = +E/2$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka3} = V_{ka4} = +E/2$

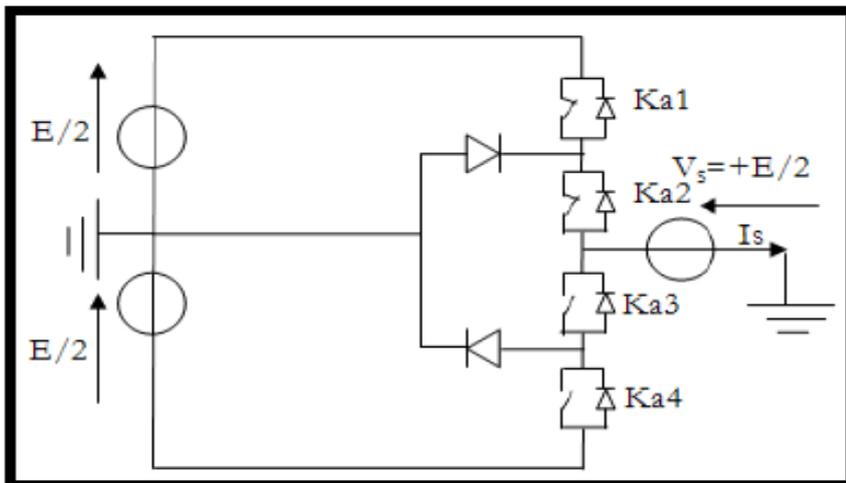


Figure III.5. 1ère configuration du 1er bras

b. Deuxième configuration {0110} :

K_{a2} , K_{a3} sont passants et K_{a1} et K_{a4} sont bloqués (figure III.6), le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple V_{ao} est nulle : $V_{ao} = 0$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2$

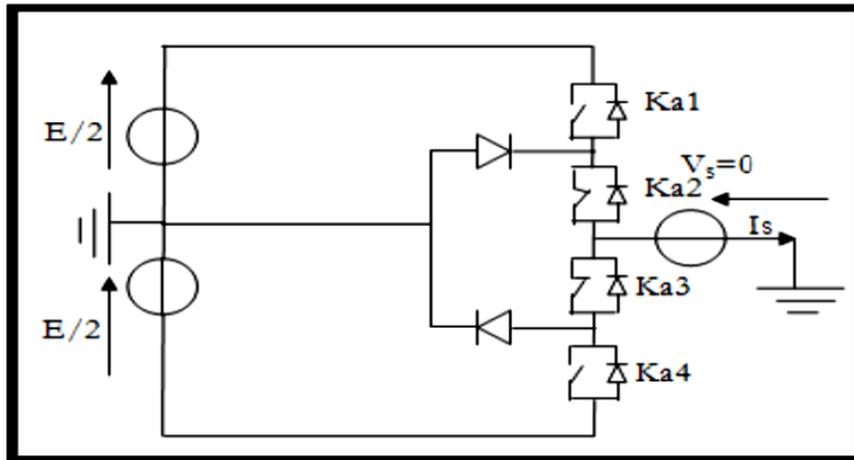


Figure III.6. 2ème configuration du 1^{er} bras

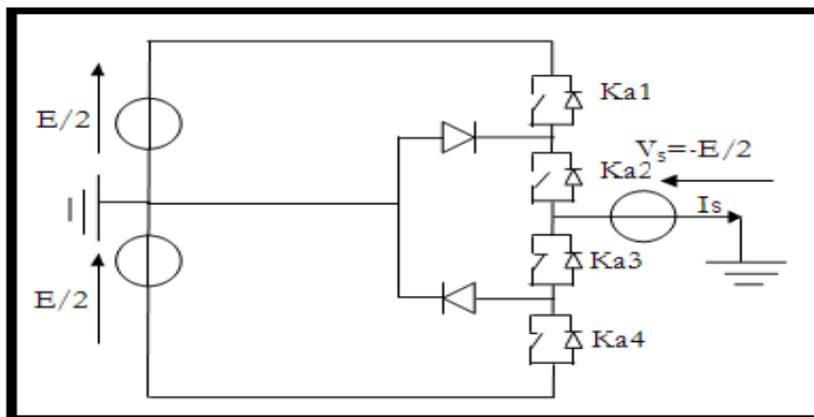


Figure.III.7.3ème configuration du 1er bras

c. Troisième configuration {0011} :

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure III.8), la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante : $V_{ao} = -E/2$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est : $V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2$

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure (III.9) représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} .

Les résultats de chaque configuration, ainsi que la tension de sortie sont regroupés dans le tableau récapitulatif III.1.

| Etats des interrupteurs | | | | Tension de sortie V_{ao} |
|-------------------------|-----|-----|-----|----------------------------|
| Ka1 | Ka2 | Ka3 | Ka4 | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | $E/2$ |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | $-E/2$ |

Tableau. III.1. Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux

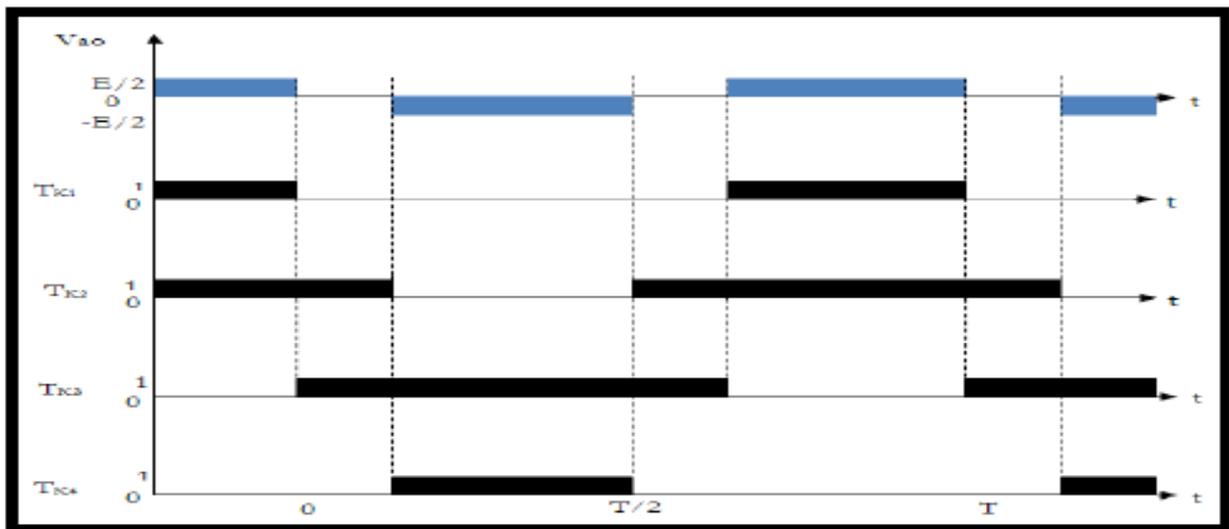


Figure.III.8. Formes d'ondes de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à 3niveaux NPC

2. Modèle de la commande de l'onduleur à trois niveaux de type NPC :

a. Commande complémentaire :

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire : Pour un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux, et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires:

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases}$$

b. Commande N° 1 :

Soit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K2}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$$

BKS : commande du transistor TKS du bras K.

Cette commande rend le système pratiquement incommandable. La table logique correspondante à cette commande est définie dans le tableau III.2 :

| <i>BK1</i> | <i>BK2</i> | <i>BK3</i> | <i>BK4</i> | <i>Tension de sortie du bras K (Vao)</i> |
|------------|------------|------------|------------|--|
| <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>Inconnue (dépend de la charge)</i> |
| <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>V=0 ou I=0 (inconnue)</i> |
| <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>V=0 ou I=0 (inconnue)</i> |
| <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>V=0</i> |

Tableau III. 2 : Etats possibles de le commande n°1 de l'onduleur 3 Niveaux NPC

c. Commande N°2 :

Soit la commande complémentaire suivante :
$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$$

La table logique correspondante à cette commande est définie dans le tableau III.3 :

| <i>BK1</i> | <i>BK2</i> | <i>BK3</i> | <i>BK4</i> | <i>Tension de sortie du bras K (Vao)</i> |
|------------|------------|------------|------------|--|
| <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>On</i> | <i>-UC2 = -E/2</i> |
| <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>(inconnue)</i> |
| <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>(inconnue)</i> |
| <i>On</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>UC1 = E/2</i> |

Tableau III. 3. Etats possibles de le commande n°2de l'onduleur 3 Niveaux NPC

d. Commande N°3 :

Soit la commande complémentaire suivante :
$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases}$$

La table logique correspondante à cette commande est définie dans le tableau III.4 :

| <i>BK1</i> | <i>BK2</i> | <i>BK3</i> | <i>BK4</i> | <i>Tension de sortie du bras K (Vao)</i> |
|------------|------------|------------|------------|--|
| <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>On</i> | <i>-UC2 = -E/2</i> |
| <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>(inconnue)</i> |
| <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>V=0</i> |
| <i>On</i> | <i>On</i> | <i>Off</i> | <i>Off</i> | <i>UC1 = E/2</i> |

Tableau III. 4. Etats possible de le commande n°3 de l'onduleur 3 Niveaux NPC

La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possibles pour un bras (U_{C1} , 0, $-U_{C2}$), avec $U_{C1} = U_{C2} = E/2$.

C'est cette commande qui va être adoptée pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

3. Fonction de connexions :

La fonction de connexions F_{KS} traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur TDKS. Pour chaque interrupteur TD_{KS} ($K \in (1, 2, 3)$, $S \in (1, 2, 3)$), on a :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } K_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases}$$

On définit la fonction de connexion d'undemi-bas qu'on notera F_{KM}^b avec K : numéro du bras, M = 1 pour le demi-bras du haut et M = 0 pour le demi-bras du bas [52].

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1}F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K4}F_{K3} \end{cases}$$

F_{K1}^b est associé au demi-bras du haut (la paire (K_{k1} , K_{k2})).

F_{K0}^b est associé au demi-bras du bas (la paire (K_{k3} , K_{k4})).

4. Modélisation des valeurs instantanées :

Les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge, sont définies par : V_a , V_b , V_c ;

Les tensions entre le point milieu « i » de chaque bras de l'onduleur et le point neutre « o » de l'alimentation continue de l'onduleur, sont définies par : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} ;

a. Les potentiels V_{io} :

Les potentiels des nœuds A, B, C de l'onduleur triphasé à trois niveaux par rapport au point milieu M, s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}F_{12}U_{c1} - F_{13}F_{14}U_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14})\frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}F_{22}U_{c1} - F_{23}F_{24}U_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24})\frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}F_{32}U_{c1} - F_{33}F_{34}U_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34})\frac{E}{2} \end{cases} \text{(III.1)}$$

Les fonctions de connexions des demi-bassont définies selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11}F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13}F_{14} \end{cases} \begin{cases} F_{21}^b = F_{21}F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23}F_{24} \end{cases} \begin{cases} F_{31}^b = F_{31}F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33}F_{34} \end{cases} \text{(III.2)}$$

En traduisant ces fonctions de connexions des demis bras dans le système (III-1) on aboutit à

$$\begin{cases} V_{ao} = F_{11}^b U_{c1} - F_{10}^b U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)\frac{E}{2} \\ V_{bo} = F_{21}^b U_{c1} - F_{20}^b U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)\frac{E}{2} \\ V_{co} = F_{31}^b U_{c1} - F_{30}^b U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)\frac{E}{2} \end{cases} \text{(III.3)}$$

b. Tensions de sorties :

Nous pourrions définir un modèle liant les fonctions des demi-bras et les tensions aux bornes de la charge V_a , V_b , et V_c .

c. Tensions composées :

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22})U_{c1} - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})U_{c2} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32})U_{c1} - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})U_{c2} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12})U_{c1} - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})U_{c2} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2} = E/2$ le système (III.4) devient :

$$\begin{cases} V_{ab} = [(F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22}) - (F_{13}F_{14} - F_{23}F_{24})] E/2 \\ V_{bc} = [(F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32}) - (F_{23}F_{24} - F_{33}F_{34})] E/2 \\ V_{ca} = [(F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12}) - (F_{33}F_{34} - F_{13}F_{14})] E/2 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad (\text{III.6})$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2}$, cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (\text{III.7})$$

d. Tensions simples :

Les tensions simples de sorties de l'onduleur se déduisent en fonction des potentiels des neuds par rapport au point milieu par la relation suivante : $V_a + V_b + V_c = 0$

$$\begin{cases} V_a = (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_b = (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co})/3 \\ V_c = (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co})/3 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (\text{III.9})$$

IV. Présentation du hacheur survolteur :

1. Introduction :

Le hacheur est un convertisseur statique qui permet d'obtenir une tension continue constante et ce, avec un rendement voisin de l'unité. Les hacheurs travaillent sur le même principe que les transformateurs en courant alternatif. Ils sont principalement utilisés pour la variation de vitesse des moteurs ainsi que dans les alimentations à découpage à courant continu. Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant)[53].

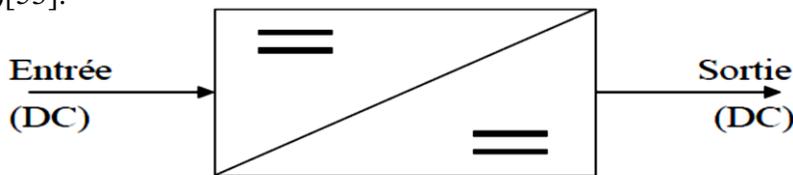


Figure.III.9.Schéma de principe d'un hacheur.

2. Principe d'un hacheur parallèle ou survolteur (BOOST) de tension :

Le hacheur parallèle ou (BOOST CONVERTER) permet de varier le courant fourni par une source de courant I dans un récepteur de tension U . Ce hacheur est, constitué d'un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d'un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur (Figure.III.10)[54].

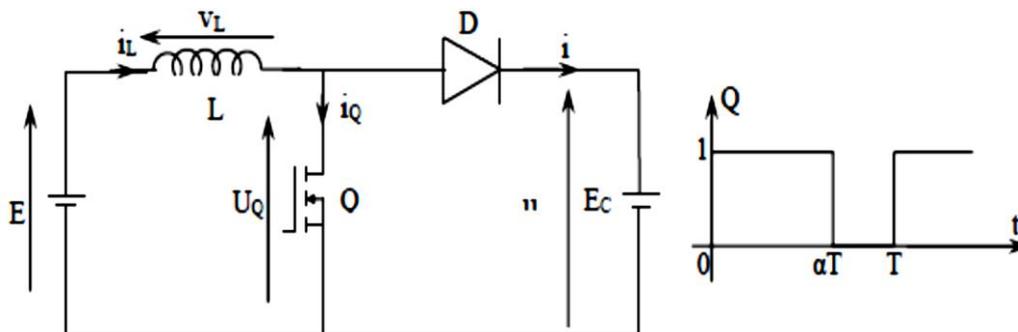


Figure.III.10.Schéma de principe d'un hacheur parallèle survolteur.

Dans ce cas, E est, une f.é.m. qui est en série avec une inductance L (dans un premier temps on néglige sa résistance propre R), ainsi donc une source de courant qui débite dans une

source de tension E_C et que la diode D empêche tout retour de courant vers la source.

V. Stratégie de contrôle du système par la logique floue :

La théorie du flou (Fuzzytheory) est presque devenue une mode pendant les années 90. Beaucoup de chercheurs, dans différents domaines scientifiques, utilisant la théorie formulée par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Berkeley [55].

Les systèmes flous appartiennent à la classe des "systèmes à base de connaissance". Leur but principal consiste implémenter un savoir-faire humain, ou des règles heuristiques, sous forme d'un programme informatique. La logique floue fournit un formalisme mathématique pour réaliser ce but. Les régulateurs flous modélisent l'expérience humaine sous forme de règles linguistiques "Si...alors" ; un moteur d'inférence calcule les actions de commande pour chacune des situations données. Les algorithmes basés sur la logique floue sont considérés comme une solution très intéressante pour le réglage des systèmes non linéaires pour lesquels il n'existe pas de modèle mathématique. Cette théorie est très attractive, parce qu'elle est basée sur le raisonnement intuitif et prend en compte la subjectivité et l'imprécision. Mais ce n'est pas une théorie imprécise [56]. C'est une théorie mathématique rigoureuse, adaptée au traitement de tout ce qui est subjectif et/ou incertain.

Un régulateur flou peut être présenté de différentes façons, mais en général la présentation adoptée se scinde en trois parties [57] : la fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie. Ainsi la mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification comme montre la figure III.11.

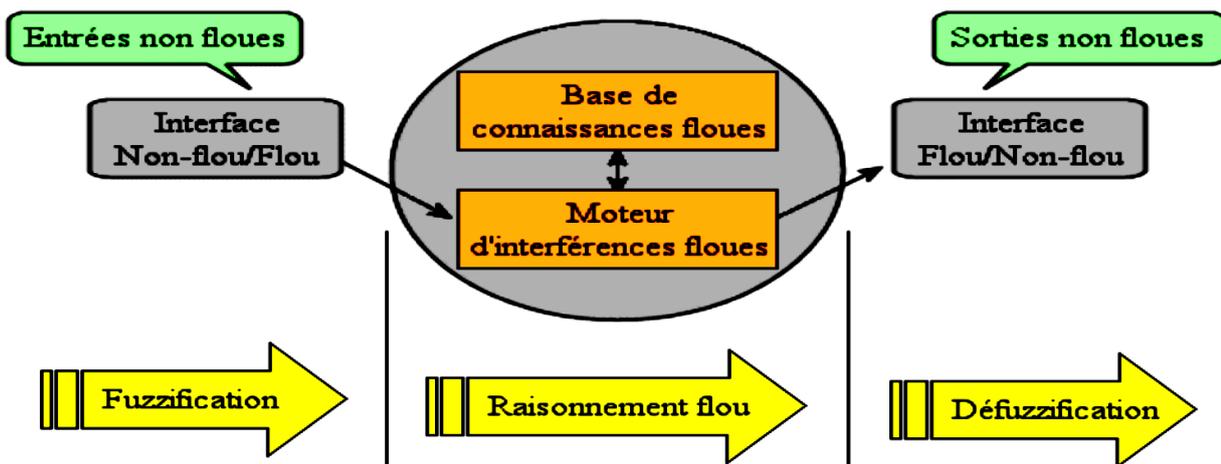


Figure. III.11. Schéma de principe de la commande à logique floue

1. Principe et éléments de la logique floue :

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité.

Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$.

Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont graduels, ou encore flous comme l'illustre la (figure III.12) [58].

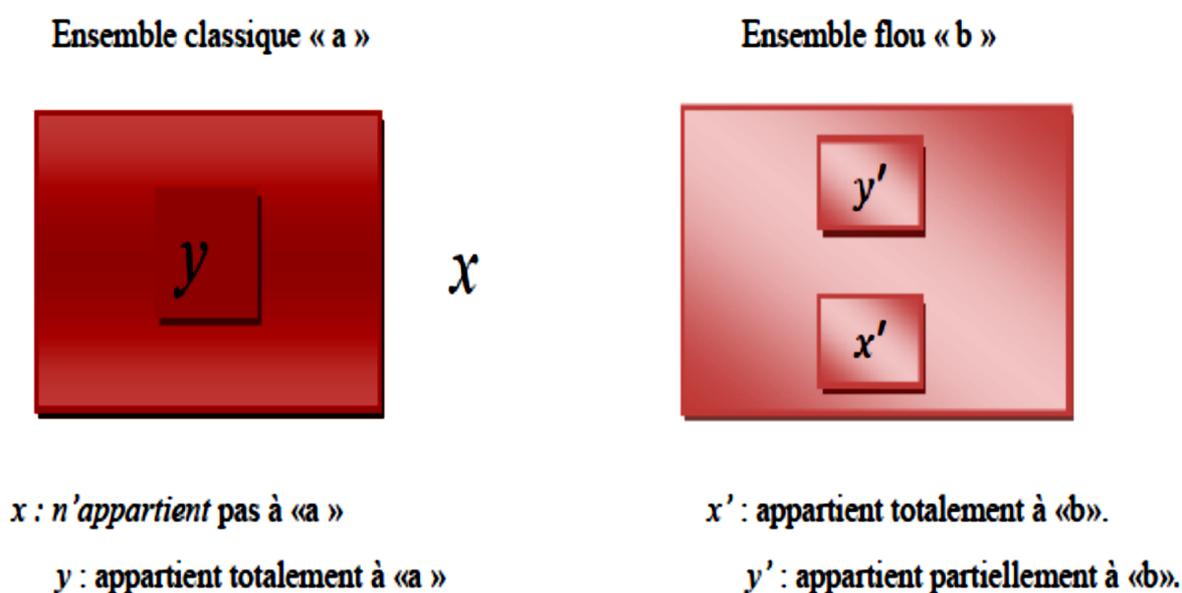


Figure. III.12. Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

Dans cette partie, Nous associe aux ensembles classiques la logique binaire dit encore booléenne, et aux ensembles flous la logique floue. Ces deux logiques ne s'opposent pas, au contraire il apparait comme nous le verrons plus loin, que la logique floue est une extension de la logique binaire pour laquelle les niveaux de vérité (degrés d'appartenance que l'on note μ), au lieu d'être vrai ou faux peuvent prendre des valeurs compris entre 0 et 1 [59].

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple. Un patient atteint d'hépatite présente généralement les symptômes suivants :

- Le patient a une forte fièvre.
- Sa peau présente une coloration jaune.
- Il a des nausées.

On peut modéliser l'état : « a une forte fièvre » par une représentation booléenne (figure III.13)

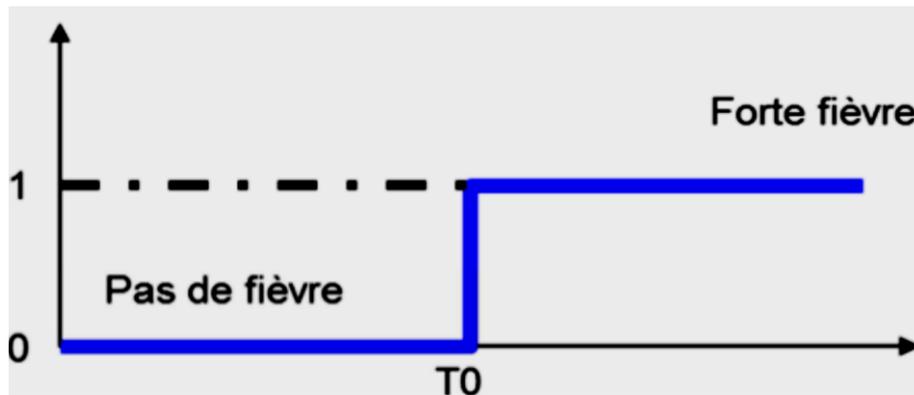


Figure.III.13. Représentation des variables booléenne classique [60]

- La variable ci-dessus tente de représenter cet état.
- En deçà de la température T_0 , le patient n'a pas de température.
- Au-delà, il doit consulter.

On doit quantifier T_0 lorsque le phénomène est complexe, la notion de fièvre est typiquement une notion floue difficilement modélisable avec l'algèbre booléenne classique.

La variable "à une forte fièvre " manipulée par la logique floue serait la suivante :

La transition entre les valeurs faux (codée 0) et vrai (codée 1) est maintenant **progressive**, comme le montre la figure suivante :

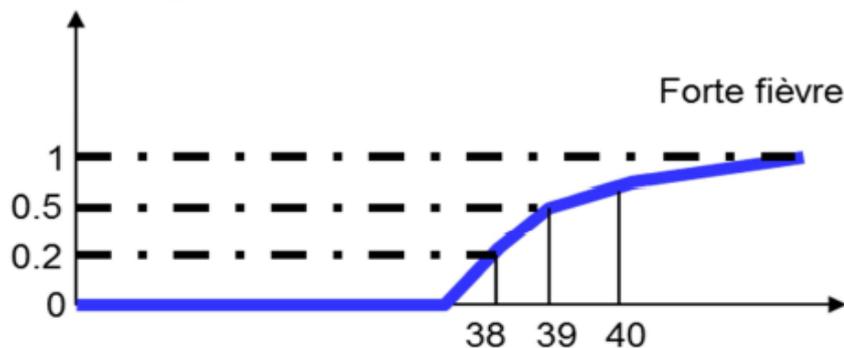


Figure. III.14. Représentation des variables floues [61]

- La fonction représentée doit être considérée comme un **degré d'appartenance** μ à l'état décrit ou comme une **probabilité d'appartenir à l'ensemble** considéré.
- Ainsi, un patient présentant une température de 38° n'a qu'un faible degré d'appartenance 20% à l'état «à une forte fièvre » alors que celui qui atteint 40 présente un fort degré d'appartenance (80%) à ce même état.
- On voit qu'il est maintenant beaucoup plus aisé de fixer la température de basculement (progressif) d'état. A 39° , on n'appartient qu'à 50% à l'état « à un forte fièvre »

2. Structure interne d'un système flou :

Contrairement aux techniques de réglage classiques, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS,...etc., appliquées à des variables linguistiques [62]. On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur flou.

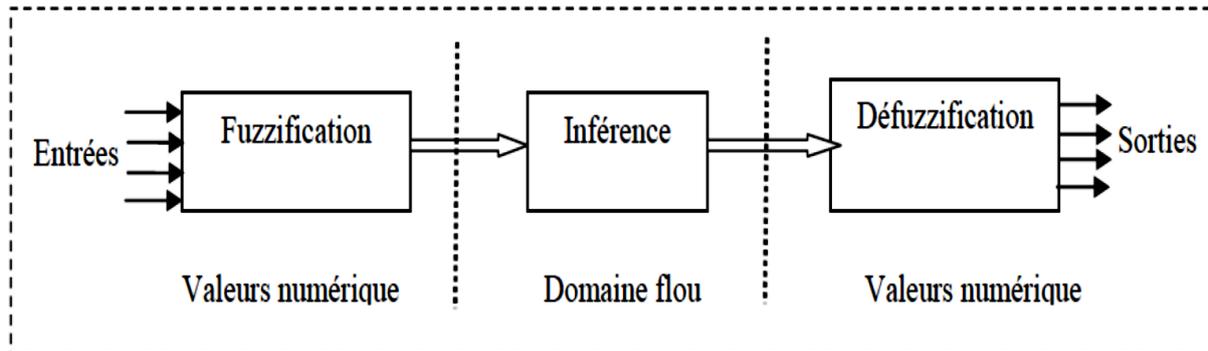


Figure. III.15. Structure interne d'un Régulateur de la logique floue [62]

a. Fuzzification :

A cette étape nous les variables physiques sont transformées en variables linguistiques. A chaque variable physique correspond un degré d'appartenance à une variable linguistique. La fuzzification est réalisée dans l'inférence d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques qui peuvent avoir plusieurs formes : triangulaire, trapézoïdale, d'une cloche ou d'autres.

b. Règles d'inférence :

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou en fonction des signaux d'entrée, elles sont exprimées sous la forme «SI ALORS». Dans les règles floues interviennent les opérateurs "ET" et "OU". L'opérateur "ET" s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur «OU» lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs. La méthode d'inférence Max-Min réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "ET" par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par «ALORS», lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie, réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur "OU", qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [63].

c. Défuzzification :

La Défuzzification permet de convertir les ensembles flous de sortie en variables physiques adaptées à un tel processus. Il existe plusieurs stratégies de Défuzzification ; on citera :

c.1) Méthode du centre de gravité (COG) :

L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivant :

$$U_{out} = \frac{\int x\mu_x dx}{\int \mu_x dx}$$

c.2) La méthode de hauteur :

Par la méthode des hauteurs, la valeur résultante U_{out} est la moyenne tous les centres de gravité individuels, divisée par leurs hauteurs (degré d'appartenance) [64]:

3. Application de la logique floue pour la commande du hacheur :

Le régulateur flou FLC présent dans ce système est conçu pour extraire la puissance maximale du vent (par la technique MPPT). Le FLC est l'un des meilleurs contrôleurs, utilisés pour le suivi du point de puissance maximum. Le MPPT-FLC intégré à notre système admet deux variables d'entrée :

- $E_v(k)$, l'erreur de la tension entre l'instant k et k-1 ;
- $E_p(k)$, l'erreur de la puissance entre l'instant k et k-1.

Ces variables sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} E_v(k) = V_d(k) - V_d(k-1) \\ E_p(k) = P(k) - P(k-1) \end{cases}$$

La variable de sortie du régulateur flou D représente le rapport cyclique entrée de hacheur BOOST. En ajustant le rapport cyclique du hacheur survolteur, la puissance maximale sera atteinte [65] (Figure. III.16).

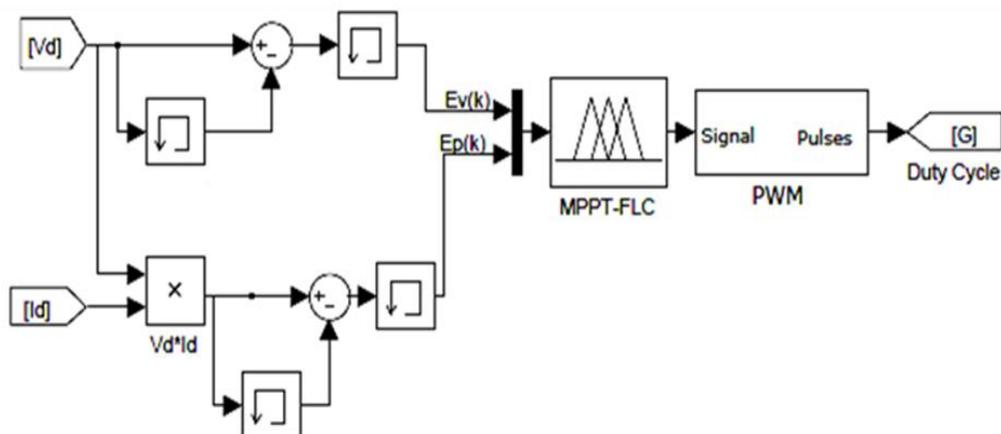


Figure. III.16. Schéma du régulateur flou (MPPT-FLC) sous Matlab-Simulink

VI. Résultats de simulations :

Pour tester l'efficacité de l'approche de contrôle et pour valider la réponse du système; le diagramme global illustré à la figure III.17 est implémenté dans le logiciel MatLab / Simulink. Un profil de vitesse du vent variable illustré à la figure III.23, est appliqué au système, il est défini par l'équation (III.10) [47]. $v(t) = 8 + \sin(0,3047.t) + 4 \sin(0,8665.t) + 2 \sin(3,2930.t) + \sin(9,6645.t)$ (III.10)

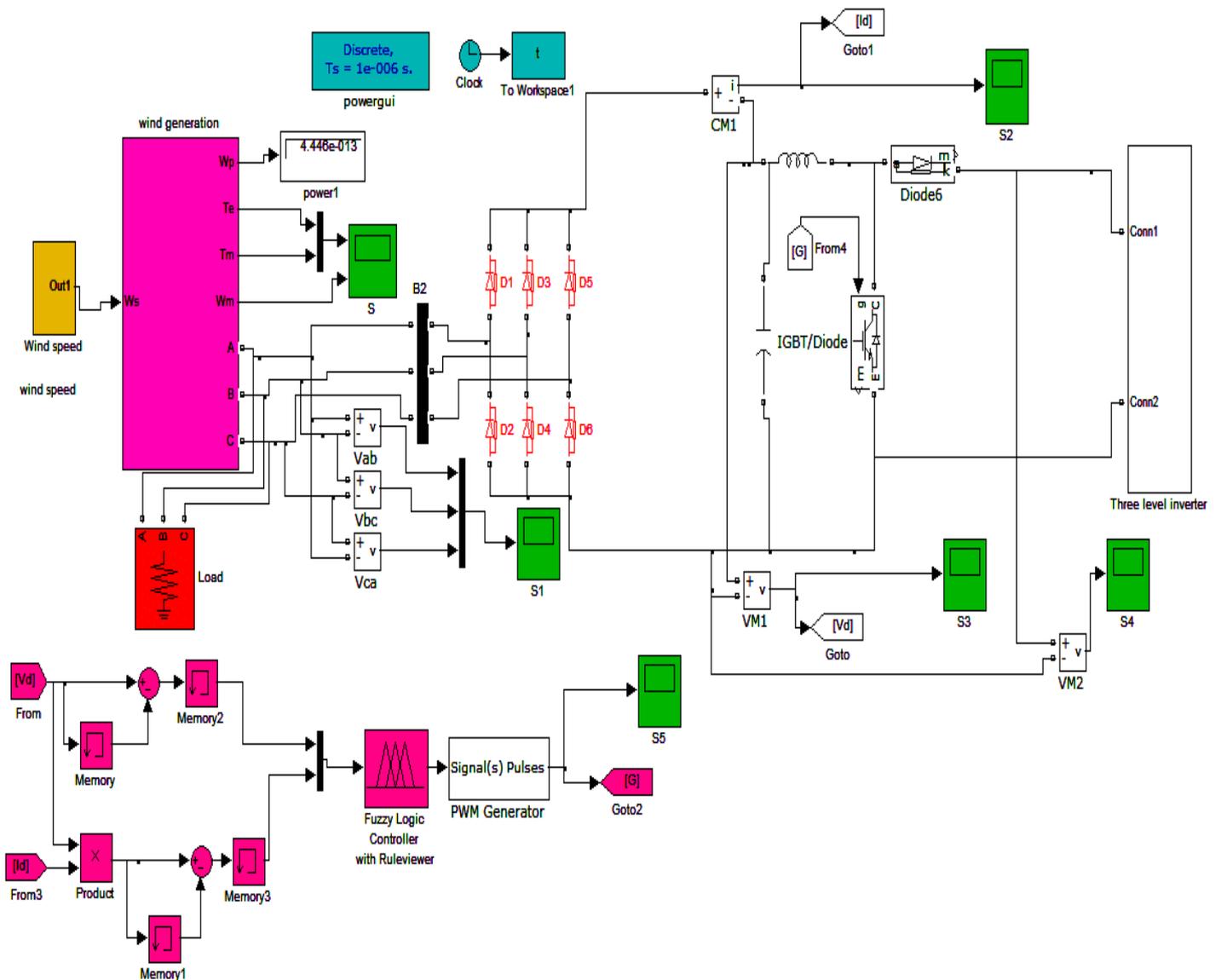


Figure III.17. Bloc Simulink global du système de production

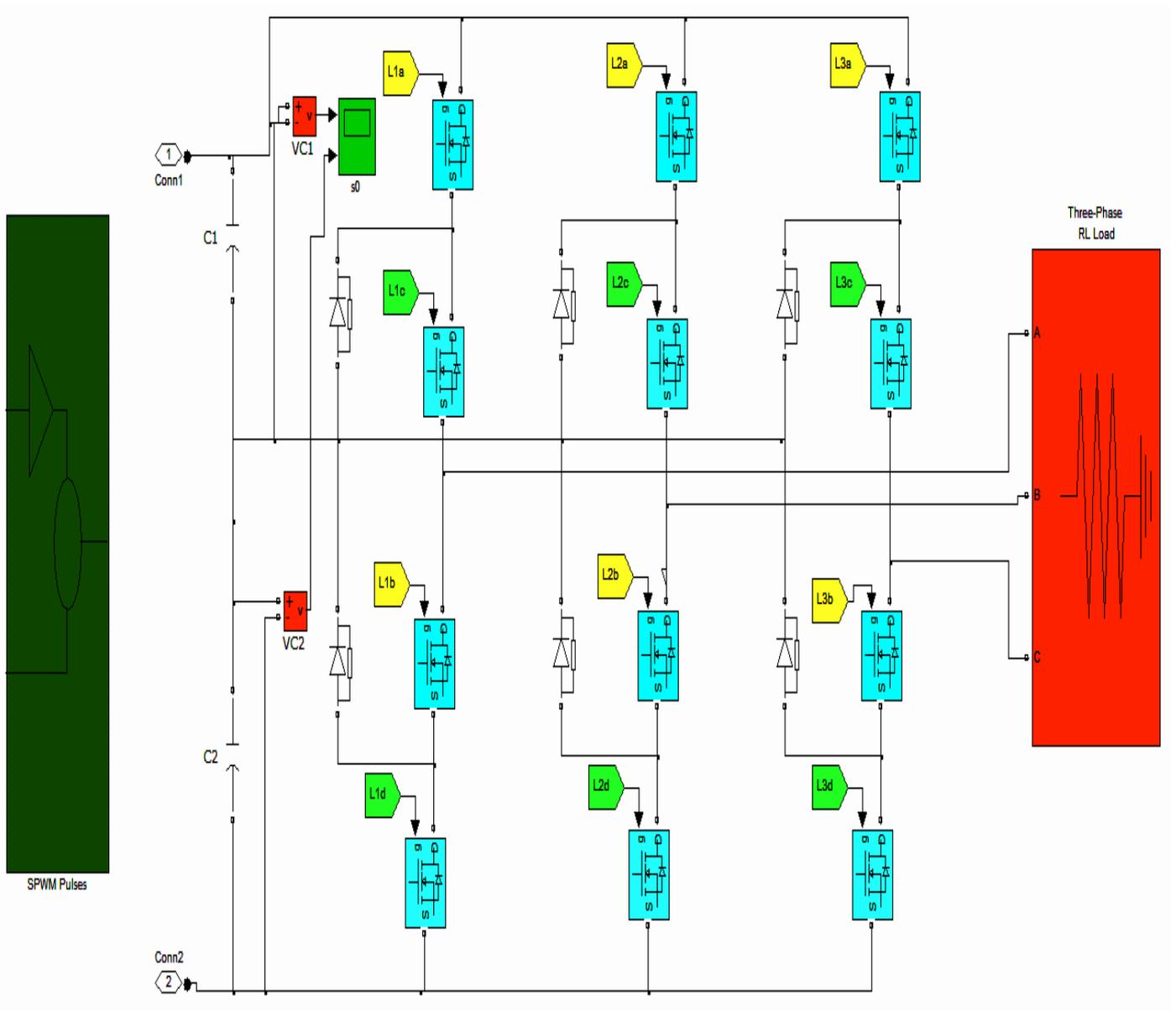


Figure III.18. Structure de l'onduleur de tension 3 niveaux

Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée/sortie du régulateur flou FLC sont représentées sur les figures III.19, III.20 et III.21 respectivement. Après le processus de fuzzification, la défuzzification est exécutée. Les valeurs floues sont converties en valeurs défuzzifiées; pour arriver aux valeurs de sortie finales.

La combinaison des différentes variables d'entrée linguistiques a engendré 21 solutions possibles du cycle de service. Les règles d'inférence pour ce contrôleur sont présentées dans le tableau 1. Le résultat numérique fourni par le bloc d'inférence est exposé dans la figure III.22. A titre d'exemple pour le cas d'une erreur de tension BP (3.3) et d'une erreur de puissance PO (0.264) nous aurons comme rapport cyclique VP ($D = 4,34$).

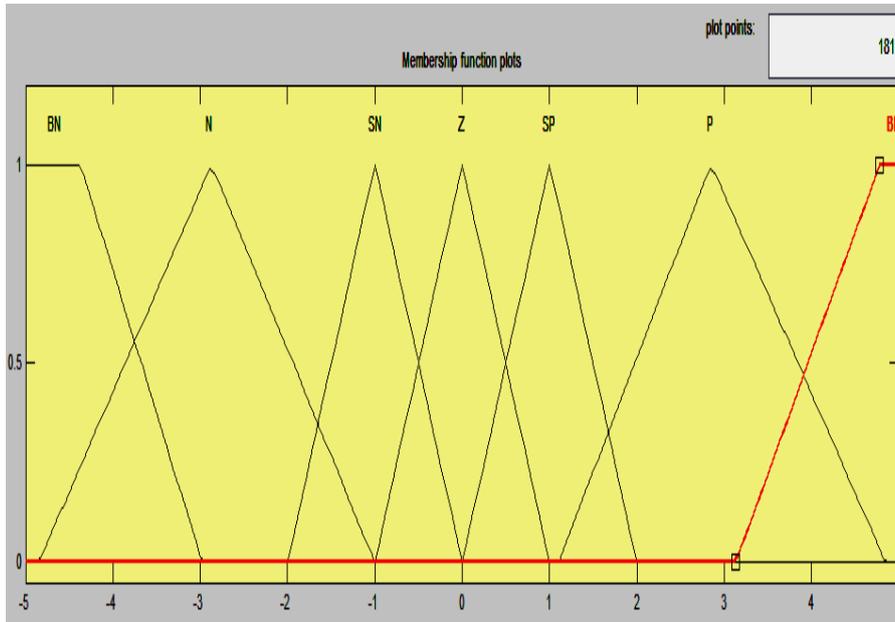


Figure III.19. Fonctions d'appartenance pour la variable d'entrée $E_v(k)$

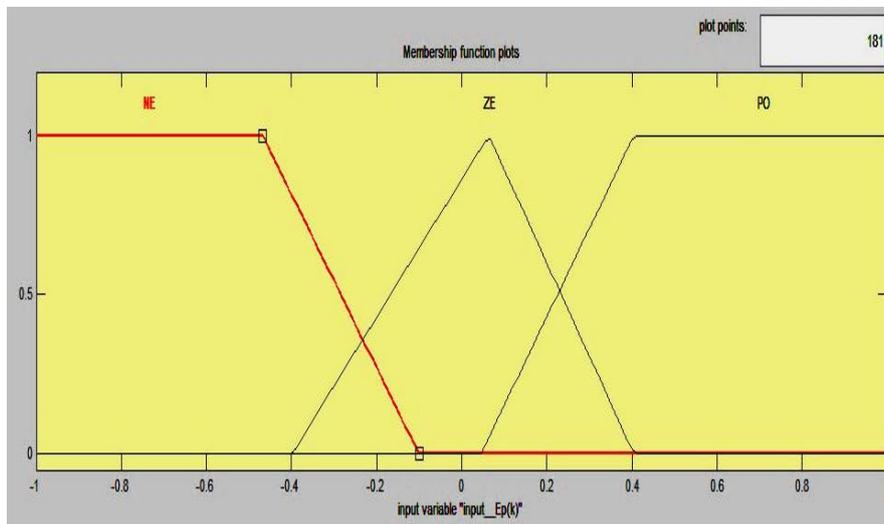


Figure III.20. Fonctions d'appartenance pour la variable d'entrée $E_p(k)$

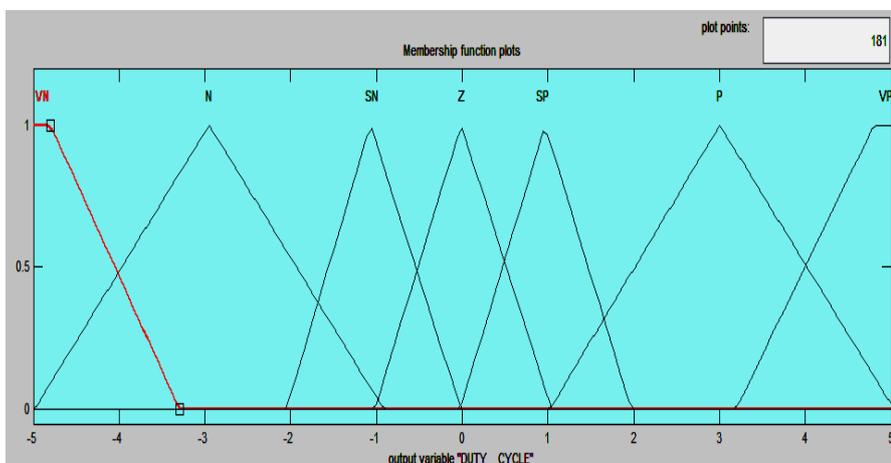


Figure III.21. Fonctions d'appartenance la variable de sortie (rapport cyclique)

| Variable de sortie <i>Duty_cycle</i> | | Variable d'entrée $E_V(k)$ | | | | | | |
|---|----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | | <i>BN</i> | <i>N</i> | <i>SN</i> | <i>Z</i> | <i>SP</i> | <i>P</i> | <i>BP</i> |
| Variable d'entrée $E_p(k)$ | <i>N</i> | <i>VP</i> | <i>SN</i> | <i>N</i> | <i>Z</i> | <i>SP</i> | <i>P</i> | <i>VP</i> |
| | <i>Z</i> | <i>VP</i> | <i>SN</i> | <i>SN</i> | <i>Z</i> | <i>SP</i> | <i>VP</i> | <i>VP</i> |
| | <i>P</i> | <i>VP</i> | <i>VN</i> | <i>VN</i> | <i>Z</i> | <i>P</i> | <i>VP</i> | <i>VP</i> |

Table 1 d'influence contrôleur

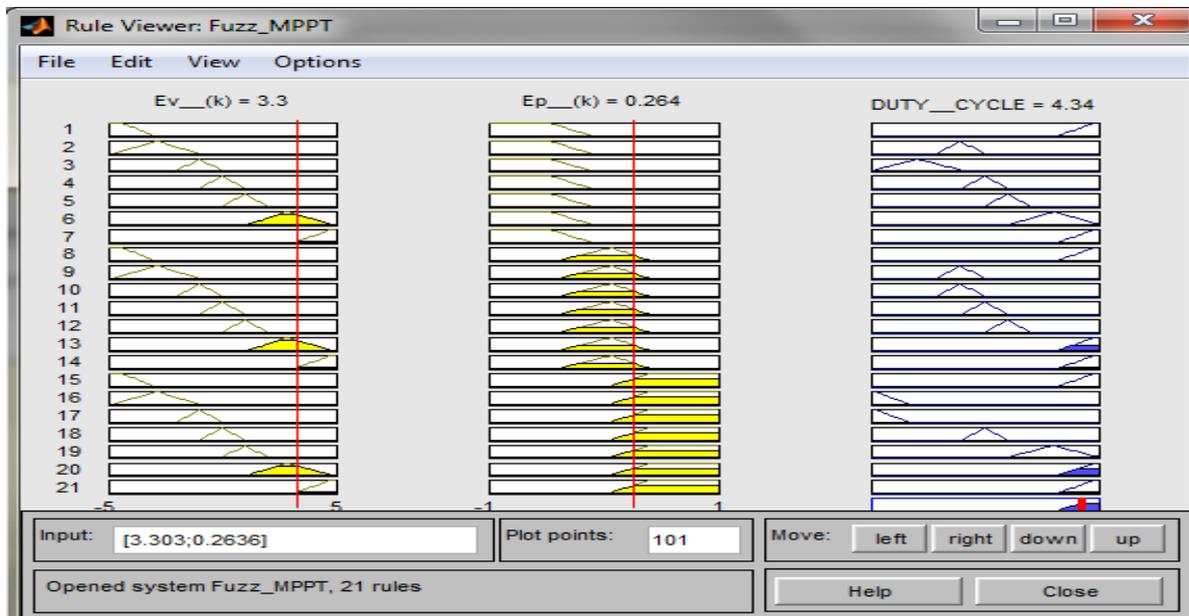


Figure III.22. Résultat numérique fourni par le bloc d'inférence

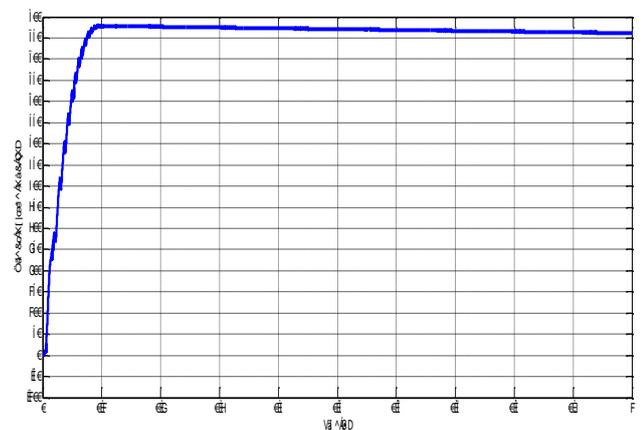
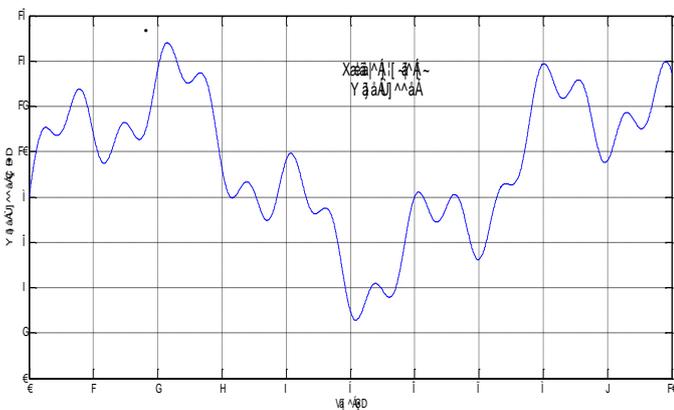


Figure III.23. Profile de la vitesse de vent Figure III.24. Variation de la tension du hacheur

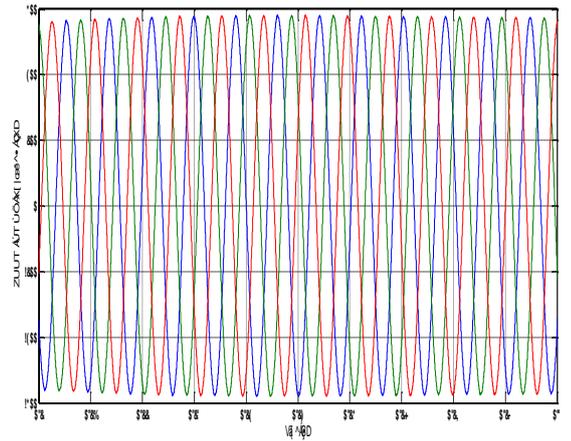
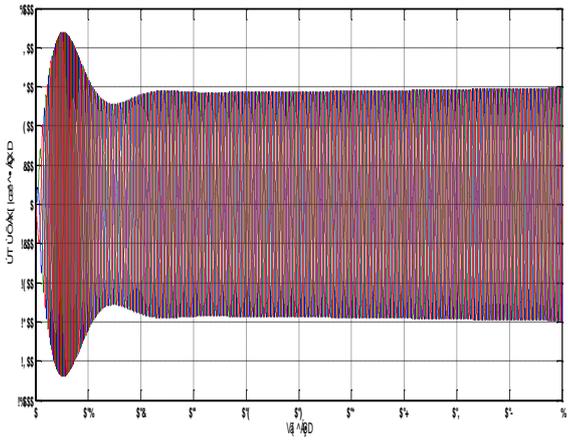


Figure III.25. Formes d'onde des tensions à la sortie de la GSAP

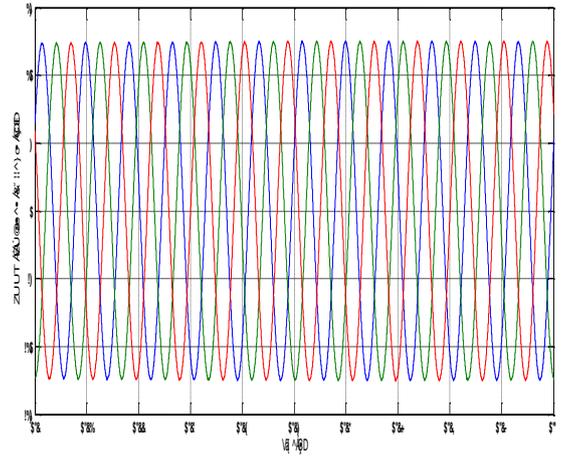
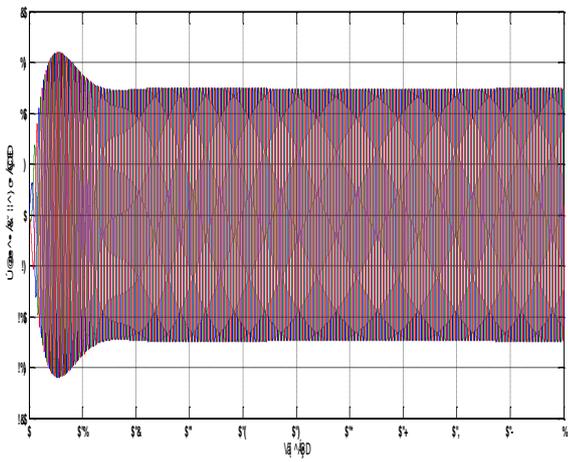


Figure III.26. Formes d'onde des courants à la sortie de la GSAP

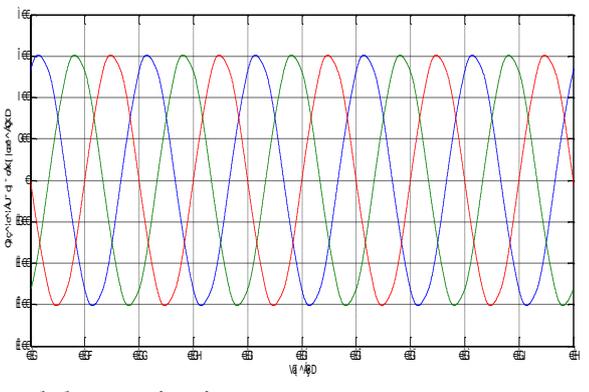
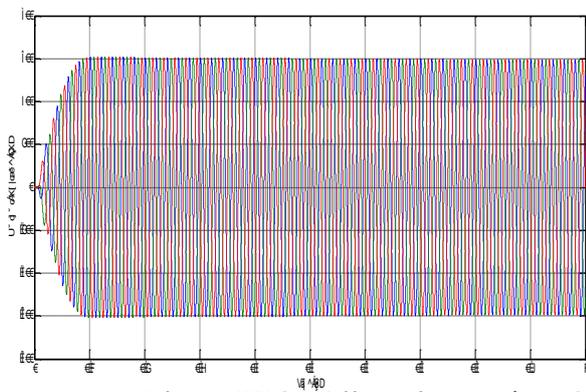


Figure III.27. Allure des tensions à la sortie de l'onduleur trois niveaux

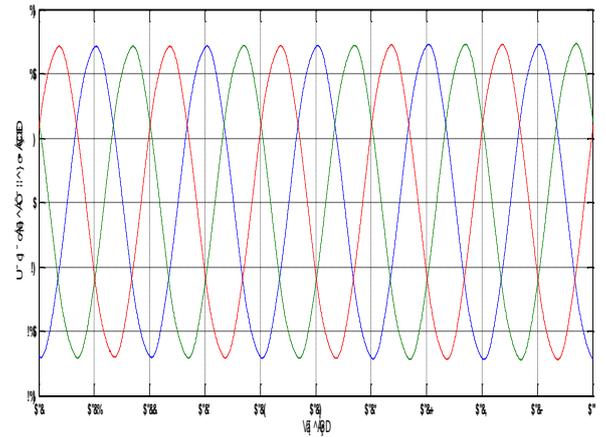
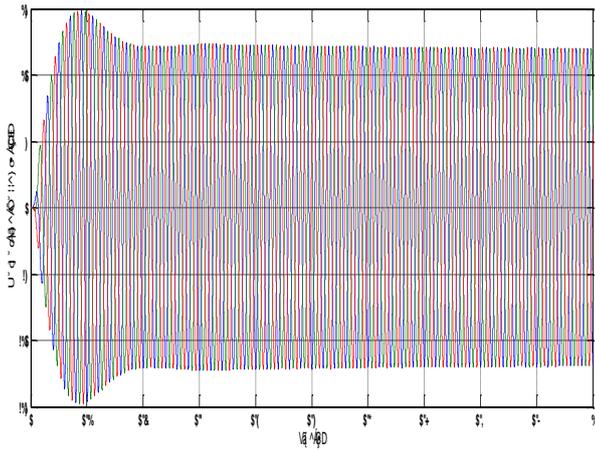


Figure III.28. Allure des Courants à la sortie de l'onduleur trois niveaux

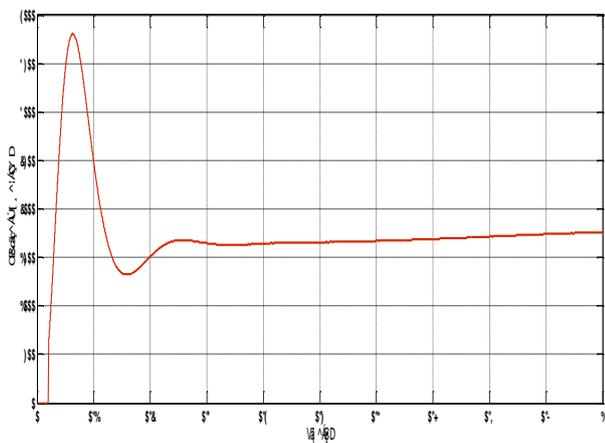


Figure III.29. Puissance active à la sortie de la GSAP

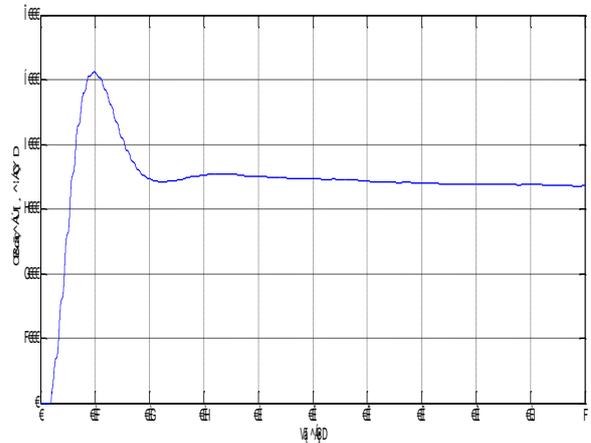


Figure III.30. Puissance active à la sortie de l'onduleur

Le régulateur flou FLC implémenté dans le système est réalisé pour suivre le point de fonctionnement de puissance maximale. Ainsi, la figure III.24 montre la variation de tension du convertisseur élévateur, qui est directement connecté à l'inverseur à trois niveaux. Nous trouvons les figures suivantes qui montrent respectivement les formes d'onde de tension, de courant et de puissance active du PMSG (voir les figures III.25, III.26 et III.29). La courbe de puissance à la sortie de la GSAP progresse à un rythme similaire au profil de vent appliqué au système.

Afin d'évaluer les performances de notre stratégie MPPT floue, nous comparons les profils de tension, de courant et de puissance à la sortie de l'onduleur à trois niveaux. Pour la tension, et le courant, on note une diminution du dépassement au départ ; la puissance de sortie extraite est nettement supérieure à la puissance en amont du FLC (voir figures III.27, III.28 et III.30).

On remarque d'après les figures de la puissance à la sortie de la GSAP, et celle à la sortie de l'onduleur ; que notre approche MPPT floue a pu contribuer d'une manière plus efficace à

l'extraction de la puissance maximale pour chaque vitesse du vent. En effet, nous constatons que pour des plages de vent faibles voir moyennes il y a une différence remarquable alors que pour les plages de vent assez grande on trouve que les puissances sont presque semblables.

VII. Conclusion :

Dans le but d'améliorer l'efficacité des systèmes de production à base d'énergie éolienne, nous avons développé une stratégie intelligente, basée sur la logique floue, pour l'extraction de la puissance maximale MPPT générée par la GSAP de l'éolienne. Cette stratégie permet d'optimiser à chaque instant et pour n'importe quelle vitesse de vent la puissance débitée par l'éolienne.

Ainsi nous avons commencé par présenter le système global à étudier, et ses différents constituants qui sont la turbine éolienne, la GSAP, l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC, et le hacheur survolteur (BOOST Converter). Puis, nous avons conçu un régulateur à base de la logique floue, dans le but d'optimiser le rapport cyclique du hacheur. Les résultats de simulation prouvent bien l'efficacité de la stratégie adoptée. En effet le MPPT flou permis la poursuite du point maximum selon la variation de vent avec un taux d'ondulation de la tension et de la puissance qui est minime.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous avons étudié dans ce mémoire la modélisation d'un système éolien basé sur une GSAP en vue d'améliorer la qualité de l'énergie, et la continuité de service de ce système.

Nous avons consacré un premier chapitre généralité sur l'énergie éolienne, et un bref rappel sur les différents constituants d'un aérogénérateur ainsi que sa modélisation.

Dans un second chapitre, nous avons développé la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents, après nous avons utilisé la transformation de Park pour éviter la complexité des équations différentielles ; cette machine offre une multitude d'avantages par rapport à ses concurrentes, surtout pour un fonctionnement à vitesse variable.

Le troisième chapitre a été réservé à la modélisation globale de la chaîne de conversion à base d'une GSAP, puis à l'interprétation des différents résultats de simulations sur l'environnement MATLAB SIMULINK. Nous avons introduit un régulateur flou pour la commande de l'hacheur survolteur dont la tension de sortie a été débitée dans un onduleur de tensions à trois niveaux ; ceci dans le but du suivi du point maximum de puissance à travers la technique MPPT.

Après une étude comparative de deux cas de simulations qui sont l'étude du système de production sans régulateur, et un second système où on intègre un régulateur intelligent (contrôleur à base de la logique floue) ; Ensuite, et à travers les résultats obtenus, l'analyse de ces résultats obtenus dans ce chapitre montre clairement un degré d'efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation de la vitesse du vent.

L'utilisation de la GSAP dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis d'autres machines.

Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes de petite et moyenne puissance sont constituées base de GSAP car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Face à ces constats et aux résultats obtenus, des perspectives peuvent être envisagées, ceci bien sûr pour contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif Turbine-GSAP-convertisseur :

- Etablissement d'un système de production à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour pouvoir faire une comparaison des deux moyens de production.
- Contrôle du système par d'autres techniques d'intelligence artificielle tels que : l'approche classique du MPPT Perturbation et Observation (P&O), et les algorithmes génétiques...etc.
- Intégration du système de stockage de l'énergie produite.
- Etude d'un système hybride de production d'énergie renouvelable

Bibliographie

- [1]. Bahousi Siham, Touhami Saad « Etude comparative d'un onduleur triphasé 3 niveaux par les stratégies spwm et svpwm destinée à une éolienne », Thèse de Master de l'Université d'Oran-2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Juin 2016.
- [2]. Association pour la promotion des énergies renouvelables : <http://www.apere.org>.
- [3]. Patrick Piro, « Guide des énergies vertes pour la maison », Livre éditions : Terre vivante, L'écologie pratique, 2006.
- [4]. <http://web.archive.org/web/20080509052730/www.lenergiecreative.com/> (section «énergie et planète »).
- [5]. Ministère de l'énergie et des mines, Algérie ; à base de génératrice asynchrone à cage». Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Université du Québec à trois Rivières, 2010. <http://www.memalgeria.org/français/index.php?page=enr>.
- [6]. Equilibres, La lettre de la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz, N 12, Mars 2011.
- [7]. A. Dendouga, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) » ; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.
- [8]. Hiber Wafa : «Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éoliens» Mémoire de Magister, université de Sétif 1, 2013.
- [9]. Mamadou Balde : «Etude d'un compensateur statique pour éolienne à vitesse fixe
- [10]. S. Mathew, « Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics », Springer, 2006.
- [11]. Michel Soutif, « Une brève histoire de l'énergie » ; encyclopédie de l'énergie, 07/2015.
- [12]. E. Hau, « Wind turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics »; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [13]. Vincent Trachsel, « L'énergie éolienne et solaire : alternatives aux besoins énergétiques de la Suisse de demain ». Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, n° 31, Juillet 2007, Physique.
- [14]. Seren KROHN, « Pourquoi l'énergie éolienne » ; Revue de la pollution atmosphérique. juillet-septembre 1997.
- [15]. M. Michel FOLLIASSON, « Les éoliennes ». Rapport du groupe de travail De l'Académie des Beaux-Arts ; Institut de France Académie des Beaux-Arts.
- [16]. Enercon, « World's most powerful wind turbine installed near Emden », Windblatt, Issue 04, 6- 7, 2007.
- [17]. Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables 2016. Revue REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21th century.
- [18]. E.Hau, « Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics », second edition. Springer, 2005.

- [19]. N.M. Kasbadji, « Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » ; Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2006.
- [20]. La tribune ; <http://www.latribune-dz.com/>.
- [21]. Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de développement des énergies renouvelables-CDER, <http://portail.cder.dz/spip.php?article4321>.
- [22]. J. MARTIN : « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 85851- B 8 58521.
- [23]. Naoul Hamdi : «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [24]. S. EL AIMANI : « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat « Ecole Centrale de Lille », 2004.
- [25]. Armand BOYETT, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [26]. DJERIRI YOUCEF : «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de doctorat université DJILLALI LIABES de sidi bel-abbés faculté des sciences de l'ingénieur, 2015.
- [27]. B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [28]. Mirecki. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » ; Thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005).
- [29]. Panorama de l'électricité renouvelable, 6ème édition : décembre 2015.
- [30]. M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez, « Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks »; IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.58, No.4, pp.1081–1095, April 2011.
- [31]. Corinne Dubois, Le guide de l'éolien, techniques et pratiques. Editions Eyrolles ; février 2009.
- [32]. M. Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » ; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France, 2007.
- [33]. A. Diop « Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateurs : Simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage variable », Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, 1999.
- [34]. S. El Aimani, B. François, B. Robyns, F. Minne, « Modeling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators for Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network », 10th European Conference on Power Electronics and

- Applications : (EPE 2003), Toulouse, France, CD, ISBN 90- 75815-07-7, 2 – 04/09/ 2003.
- [35]. N. Laverdure « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'INPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09/12/ 2005.
- [36]. Tarak GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse doctorat del'EMPA le 29/09/2011.
- [37]. Arnaud DAVIGNY, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Thèse doctorat de l'UST, Lille le 11/12/2007.
- [38]. F Z Naama, A Zegaoui, Y Benyessad, and al “Model and Simulation of a Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator” Science Direct. Energy Procedia 157 (2019) 737–745.
- [39]. S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla “Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne”. Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 - 161.
- [40]. F. Achouri, A.Y. Achour and B. Mendil “A PMSG wind turbine control based on passivity”. Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar (2011) 261 – 270.
- [41]. M.J. Lalou “Système de conversion simplifié pour éolienne équipée de génératrice synchrone à aimants permanents”. Revue des Energies Renouvelables Vol. 18 N°3 (2015) 469 – 477.
- [42]. H.-J. Wagner. J. Mathur “Introduction to Wind Energy Systems. Basics, Green Energy and Technology. ISBN 978-3-319-68803-9. Thirdedition: © Springer International Publishing AG 2018.
- [43]. L. Saad, H. Hicham and F. AH Khalid “Modeling and control of a permanent magnet Synchronous generator driven by a wind turbine” 2ème conférenceInternationale des énergiesrenouvelables CIER-2014. Proceedings of Engineering and Technology – PET Copyright - IPCO 2015.
- [44]. S. Kumar Bhuyan, A. Prasad Naik, B. Panda, P. Kumar Hota, “Modelling and Simulation of Grid Connected Wind Energy Conversion System using Matlab,” JASC: Journal of Applied Science and Computations. ISSN NO: 1076-5131. Volume VI, Issue II, February/2019.
- [45]. Hossam H. H. Mousa • Abdel-Raheem Youssef •Essam E. M. Mohamed “Modified P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of five-phase PMSG based wind generation system”, SN Applied Sciences (2019) 1:838 | <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0878-5>.
- [46]. Q.-Vi Ngo, C. Yi, T.-Thang Nguyen “The fuzzy-PID based-pitch angle controller for small-scale wind turbine” International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 135~142.

- [47]. R. Tiwari, R. Babu. N “Fuzzy logic based mppt for permanent magnet synchronous generator in wind energy conversion system” IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier. Papers On Line 49-1 (2016) 462–467.
- [48]. B. Biharee Srivastava, Er. Sudhanshu Tripathi “Tracking of Maximum Power from Wind Using Fuzzy Logic Controller Based On PMSG” International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). | IJMER | ISSN: 2249–6645. Vol. 4 | Iss.11| Nov. 2014.
- [49]. A. Uehara, T. Senjyu, A. Yona, T. Funabashi and C.H. Kim “A Fuzzy-Logic Based Output Power Smoothing Method of WECS with Permanent Magnet Synchronous Generator using Inertia of Wind Turbine”. Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 1, No. 3, pp. 309~316, 2011.
- [50]. A. Aissaoui, A. Tahour, N. Essounbouli, and al ” A Fuzzy-PI control to extract an optimal power from wind turbine” Energy Conversion and Management journal; 65 (2013) 688–696.
- [51]. Jigar K. Parmar, S. K. Darji, Gajendra R. Pate “Fuzzy based MPPT controller of wind energy conversion system using PMSG”. International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE): ISSN (P): 2278-9944; ISSN (E): 2278-9952. Vol. 7, Issue 3, Apr - May 2018, 17-30. © IASET.
- [52]. B. Belkacem, L. Abdelhakem-Koridak, M. Rahli “Comparative Study between SPWM and SVPWM control of a three level voltage inverter dedicated to a variable speed wind turbine”. Journal of Power Technologies 97 (3) (2017) 190–200.
- [53]. H. Hachemi, A. Allali, B. Belkacem “Control of the energy Quality for a DFIG powered by multilevel inverters”. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol. 9, No. 3, Month 2019, ISSN: 2088-8694.
- [54]. Colas CELLIER “étude et simulation d’un système éolien connecté au réseau monophasé”. mémoire présenté à l’école de technologie supérieure comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise en génie électrique ; Montréal, le 28 juillet 2012.
- [55]. Guillaume Pongo Pyoumea” Modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents” mémoire présenté à l'université du Québec en Abitibi Témiscamingue comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie ; Avril2018.
- [56]. B. Abdessemed, K. Salah-ddine, C. Elidrissi Mohamed “Design and Modeling of DC/ DC Boost Converter for Mobile Device Applications”. International Journal of Science and Technology Volume 2 No. 5, May 2013.
- [57]. B. M Hasaneen, and Adel A. Elbaset Mohammed, “Design and simulation of DC/DC boost converter,” Power System Conf. Middle-East, pp. 335-340, 2008.
- [58]. Ch. Ghabara, H. Jouini, M. Lahbib, A. Mami “Stratégie d’optimisation floue du point d’extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés” International conference on green energy and

- environmental engineering (GEEE 2017) ; International journal of scientificresearch and engineering Technology-IGSET. VOL 5 pp 48-54.
- [59]. L. Reznik “Fuzzy Controllers” Victoria University of Technology, Melbourne, Australia. Newnes, An imprint of Butterworth-Heinemann. First published 1997.
- [60]. A. Asri, Y. Mihoub, S. Hassaine, P.O. Logerais, T. Allaoui, “Intelligent Maximum Power Tracking Control of a PMSG Wind Energy Conversion System,” Asian Journal of Control • April 2019.
- [61]. A.A. Sale, Noura A. Nour Aldin, Ahmed M. Azmy, Walid S. E. Abdellatif,” A Fuzzy Logic-Based MPPT Technique for PMSG Wind Generation System”, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH. A.A. Salem et al, Vol.9, No.4, December 2019.
- [62]. YacineHocini, Ahmed. Allali, HouariMerabetBoulouiha “Power fuzzy adaptive control for wind turbine” International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 10, No. 5, Octobre 2020, pp. 5262~5273. ISSN : 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v10i5.pp5262-5273.
- [63]. ASSAM Azzeddine, BOUKERMA Redouane « Optimisation et commande d’une chaine de conversion éolienne par la logique floue adaptative » Thèse de master de l’université Akli Mohand Oulhadj-Bouira ; 2019.
- [64]. LouarFateh « Modélisation et simulation d’une chaine de conversiond’énergie éolienne à base d’une machine synchroneà aimant permanent » Thèse de DOCTORAT 3ème cycle de l’université Badji Mokhtar Annaba ; 2016.
- [65]. BontjesJoamie « Etude d'un hacheursurvolteur »ECAM EPMISeptembre 6, 2017.

