

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Réseaux Electriques**
Filière : **Génie Electrique**

Présenté par
Nabila CHABBI
Kahina MERBOUTI

Mémoire dirigé par **Koussaila MESBAH**

Thème

**Etude et émulation d'une turbine
éolienne de 3kW**

Mémoire soutenu publiquement le 06 Juillet 2017 devant le jury composé de :

M Tahar OTMANE-CHERIF

MCA, UMMTO, Président

M Koussaila MESBAH

MAB, UMMTO, Rapporteur

M Hamid SEDDIKI

MCA, UMMTO, Examineur

M Adel RAHOU

Docteur, UMMTO, Examineur

Remerciements

*On tient à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur **Koussaila MESBAH**, maître assistant classe B en UMMTO, pour avoir dirigé ce travail, et pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements distingués vont à Monsieur **Tahar OTMANE-CHERIF**, maître conférence de classe A, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*On remercie vivement Monsieur **Hamid SEDDIKI**, maître conférence classe A, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à monsieur **Adel RAHOUI**, Docteur en UMMTO, pour avoir accepté d'examiner ce travail en nous faisant l'honneur de participer à ce jury.*

Que tous nos enseignants du département d'électrotechnique soient remerciés pour leurs conseils et encouragement, leurs discussions scientifiques enrichissantes ont élargi nos horizons de connaissances.

Sans oublier l'équipe du service technique du SONELGAZ de la direction de TIGZIRT un grand merci pour leur aide précieuse.

Dédicaces

Je dédie ce travail qui est l'aboutissement de plusieurs années de sacrifice, à mes êtres les plus chers au monde, d'abord à la mémoire de mon père, que Dieu le garde dans son vaste paradis, à ma très chère mère. Durant cette longue période, elle n'a ménagé aucun effort moral et matériel pour me prêter son assistance indéfectible que Dieu me la protège.

A mes frères et mes sœurs, à tous mes amis(es) et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire, à mon futur mari et mes enfants.

Une spéciale dédicace aux étudiants du master II de la promotion 2016-2017 option réseaux électriques.

Ceci sans oublier mes professeurs auxquels je rends un vibrant hommage pour la science et le savoir prodigués tout au long de mon cursus universitaire. Ce qui m'a permis de réaliser ce mémoire duquel ils tireront toute leur fierté et qui, j'espère, sera à la hauteur de leurs espérances.

NABILA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail avec un grand plaisir à :

A mon cher papa : Celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grandes personnes.

A ma chère maman : Celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation durant toutes ces longues années.

A mes frères et sœur Anis, Lila, Younes, Nassima et Sofiane, et à tous mes proches qui m'ont beaucoup soutenue durant cette période.

A tous mes amis.

A tous les étudiants de la promotion 2016/2017 ; option réseau électrique.

KAHINA

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes éoliens

I. Introduction	4
I.1. L'utilité de l'énergie éolienne	4
I.2. Actualités sur l'énergie éolienne.....	4
I.3. Descriptifs et qualités d'énergie d'une éolienne	7
I.3.1. Définitions.....	7
I.3.2. Principaux composants d'une éolienne	8
I.4. Types d'éoliennes	8
I.4.1 Eolienne à axe vertical	9
I.4.2 Eolienne à axe horizontal.....	10
I.5. Energie cinétique du vent.....	11
I.5.1. Loi de BETZ	11
I.5.2. Production de l'énergie mécanique.....	13
I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	14
I.6.1. Phases de fonctionnement d'une éolienne	15
I.6.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe.....	15
I.6.1.2. Fonctionnement à vitesse variable	17
I.6.1.2.1. Eolienne isolée	18
I.6.1.2.2. Eolienne connectée au réseau	18
I.6.2. Bilan des forces sur une pale	18
I.6.3. Production optimale de l'énergie	19
I.7. Etat de l'art sur les génératrices éoliennes à vitesse variable	20
I.7.1. Système à génératrice synchrone	20
I.7.2. Système à génératrice asynchrone	21
I.7.3. Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation.....	22
I.7.3.1. MADA à énergie rotorique dissipée	22
I.7.3.2. MADA : Structure de KRAMER.....	23
I.7.3.3. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.....	23
I.7.3.4. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.....	23
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	24
I.9. Connexion des fermes éoliennes vers les réseaux et les contraintes à respecter	26

I.9.1. Raccordement au réseau de distribution	26
I.9.2. Tension de raccordement	27
I.9.3. Contraintes de raccordement de l'éolienne au réseau de distribution.....	28
I.10. Conclusion	29

Chapitre II : Modélisation et commande d'une turbine éolienne

II.1. Introduction	32
II.2. Modélisation et reproduction des variations du vent.....	32
II.2.1. Définition du vent.....	32
II.2.2. Modélisation de la vitesse du vent.....	32
II.3. Modélisation mécanique de la turbine	34
II.3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine	34
II.3.2. Mise en équation de la turbine éolienne	36
II.3.2.1. Modélisation de la turbine éolienne.....	36
II.3.2.2. Choix du multiplicateur	38
II.3.3. Mise en équation de l'arbre mécanique	38
II.3.3.1. Equation mécanique de l'arbre de la génératrice.....	39
II.4. Méthode de la recherche de maximum de puissance (MPPT)	40
II.4.1. Mise en équation de la puissance maximale de la turbine.....	40
II.4.2. Mise en équation du couple optimale de la turbine	40
II.5. Simulation.....	41
II.5.1. Modélisation de la turbine	41
II.5.2. Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.....	42
II.5.2.1. Résultat de simulation sans asservissement de vitesse	43
II.5.3. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	45
II.5.3.1. Mise en œuvre du régulateur	46
II.5.3.2. Résultat de simulation avec asservissement de vitesse	47
II.6. Comparaison entre les deux méthodes	48
II.7. Conclusion.....	50

Chapitre III : Etude d'un émulateur à base d'une MCC

III.1. Introduction	53
III.2. Construction du l'émulateur.....	53
III.3. Stratégie de commande de la MCC.....	54
III.3.1. Modèle de la MCC	54
III.3.2. Commande la MCC.....	55

III.4. Structure de la commande PI.....	56
III.5. Calcul des régulateurs	58
III.6. Commande en couple de la MCC	59
III.7. Simulation de l'émulateur	59
III.8. Résultat de simulation et interprétation.....	60
III.9. Comparaison entre les deux systèmes étudiés.....	62
III.10. Conclusion.....	62
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	

Introduction générale

L'augmentation aujourd'hui de l'utilisation des appareils électroménagers et la consommation industrielle favorisent une demande importante d'électricité. Dans les pays industrialisés cette demande est trop élevée, ce qui entraîne un recours systématique aux combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Il est à savoir que les sources de ces combustibles restent non renouvelables et limitées à long terme, ce qui engendre un coût prépondérant de ceux-ci.

L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place parmi les énergies renouvelables, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire aux autres sources telles l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'énergie thermique, etc. En plus, elle n'émet pas de gaz à effet de serre.

Aujourd'hui, beaucoup de travaux de recherche portent sur l'intégration et les impacts de l'énergie éolienne sur les réseaux de distribution. Ainsi, plusieurs technologies de génératrices éoliennes sont actuellement proposées sur le marché.

L'augmentation de la puissance éolienne installée dans le monde a un impact croissant sur le réseau électrique du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité.

Notre projet vise à étudier les caractéristiques de connexion d'un aérogénérateur à partir d'un émulateur éolien à base d'une machine à courant continu. L'objectif principal est de développer une méthode de commande MPPT dans le but d'adapter la vitesse de la turbine à la vitesse du vent, afin de maximiser la puissance convertie, ceci permettra d'améliorer leur intégration aux réseaux électriques. Pour réussir nos objectifs nous avons suivi la méthodologie suivante :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des généralités sur l'énergie renouvelable plus précisément sur les systèmes d'énergie éoliens dans le monde. Nous allons décrire les principales constitutions d'un aérogénérateur en passant en revue les différents types d'éoliennes existantes. Nous présenterons ensuite les convertisseurs de l'énergie éolienne à travers les différents types de génératrice utilisée.

Le chapitre deux sera consacré à l'étude approfondie de la partie mécanique de la turbine éolienne en passant par sa modélisation et sa mise en équation pour pouvoir la commander en présentant deux stratégies de commande de sa vitesse mécanique, en utilisant

un régulateur PI pour maximiser sa puissance extraite (MPPT). La simulation sera effectuée avec l'outil SIMULINK de MATLAB.

Au troisième chapitre on s'intéressera à l'étude d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu commandée de façon à reproduire le comportement mécanique de la turbine éolienne.

.....

Chapitre I :

.....

*Etat de l'art des systèmes
éoliens*

I. Introduction :

L'énergie éolienne est utilisée depuis très longtemps déjà, elle a remplacé les rames pour faire avancer les navires. Elle a été utilisée pour actionner les meules des moulins pour moudre du grain, elle permet encore le pompage d'eau dans les champs ; à cette époque l'énergie cinétique du vent était uniquement transformé en énergie mécanique.

La demande croissante en énergie électrique dans le monde fait appel à plusieurs sources d'énergie (renouvelables et non renouvelables). L'énergie éolienne étant une énergie renouvelable qui produit une énergie propre est devenue un moyen très important dans la production de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent.

I.1 L'utilité de l'énergie éolienne :

Depuis plus de 100 ans, l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité, une source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

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

I.2 Actualités sur l'énergie éolienne :

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème de réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont les facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source alternative et durable, en le comparant avec d'autres sources d'énergie, cette dernière est renouvelable et produit une énergie propre. Elle est devenue un moyen très important de production de l'énergie électrique dans plusieurs pays. [2]

Le parc mondial s'élève à 432 419MW à la fin de 2015 contre 369 595 MW en 2014, enregistrant une croissance de 17%. Pour rappel, il y a 11ans, en 2005 la puissance de parc était de 59 048 MW. Les investissements mondiaux dans le secteur s'élèvent à 109 milliards de dollars contre 99 milliards de dollars en 2014. [3]

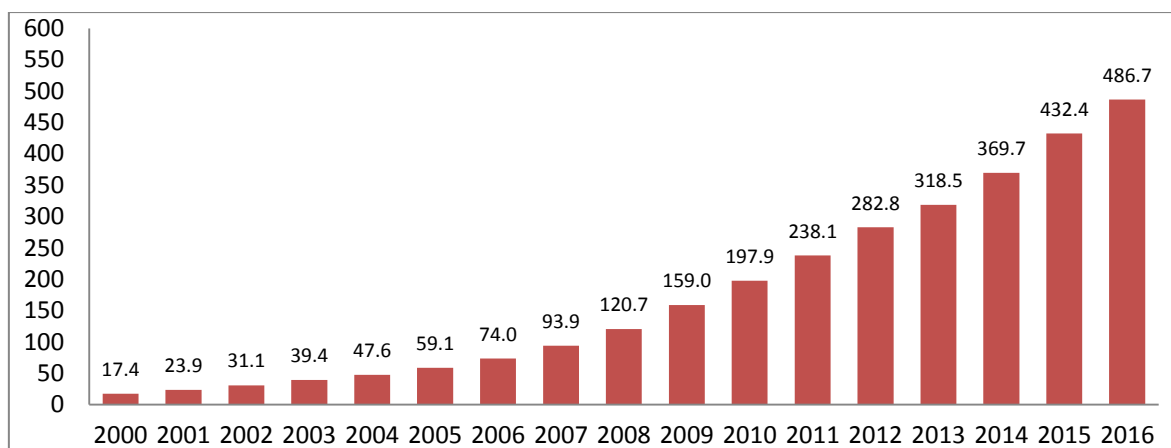


Figure 1.1 : Evaluation de la capacité installée dans le monde depuis 2000 [1]

Le marché mondial est attiré par l'ASIE : la Chine a installé 30 500MW en 2015, soit la moitié de la progression mondiale. Son parc, qui a progressé de plus de 22% en un an, celui de l'Inde a 25 088MW, avec 2 623MW installé en 2015.

Aux Etats-Unis, 8 598MW ont été raccordés en 2015, le parc compte désormais 74 500MW. En Amérique de sud, le dynamique du marché repose sur le Brésil qui a vu son parc augmenter de 2 754MW en un an et représente aujourd'hui un total de 8 715MW, contre 5 926MW fin 2014.

En Europe l'Allemagne a enregistré une année record, avec 6 013MW de nouvelles installations, dont 2 300MW d'éolien en mer. Son parc s'élève à 45 000MW. La Pologne se situe à la deuxième position pour les nouvelles installations avec 1 266MW raccordés. Fin 2015, le parc Polonais affiche une puissance de 5 100MW. [3]

La troisième nation européenne et la France, avec 1 073MW raccordés l'année dernière, elle dispose, au 31 décembre 2014 d'un parc de 10 312MW. La grande Bretagne a de son côté, installé 975MW et la puissance de son parc et de 13 600MW. Le total des nouvelles capacités d'Europe atteint 12 800MW. Les investissements dans le secteur se sont élevés à 26.4 milliards d'euros, avec une puissance de plus 10 300MW. La France dispose du 4^{ème} parc européen derrière l'Allemagne, l'Espagne et la Grande-Bretagne.

En Afrique la puissance installée a progressé de 30% en 2015, passant de 1 612MW fin 2013 à 2 536MW en 2014 et 3 829MW en fin 2015. L'Afrique du sud a contribué pour 64% à

la production du parc africain avec plus de 483MW, de ce fait, elle est le leader africain avec 1 053MW installés fin 2015 contre 750MW fin 2014. Après avoir fait une décennie pour installer ces premières éoliennes, le plan directeur énergétique prévoit 9 000MW éoliens d'ici 2030.

Le Maroc n'était qu'au deuxième rang en Afrique avec 787MW fin 2015, sans nouvelle mise en service en 2015.il prévoit en 2020 des parcs éoliens fournissant 12% de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000MW. Après le Maroc se trouve l'Egypte 610MW en fin 2015 ; au 4^{ème} rang arrive l'Ethiopie avec 324MW, suivie de la Tunisie de 245MW.

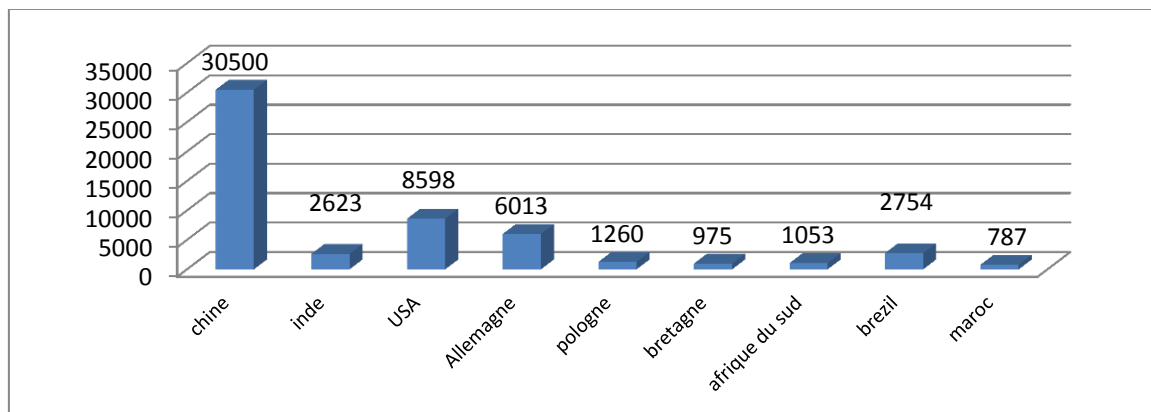


Figure I-2 : Capacité éolienne installée dans le monde en 2015 [1]

L'Algérie avait réceptionné sa première ferme éolienne pilote d'Adrar le 4 juillet 2014, pour un coût total de 2.8 milliards de dinars. Elle se déploie sur 30 hectares et a une capacité de 10MW.

Le potentiel qu'a l'Algérie est très important si l'on s'intéresse au solaire et à l'éolien. Le gouvernement a estimé que le potentiel solaire était le plus représentatif, et le programme national est donc axé essentiellement sur l'énergie solaire. L'éolien la biomasse et la géothermie représente une partie plus marginale de projet de développement des énergies renouvelable. Dans l'ensemble, le programme table sur la production de 40% des besoins d'électricité de pays à partir des énergies renouvelables d'ici 2030(37% pour le solaire et 3%pour l'éolien). [3]

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représenté à la figure (1.3) monte que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieure à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée, cependant, les cites côtière d'Oran, Bejaïa et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El

KHEITER ainsi que la région délimité par Bejaïa par le Nord et Biskra au Sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur de l'éolienne choisit est élevée. [3]

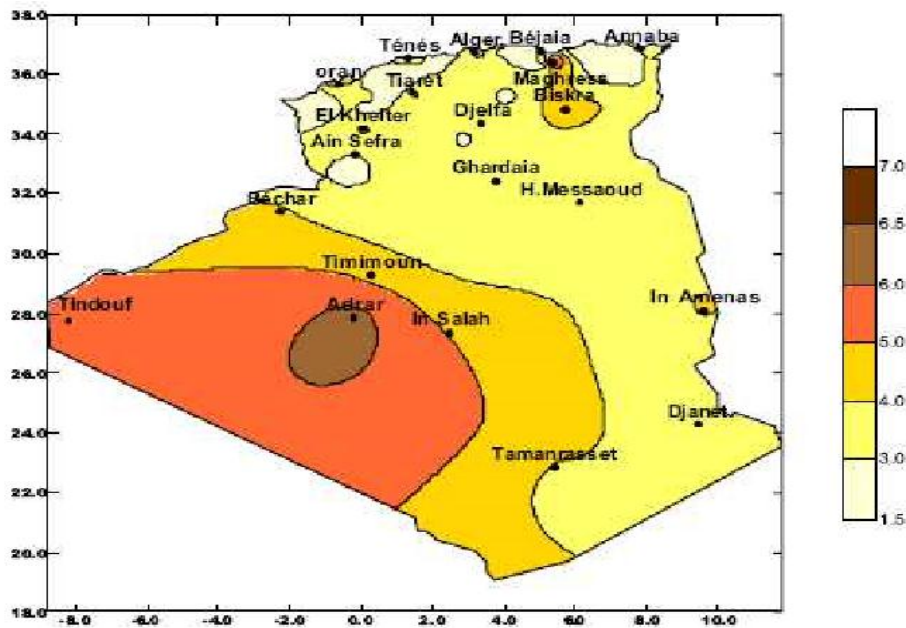


Figure I-3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol.[3]

I.3. Descriptifs et qualités d'énergie d'une éolienne :

I.3.1 Définition :

Une éolienne appelé aussi aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [4] comme le montre la figure I-4 :

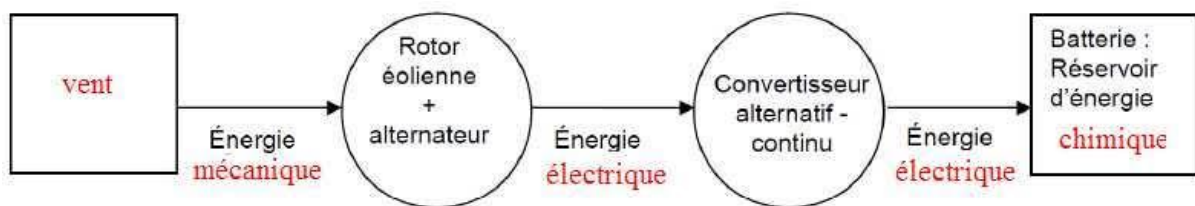


Figure I-4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusées et surtout en corrélation saisonnière (en hiver, l'énergie électrique est plus demandé car en cette saison, la moyenne des vitesses du vent est plus élevé). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchets radioactifs [5].

I.3.2 .Principaux composants d'une éolienne :

Pour décrire une éolienne, le vocabulaire le plus souvent utilisé retient principalement trois sous-ensembles :

- **Le mât** : un tube d'acier (un treillis métallique) qui doit être le plus haut possible afin de bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et aussi pour éviter les perturbations près du sol [6]

- **la nacelle** : structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques, permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique ; elle comprend les éléments suivants :

- l'arbre.
- Multiplicateur
- Roulements
- Générateurs

- **Le rotor** : Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent reliées par un moyeu.

La figure suivante représente les différentes composantes d'une éolienne :

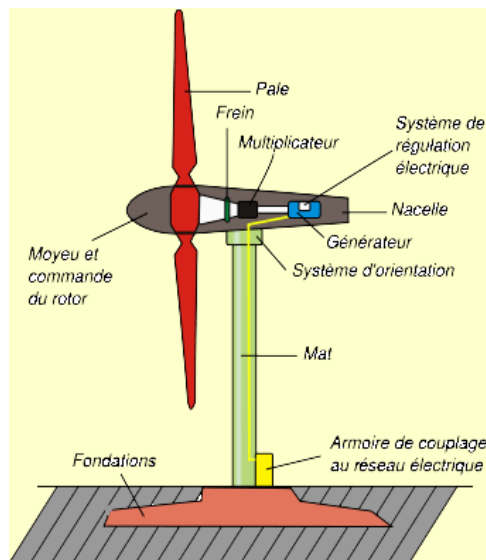


Figure I-5 : Eléments constituant une éolienne.

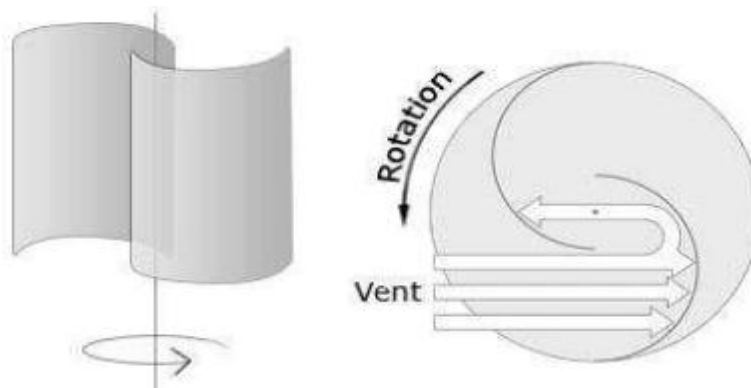
I.4. Types d'éoliennes :

De nos jours, il existe plusieurs sortes d'éoliennes dont on distingue deux grandes catégories qui sont comme suit:

I.4.1 Eoliennes à axe vertical :

Les premières structures développées afin de produire de l'énergie électrique sont les éoliennes à axe vertical. Plusieurs prototypes ont été vu dont deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation : le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS.

✓ **Le rotor de SAVONIUS** (étant le nom de son inventeur, en 1925) : son fonctionnement est basé sur le principe de « traînée différentielle » utilisée dans les anémomètres. Le vent exerce sur chacune des faces d'un corps creux des efforts d'intensités différentes ; il en résulte ainsi un couple moteur qui entraîne la rotation de l'ensemble. L'effet ici est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [7].



FigureI-6 : Eolienne à axe vertical (structure de SAVONIUS)

✓ **Rotor de DARRIEUS** (ingénieur français) : la structure la plus répandue pour les éoliennes à variation cyclique d'incidence est celle de DARRIEUS. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne SAVONIUS sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peut utiliser voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin, la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées. [4]

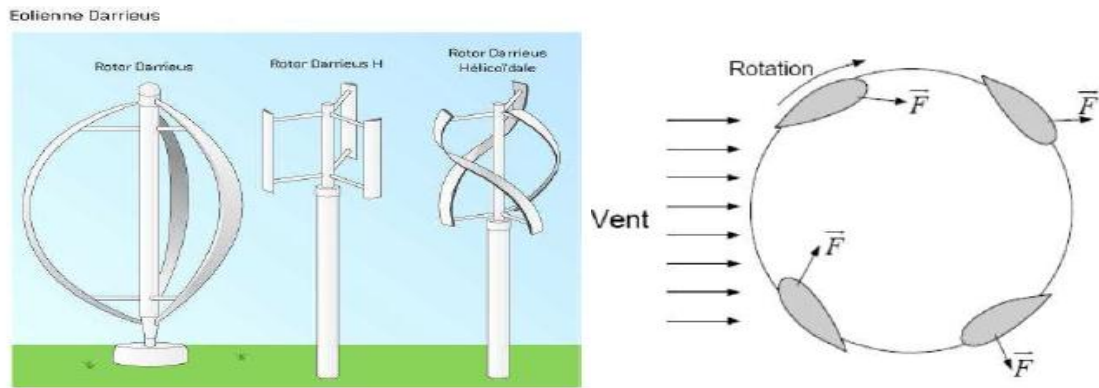


Figure 1-7 : Eolienne à axe vertical (structure de DARRIEUS [1])

I.4.2. Eolienne à axe horizontal :

Ces éoliennes sont basées sur la technologie des moulins à vent, constituées de plusieurs pâles profilées à la manière des ailes d'avions afin de générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pâles utilisées varie de 1 à 3 ; le rotor tripale étant le plus utilisé parce qu'il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [4]

Avantages des éoliennes à axe horizontal :

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

Inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

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

Malgré ces inconvénients, cette structure reste la plus utilisée pour la production d'énergie électrique ; ainsi les éoliennes à axe verticale sont utilisées dans les zones isolées parce qu'elles sont de faibles puissances destinées à des utilisations permanentes. [8]



Figure 1-8 : Eolienne à axe horizontal

I.5. Energie cinétique du vent :

Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'applique sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor ce qui produit une énergie éolienne.

I.5.1 Loi de BETZ :

Le savant Allemand à établie la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal dans les années 1920. BETZ suppose que le moteur éolien soit placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 comme le montre la figure suivante : [9]

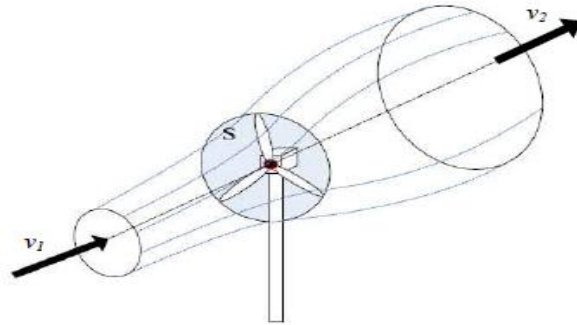


Figure I-9 : Tube du courant autour d'une éolienne

On suppose que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 ; soit : $\frac{V_1 + V_2}{2}$

La masse d'air de la densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est donnée par :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (1.1)$$

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

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.2)$$

En remplaçant l'équation (1.1) dans (1.2) on aura :

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traversait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse v_1 , la puissance p_v correspondante serait donc :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (1.4)$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est donné par la formule suivante :

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \quad (1.5)$$

La caractéristique correspondante à l'équation (1.5) est représentée par la figure suivante :

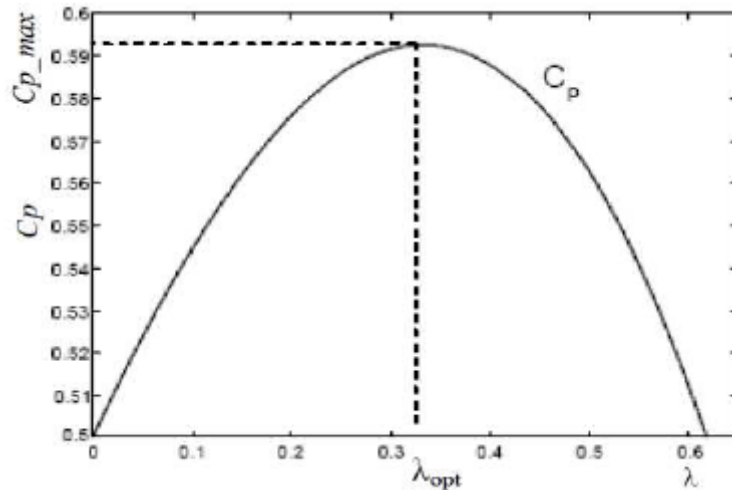


Figure I-10 : Exemple d'interpolation du facteur de puissance

Le rapport $\frac{P_t}{P_v}$ est appelé aussi coefficient de puissance C_p qui a une allure d'une parabole

qui représente un maximum de 0.593 (16/27) ; cette limite théorique se nomme limite de BETZ. Elle fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est jamais atteinte en réalité et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de l'angle de calage des pâles β

Et la vitesse relative λ représentant le rapport de la vitesse tangentielle de l'extrémité des pâles de l'éolienne ($\Omega_t R$) sur la vitesse instantanée du vent ainsi :

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (1.6)$$

La figure suivante (I-11) représente un aperçu sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

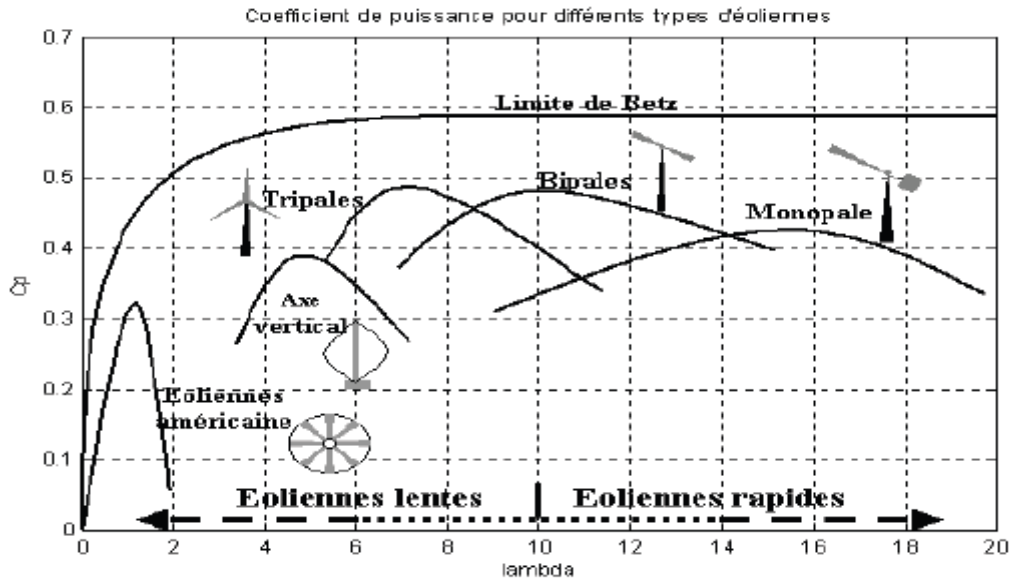


Figure I-11: Coefficient de puissances pour différents types d'éoliennes [4]

I.5.2 Production de l'énergie mécanique :

L'énergie mécanique dans une éolienne est entraîné en rotation des pâles par la force du vent. La puissance mécanique est déterminée donc par la quantité de travail effectué par les pâles dans un intervalle de temps.

La combinaison des équations (1.1) (1.4) et (1.5) donnera la puissance mécanique p_m disponible sur l'arbre d'une éolienne, cette dernière est représentée par la formule suivante :

$$P_m = \frac{P_t}{P_v} P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.7)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$$

Ω_1 : est la vitesse de rotation avant la multiplication.

R : le rayon de l'aérogénérateur.

On tenant compte du multiplicateur K, la puissance mécanique p_m disponible sera comme

suite :

$$\lambda = \frac{\Omega_2 R}{k V_1}$$

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{k V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

Avec Ω_2 : est la vitesse de rotation après la multiplication.

k : Le rapport de multiplication.

La relation (1.8), nous permet d'obtenir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour une variation de vitesse du vent, comme l'indique la figure suivante :

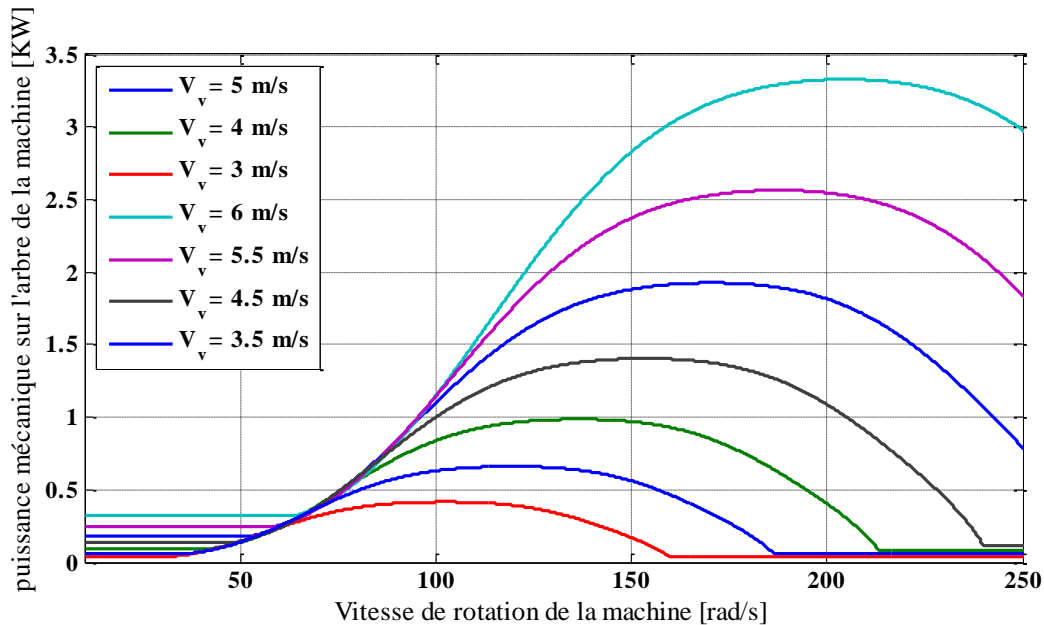


Figure I-12 : Puissance théorique disponible pour une éolienne donnée en fonction de la vitesse de rotation de la machine (rd/s)

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne fonctionne à une vitesse fixe de 1500 tr/mn sur la figure (I-12), la puissance maximum théorique des courbes n'est pas totalement exploitée. Elle est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée ($v=6$ m/s).

Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque courbe, la génératrice doit fonctionner à une vitesse variable (entre 1100 m/s et 1900 m/s pour l'exemple donnée sur la figure 1.8).

I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Lorsque le vent souffle à la hauteur de la nacelle avec une vitesse au-dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeaux (leur surface est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse de seuil détecté un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement ; le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent et les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage de l'éolienne et tourne.

Ainsi la puissance captée (P_{vent}) est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice mais à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va être transformée en puissance électrique

débité par la machine ; on distingue ainsi deux cas : soit l'éolienne est relié directement au réseau soit elle alimente en autonome une charge isolée. [10]

I.6.1 Phases de fonctionnement d'une éolienne :

Les zones de fonctionnement d'une éolienne sont définies en fonction de la vitesse du vent [11], les caractéristiques des zones de fonctionnement d'une éolienne sont représentées dans la figure suivante :

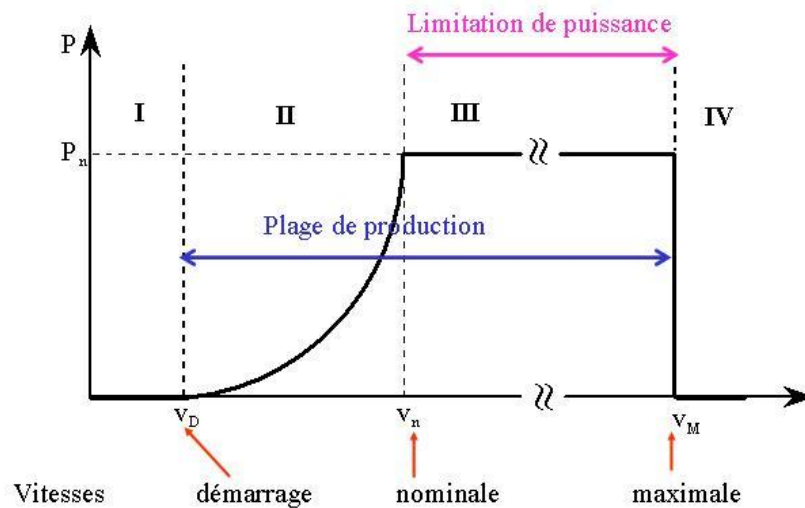


Figure I-13 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

- ✓ **Zone 1** ($V < V_1$) : c'est la zone de démarrage de la machine, la vitesse du vent est trop faible ; la turbine peut tourner mais l'énergie à capter reste faible. V_1 étant la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.
- ✓ **Zone 2** ($V_1 < V < V_2$) : c'est la zone d'extraction de la puissance maximale, elle correspond au fonctionnement à charge partielle (C_p). l'angle des calages β reste constant dans cette zone afin d'obtenir un C_p maximal pour cela la puissance captée reste maximale. V_2 étant la vitesse du vent qui correspond à la puissance nominale de la génératrice.
- ✓ **Zone 3** ($V_2 < V < V_3$) : elle correspond à une vitesse mécanique quasiment constante et β varie. La puissance captée augmente rapidement jusqu'à sa valeur nominale ; c'est la zone de fonctionnement en pleine charge. V_3 étant la vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne.
- ✓ **Zone 4** ($V > V_3$) : la vitesse du vent devient trop forte, les pales sont en position d'arrêt ainsi la puissance extraite reste nulle.

I.6.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes mises en œuvre utilisent une génératrice à cage d'écurie directement couplé au réseau (GAS), cette machine est entraînée par un multiplicateur dont la vitesse est maintenue constante par un système mécanique d'orientation des pales. Ainsi la

machine fonctionne en hyper synchronisme, à une vitesse $\Omega_s (1 - g)$, Ω_s étant la vitesse du synchronisme et g le glissement ($g < 0$) ; pour un fonctionnement en génératrice.

La rotation des pales par des actionneurs permet l'augmentation de l'angle de calage β , ainsi la puissance peut être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lorsque ya un fort vent cette technique met les pales en drapeau ($\beta = 90^\circ$) [9] (fig I-14)

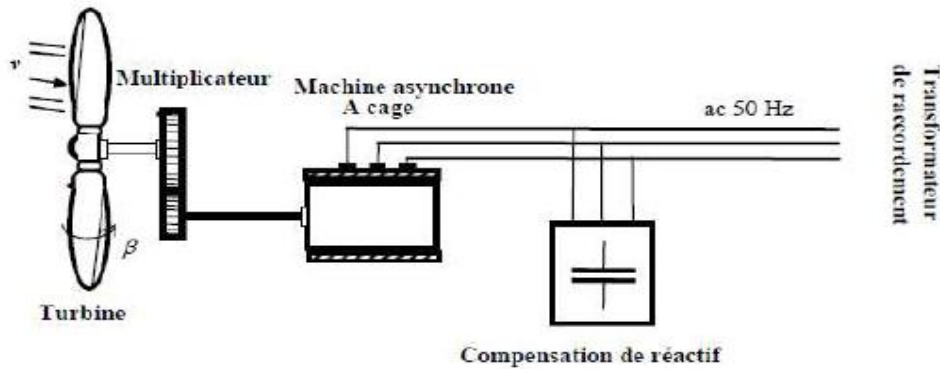


Figure I-14 : Eolienne à vitesse fixe (GAS) [9]

Cette structure présente les avantages suivants :

- Elles possèdent un système électrique plus simple
- Elles ont une très grande fiabilité
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne
- Moins chère

Cette machine à un nombre de paires de pôles fixe donc doit fonctionner sur une plage de vitesse très limitée ; la fréquence étant imposée sur le réseau si le glissement augmente les courants statorique de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La figure I-15 représente la caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles :

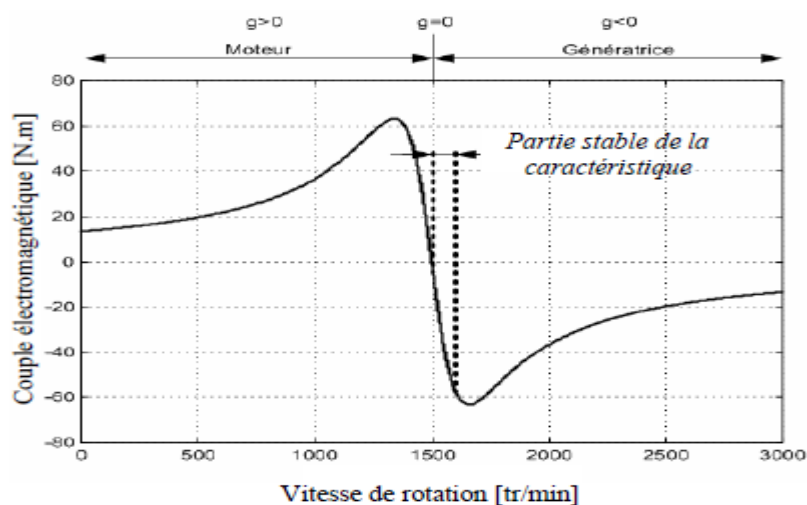


Figure I-15 : Caractéristique d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles [12]

Les éoliennes à vitesse fixe sont utilisées pour des faibles puissances (à l'ordre de 1 MW). Elles sont robustes et leur simplicité mécanique facilite la maintenance. Par contre, la puissance extraite n'est pas optimisée, le coût de maintenance imputé au multiplicateur est élevé et la puissance réactive n'est pas contrôlée (mais compensée).

La connexion directe de la génératrice au réseau entraîne une très forte sensibilité lors de la présence d'un défaut [12]

I.6.1.2 Fonctionnement à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable signifie le fait que la vitesse de la turbine ne dépend pas de la fréquence du réseau électrique. [1]

Elle est constituée d'une turbine, d'un multiplicateur et d'un convertisseur de puissance. La partie électrique, est constituée en générale d'un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

❖ **Les machines synchrones** : Elles sont utilisées dans plusieurs procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans les centrales à grande puissance (centrales hydrauliques, thermiques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien sont plus chers que les générateurs à inductions.

❖ **Les machines asynchrones** : Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse plus grande que celle des turbines éoliennes d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés aux éoliennes à vitesses fixes sont comme suit : [13]

- Elles génèrent une meilleure qualité de puissance électrique.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation de pale simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

I.6.1.2.1 Eolienne isolée (autonome) :

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissance de quelques dizaines de kilowatts. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux ou les stations météo ou de watts à quelques dizaines de kilowatts pour des appareils électriques et d'instrumentation ou camping. Les éoliennes de plus grandes puissances sont utilisées pour la production pour l'alimentation en énergie électrique des villages isolés. [14]

I.6.1.2.2 Eolienne connectée au réseau :

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée est rencontré de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou industriel, de 50kW à 7.5MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Vu que la mer est caractérisée par un vent très fort, on estime que cette puissance augmentera à l'avenir.

Ces éoliennes ont besoin d'être raccordées au réseau afin, de minimiser l'impact des fluctuations de la puissance générée par ces dernières.

I.6.2 Bilan des forces sur une pale :

On représente la vitesse du vent qui arrive à la pale par le vecteur \vec{V} , et la composante du vent due à la rotation de l'éolienne est représentée par \vec{V}_{rot} ainsi leur résultante est $\vec{V}_{rés}$. L'action du vent sur une pale se décompose en deux forces ; l'une est une poussée axiale représentée par \vec{F}_{ax} qui est directement compensée par la résistance mécanique du mat, et la seconde force est une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit le déplacement. La résultante de ces deux forces est nommée $\vec{F}_{rés}$. (Figure I-16)

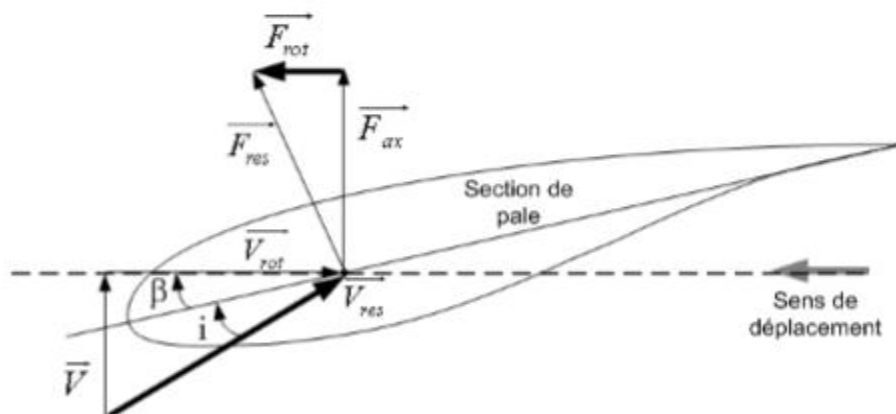


Figure I-16 : Représentation vectorielle des forces exercées sur une pale [8]

Pour une vitesse nominale du vent donnée, chaque turbine doit être dimensionnée de manière à ce que la force résultante atteigne sa valeur nominale. Si la vitesse du vent est très grande, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. [15]

I.6.3 Production optimale de l'énergie :

Pour pouvoir obtenir le maximum théorique de chaque vitesse du vent, on doit optimiser le transfert de puissance et ainsi, la machine doit aussi fonctionner à une vitesse variable (régulation de λ optimal pour avoir un C_p maximal) et pour se faire une stratégie de gestion (MPPT) nous permet de suivre le point de puissance maximale afin de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent. Figure I-12

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure I-18. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale, ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par [4]:

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (1.9)$$

La zone II de la figure I-18 suivante, représente la caractéristique de la relation (1.9), et la zone I correspond à la vitesse du vent faible qui est insuffisante pour entraîner la rotation de l'éolienne, enfin la zone III correspond à une vitesse du vent très élevée pour laquelle la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter le moindre dégât.

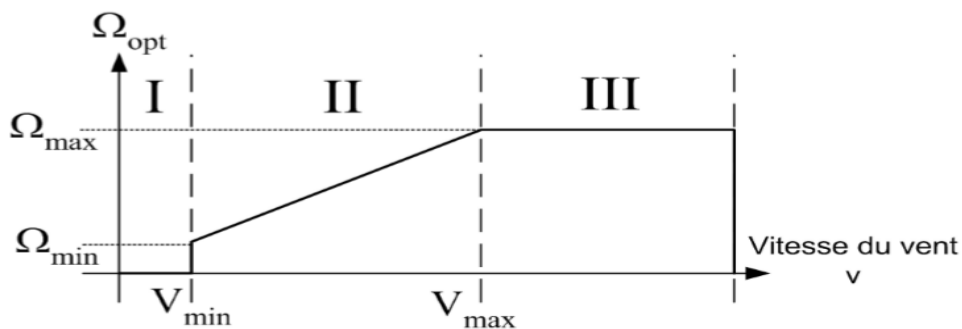


Figure I-18 : Loi de commande d'une éolienne à vitesse variable.

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Ces dispositifs sont conçu et commander de façon à limité les perturbations qui sont susceptibles d'être générer sur le réseau, et de faire transité la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, comme le résume la figure I-19 :

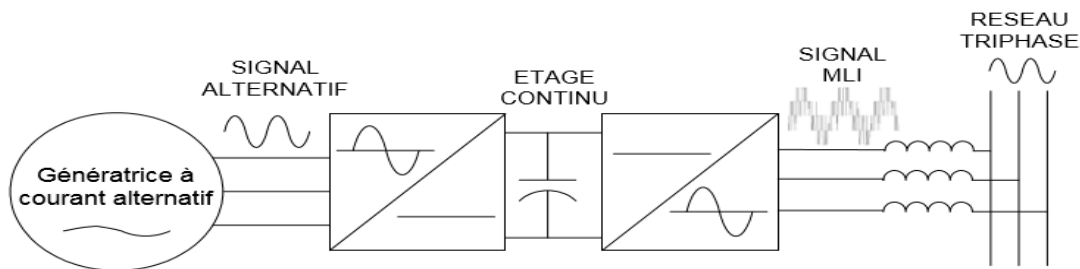


Figure I-19 : Interface électronique de puissance.

I.7 Etat de l'art sur les génératrices éoliennes à vitesse variable :

I.7.1 Système à génératrice synchrone :

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation. [16] [17]

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes :

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) ;
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

❖ Avantages et inconvénients :

Les systèmes utilisant une génératrice synchrone présente des avantages et des inconvénients qui se résument dans le tableau I-1 :

Avantages	Inconvénients
-----------	---------------

<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. - Absence de boîte de vitesse. - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Machine spécifique. - Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale. - Grand diamètre de la machine
---	---

Tableau I-1 : *Avantages et inconvénients des génératrices synchrones*

I.7.2 Système utilisant une génératrice asynchrone

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

❖ Avantages et inconvénients :

Le tableau I-2 suivant représente les principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

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

Tableau I-2 : *Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.*

I.7.3 Système utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation :

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotorique. La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir la tension du bus constante. (Figure I-20)

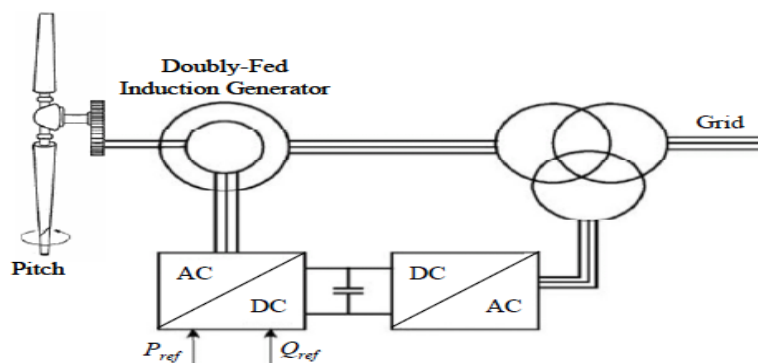


Figure I-20: *Eolienne utilisant la MADA*

Il existe d'autres configurations de la MADA qu'on peut citer : [18]

I.7.3.1 MADA à énergie rotorique dissipée :

Le stator est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté à un redresseur et une charge résistive est placée en sortie du redresseur. L'ajout d'un hacheur permet de varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. Figure I-21

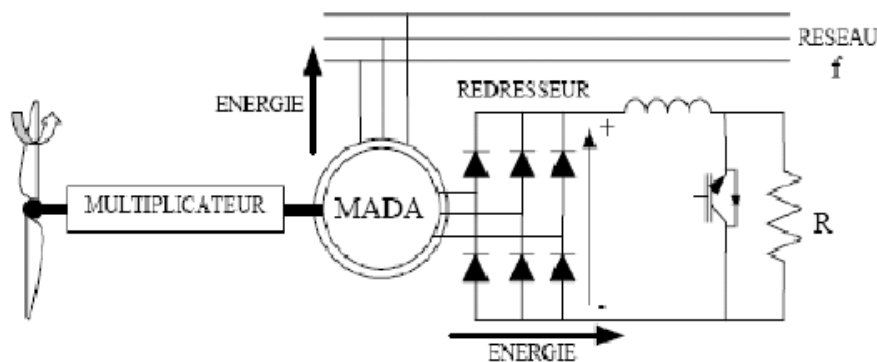


Figure I-21 : MADA à énergie rotorique dissipée

I.7.3.2 MADA : structure de KRAMER :

Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau. Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper-synchrone). Figure (I-22)

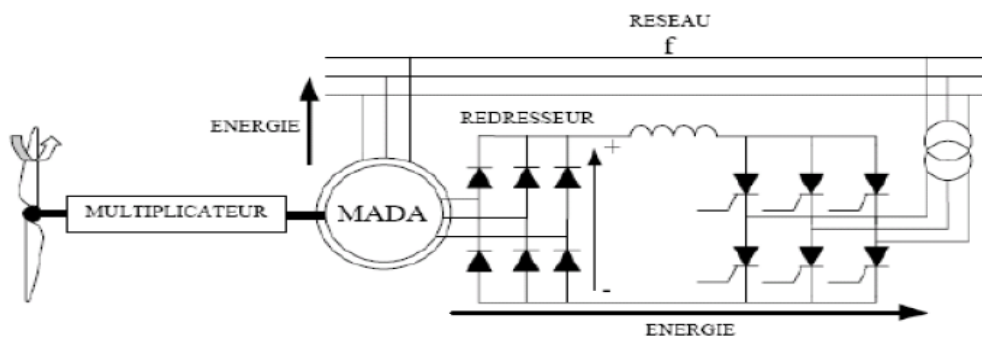


Figure I-22 : structure de KRAMER

I.7.3.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseurs :

Afin de rendre la structure précédente réversible, en échange d'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'inconvénient de cette structure est la génération des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif. (Figure I-23)

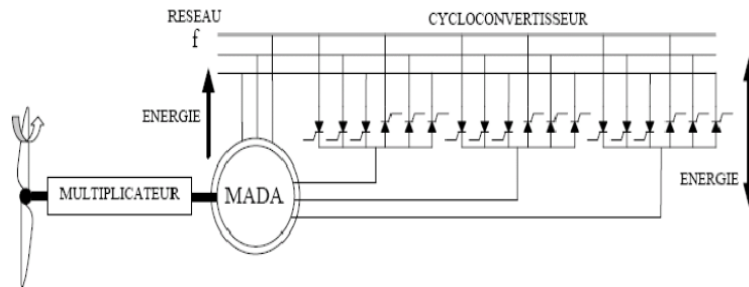


Figure I-23 : structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

I.7.3.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

L'utilisation des convertisseurs à base d'interrupteurs IGBT, permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. (Figure : I-24)

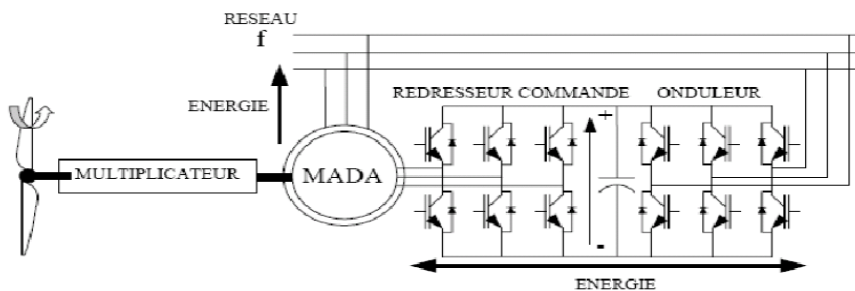


Figure I-24 : structure de Scherbius avec convertisseur MLI

❖ Avantages et inconvénients :

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transité par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique. Le Tableau I-3 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale - Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale). 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance du multiplicateur - Commande complexe - Oscillations mécaniques.

Tableau I-3 : avantages et inconvénients d'une MADA

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Comme toute énergie renouvelable, l'énergie éolienne a ses propres avantages et inconvénients qu'il faut étudier pour un meilleur développement de cette dernière.

a) **Avantage:**

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [19], [20] :

- La concentration du CO₂ est augmentée de 25% depuis l'ère préindustrielle.

Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂ et 21 millions de tonnes de SO₂ et 17500 tonnes de NO₂, qui sont les principaux responsables des pluies acides.

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.

- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

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

- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer.

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles sur les sites plus venteux. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

b) Inconvénients :

Comme toute source, l'éolienne présente des inconvénients même s'ils ne sont pas nombreux :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif
- Le bruit : Notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

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

- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.

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

I.9 Connexion des fermes éoliennes vers les réseaux et les contraintes à respecter :

Les éoliennes sont regroupées en ferme. Les éoliennes à vitesse variable et celles basées sur une machine asynchrone à double alimentation sont reliées au réseau au moyen d'une liaison à courant alternatif. Les éoliennes basées sur une machine synchrone peuvent être reliées de la même façon; la présence d'un bus continu dimensionné pour la tension nominale de la génératrice permet également d'envisager une connexion des éoliennes entre – elles via une liaison à courant continu. Cette architecture, imaginée pour les fermes éoliennes off-shore interfacées avec le réseau via un seul convertisseur continu - alternatif, permet d'envisager,

par exemple, une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de connexion [21].

I.9.1 Raccordement au réseau de distribution :

Une fois l'énergie électrique est produite par l'éolienne, il s'agit ensuite de la transmettre au réseau de distribution. Typiquement, pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW, la tension en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de Volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension qui permet de se raccorder à un réseau de distribution (10000V ou 15000V).

Cependant, le raccordement au réseau doit prendre en compte certaines particularités de l'éolienne. Il s'agit notamment de toutes les phases transitoires du fonctionnement (démarrage arrêt, absorption des rafales) qui du fait de la nature fluctuante du vent, peuvent occasionner des variations de puissance. Il existe des conditions de raccordement et des réglementations à prendre en considération. Il s'agit notamment de l'arrêté de 17 mars 2003 (4 juillet 2003) relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement d'une installation de production d'énergie électrique à un réseau public de distribution.

Le regroupement des éoliennes à vitesse fixes ou à vitesse variable constitue une ferme éolienne on shore ou offshore. On peut distinguer deux architectures de connexion des fermes éoliennes au réseau de distribution :

- La première consiste à connecter ces fermes au réseau au moyen des liaisons en tension alternatives à travers un transformateur comme le montre la figure I-25 :

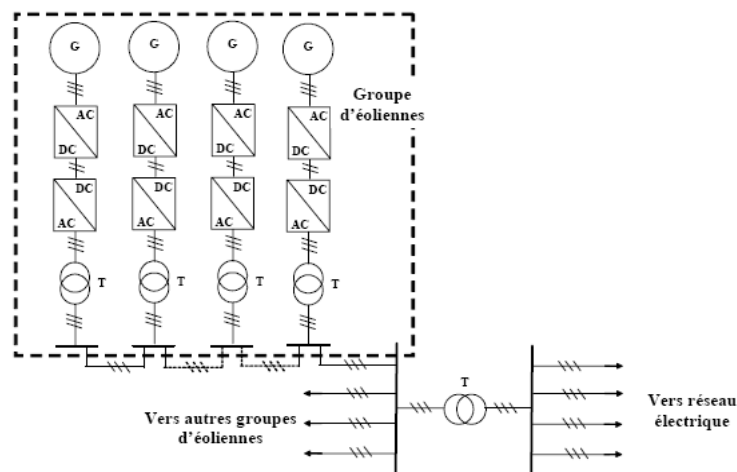


Figure I-25 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives [30]

- La seconde architecture consiste à connecter les éoliennes entre elles à travers une liaison en tension continue dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la

génératrice ; et puis y a un seul convertisseur continu-alternatif qui permet la liaison au réseau électrique. Cette architecture est particulièrement envisagée pour les fermes éoliennes off-shore et permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement. [26] [27]

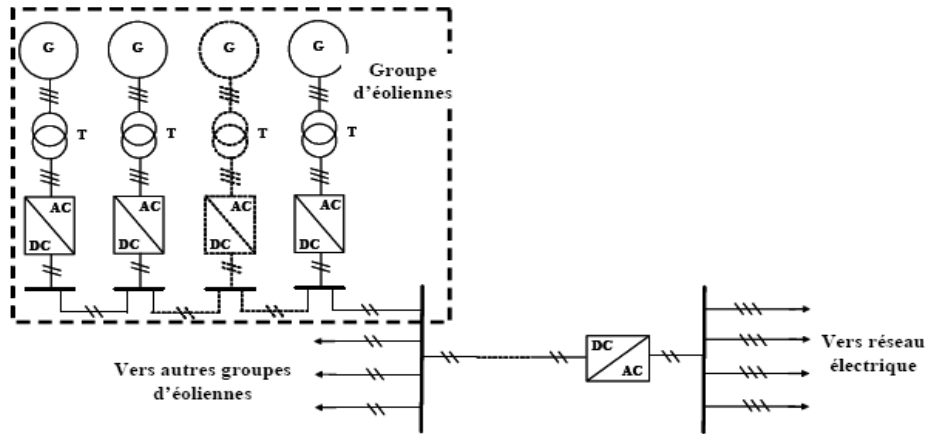


Figure I-26 : Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [30]

I.9.2 Tension de raccordement :

Les modalités de raccordement au réseau électrique des installations de production, et notamment les contraintes techniques, sont définies par des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés. Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder qui définit le réseau de connexion. Le tableau I-4 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance [23].

Type de réseau	Plage de tension	Niveau de tension	Puissance
BT	BT monophasé	230V	$S \leq 18 \text{KVA}$
BT	BT triphasé	400V	$S \leq 250 \text{KVA}$
MT	$1 \text{Kv} < U \leq 50 \text{KV}$	15KV, 20KV	$P \leq 12 \text{MW}$
HT (HTB1)	$50 \text{Kv} < U \leq 130 \text{KV}$	63KV, 90KV	$P \leq 50 \text{MW}$
HT (HTB2)	$130 \text{Kv} < U \leq 350 \text{KV}$	150KV, 225KV	$P \leq 250 \text{MW}$
HT(HTB3)	$350 \text{Kv} < U \leq 500 \text{KV}$	400KV	$P > 250 \text{MW}$

Tableau I-4 : Niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur Puissance

Les installations de production relèvent donc :

- du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la haute tension HT).

- du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieure ou égale à 20 kV [21].

I.9.3 Contraintes de raccordement de l'éolien au réseau de distribution :

❖ En fonction de leur type, de leur tension de raccordement et de leur puissance ; les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

❖ En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :

- Les réglages primaire et secondaire de la tension ;
- Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
- Le fonctionnement en réseau séparé ;
- Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

• Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation.

• Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport. Les contraintes de raccordement en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques-unes de ces contraintes dans la suite de cette section et dans la section suivante.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales d'une éolienne. En premier lieu, nous avons donné des généralités sur l'éolienne suivie d'un bref aperçu sur la situation actuelle de cette dernière.

Ensuite, nous avons décrit les différents types d'aérogénérateurs à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. L'aspect aérodynamique de la conversion de l'énergie éolienne est aussi détaillé dans ce chapitre en se basant sur la limite de BETZ et la production d'énergie mécanique.

Le contrôle électrique au niveau de la génératrice et transmission au réseau nous offre deux structures essentielles (entraînement à vitesse fixe et variable). Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir: génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant de pouvoir étudier chaque mode de fonctionnement. Aussi, nous avons exposé l'état de l'art des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

La dernière partie de ce chapitre a décrit les deux modes de connexion des éoliennes pour former une ferme en se focalisant sur les contraintes et les réglementations définissant les modalités de connexion de ces fermes au réseau électrique. L'intégration de la production éolienne dans le système électrique n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de ce dernier, pour cela on a cité quelques avantages et inconvénients de l'utilisation de l'énergie éolienne.

Chapitre II :

*Modélisation et commande
d'une turbine éolienne*

Notions Utilisés dans le chapitre

- S_i : Puissance des composantes spectrales de la décomposition de Van der Hoven.
 ω_i : Pulsation discrète.
 φ_i : Phase discrète des amplitudes A_i .
 A_i : Amplitude des composantes spectrales de la décomposition de Van der Hoven.
 R : Longueur de pale de l'éolienne.
 β : Angle de calage des pales.
 λ : Vitesse relative.
 ρ : Densité de l'air (1.225 kg/m^3).
 S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
 V_v : Vitesse du vent.
 G : Gain du multiplicateur
 Ω_t : Vitesse angulaire de rotation de la turbine éolienne.
 Ω_g, Ω_m : Vitesse angulaire de rotation de la génératrice (machine).
 C_p : Coefficient de puissance.
 C_g, C_m : Couple mécanique de la génératrice (machine).
 C_t : couple mécanique de la turbine.
 C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice.
 P_t : Puissance de la turbine.
 J_t, J_m : Inertie de la : turbine, machine.
 f_t, f_m : Frottement de la : turbine, machine.
 J_T, f_T : Inertie et frottement totale du système turbine+machine (MADA).
 $C_{p \max}$: Coefficient de puissance maximal.
 λ_{opt} : Vitesse relative optimal.
 $P_{t \max}$: Puissance maximale de la turbine.
 $C_{t \text{opt}}$: Couple optimale de la turbine.

II.1. Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique

Dans le chapitre précédent, nous avons parlé de la structure externe de l'éolienne qui sert à capter l'énergie du vent et de sa structure interne qui la transforme en énergie électrique. Dans ce chapitre, il est important de modéliser les différents systèmes constituant une éolienne pour mieux comprendre leur fonctionnement.

En premier lieu, on définira le profil du vent que nous devons utiliser, suivi de la modélisation de la turbine en tenant compte des différents paramètres qui la constitue. Notre travail de validation débutera par une étude du comportement de notre turbine pour un angle de calage « β » constant et vitesse du vent variable.

Ensuite, la deuxième partie sera consacré à l'utilisation d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec et sans asservissement de vitesse dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quel que soit le vent qui lui est appliqué.

II.2 Modélisation et reproduction des variations du vent :

II.2.1 Définition du vent :

Le vent est un courant d'air qui se forme lorsque l'air d'une zone de haute pression se déplace vers une zone de basse pression ; et comme étant un champ de vitesse de déplacement de masses d'air, il est aussi le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, ainsi il constitue la source primaire d'énergie déterminant pour le calcul de la production de l'électricité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie.

II.2.2. Modélisation de la vitesse du vent :

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. La modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du kilomètre au centimètre et celles dans le temps de la seconde à des mois. Le spectre de Van der Hoven présente trois évènements remarquables (figure II-1) : Plusieurs pics d'énergie pour des basses fréquences autour d'une année (variation saisonnière), 4jours (variation climatique) et un jour (variation journalière) qui sont clairement identifiés au mouvement atmosphérique de large amplitude [24]

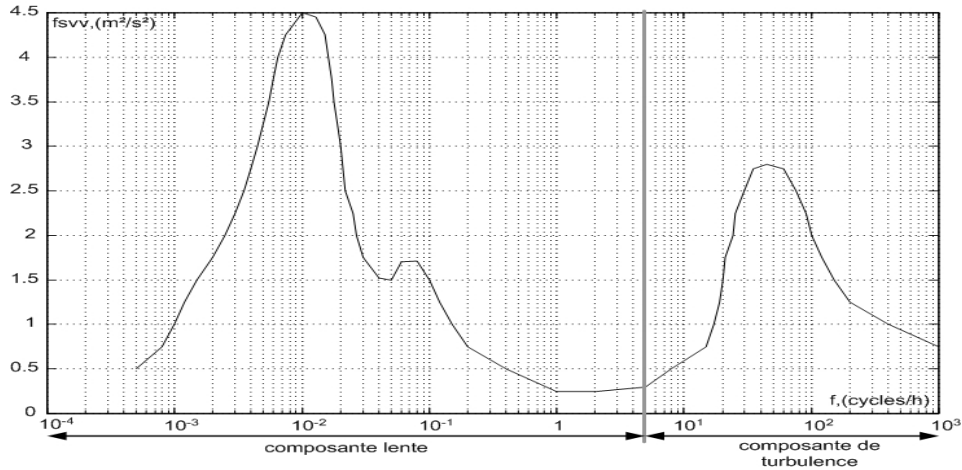


Figure II-1 : Spectre d'énergie des mouvements atmosphériques d'après Van der Hoven [4]

La discrétisation de la courbe de la figure ci-dessus en pulsation ω_i avec la puissance correspondante S_i permet d'extraire l'amplitude A_i de chaque composante spectrale associé à ces pulsations :

$$A_i = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{S_i} \quad (2.1)$$

Ainsi la variation de la vitesse du vent $V_v(t)$ est écrite en utilisant la somme des harmoniques correspondant à chaque pulsation ω_i avec une phase φ_i déterminée de façon aléatoire

$$V_v(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2.2)$$

Avec N : nombre de valeurs discrètes utilisées pour l'échantillonnage

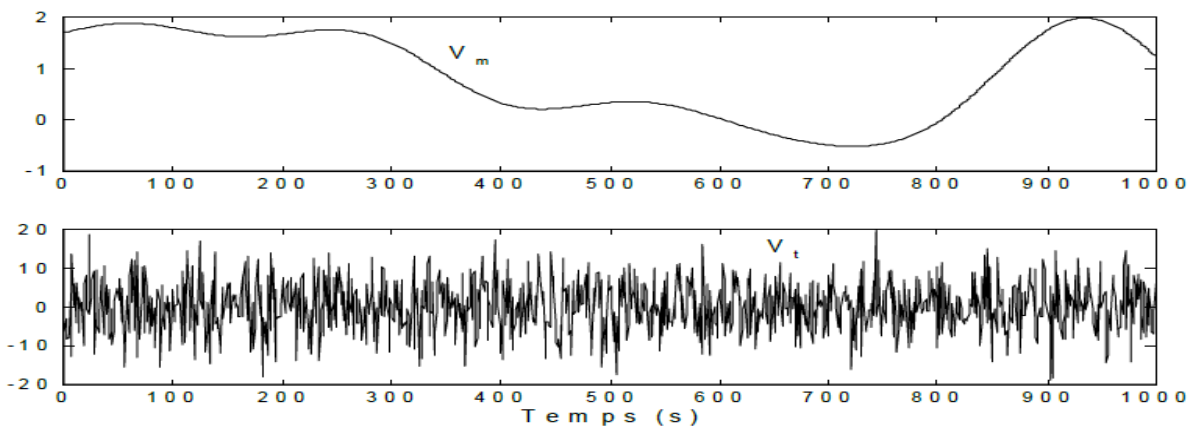


Figure II.2 : Composante lente et composante de turbulence de la vitesse de vent. [4]

La vitesse du vent fait apparaître deux composantes : une composante lente qui correspond à la vitesse moyenne du vent et une composante rapide dite de turbulence venant se superposer à cette vitesse moyenne. La figure II.2 représente l'évolution de ces deux composantes sur 1000 secondes.

Ainsi, on constate que quel que soit la vitesse moyenne du vent, la composante de turbulence possède les mêmes propriétés statistiques. [4]

Mathématiquement, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent correspondant à ce que l'on peut trouver sur un site éolien.

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse de vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques décrit comme suit :

$$V_v(t) = 5 + 0.05 \sin(0.1047t) + 0.5 \sin(0.2665t) + 0.25 \sin(1.2930t) + 0.05(3.6645t) \quad (2.3)$$

L'évolution temporelle obtenue après avoir simulé cette équation est la suivante :

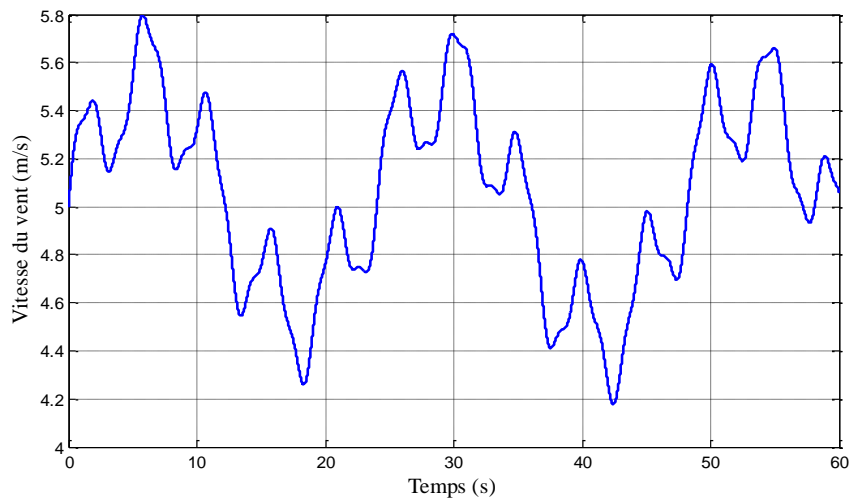


Figure II.3 : Profil du vent modélisé

II.3 Modélisation mécanique de la turbine :

II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

Considérons une turbine éolienne à trois pales fixes de longueur R fixé sur l'arbre de la turbine en formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner à une vitesse $\Omega_{turbine}$ grâce à l'énergie du vent, qui est relié lui aussi à un multiplicateur. D'une manière générale, l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice et qui assure son entraînement. Ce qui nous permet de déduire que chaque partie de cette ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique, comme l'illustre la figure II-4:

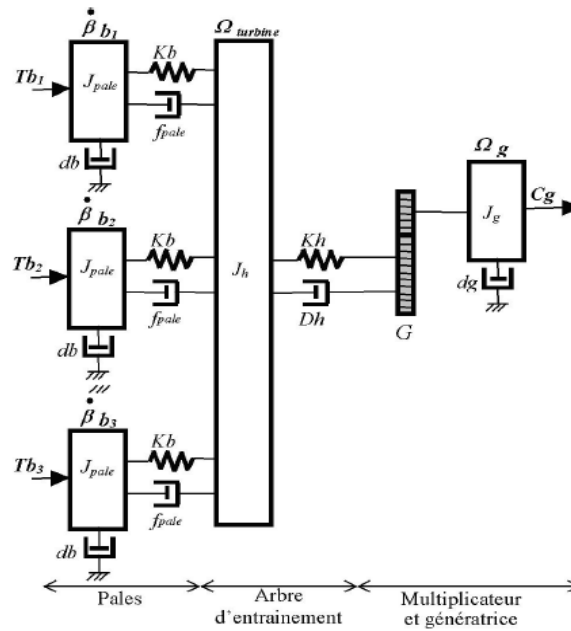


Figure II-4 : Schéma mécanique équivalent d'une turbine éolienne [25]

Les trois pales sont considérées de conceptions identiques et qui sont caractérisées par :

- Une inertie J_{pale}
- Un coefficient de frottement f_{pale}
- Une élasticité K_b

Ces pales représentent le même coefficient de frottement f_{pale} , et la vitesse d'orientations de chacune de ces pales est notée $\beta_{b1}, \beta_{b2}, \beta_{b3}$. Chaque pale reçoit une force T_{b1}, T_{b2}, T_{b3} qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie J_h
- Son élasticité K_h
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice lui aussi possède ces propres caractéristiques :

- Une inertie J_g
- Un coefficient de frottement D_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse mécanique Ω_g . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée alors, on peut considérer l'ensemble

des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De même, la vitesse de la turbine étant faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient donc un modèle mécanique comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique C_{aer} comme nous l'explique la figure II-3. [26]

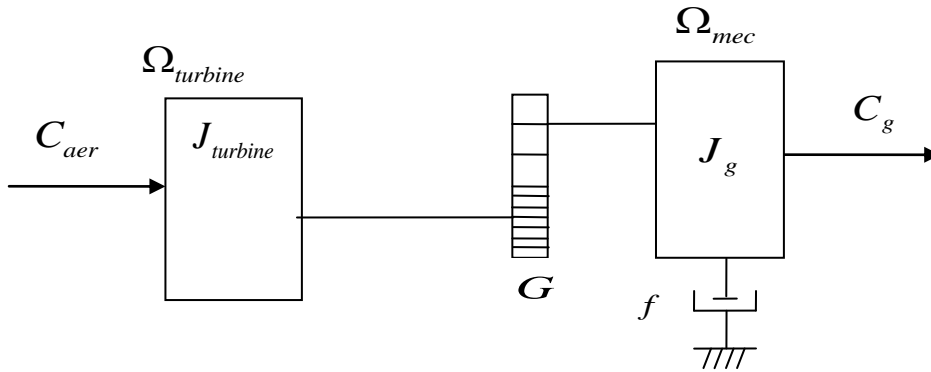


Figure II-5: Schéma simplifié de la turbine éolienne. [26]

II.3.2 Mise en équation de la turbine éolienne.

II.3.2.1 Modélisation de la turbine :

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent toutes limitées par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière: chaque turbine à un comportement spécifique [27].

Pour notre étude nous allons utiliser une turbine éolienne de 3 KW. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 4.5m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 24.[30]

La formule (2.4), nous illustre l'évaluation du coefficient de puissance C_p qui dépend des caractéristiques aérodynamique de la turbine à étudier, ainsi, de ses conditions de fonctionnement. Le coefficient C_p est alors exprimé en fonction de rapport de vitesse λ et de l'angle de calage des pales β

Les variations de C_p dans notre cas, sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p(\lambda) = -0.0003243\lambda^6 + 0.01174\lambda^5 - 0.1573\lambda^4 + 0.9072\lambda^3 - 1.942\lambda^2 + 1.713\lambda - 0.08196 \quad (2.4)$$

Le ratio de vitesse est défini alors comme le rapport entre la vitesse des pales et la vitesse du vent comme suit : (Figure II-6)

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v_v} \quad (2.5)$$

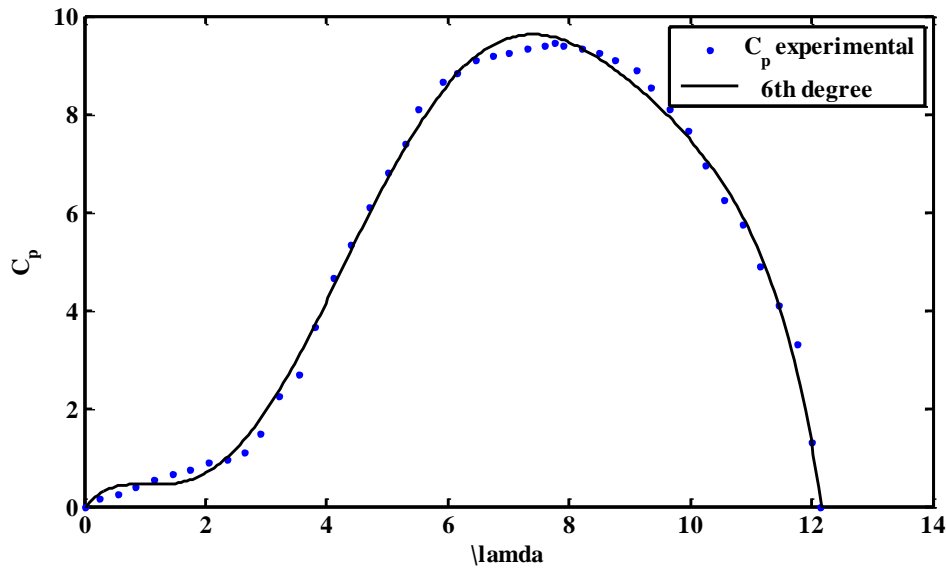


Figure II-6 : Coefficient de puissance en fonction de ratio de vitesse de la turbine (Lamda).

La vitesse du vent V_v appliquée sur les pales de l'éolienne entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine noté P qui est exprimée par la formule :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^3 \tag{2.6}$$

On connaissant la vitesse de rotation de la turbine et la puissance mécanique disponible, le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine est donc exprimé par la formule

suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 v^2 C_p(\lambda) \tag{2.7}$$

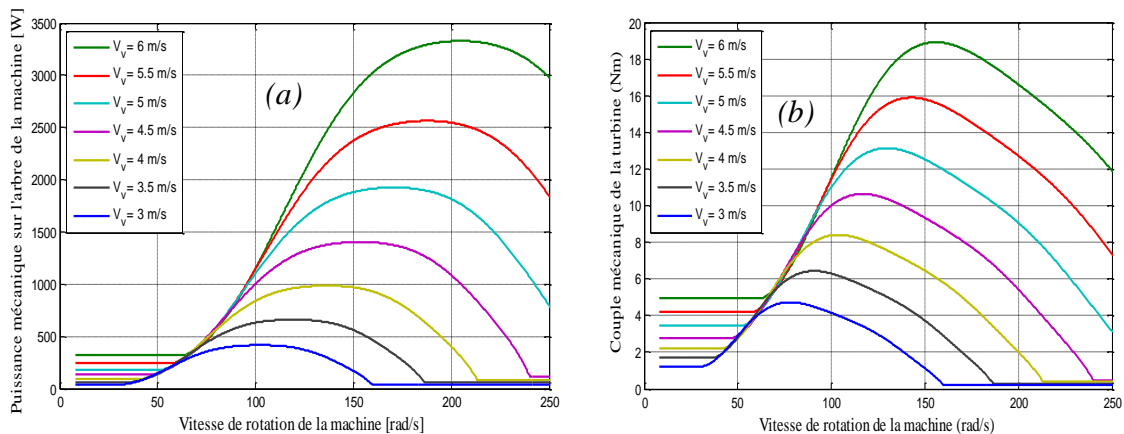


Figure II-7 : Caractéristique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeur de la vitesse de vent, (a) : Puissance mécanique sur l'arbre de la machine et (b) : couple mécanique.

II.3.2.2 Choix du multiplicateur :

Le multiplicateur de vitesse qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice a comme rôle d'adapter la vitesse mécanique lente de la turbine Ω_m à la vitesse de rotation de la génératrice Ω_g qui est rapide. En considérant que le multiplicateur est idéal (c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables), ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [28] :

$$G = \frac{C_t}{C_g} \quad (2.8)$$

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t} \quad (2.9)$$

II.3.3 Mise en équation de l'arbre mécanique.

Dans la précédente étude, nous avons constaté que le modèle mécanique de la turbine éolienne se compose de deux masses, la turbine et la génératrice. Ces deux masses peuvent être résumées sous forme d'un arbre (l'arbre de la génératrice) en ramenant toutefois les frottements et l'inertie de la turbine au rotor de la génératrice éolienne.

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie $J_{turbine}$, et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_T constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [25]

Ce même modèle mécanique sera caractérisé par le coefficient de frottement total F_T , constitué à la fois des frottements de la turbine ramenés au rotor de la génératrice ainsi que ceux de la génératrice.

Le modèle mécanique équivalent (à un seul arbre) est illustré dans la figure II-8 :

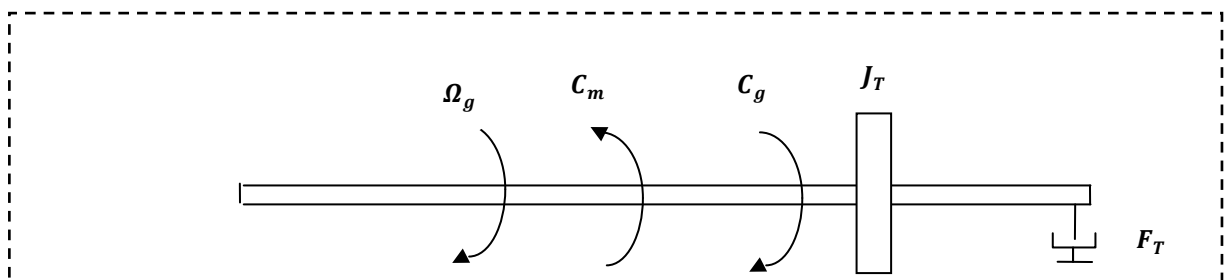


Figure II-8 : Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.3.1 Equation mécanique sur l'arbre de la génératrice.

L'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la machine est comme suit :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_m \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (2.10)$$

Avec :

- J_t : Moment d'inertie de la turbine.
- J_m : Moment d'inertie de la machine.
- f_m : Le coefficient dû au frottement de la machine.
- C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la machine.
- Ω_m : Vitesse de rotation de la machine.
- C_{em} : Couple électromagnétique de la machine.

L'équation fondamentale simplifiée de la dynamique du système qui nous permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique d'entraînement C_m disponible sur le rotor de la génératrice s'écrit alors comme suite :

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f_T \Omega_G = C_g - C_{em} \quad (2.11)$$

Mise en équation de J_T et F_T :

L'expression de l'inertie totale J_T équivalente du système éolien vue du rotor de la génératrice est composée de l'inertie de la turbine J_t comprenant les trois pales, du coefficient de multiplication G et de l'inertie de la génératrice J_m :

$$J_T = \left(\frac{J_t}{G} + J_m \right) \quad (2.12)$$

De la même façon, l'expression de coefficient de frottement total F_T du système éolien constitué des pertes par frottement dans la turbine et des pertes par frottement dans la génératrice. Ainsi, nous retrouvons que :

$$f_T = \left(\frac{f_t}{G^2} + f_m \right) \quad (2.13)$$

II.4 Méthode de recherche de maximum de puissance (MPPT).

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. 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 quel que soit la vitesse du vent. [26]

II.4.1 Mise en équation de la puissance maximale de la turbine

La puissance maximale de la turbine correspond à un coefficient de puissance maximal, et à une vitesse relative optimale et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{t \max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_{p \max} \cdot V_v^3 \quad (2.14)$$

La vitesse relative optimale λ_{opt} est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{opt} = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (2.15)$$

De cette dernière, on peut déduire la vitesse du vent comme suit :

$$V_v = \frac{R \cdot \Omega_t}{\lambda_{opt}} \quad (2.16)$$

En remplaçant l'équation (2.16) dans l'équation (2.14) on obtiendra alors l'équation de la puissance maximale de la turbine :

$$P_{t \max} = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{p \max} \cdot \Omega_t^3 \quad (2.17)$$

En introduisant le coefficient du multiplicateur G dans cette dernière, alors la puissance maximale récupérée par la turbine s'écrira comme suit :

$$P_{t \max} = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{p \max} \cdot \frac{\Omega_g^3}{G^3} \quad (2.18)$$

II.4.2 Mise en équation du couple optimale de la turbine :

Le couple optimale est une grandeur qui reflète la puissance maximale de la turbine, ainsi pour chaque vitesse du vent, on a une puissance maximale et un couple optimal qui lui correspond.

La puissance maximale de la turbine à comme équation :

$$P_{t \max} = C_{t \text{opt}} \cdot \Omega_t \quad (2.19)$$

A partir de cette dernière, on peut déduire donc le couple optimal :

$$C_{t \text{opt}} = \frac{P_{t \max}}{\Omega_t} \quad (2.20)$$

En remplaçant l'équation (2.13) dans l'équation (2.15), on aura donc l'équation finale du couple optimal de la turbine comme suit :

$$C_{t \text{opt}} = \frac{1}{2\lambda_{\text{opt}}^2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{p \max} \cdot \frac{\Omega_g^2}{G^3} \quad (2.21)$$

II.5 Simulation :

Dans cette partie de simulation, nous allons adaptés deux méthodes de contrôle, l'une consiste à contrôler la vitesse de rotation sans asservissement et l'autre, consiste à contrôler la vitesse de rotation avec asservissement en utilisant un régulateur de forme PI (Proportionnel intégral), pour aboutir à la fin à une comparaison de ces deux derniers méthodes et voir laquelle est meilleure pour notre système.

II.5.1. Modélisation de la turbine :

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de la courbe de puissance, pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) sera mise au point. La stratégie de la MPPT consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de rotation de manière à maximiser la puissance électrique générée.

La figure (II.7) précédente, représente l'évolution de la puissance mécanique de la turbine et le couple mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour des différentes valeurs de vitesse du vent. On constate que, la variation de la vitesse du vent provoque la variation de la puissance mécanique ainsi la variation du couple mécanique de la turbine. La puissance mécanique maximale de la turbine pour une vitesse du vent donnée correspond au coefficient de puissance optimal qui est de 0.4055 comme nous l'indique la figure II-6.

Ainsi, Le couple et la puissance sont deux notions différentes, par ailleurs, on constate à la figure (II-9) que, le maximum du couple pour une vitesse donnée ne correspond pas au maximum de la vitesse pour cette même vitesse. Donc une courbe du couple optimal peut

être obtenue à partir de l'équation (II-16), pour extraire au mieux la puissance maximale du vent.

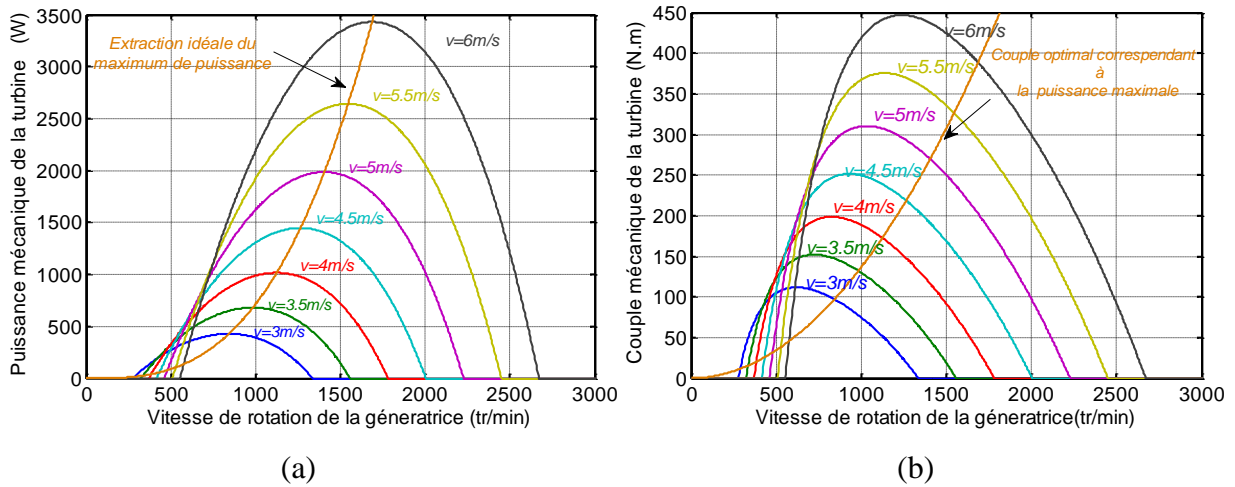


Figure (II.9) : (a) Extraction du maximum de puissance de la turbine éolienne, (b) Couple optimal de la turbine [26]

II.5.2. Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

Cette méthode de contrôle, nous permet de maintenir l'éolienne fonctionnelle au sommet de sa courbe de coefficient de puissance C_p .

La plupart des turbines éoliennes sont contrôlées avec asservissement de vitesse, car en cas sans asservissement de vitesse, une dégradation de la puissance captée est imposée.

La figure (II.10), nous renseigne sur le schéma de contrôle sans asservissement comme suit :

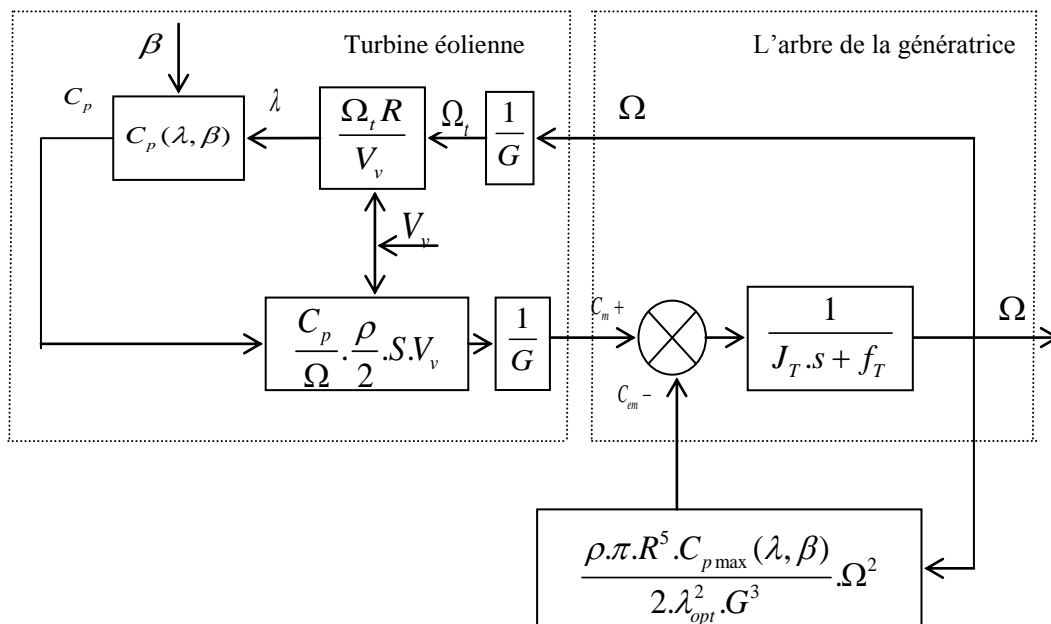


Figure (II.10) : Contrôle MPPT sans asservissement de vitesse de rotation.

Ce mode contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électrique du système éolien, ce qui indique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul, et les pertes par frottements sont négligeables. Dans ce cas, à partir de l'équation (2.5), nous pouvons écrire :

$$C_m = C_{em} = C_{em_ref}$$

Pour extraire le maximum de puissance du vent, le couple C_{em_ref} doit coïncider avec le couple optimal C_{em_opt} rapporté du côté du générateur dont l'expression est donnée par :

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \lambda R^5 C_{p\max}(\lambda, \beta)}{2 \lambda_{opt}^2 G^3} \Omega^2 \quad (2.22)$$

A partir de cette dernière, on peut déduire la puissance maximale de la génératrice en fonction du couple électromagnétique de référence comme suite :

$$P_{m\max} = C_{em_ref} \cdot \Omega = \frac{\rho \pi R^5 C_{p\max}(\lambda, \beta)}{2 \lambda_{opt}^2 G^3} \cdot \Omega^3 \quad (2.23)$$

II.5.2.1 Résultat de simulation sans asservissement :

Cette partie de simulation, consiste à garder le même profil de vent (vitesse du vent variable). Les résultats obtenus après simulation sont illustrés dans les figures suivantes. D'après ces figures, on constate que la turbine montre une bonne adaptation quant aux variations de la vitesse du vent. La simulation avec contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation, montre une nette amélioration par rapport à la simulation en boucle ouverte.

La figure (II.11) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, le coefficient C_p prend toujours une forme d'allure variable, il se met à varier entre la valeur ($C_p=0.406$) et n'atteignent pas la valeur théorique maximale donnée par Betz (0,59), ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient C_p de la turbine.

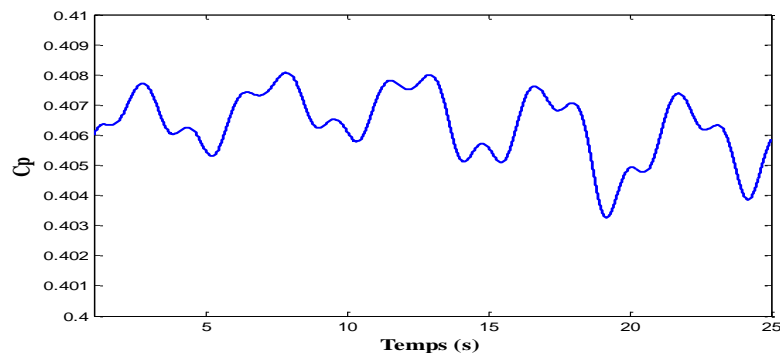


Figure (II.11) : (a)- Coefficient de puissance

La figure (II.12) montre l'évolution du coefficient λ en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable; l'allure de la courbe est variable et prend une valeur autour de la valeur ($\lambda=6.3$) ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient λ de la turbine.

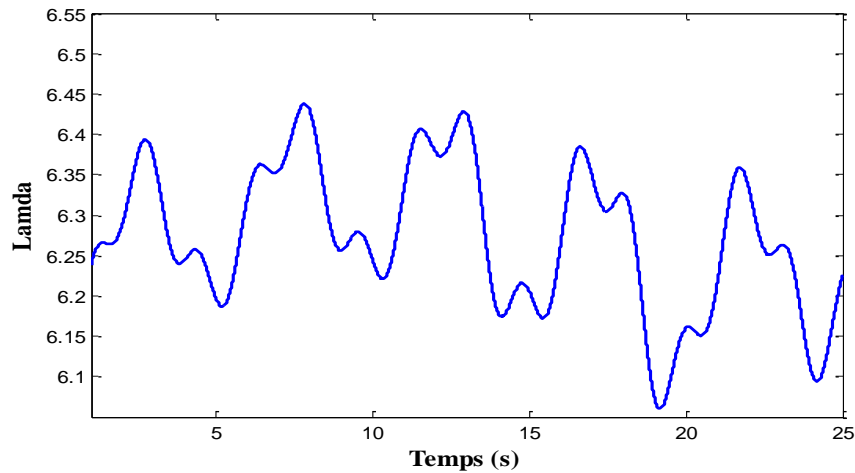


Figure (II.13) : Vitesse relative Lamda.

La vitesse relative λ et le coefficient de puissance C_p sont proches de leurs valeurs optimales, avec une erreur minimale relativement à ces valeurs.

Ainsi, pour la vitesse de rotation de la machine, on remarque qu'elle suit aussi la forme de l'allure de la vitesse du vent. On constate que cette vitesse de la machine varie entre (140-195) rad/s pour un profil de vent variable, comme le montre la figure II-14 :

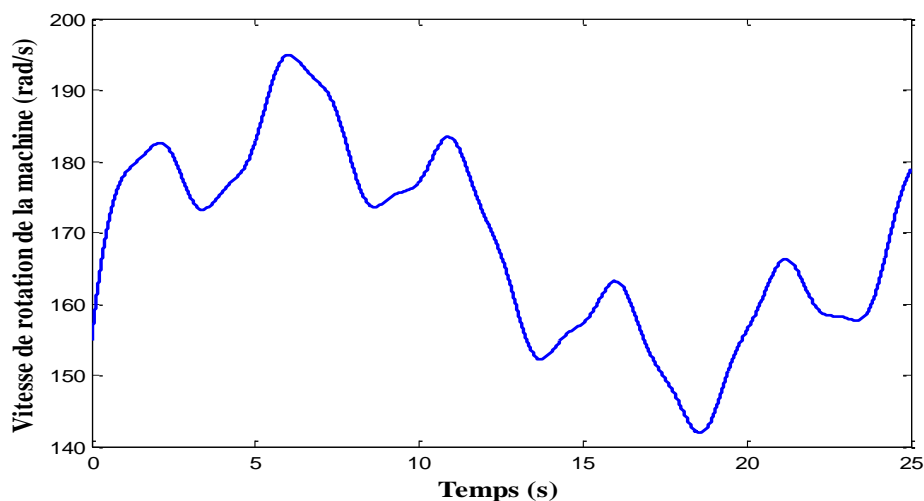


Figure (II.14) : Vitesse de rotation de la machine

La figure (II.15) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une valeur variable au voisinage de l'intervalle $[-8, -16]$ ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du

vent sur le couple mécanique de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système.

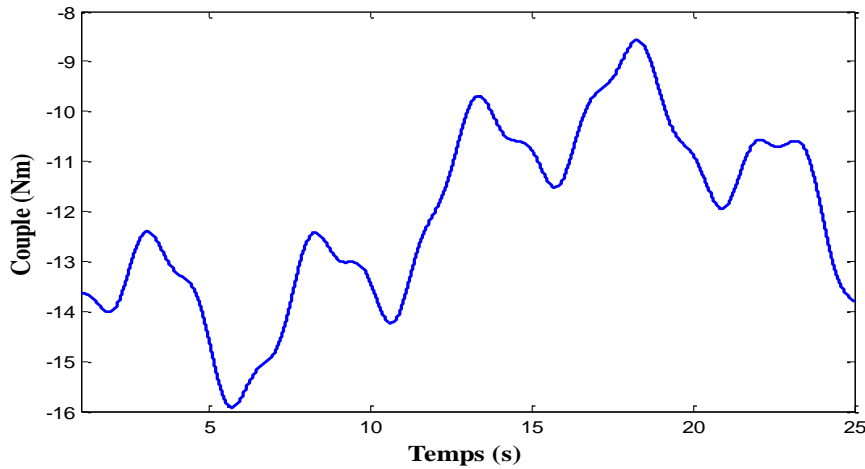


Figure (II.15) : Couple de la machine.

II.5.3. Contrôle avec asservissement de la vitesse

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Pour réaliser ceci, on va utiliser un asservissement de vitesse.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice [36]

Ainsi, pour obtenir la vitesse de rotation de référence du générateur, on doit avoir la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} . La fonction finale est :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} G \quad (2.24)$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em_ref} permettant d'avoir une vitesse de rotation égale à sa valeur de référence est obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation. [27]

La fonction de transfert du régulateur choisit (PI) s'écrit comme suit :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.25)$$

Le schéma bloc de la figure II-16, nous résume le contrôle avec asservissement à l'aide d'un régulateur PI de la vitesse de rotation :

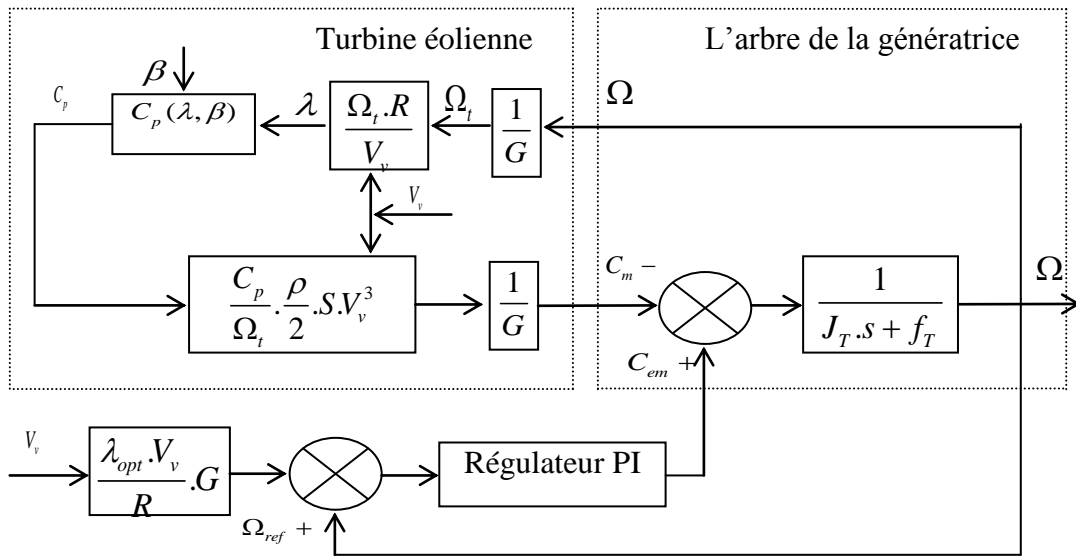


Figure (II.16) : Contrôle MPPT avec asservissement de vitesse de rotation

II.5.3.1 Mise en œuvre du régulateur

Dans le souci de déterminer les paramètres de ce régulateur, on utilise le plus souvent la méthode de synthèse directe qui est représentée par le schéma de commande de la figure II-17, qui se compose en générale, d'une fonction de Transfert $G(p)$ et un régulateur $C(p)$ comme suite :

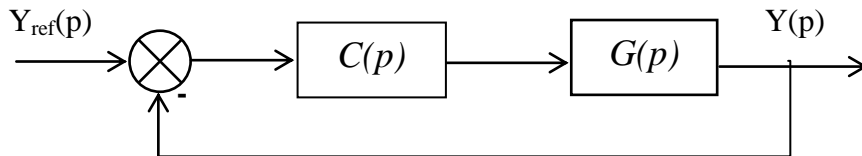


Figure II.17 : schéma bloc d'un régulateur

Dans notre cas, on utilisera un régulateur de forme PI (proportionnel-intégral), donc notre schéma équivalent est :

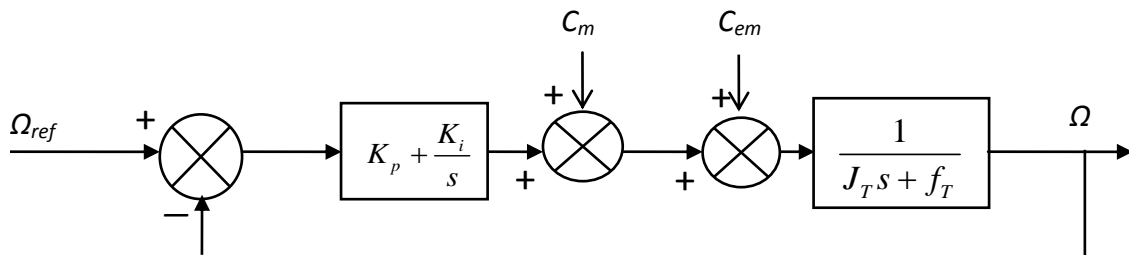


Figure II.18 : schéma bloc d'un régulateur PI

La fonction de transfert correspondante à ce circuit est la suivante :

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_p + \frac{K_i}{s} \cdot \left(\frac{1}{J_T s + f_T} \right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{J_T s + f_T} \right)} \quad (2.26)$$

Après la simplification, et en utilisant les paramètres tirés de la référence [30] on aura une équation de transfert de second ordre. En choisissant

$\zeta = 1$ et un temps de réponse $t_r = 0.5s$ on obtient :

$$\begin{aligned} \omega_n &= 9.6 \text{ rd / s} \\ K_i &= 4.534 \\ K_p &= 0.932 \end{aligned} \quad (2.27)$$

II.5.3.2 Résultats de la simulation avec asservissement de vitesse.

Dans cette partie de la simulation avec asservissement, l'utilisation d'un contrôleur nous permet de se rapprocher au mieux des valeurs optimales et maximales du fonctionnement de la turbine éolienne.

La figure (II-19), nous illustre l'évolution du coefficient de puissance C_p et de la vitesse relative λ qui se rapproche de leurs valeurs optimales et qui sont respectivement égales à 0.409 et 6.7. Le contrôle de ces deux paramètres influencera sur toutes les autres grandeurs à contrôler (couple, vitesse de rotation), qui eux aussi, vont se rapprocher de leurs valeurs idéales.

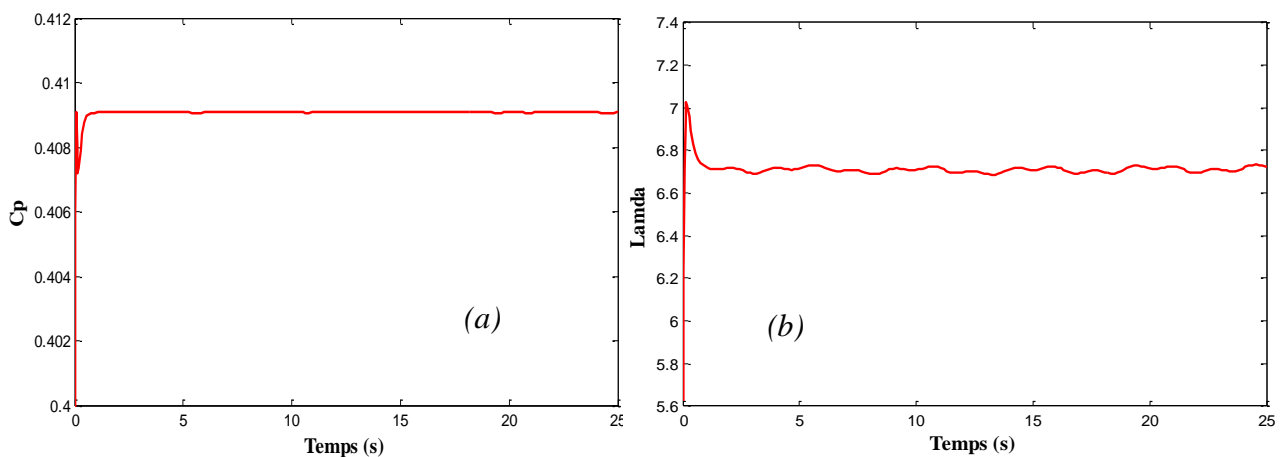


Figure (II.19) : a- Coefficient de puissance, b- la vitesse relative Lamda

Ainsi, la figure (II-20), nous montre que le couple électromagnétique de référence C_{emref} est légèrement inférieur au couple mécanique de la génératrice C_m , ce qui est dû aux pertes causées par les couples d'inertie et de frottement.

Le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice, nous permet de fixer la vitesse de rotation de cette dernière à une vitesse de référence w_{mref} , la génératrice sera donc ramenée à tourner à cette référence de vitesse. Du fait que le coefficient de puissance est bien ajusté à sa valeur optimale de 0.409, c'est cependant très significatif. En régime permanent, aucune différence n'apparaît entre les deux vitesses de rotation de la machine.

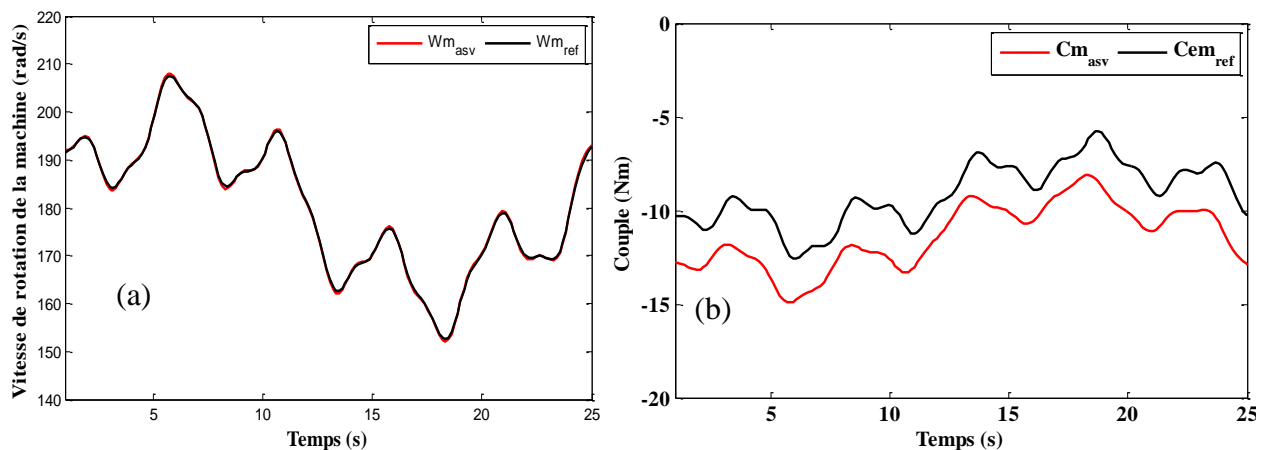


Figure (II.20) : a- Vitesse de rotation de la machine, b- Couple de la machine.

II.6. Comparaisons entre les deux méthodes :

Les résultats de simulation montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une turbine éolienne à trois pales identiques et une vitesse de rotation de 1500 tr/min et une puissance de 3kW.

Après avoir étudié les deux méthodes de contrôles dans les parties précédentes, on constate que les grandeurs étudiées dans la partie de contrôle sans asservissement varient selon la variation du profil de vent.

Contrairement à la méthode de contrôle avec asservissement de vitesse en utilisant un régulateur de forme PI (proportionnel intégral) qui compare la valeur initiale à sa valeur de référence, et qui fait en sorte d'éliminer toute erreur possible pour avoir un bon fonctionnement du système. Figure II-21

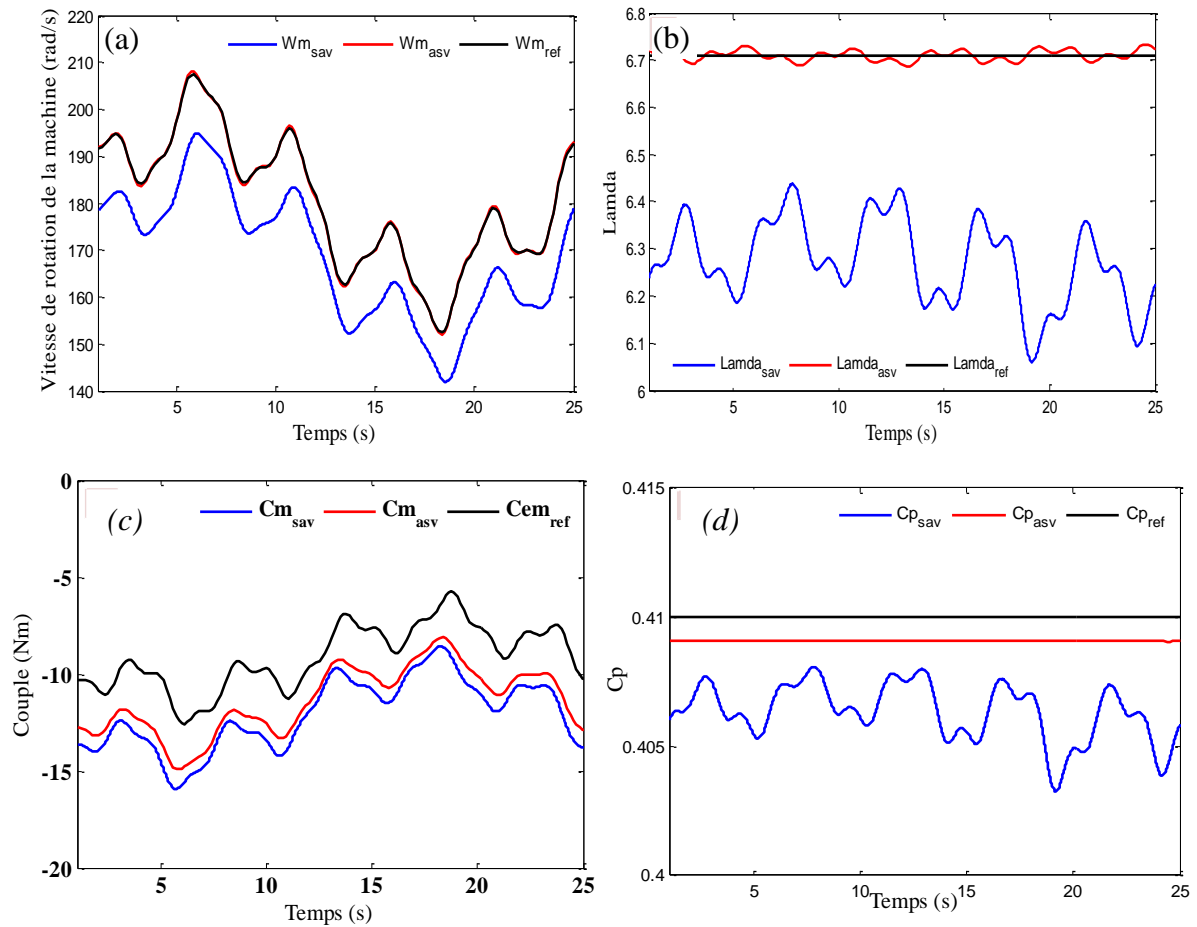


Figure (II.21) : Résultats de simulation turbine + génératrice sans et avec asservissement de vitesse, (a) : vitesse de rotation, (b) : vitesse relative Lamda, (c) Couple mécanique, (d) Coefficient de puissance de la turbine.

On constate que la méthode de contrôle avec asservissement en utilisant le régulateur aide le système à améliorer son rendement d'un rendement qui varie entre [0.10-0.20] à une valeur constante de 0.41 pour un meilleur fonctionnement

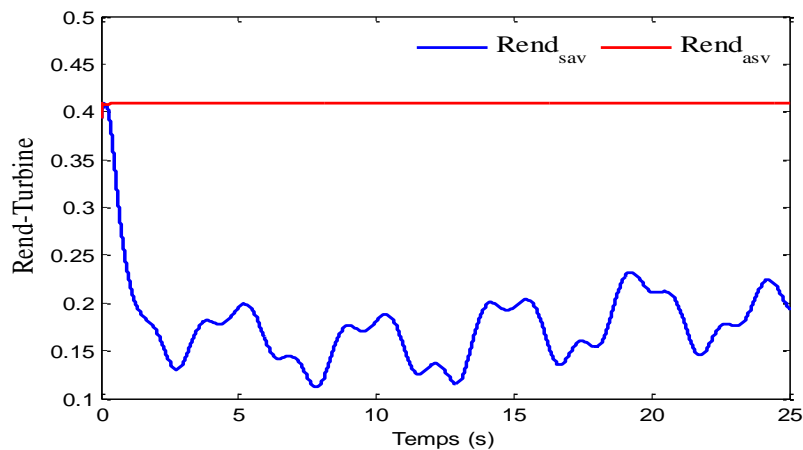


Figure (II.22) : Rendement de la turbine.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons en premier mis le vent sous un système d'équation en vue de produire des variations détaillées pour une modélisation de l'ensemble de la partie mécanique y compris le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec la génératrice ; suivit d'une illustration des différentes méthodes de contrôle de la turbine éolienne pour divers simulation afin de pourvoir commander au mieux l'éolienne et permettre ainsi un fonctionnement optimal de cette dernière.

En dernier, nous avons consacré cette partie à la simulation et la présentation des résultats de simulation effectuée sous Matlab/Simulink, ou nous avons conclu que la MPPT avec asservissement de vitesse de rotation est la méthode la plus fiable car elle nous permet de rapprocher au mieux la puissance de la turbine de sa référence et en extraire ainsi le maximum de puissance du vent.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la construction et la mise en œuvre de l'émulateur à base d'une machine à courant continu.

Chapitre III :

*Etude d'un émulateur à base
d'une MCC*

Notions utilisées dans le chapitre :

U_e, U_a : Tensions d'alimentation de l'inducteur et l'induit de la machine

I_e, I_a : Courants d'inducteur et d'induit de la MCC

R_e, R_a : Résistances d'inducteurs et d'induit de la MCC

L_e, L_a : Inductances propres de l'inducteur et l'induit de la MCC

L_m : Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur

Φ_e : Flux d'excitation de la MCC

Ω_t : Vitesse angulaire de rotation de la turbine

Ω_{mcc} : Vitesse angulaire de rotation de la MCC

Ω_{mccref} : Référence de la vitesse angulaire de la MCC

Ω_g : Vitesse angulaire de rotation de la MADA

G : Gain du multiplicateur

C_t : Couple mécanique de la turbine

C_{em} : Couple électromagnétique de la turbine

C_{emcc} : Couple moteur de la MCC

C_g : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA

C_{rmcc} : Couple résistant de la MCC

C_c : Couple de compensation

J_t, J_{mcc}, J_g : Inerties de la : Turbine, MCC, MADA

f_t, f_{mcc}, f_g : Frottements de la : Turbine, MCC, MADA

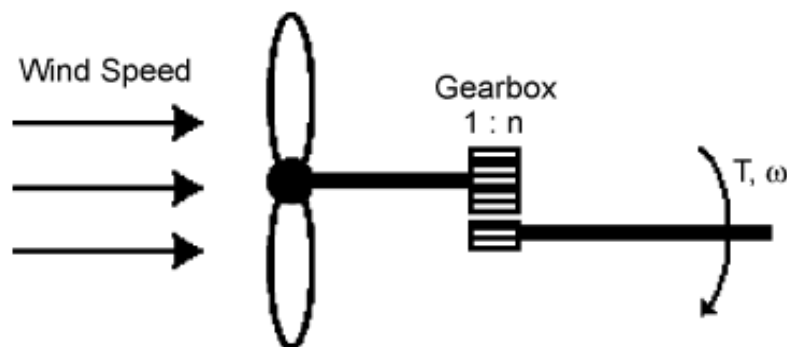
III.1. Introduction :

Le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs à mener les investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromagnétique et la qualité d'énergie fournie. Les études menées sur les systèmes éoliens dans les laboratoires n'utilisent pas directement les éoliennes mais plutôt les émulateurs vu leur souplesse et leur facilité de réglage. Ces derniers temps la structure la plus utilisée des émulateurs sont généralement celles des moteurs à courant continu. L'émulateur a pour but de reproduire les mêmes caractéristiques que celle de la turbine éolienne.

L'objet de ce chapitre est le développement d'un émulateur de la turbine éolienne étudié dans le chapitre précédent à base d'une machine à courant continu.

III.2. Construction de l'émulateur :

L'émulateur est basé sur le système de conversion d'énergie montré à la (figure III.1), comme il n'est pas possible d'utiliser une éolienne dans un laboratoire, les chercheurs remplacent le vent et la turbine éolienne par un PC afin d'émuler le comportement de la turbine éolienne par une machine à courant continu (figure III.2) [36]. Le couple généré par la turbine est appliqué en référence à la MCC accouplée à la génératrice. Le PC implémentant MATLAB/SIMULINK contient un programme qui contient le modèle de la turbine éolienne et sa commande en MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation ainsi que la commande en couple de la MCC. [32]



Figure(III.1) : système d'une turbine éolienne [32]

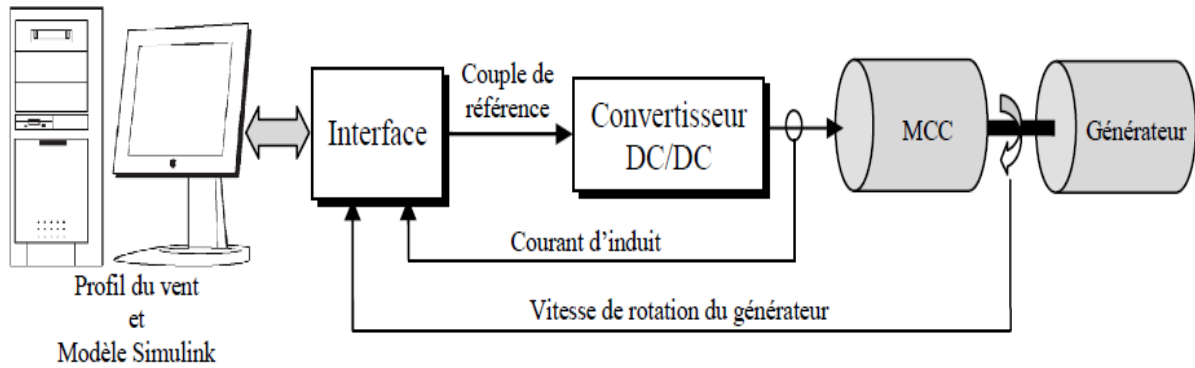


Figure III.2 : schéma du système d'un émulateur éolien à base d'une MCC [31]

III.3. Stratégie de commande de la MCC :

III.3.1. Modèle de la MCC :

Pour notre travail on utilise une MCC à excitation séparée représentée dans figure suivante:

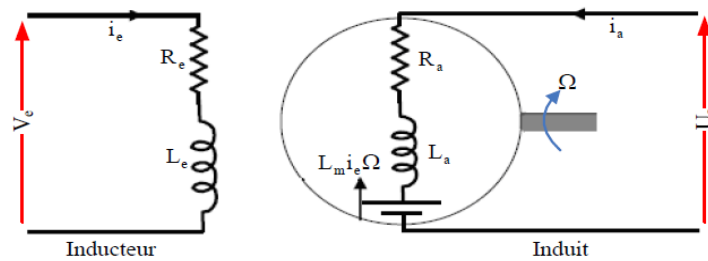


Figure III.3 : Modèle électrique de la MCC à excitation séparée [36]

La machine à courant continu peut être modélisée par ses équations électriques mécaniques et électromécaniques ;

L'équation de tension induite s'écrit comme suit (pour l'inducteur) :

$$U_e = R_e I_e + L_e \frac{dI_e}{dt} \quad (3.1)$$

Et pour l'induit :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + L_m I_e \Omega_{mcc} \quad (3.2)$$

Pour la machine à courant continu à excitation séparée, si le flux créé par le bobinage inducteur est constant, on a alors :

$$\phi_e = L_m \cdot I_e = K_e \quad (3.3)$$

Le couple électromagnétique de la MCC :

$$C_e = K_e I_e \quad (3.4)$$

Ainsi l'équation mécanique peut s'écrire comme suit :

$$(J_m + J_{mcc}) \frac{d\Omega}{dt} + (f_m + f_{mcc}) \Omega = C_e - C_r = K_e I_a - C_r \quad (3.5)$$

Dans le système réel, l'équation mécanique est donnée par :

$$\left(J_m + \frac{J_t}{G^2} \right) \frac{d\Omega}{dt} + \left(f_m + \frac{f_t}{G^2} \right) \Omega = C_m - C_r \quad (3.6)$$

Pour que le système réel et l'émulateur soient équivalents, il faut que le couple résistant qui apparaît dans les deux équations (3.6) et (3.7) soit le même et l'accélération des deux systèmes soient identiques et on aura :

$$K_e I_a - (J_m + J_{mcc}) \frac{d\Omega}{dt} - (f_m + f_{mcc}) \Omega = C_m - \left(J_m + \frac{J_t}{G^2} \right) \frac{d\Omega}{dt} - \left(f_m + \frac{f_t}{G^2} \right) \Omega \quad (3.7)$$

En égalisant l'accélération des deux systèmes on aura : figure III.4

$$C_{e_mcc_ref} = K_e I_{a_ref} = C_m + \left(J_{mcc} - \frac{J_t}{G^2} \right) \frac{d\Omega}{dt} + \left(f_{mcc} - \frac{f_t}{G^2} \right) \Omega \quad (3.8)$$

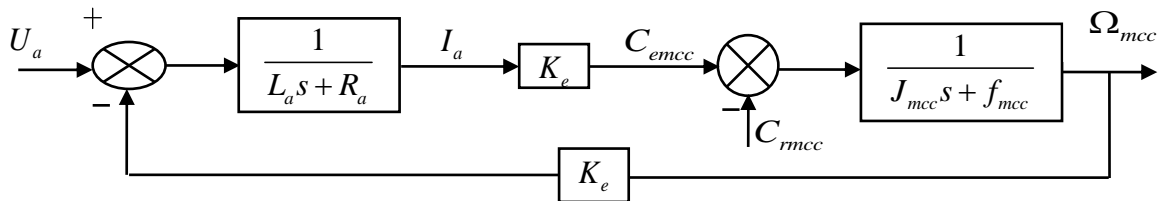


Figure III.4 : modèle équivalent de la machine à courant continu à excitation séparée

III.3.2. commande de la MCC :

La machine à courant continu doit être considérée comme un générateur de couple comme tous les moteurs électriques [33] Ce couple est alors transmis à la génératrice qui peut entrer en rotation. La vitesse de l'ensemble moteur-génératrice n'est pas imposée par le

moteur lui-même, mais plutôt par la caractéristique couple/vitesse de l'ensemble moteur-génératrice.

Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni par le moteur à la génératrice. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-génératrice, il faut augmenter le couple fourni par le moteur qui devient alors supérieur au couple de la génératrice. Il apparaît un couple d'accélération, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de la turbine [34]

Pour pouvoir modéliser la MCC, sa commande peut être décomposée en deux types : une commande en couple et l'autre en vitesse. Figure III.5

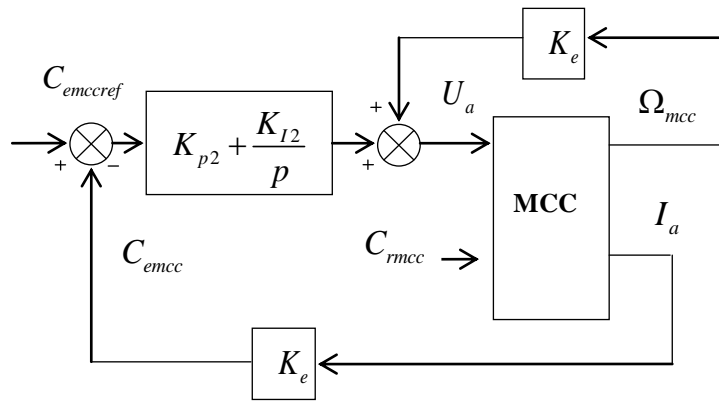


Figure (III.5) : Commande en couple et en vitesse de la MCC à excitation séparée

Lors de la mise en œuvre de l'émulateur de la turbine éolienne, on prend seulement la commande en couple de la machine à courant continu en évidence.

III.4. Structure de la commande PI :

Afin d'imiter le système réel le couple de référence doit s'établir aussi rapidement que possible, pour cela faut joindre une boucle de régulation à base d'un PI qui calcul à tout instant la tension U_a qui est appliquée à l'induit du moteur ce qui garantit le couple de référence calculé.

En général la structure d'un régulateur proportionnelle intégral noté PI est composé de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale dont la fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = K_{p1} + \frac{K_{p2}}{P} = \frac{K_{p1}P + K_{p2}}{P} \quad (3.9)$$

Lors de l'utilisation du correcteur PI, l'avantage principal de ce dernier c'est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale. Ainsi il calcule la commande $u(t)$ à injecter au système en intégrant la grandeur d'erreur $\varepsilon(t)$; le système de commande augmente tant que le signal d'erreur est non nul et la commande $u(t)$ ne cesse de croître tant que l'erreur entre la sortie $y(t)$ et la référence $y_{\text{ref}}(t)$ n'est pas nulle. Figure III.6

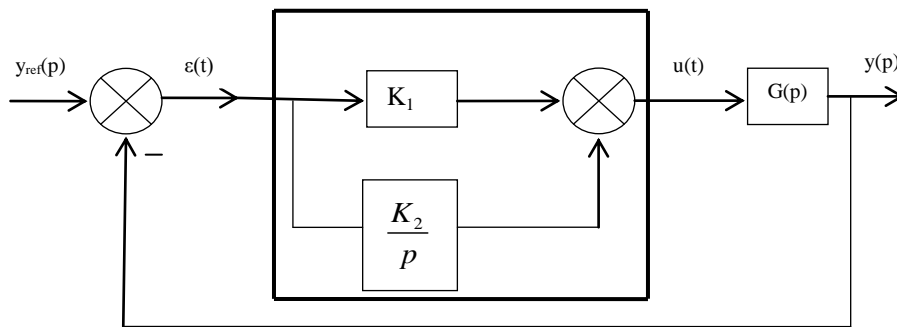


Figure (III.6) : structure générale d'un régulateur PI

Sa fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$G_{bf}(p) = \frac{K_1 \left(P + \frac{K_2}{K_1} \right) G(p)}{1 + K_1 \left(P + \frac{K_2}{K_1} \right) G(p)} \quad (3.10)$$

On constate que le régulateur PI ajoute un zéro à la fonction de transfert en boucle fermée. Celui-ci peut éventuellement être utilisé pour compenser un pôle de la fonction de transfert du système à commander, simplifiant ainsi l'ordre de la fonction de transfert en boucle fermée. La méthode la plus utilisée est la méthode de compensation de pôles [35]

Cette méthode consiste en premier lieu à utiliser le zéro du régulateur pour compenser un pôle du système à commander ; elle permet ainsi de simplifier l'ordre de la fonction de transfert en boucle ouverte. Cette compensation donne la première équation permettant de calculer les deux paramètres K_i et K_p .

En deuxième lieu on calcule la fonction de transfert en boucle fermée et on détermine la seconde équation qui permet de calculer le deuxième coefficient du régulateur.

III.5. Calcul des régulateurs :

L'équation différentielle qui régit le couple électromagnétique de la MCC est la suivante :

$$U_a - E = \frac{R_a}{K_e} C_e + \frac{L_a}{K_e} \frac{dC_e}{dt} \quad (3.11)$$

Le terme $E = K_e \Omega$ va être compensé dans la partie commande dans le but d'éliminer l'influence de la FEM ; ce qui permet d'écrire une fonction de transfert sans tenir compte de cette dernière. En introduisant la variable $U'_a = U_a - E$ on aura :

$$\frac{C_e(s)}{U'_a(s)} = \frac{b_0}{\tau_a s + 1} \Rightarrow b_0 = \frac{K_e}{R_a}; \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.12)$$

En utilisant un régulateur PI dont la fonction de transfert :

$$R(s) = K_{pmcc} + \frac{K_{imcc}}{s} \quad (3.13)$$

On aboutit au diagramme vectoriel suivant : Figure III.7

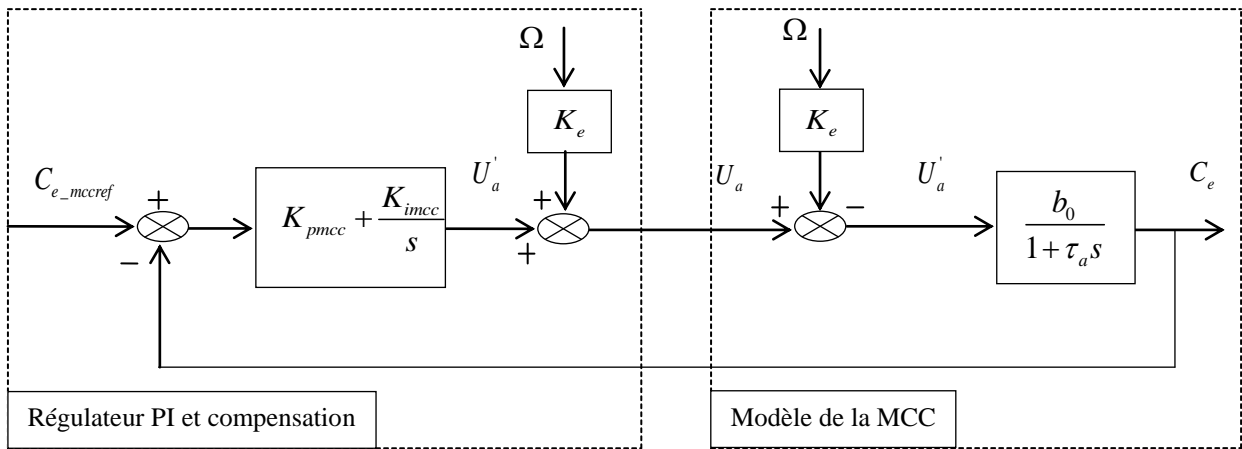


Figure (III.7) : boucle de régulation du couple de l'émulateur

La fonction de transfert obtenue de ce système s'écrit comme suit :

$$\frac{C_e(s)}{C_{e_mccref}} = \frac{b_0 K_{imcc} \left(\frac{K_{pmcc}}{K_{imcc}} s + 1 \right)}{\frac{\tau_a}{K_{imcc}} s^2 + \frac{(1 + b_0 K_{pmcc})}{K_{imcc}} s + 1} = \frac{b_0 K_{imcc} (b_1 s + 1)}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1} \quad (3.14)$$

En choisissant un amortissement $\zeta = 1$ et un temps de réponse $t_r = 10ms$ on aura :

$$\omega_n = 480 \text{rd} / \text{s}$$

$$K_{imcc} = 23040$$

$$K_{pmcc} = 71.4$$

III.6. Commande en couple de la MCC :

On applique le modèle du vent à une turbine éolienne de 3kW ainsi on contrôle la MCC en couple en utilisant des régulateurs PI. On affecte une commande en couple à la machine à courant continu afin de ramener son couple à sa référence à partir des équations du mouvement qui régissent le système étudié.

L'émulateur est testé avec un modèle de MCC couplée comme la turbine éolienne à une MADA dans le but de reproduire les mêmes caractéristiques statiques et dynamiques que celles de la turbine éolienne réelle.

Les régulateurs utilisés pour la commande du système seront du type proportionnel intégral (PI) pour sa simplicité et afin de réduire l'erreur statique.

Le régulateur comprendra deux structures en cascade : une boucle interne régulant le couple de la machine et une boucle externe contrôlant la vitesse de rotation de la machine ; la boucle interne sera plus rapide que la boucle externe afin d'avoir une bonne régulation.

III.7. Simulation de l'émulateur :

Afin de pouvoir simuler l'émulateur, nous avons utilisé la commande MPPT avec asservissement de vitesse utilisé dans la turbine réelle. La simplicité du système à commander nous a amené à choisir un correcteur PI, le modèle d'état est représenté dans la figure (III.4).

Une fois que la commande de la MCC établie, on ajoute la turbine précédemment étudiée en ajoutant une commande en couple par le biais d'un régulateur PI. Cet ensemble permet d'émuler la partie mécanique de l'aérogénérateur ; le schéma bloc de l'ensemble est représenté à la figure III.5 :

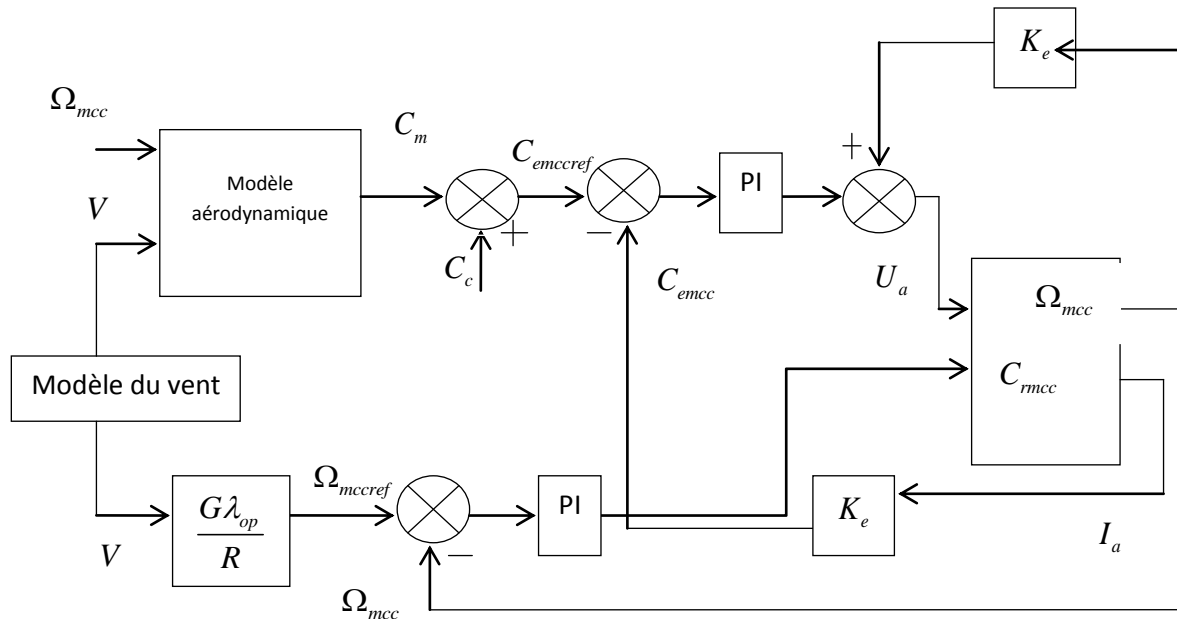


Figure (III.8) : schéma bloc de l'émulateur

III.8. Résultats de simulation et interprétation :

Après avoir mis en œuvre l'émulateur de la turbine éolienne on peut dire que la MCC a été bien commandée en couple, d'où le couple électromagnétique de la machine est tout le temps égal au couple de référence.

Le couple électromagnétique C_{emcc} de la MCC est l'image du courant d'induit, d'après la figure III.9 (a), obtenue après, la simulation on voit que ce couple est égale à sa référence $C_{emccref}$ obtenues par l'équation mécanique des deux systèmes TURBINE/GENERATRICE et MCC/GENERATRICE. Ces couples sont les mêmes en ajoutant le couple de compensation.

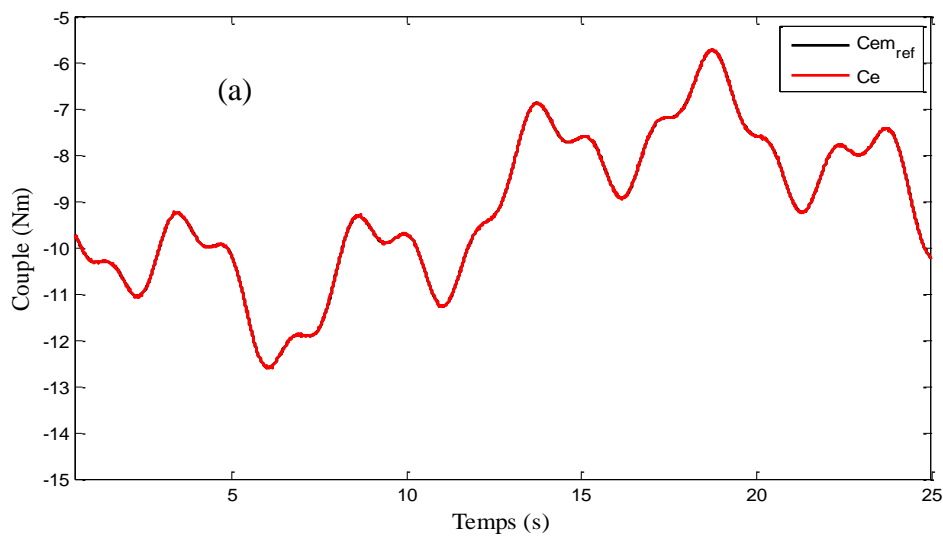


Figure (III.9) : couples en fonction du temps

Quant à la vitesse de rotation du système (émulateur) et sa référence sont à tout instant plus proches, voir la figure III.9 (b).

La vitesse de rotation du système est en corrélation avec la vitesse du vent, mais elle dépasse la valeur nominale du système (1500tr/min). Pour cela, on doit diminuer la valeur moyenne de la vitesse du vent de 5m/s à 4m/s.

En comparant les deux figures, on peut dire que la MCC a bien émulé les caractéristiques de la turbine (couple/vitesse)

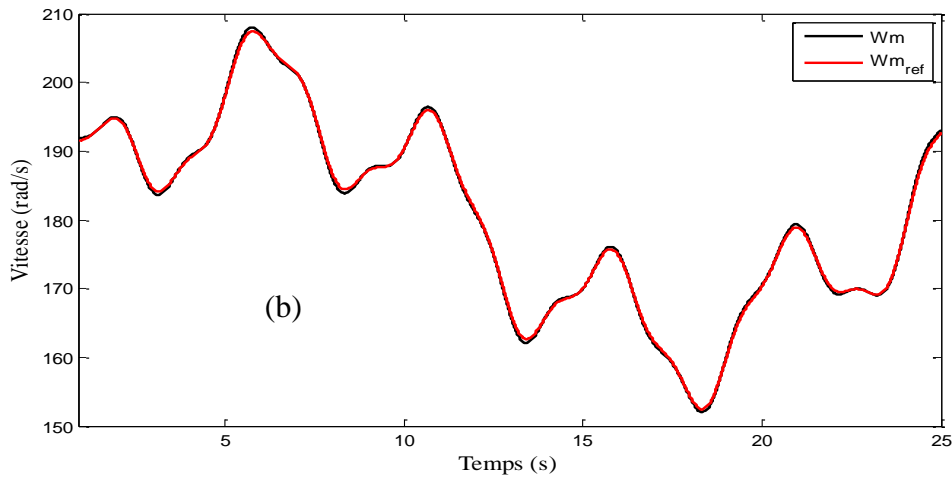


Figure III.9) : vitesses de rotation en fonction du temps

D'après la figure III.10, on voit que le coefficient de puissance C_p et la vitesse relative λ restent à leurs valeurs optimale d'où une bonne récupération de la puissance du vent.

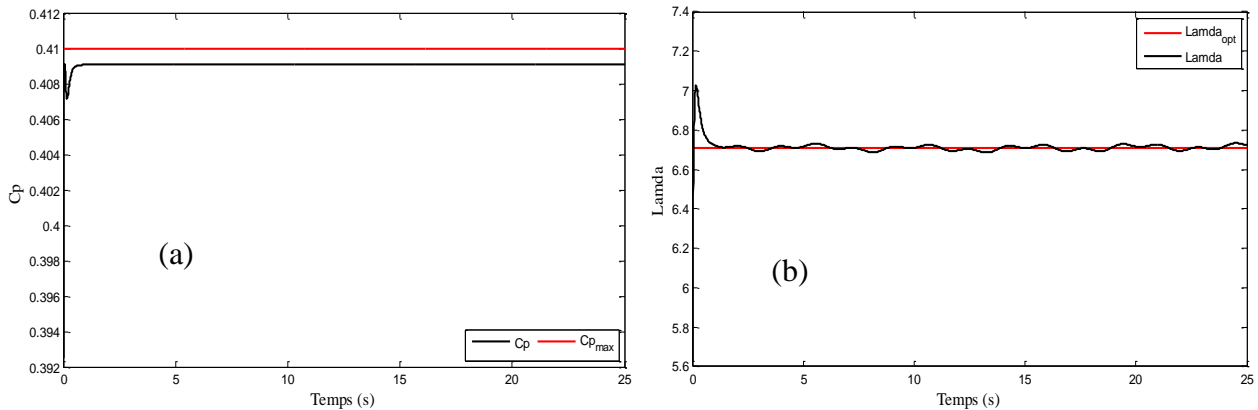


Figure III.10) : (a) : Coefficient de la puissance, (b): Vitesse relative

III.9. Comparaison entre les deux systèmes étudiés :

Notre essai de simulation a été effectué en utilisant un profil du vent aléatoire ayant une valeur moyenne de 4m/s. d'après les figures III.9 (a) (b) III.10 (a) (b) on peut dire que les résultats de simulation du système MCC/GENERATRICE coïncident (les mêmes) avec ceux du système réel (turbine/GENERATRICE).

En comparant les deux systèmes on remarque une très faible erreur d'où le bon fonctionnement de l'émulateur réalisé. La vitesse de rotation de la génératrice et son couple électromagnétique sont identiques pour les deux systèmes ; on peut dire ainsi que la MCC reflète exactement le même fonctionnement de la turbine éolienne. La MCC a été bien commandée en couple où son couple électromagnétique est tout le temps égal au couple de référence imposé ; on peut dire qu'avec l'émulateur, le coefficient de puissance et la vitesse relative sont parfaitement commandés C_p à son maximum et λ à son optimum

III.10. Conclusion :

Notre chapitre a été consacré à l'étude d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu commandée en couple dans le but de reproduire le couple mécanique de la turbine appliqué sur la génératrice.

En premier lieu on a donné une présentation générale de l'émulateur ainsi que les deux systèmes turbine/génératrice et MCC/génératrice. Deuxièmement, on a étudié la machine à courant continu à excitation séparée avec une mise en équation présentant les différentes stratégies de commande ; puis on a mis en œuvre l'émulateur sous l'outil MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de simulation obtenus de l'émulateur nous a permis de montrer son efficacité de reproduire fidèlement le comportement de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

Conclusion générale

Dans le cadre de réalisation de notre projet de fin d'étude, nous avons choisi de travailler sur l'émulation d'une turbine éolienne à base d'une machine à courant continu MCC. Pour cela nous avons choisi comme objectif la commande et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine éolienne de 3KW associée à une génératrice. Afin d'atteindre notre objectif nous avons organisé notre travail selon trois chapitres.

Le premier chapitre a été consacré au traitement de l'état de l'art des systèmes éoliens en tenant compte de l'état actuel de l'exploitation de ce créneau énergétique. Puis nous avons cité les types d'éoliennes avec leurs différentes structures existantes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. Nous avons aussi traité les notions fondamentales permettant la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. On a, ensuite, effectué un comparatif entre les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable, ce qui nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Et aussi, on a cité les différentes topologies utilisées dans ce domaine. Il était indispensable de citer les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, d'où nous avons pu mettre en évidence l'intérêt de cette énergie. Ainsi on a parlé de la connexion des fermes éolienne au réseau dans l'intérêt de voir l'interaction entre gestionnaire du réseau et le producteur de l'énergie électrique de type éolienne.

Dans le deuxième chapitre nous avons d'abord modélisé le vent qui est la source primaire de l'énergie. Nous avons, ensuite, modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude afin d'obtenir un modèle précis de la caractéristique de puissance ; la simulation du système a été effectuée sous le logiciel MATLAB-SIMULINK à travers plusieurs essais. Par la suite, nous avons utilisé deux méthodes de commande de la turbine fonctionnant à vitesse variable qui permet d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent. Une comparaison a été effectuée entre les deux méthodes d'où on a vu que la commande MPPT avec asservissement de vitesse de rotation est plus performante par rapport la commande sans asservissement de vitesse de rotation.

Le dernier chapitre montre les étapes de réalisation d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu où on a mis en évidence le contrôle de la turbine avec asservissement de vitesse pour pouvoir simuler l'émulateur. On a appliqué un profil de vent à la turbine éolienne étudiée en chapitre 2 dont le couple obtenu est appliqué en référence à une machine à courant continu à excitation séparée ; cette dernière est contrôlée en

couple en utilisant des régulateurs PI. A l'aide de l'outil SIMULINK de MATLAB, le modèle de la MCC est couplé comme la turbine à une génératrice. Après avoir simulé l'ensemble et en comparant les résultats, on voit que l'émulateur a reproduit les mêmes caractéristiques de la turbine éolienne d'où l'objet de cette étude.

Afin de s'approcher plus du système réel, nous proposerons quelques perspectives qui feront l'objet des études à venir

- Modélisation et simulation du système global (Turbine + MADA + convertisseurs)
- Test de cette commande sur un banc d'essai réel

Références Bibliographiques :

- [1] M. DAHMANI, H. YAKOUBI « commande d'un système de production de l'énergie éolienne », mémoire de Master, UMMTO, 2016
- [2] M. BOUARAKI. « Etude d'un entraînement à double alimentation pour une turbine éolienne à vitesse variable : application sur site à TINDOUF », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2012.
- [3] T. GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au régle des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, l'Ecole de LIILE et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011
- [4] F.POTIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [5] J. Martin, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21
- [6] B. KELKOUL « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de Magister API, TLEMCEN, 2011
- [7] O. BOUHALI « contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement de la production de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, école centrale de LILLE, 2007
- [8] S. METATLA « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA »Magister, 2009, Ecole nationale supérieur polytechnique, Alger
- [9] M. SMAILI « modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération » Thèse de Doctorat Université de Québec, Aout 2013.
- [10] Z. LEMMOUCHIA, « commande robuste de la machine asynchrone doublement alimentée MADA avec et sans capteur de vitesse » Magister, 2013, Université de EL OUED
- [11] M. ADJOUJJA, M. ABIDA, A. AISSAOUIA, Y. RAMDANIA, H. BOUNOUA « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne »Département d'électrotechnique, Université DJILLALI ABBES BP 89 SIDI BEL ABBES.
- [12] A. TENINGE « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : applications en milieu insulaire » thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2009
- [13] Y. DJERRIRI « commande directe du couple et des puissances d'une MADA associé à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle » Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-bel-abbes, 2015
- [14] E. CHEKHET, I. SHAPOVAL, V. MIKHALSKY and V. SOBOLEV, « Control of the stand-alone doubly fed induction generator supplied by the matrix converter »; Proc of the International Workshop on Renewable Energy Based Units and Systems REBUS'06, pp.35-40, St. Petersburg, Russia, June 2006.

- [15] M. SI BRAHIM « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2015.
- [16] G. Andersson « Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance », *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, n°4, pp. 1922-1928, November 2005.
- [17] S.M. Muyeen « A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements », *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 25, n°1, pp. 331340, February 2010.
- [18] TELLI Abderrahim « étude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégré au réseau MT » Mémoire de Magister, université d'ORAN MOHAMED BOUDIAF USTOMB, 2012
- [19] R .BAÏLE «Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.» Thèse de Doctorat, université de Corse le 18 Octobre 2010.
- [20] K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2008.
- [21] B. ROBYNS, A. DAVIGNY, C. SAUDEMONT, A. ANSEL, V. COURTECUISSÉ B.FRANÇOIS, S. PLUMEL, J. DEUSE, «Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *j3eA-Vol.5 – Série 1(2006)*.
- [22] S. MULLER, M. DEICKE, R. W.DEDONCKER, "Doubly-Fed Induction Generators systems for Wind Turbines", *IEEE Industry Applications Magazine*, May-June 2000.
- [23] VICENT COURTECUISSÉ, « Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat l'Ecole Nationale Supérieure d'arts et métiers, 2008.
- [24] B.BELTRAN, « contribution à la commande robuste des éoliennes à base de la GADA : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale, juillet 2010
- [25] S.EL AIMANI « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de doctorat, 2004, Ecole central de LIILE.
- [26] M.MALKI, S. BELARBI « Etude et simulation d'un aérogénérateur connecter au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret » Université Aboubeker Belkaid Tlemcen, Master en électrotechnique, 2014
- [27] N.LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [28] A.HEDDIR « étude et dimensionnement d'émulateurs d'une turbine éolienne » Mémoire de master en électrotechnique, UMMTO, 2012

- [29] L. HEMOUZAL, M.MEDIOUNI, M.KOURCHI. «Stratégies de commande d'une turbine éolienne en vue de l'extraction de sa puissance maximale ». Laboratoire de l'Energie et de l'Environnement, ENSA, Agadir
- [30] K. MESBAH « Etude du générateur asynchrone et coordination des puissances dans une ferme éolienne connectée au réseau » thèse doctorat, UMMTO, 2016
- [31] A.BECHOUCHE « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : Application à une éolienne » Thèse doctorat, UMMTO, 2013.
- [32] M. MONFARED, H. M. KOJABADI, H. RASTEGAR, « Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor » Renewable Energy Vol: 33,.PP 906-913. (2008)
- [33] T.WILDI, C.SYBILLR, Electrotechnique, Edition de Boeck, 4^{ème} édition, 2005
- [34] A.FOUILLE, Machine continues, électronique de puissance, Edition DUNOD, 4^{ème} édition Paris, 1980.
- [35] S.ABDOULAYE MAMADIE « modélisation d'un émulateur éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire, université de QUEBEC, 2013
- [36] H.BOUKHAMKHAM « Diagnostique des défaillances dans une machine asynchrone utilisé dans une chaîne éolienne » Magister en électrotechnique, université de Biskra, 2011